

DOI: [https://doi.org/10.25140/2411-5363-2026-2\(44\)-116-130](https://doi.org/10.25140/2411-5363-2026-2(44)-116-130)

УДК 621.9:681.5:004.94

**Сергій Петрович Сапон¹, Володимир Костянтинівич Фролов²,
Василь Петрович Приходько³, Олеся Олександрівна Драчук⁴**

¹кандидат технічних наук, доцент, доцент кафедри технології машинобудування
Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського» (Київ, Україна)
E-mail: s.sapon@gmail.com. ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-1082-6431>. ResearcherID: [G-7764-2014](https://orcid.org/0000-0003-1082-6431)

²кандидат технічних наук, доцент, доцент кафедри технології машинобудування
Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського» (Київ, Україна)
E-mail: v.k.frolov@gmail.com. ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-3697-286X>. ResearcherID: [ACH-0071-2022](https://orcid.org/0000-0002-3697-286X)

³кандидат технічних наук, доцент, доцент кафедри технології машинобудування
Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського» (Київ, Україна)
E-mail: privas0718@gmail.com. ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-1852-3777>. Researcher ID: [HDM-7277-2022](https://orcid.org/0000-0003-1852-3777)

⁴асистент кафедри автоматизації та систем неруйнівного контролю
Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського» (Київ, Україна)
E-mail: o.drachuk@kpi.ua. ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-2541-0316>. ResearcherID: [ABT-2392-2022](https://orcid.org/0000-0003-2541-0316)

ІНСТРУМЕНТАРІЙ ДЛЯ СТВОРЕННЯ ЦИФРОВИХ ДВІЙНИКІВ МЕТАЛООБРОБНИХ ВЕРСТАТІВ

У статті проведено комплексний аналіз сучасного інструментарію створення цифрових двійників металообробних верстатів у контексті розвитку кіберфізичних виробничих систем та концепції Smart Manufacturing. Розглянуто еволюцію підходів до моделювання – від фізично-орієнтованих і дані-орієнтованих до гібридних методів, що поєднують переваги обох парадигм. Систематизовано архітектури цифрових двійників відповідно до стандарту ISO 23247, визначено ключові етапи їх створення, включаючи інтеграцію датчиків, обробку даних, побудову моделей та синхронізацію з фізичним об'єктом. Проаналізовано роль IoT, Edge/Cloud-обчислень і промислових протоколів (OPC UA, MTConnect) у забезпеченні інтероперабельності різноманітного обладнання. Обґрунтовано перспективність когнітивних цифрових двійників та їх вплив на підвищення ефективності, надійності й адаптивності технологічного обладнання.

Ключові слова: цифровий двійник; металообробні верстати; кіберфізичні системи; Smart Manufacturing.

Рис.: 1. Бібл.: 37.

Актуальність теми дослідження. Фундаментальною основою трансформації сучасного машинобудівного виробництва є розвиток кіберфізичних виробничих систем (Cyber-Physical Production Systems, CPPS), які забезпечують глибоку безперервну конвергенцію обчислювальних ресурсів, мережевих технологій та фізичних процесів [1; 2]. У цьому високотехнологічному середовищі металообробні верстати з числовим програмним керуванням (ЧПК), роботизовані комплекси та гнучкі виробничі модулі виконують роль базових засобів виробництва, від продуктивності, точності, енергоощадності та надійності яких безпосередньо залежить ефективність виробничої системи в цілому.

Постановка проблеми. Незважаючи на високий рівень автоматизації, більшість сучасного технологічного обладнання, в тому числі металообробних верстатів, залишаються інформаційно ізольованими системами. Вони функціонують переважно за принципом виконання жорстко запрограмованих детермінованих інструкцій, відомих як G-коди. Ці керуючі програми генеруються на етапі технологічної підготовки й абсолютно не мають здатності до глибокої динамічної самодіагностики, адаптації до стохастичних збурень у зоні різання та горизонтальної взаємодії з іншими елементами цеху як виробничої системи [1]. Відсутність зворотного зв'язку високого рівня призводить до виникнення критичного, нездоланного розриву між етапом ідеалізованого віртуального технологічного планування у комплексах CAD/CAM/CAE-систем та фактичним виконанням технологічних операцій у реальних умовах з технологічними інцидентами, колізіями та численними невизначеностями.

Наслідками такого розриву є обробка на занижених, субоптимальних режимах різання, які технологи вимушені призначати із надмірним запасом надійності. Крім того, це спричиняє виникнення непередбачуваних та некомпенсованих температурних дефор-

мацій базових деталей верстата, передчасне, непрогнозоване зношування різального інструмента, генерацію руйнівних автоколивань (chatter) та, як наслідок, зниження загальної ефективності обладнання [1; 4].

Концепцією цифрового двійника (Digital Twin, DT) передбачено комплексне та системне вирішення зазначеної проблеми. Цифровий двійник (ЦД) технологічного обладнання являє собою не просто статичну тривимірну модель, а високоточну, мультифізичну, мультимасштабну, інтегровану з даними віртуальну копію, яка безперервно синхронізується з фізичним об'єктом у режимі реального часу [4-7]. Саме впровадження ЦД відкрило шлях до створення технологічного обладнання нового покоління – кіберфізичних верстатів (Cyber-Physical Machine Tools, CPMT) [1, 2]. У контексті Smart Manufacturing створення ЦД технологічного обладнання забезпечує перехід від реактивної до проактивної моделі управління, де будь-які критичні ситуації, інциденти, збої або відхилення функціональних параметрів виявляються та коригуються у віртуальному середовищі ще до їх виникнення на реальному обладнанні [5, 6]. Відповідно, аналіз та систематизація підходів, методик та інструментальних засобів для створення ЦД технологічного обладнання дозволяє виявити найефективніші методики, алгоритми, протоколи, інструментальні платформи, системи моделювання та проектування для створення структурованої, уніфікованої методології, яка забезпечить високу якість, надійність, відтворюваність, масштабованість та зниження витрат при створенні ЦД металообробних верстатів та інших подібних технологічних систем.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Еволюція наукових поглядів на концепцію цифрових двійників демонструє стрімкий перехід від теоретичних концептів до затверджених промислових стандартів. Вперше концепція віртуального еквівалента фізичного об'єкта була описана М. Гривзом у 2003 році як «інформаційна дзеркальна модель» (Information mirroring model) для управління життєвим циклом продукту (Product Lifecycle Management, PLM) [8; 9]. Потужний розвиток ця технологія отримала у 2012 році, коли космічна агенція NASA інтегрувала ЦД у дорожню карту розвитку технологій моделювання для прогнозування стану аерокосмічних апаратів [4]. За останнє десятиліття спостерігається експонентне зростання кількості прикладних досліджень, присвячених розробці ЦД машинобудівних процесів та технологічного обладнання.

Аналіз масиву наукових публікацій дозволяє виділити окремі ключові роботи, які сформувавши фундаментальний та прикладний базис для створення цифрових двійників технологічного обладнання. Зокрема, в роботах [1; 2] Liu, Chao зі співавторами розробили методологію переходу від класичних верстатів з ЧПК до кіберфізичних верстатів. Запропоновано концепцію Machine Tool Cyber Twin (MTCT). F. Тао, M. Zhang в роботах [10; 11] представили багаторівневу архітектуру ЦД на рівні виробничої ділянки на основі п'ятивимірної моделі, орієнтованої на конвергенцію великих даних. У монографії [12] представлено результати досліджень проєкту Twin-Control у галузі верстатобудування. Розроблено імітаційні моделі динамічних характеристик, процесів оброблення, енергоефективності тощо для створення ЦД верстата у вигляді кіберфізичної системи.

У роботах [13; 14] автори запропонували цілісну концепцію ЦД для верстата з ЧПК: багатодоменну описову модель, модель відображення даних між фізичним і цифровим об'єктами та алгоритмічну модель для інтелектуального аналізу. Як приклад вони реалізували цифровий двійник для фрезерного верстата з ЧПК у MWorks/Modelica для прогнозування залишкового ресурсу та ймовірності відмови кульково-гвинтових передач.

Автори статті [15] запропонували алгоритми ідентифікації параметрів динамічної жорсткості верстата за допомогою ЦД. G. Shao зі співавторами [16] виконали детальний аналіз впровадження стандарту ISO 23247 (Digital Twin Framework for Manufacturing) [17; 18], в якому формалізовано чотири рівні архітектури ЦД та методологію обміну даними.

Аналіз публікацій свідчить про зміщення наукового фокусу від створення суто ізольованих імітаційних моделей (White-box) до розробки комплексних гібридних систем (Grey-box), які постійно оновлюються в режимі реального часу за допомогою алгоритмів штучного інтелекту та стандартизованих IoT-інтерфейсів. Відбувається активний процес стандартизації підходів, що підтверджується прийняттям серії стандартів ISO 23247, спрямованих на подолання проблеми несумісності різноманітного обладнання на сучасному виробництві.

Метою цього аналітичного дослідження є виявлення, комплексний аналіз та систематизація сучасних підходів, архітектур, методик, апаратних та програмних засобів для створення цифрових двійників технологічного обладнання в умовах концепції Smart Manufacturing.

Виклад основного матеріалу. У сучасній науковій літературі [19-21] та нормативних документах (зокрема, в стандарті ISO 23247 [17]) поняття цифровий двійник трактується як віртуальне представлення фізичного об'єкта (системи), яке складається з самого фізичного об'єкта (системи), його цифрової моделі та двосторонніх інформаційних зв'язків між ними, які забезпечують їхню безперервну взаємодію в режимі реального часу.

У статті [22] поняття цифрового двійника виробу (системи) сформульовано як віртуальне представлення фізичного об'єкта (системи), яке складається із самого фізичного об'єкта (системи), його цифрової моделі та двосторонніх інформаційних зв'язків між фізичним об'єктом і цифровою моделлю об'єкта і (або) його складових частин, і використовується для моделювання, аналізу, оптимізації стану та поведінки фізичного об'єкта (системи) в реальних умовах функціонування, у режимі реального часу протягом всього життєвого циклу виробу (системи).

Наразі часто виникає некоректне застосування, плутанина та змішування термінів «цифровий двійник», «цифрова модель». Принципова різниця між суміжними поняттями цифрового представлення полягає у рівні автоматизації оброблення та інтеграції даних і в напрямку інформаційних потоків між фізичним об'єктом та його цифровою моделлю. Ці відмінності на основі робіт [5, 6, 7, 19-21] систематизовано в табл. 1.

Таблиця 1 – До визначення понять цифрового представлення фізичних об'єктів

Поняття	Потік даних між об'єктами (фізичний → цифровий)	Потік даних між об'єктами (цифровий → фізичний)	Характеристика та приклади застосування
Цифрова модель (Digital Model)	Ручний (Manual)	Ручний (Manual)	Віртуальне представлення об'єкта без автоматичного зв'язку з ним. Будь-які зміни у фізичному об'єкті інженер вносить в модель вручну. Приклад: статична 3D CAD-модель верстата.
Цифрова тінь (Digital Shadow)	Автоматичний (Automatic)	Ручний (Manual)	Односторонній потік даних. Модель автоматично змінює свій стан синхронно з фізичним об'єктом, але не може впливати на нього. Приклад: SCADA-система, інформаційна панель моніторингу температури шпинделя.
Цифровий двійник (Digital Twin)	Автоматичний (Automatic)	Автоматичний (Automatic)	Двосторонній зв'язок. Модель отримує дані, аналізує їх, формує керуючі команди і автоматично впливає на фізичний процес. Приклад: адаптивне коригування подачі верстата для уникнення вібрацій.

Джерело: розроблено авторами.

Еволюція впровадження цифрового двійника в інфраструктуру виробництва може бути оцінена за допомогою моделей зрілості (Maturity Models) [23-25]. Відповідно до стандартів серії ISO/IEC 30186 [23], ISO 22549-2 [25] та методології MESA MOM виділяють п'ять основних рівнів зрілості ЦД технологічного обладнання (рис. 1):

Рівень 1 (Identified / Initial)	• Статична ідентифікація. Наявність лише цифрової моделі (кресленики, специфікації) без підключення до потоків даних.
Рівень 2 (Measured / Data Collection)	• Рівень цифрової тіні. Забезпечується збір даних у реальному часі, що дозволяє спостерігати за станом обладнання, але без поглибленого автоматизованого аналізу.
Рівень 3 (Analysed / Context-Aware)	• Рівень глибокої аналітики. Система здатна інтегрувати дані з різних джерел, здійснювати їх злиття (Data Fusion) та виявляти аномалії в роботі технологічного обладнання за допомогою математичних алгоритмів.
Рівень 4 (Optimized / Predictive)	• Рівень предиктивної оптимізації. ЦД використовує минулі та поточні дані для запуску імітаційних моделей типу (what-if). Система прогнозує зношування інструменту або теплові деформації та пропонує оператору оптимізовані рішення.
Рівень 5 (Autonomous / Cognitive)	• Рівень повної автономії. Цифровий двійник (Cognitive Digital Twin) самостійно ідентифікує оптимальні сценарії розвитку подій і без втручання людини передає керуючі директиви на ЧПК для безперервного покращення продуктивності та якості.

Рис. 1 – П'ять основних рівнів зрілості цифрових двійників технологічного обладнання
Джерело: розроблено авторами на основі стандарту [23].

Розробка основи, ядра ЦД вимагає обрання відповідної методології моделювання, яка здатна з потрібною точністю описувати поведінку технологічного обладнання як складної мехатронної системи. Сучасні підходи та методики створення ЦД класифікують на п'ять основних парадигм:

- фізично-орієнтоване моделювання;
- дані-орієнтовані методи;
- гібридні підходи;
- архітектурні методології, такі як мультифізичне, мультимасштабне моделювання;
- модельно-орієнтований системний інжиніринг (MBSE).

Фізично-орієнтоване моделювання (Physics-based models / White-box), також відоме як механістичне моделювання, використовує фундаментальні закони фізики, математики та кінематики для математичного опису поведінки системи [26-28]. Включає використання методів скінченних елементів та динаміки багатомасових систем. Такі моделі незамінні, коли фізичні властивості системи добре зрозумілі. Вони здатні точно прогнозувати реакцію верстата на різні умови різання (наприклад, визначення зон стабільного фрезерування без виникнення автоколивань). Основною перевагою є високий рівень інтерпретованості (зрозумілість причинно-наслідкових зв'язків) та здатність екстраполювати результати на режими, для яких немає напрацьованих експериментальних даних [28]. Проте, фізично-орієнтовані моделі характеризуються високою обчислювальною складністю, що унеможливило їх пряме використання для управління процесами в режимі реального часу, де допустимий час відгуку вимірюється мілісекундами.

Дані-орієнтовані методи (Data-driven models / Black-box). Методологія ґрунтується на застосуванні алгоритмів машинного та глибокого навчання для виявлення прихованих закономірностей у масивах виробничих даних (Big Data) [3; 26; 27]. Штучні нейронні мережі, рекурентні нейронні мережі з довгою короткочасною пам'яттю або алгоритми на базі дерев рішень (Random Forest, Gradient Boosting) навчаються на накопичених ретроспективних по-

казаннях датчиків вібрації, температури та струму шпинделя. Цей підхід відзначається високою швидкістю генерації висновків (низька латентність) і високою масштабованістю, що робить його прийнятним для моніторингу верстатів у реальному часі. Головними недоліками є «ефект чорної скриньки» з низькою інтерпретованістю результатів, залежність від величезних обсягів якісно розпізнаваних даних та нездатність адекватно реагувати на ситуації, що виходять за межі навчальної вибірки.

Методики створення ЦД на основі **гібридного моделювання** (Hybrid models / Grey-box) синергетично об'єднують переваги фізичного та дані-орієнтованого підходів, нівелюючи їх недоліки. У гібридній парадигмі фізична модель може використовуватися в офлайн-режимі для генерації теоретичних даних у граничних режимах обробки. На цих даних, об'єднаних з реальними даними, навчається так звана «сурогатна модель» (Surrogate Model) або фізично-інформована нейронна мережа (PINN) [28]. Отримана сурогатна модель інтегрується в ядро цифрового двійника, забезпечуючи фізичну обґрунтованість результатів.

Мультифізичне та мультимасштабне моделювання. Технологічне обладнання є типовою кіберфізичною, мехатронною системою. Створення її адекватного ЦД вимагає багатодоменого (мультифізичного) підходу, що передбачає спільне моделювання механічних (кінематика та динаміка формоутворюючих вузлів), електричних (сервоприводи, інвертори), гідравлічних та алгоритмічних (регулятори ПД, контури ЧПК) підсистем у єдиному середовищі [30]. Мультимасштабність (multi-scale) передбачає здатність моделі обробляти фізичні процеси на різних просторових та часових рівнях: від мікрорівня взаємодії стружки з передньою поверхнею різця до макрорівня теплових деформацій всієї конструкції верстата.

Модельно-орієнтований системний інжиніринг (MBSE) виступає архітектурним і методологічним базисом для управління складністю розробки ЦД. Цей підхід передбачає фундаментальний перехід від традиційного документоорієнтованого проєктування до використання цифрових моделей як головного носія інформації про життєвий цикл металорізального верстата і як технічної системи. Використання стандартизованих мов, таких як SysML (Systems Modeling Language), дозволяє формалізувати системні вимоги, структурні та поведінкові зв'язки між усіма підсистемами [29; 31]. MBSE забезпечує наскрізну простежуваність та безперервну валідацію: будь-які зміни у віртуальній архітектурі автоматично верифікуються на предмет узгодженості, що суттєво зменшує ризики при створенні складних ЦД технологічного обладнання.

Процес створення повноцінного цифрового двійника верстата або виробничої лінії реалізується через послідовні та ітеративні етапи: від встановлення апаратного забезпечення до калібрування цифрових моделей. Спираючись на концепцію СРМТ [1; 2; 13; 32], методологію створення цифрового двійника металорізального верстата можна поділити на наступні етапи.

1. Створення фізичного рівня інтеграції: дооснащення існуючого верстата додатковими датчиками (віброприскорення, температури, сили різання, акустичної емісії тощо) з розширеними функціональними можливостями вбудованої обробки сигналів та налаштування комунікаційних шлюзів для прямого зчитування внутрішніх параметрів з ядра ЧПК та програмованих логічних контролерів (позиції осей, струми двигунів, коди помилок тощо).

2. Злиття та попередня обробка даних (Data Fusion & Pre-processing): необроблені високочастотні сигнали з датчиків піддаються цифровій фільтрації, очищенню від шумів та просторово-часовій синхронізації. На цьому етапі розрізнені потоки даних агрегуються та прив'язуються до конкретних компонентів верстата за допомогою єдиної семантичної інформаційної моделі.

3. Побудова та налаштування математичних моделей: формування тривимірних геометричних, кінематичних та мультифізичних моделей, які репрезентують функціонування верстата.

4. Синхронізація «Віртуальне-Реальне» (Virtual-Real Mapping): встановлення постійного бідирекціонального зв'язку між фізичним і віртуальним відображенням верстата через промислові протоколи. Дані телеметрії динамічно оновлюють параметри віртуальної моделі.

5. Валідація, верифікація та оптимізація: порівняння прогнозованих віртуальною моделлю значень із фактичними показаннями датчиків. На основі виявлених відхилень алгоритми оптимізації коригують внутрішні параметри моделі ЦД верстата, забезпечуючи адаптивність ЦД до зношування або змін навколишнього середовища.

Ядром цифрового двійника металорізального обладнання є набір математичних моделей, які описують закономірності формування вихідних показників якості та ефективності його функціонування та повинні постійно ідентифікуватися та оновлюватися. Основними типами моделей при побудові ЦД верстата є: кінематичні, динамічні, моделі теплових процесів, зношування та прогнозування відмов.

Кінематичні моделі, які описують геометричні переміщення виконавчих органів верстата, базуються на використанні матриць однорідних перетворень, теорії гвинтового руху та рівняннях замкнених кінематичних ланцюгів. Вони дозволяють аналізувати об'ємні похибки та генерувати точні траєкторії інструмента у віртуальному просторі [30].

Динамічні моделі відображають коливальні та перехідні процеси у верстаті. Математично динаміка верстата описується диференціальним рівнянням виду [15]:

$$M\ddot{x} + C\dot{x} + Kx = F(t),$$

де M , C та K – відповідно матриці маси, демпфування та жорсткості системи;

$F(t)$ – вектор зовнішніх збурень (зусиль різання).

Для аналізу стабільності використовується частотна передатна функція $H(\omega)$, яка характеризує зв'язок між виходом і входом системи та відображає її власні динамічні характеристики верстата [15]:

$$H(\omega) = \frac{1}{-\omega^2 M + j\omega C + K}.$$

Оскільки параметри контактної жорсткості K та демпфування C у напрямних або підшипниках верстата змінюються в часі, його цифровий двійник використовує методи адаптивної модифікації. Зібрані датчиками дані про вібрацію порівнюються з розрахунковою реакцією моделі й за допомогою генетичних алгоритмів або методу найменших квадратів матриці K та C автоматично коригуються, мінімізуючи цільову функцію відхилення.

Фізично-орієнтовані моделі теплових процесів базуються на диференціальних рівняннях теплопровідності (Фур'є). Однак, на практиці найвищу ефективність показують гібридні моделі, що поєднують температурний моніторинг з нейронними мережами для точного прогнозування зміщення інструмента в реальному часі та формування сигналів компенсації в системі ЧПК [32].

Моделі зношування та прогнозування відмов описують зношування інструмента та деталей основних формоутворюючих вузлів верстата (наприклад, кулько-гвинтової передачі). Математично зношування апроксимується емпіричними залежностями або моделями накопичення втоми. У передових цифрових двійниках використовуються алгоритми В-сплайнових нечітких нейронних мереж (B-splines fuzzy neural networks) для аналізу трендів вібрації і температури та розрахунку залишкового корисного ресурсу формоутворювальних вузлів, що дозволяє реалізувати стратегії предиктивного обслуговування [14].

Промисловий інтернет речей (IoT) створює так звану «нервову систему» цифрового двійника. Технологічне обладнання дооснащується різноманітними датчиками: п'єзоелектричними динамометрами для вимірювання сил різання в трьох координатах, віброакселерометрами для реєстрації автоколивань, датчиками акустичної емісії для фіксації мікротріщин інструмента, а також системами технічного зору (CCD-камерами). Дані агрегуються через локальні модулі збору й передаються до комунікаційних шлюзів через протоколи TCP/IP. Крім того, технології радіочастотної ідентифікації (RFID) використовуються для прив'язки статичних паспортних даних (геометрія інструмента, параметри заготовки) безпосередньо до об'єктів виробництва.

Сучасні архітектури цифрових двійників еволюціонують у напрямках стандартизації, інтегруєбельності та розподілених обчислень, що дозволяє інтегрувати розрізнене обладнання у єдині екосистеми.

Для усунення термінологічної та архітектурної плутанини Міжнародна організація зі стандартизації (ISO) розробила стандарт ISO 23247 «Digital Twin Framework for Manufacturing» [17, 18], який визначає еталонну чотирирівневу архітектуру для цифрових двійників у машинобудуванні.

1. **Observable Manufacturing Elements (OME):** рівень фізичних елементів, які моніторять. Включає сам верстат, різальний інструмент, заготовку, датчики, актуатори та персонал. Це джерела даних і об'єкти фізичного керування.

2. **Device Communication Entity (DCE):** сутність зв'язку з пристроями. Відповідає за збір, маршрутизацію та попередню обробку агрегованих станів від OME. Цей рівень також забезпечує зворотну передачу команд керування на фізичне обладнання. Виступає у ролі шлюзу між фізичними інтерфейсами (наприклад, PROFINET, Modbus) та IT-інфраструктурою.

3. **Digital Twin Entity (DTE):** сутність цифрового двійника. Центральний рівень, де розміщені віртуальні імітаційні моделі, бази даних та алгоритми аналітики. DTE безперервно зчитує відфільтровані дані від DCE та синхронізує віртуальні моделі з фізичною реальністю.

4. **User Entity (UE):** сутність користувача. Шар прикладних програм та сервісів (ERP, PLM, MES, інформаційні панелі, AR-інтерфейси), які використовують знання та прогнози, згенеровані DTE, для підвищення ефективності управління виробничими елементами.

Класична архітектура ЦД не здатна впоратися з обсягом даних, що генеруються вбудованими та додатково інтегрованими у кіберфізичний верстат датчиками через величезну кількість високочастотних сигналів. Тому сучасні архітектури ЦД є розподіленими на граничні та хмарні обчислення (Edge/Cloud Computing) [12, 32, 33].

Частина обчислювальних потужностей (Edge Computing – граничні обчислення) розміщуються у безпосередній близькості до верстата (Edge-сервери, промислові шлюзи). Вони забезпечують очищення даних, виділення ознак сигналів та запуск швидких алгоритмів машинного навчання з наднизькою затримкою. Граничний рівень є критично важливим для завдань реального часу, таких як адаптивне запобігання колізіям (Collision Detection) або виявлення поломки інструмента, коли рішення має прийматися за мілісекунди.

Хмарні обчислення (Cloud Computing) забезпечують масштабовану інфраструктуру для зберігання накопичених масивів ретроспективних даних від усього парку верстатів, навчання «важких» моделей глибокого навчання (Deep Learning). Оновлені та натреновані в хмарі моделі згодом можуть транслюватися назад на Edge-рівень для локального виконання.

Забезпечення інтегруєбельності в гетерогенному парку верстатів різних виробників є однією з найскладніших проблем. У статті [34] безпосередньо зазначається, що розробка кіберфізичних верстатів безальтернативно вимагає стандартизованих методів інформаційного моделювання та загальних комунікаційних протоколів. У цій роботі

детально описується створення спеціальної платформи, яка поєднує стандарти OPC UA та MTConnect для забезпечення ефективного та інтероперабельного обміну даними між верстатами різних виробників та програмними додатками. Оскільки ці протоколи відрізняються за методом кодування даних (хоча обидва мають серверну-клієнтську архітектуру), автори описують розробку спеціального інтерфейсу-шлюзу, який трансформує семантичну модель MTConnect у відповідні вузли OPC UA для повної сумісності.

У статті [2] зазначається, що використання стандарту MTConnect або аналогічних відкритих стандартів є ключовим для забезпечення інтероперабельності та розширюваності в архітектурі цифрового двійника. Автори наводять приклад розробленого прототипу на базі MTConnect, експериментальні результати якого довели його високу здатність до інтеграції різноманітного обладнання.

Отже, наразі проблема інтероперабельності різноманітного технологічного обладнання вирішується шляхом впровадження стандартизованих інформаційних моделей та комунікаційних протоколів (табл. 2).

Таблиця 2 – Характеристики стандартизованих комунікаційних протоколів

Характеристика	MTConnect	OPC UA
Призначення та поширеність	Розроблений спеціально для верстатів з ЧПК. Широко підтримується виробниками верстатів (Mazak, Fanuc).	Універсальний промисловий стандарт для широкого спектра пристроїв (ПЛК, роботи, верстати).
Архітектура зв'язку	Client-Server (переважно через Agent-Adapter). Традиційно односторонній зв'язок (Read-only), зорієнтований на моніторинг.	Client-Server та Pub-Sub. Підтримує двосторонній зв'язок (Read/Write), придатний для відправлення керуючих команд.
Семантична модель	Має багатий, чітко визначений словник (словник термінів) та жорстку ієрархічну XML-структуру, стандартизовану саме для верстатів.	Не має жорстко заданого семантичного словника «з коробки». Інформаційні моделі (вузли, змінні, методи) повинні бути спроектовані розробником (або через Companion Specifications).
Сценарії використання у цифрових двійниках	Швидке та уніфіковане розгортання систем збору даних та «цифрових тіней» верстатів.	Створення повноцінних цифрових двійників зі складними архітектурами, M2M комунікацією та високими вимогами до кібербезпеки.

Джерело: розроблено авторами.

Для об'єднання переваг обох стандартів розроблено спільну специфікацію (MTConnect-OPC UA Companion Specification). На практиці архітектури цифрових двійників часто використовують інтерфейсні модулі (транслятори), які зчитують структуровані XML-дані від агентів MTConnect і автоматично відображають їх у вузли адресного простору центрального OPC UA сервера [33]. Це дозволяє створювати єдину інтероперабельну платформу управління цифровими двійниками верстатів у цеху.

Промислове розгортання цифрового двійника вимагає комплексного використання взаємопов'язаних програмних та апаратних інструментів на всіх рівнях архітектури: CAD/CAE/CAM системи, системи мультифізичного моделювання, платформи для цифрових двійників (DT Platforms), засоби збору та обробки даних.

CAD/CAE/CAM системи є фундаментом для побудови фізичної та геометричної моделей ЦД верстата. Системи вищого рівня, такі як Siemens NX або Dassault Systèmes CATIA, використовуються не лише для створення твердотільних 3D-моделей, а і для генерації просторових кінематичних ланцюгів. Комплекси CAE (наприклад, Ansys, SAMCEF Mecano, Abaqus) застосовують для виконання розрахунків методом скінченних елементів – аналізу міцності, модального аналізу (визначення власних частот вібрацій) та тепломасообміну в конструкціях верстата.

Системи мультифізичного моделювання використовують для створення динамічних, обчислювальних моделей цифрового двійника, які об'єднують механіку, електроніку та алгоритми управління. При цьому використовується мова Modelica [13]. Це об'єктно-орієнтована мова для мультифізичного моделювання складних технічних систем, що дозволяє у єдиному середовищі на основі диференціальних рівнянь описувати механічні, електричні та керуючі підсистеми.

Для її компіляції та візуального програмування використовують такі інструменти, як Dymola, MWorks або MATLAB/Simulink з модулями Simscape [30; 35; 36].

Створення ЦД металорізального верстата неможливе без відповідної платформи (DT Platforms). Провідні світові розробники пропонують хмарні та гібридні платформи (IoT OS), які виконують роль інтегратора всіх компонентів цифрового двійника. Прикладами є Siemens MindSphere, PTC ThingWorx, Ansys Twin Builder та AWS IoT TwinMaker [32]. Ці платформи забезпечують зв'язок (Digital Thread) між моделями CAD/CAE, системами управління виробництвом та даними датчиків з верстатів, а також надають середовище для розгортання алгоритмів аналітики й машинного навчання.

Для апаратної інтеграції застосовуються модульні платформи збору даних в режимі реального часу (Data Acquisition Systems, DAQ), такі як шасі NI PXI/CompactRIO, які здатні оцифровувати високочастотні сигнали з датчиків сили та вібрацій. Дані із системи ЧПК отримують через спеціалізовані API (наприклад, FOCAS для Fanuc) або відкриті адаптери (LinuxCNC). Для зберігання цих потоків використовують спеціалізовані бази даних часових рядів (Time-Series Databases, як InfluxDB), а для візуалізації станів – ігрові рушії типу Unity3D або Unreal Engine, які дозволяють візуалізувати стан верстата в повноцінній чи віртуальній реальності.

Дослідження та промисловий досвід переконливо доводять операційну та економічну ефективність цифрових двійників у машинобудуванні.

Яскравим прикладом є результати європейського проєкту «Twin-Control» [12]. Розроблена платформа була впроваджена на великих порталних верстатах Gerpro 502 для аерокосмічної галузі та верстатах COMAU Urane в автомобільній промисловості. Цифровий двійник об'єднав динамічну модель механіки верстата з моделлю взаємодії інструменту та заготовки (Tool-Workpiece Engagement, TWE). Порівняння розрахункового крутного моменту з фактичними вимірами на шпинделі в реальному часі дозволило ідентифікувати аномалії різання, запобігти виникненню шкідливих вібрацій та суттєво прискорити процес налагодження на виконання технологічних операцій.

Обробка лопаток з титанових сплавів є складним завданням через їхню тонкостінність і схильність до деформацій при обробці та внаслідок прояву залишкових напружень. У статті [37] дослідники розробили систему DT-PMS (Digital Twin-driven Product Smart Manufacturing System), яка об'єднала CAD-модель, симулятор процесу обробки, фізичний 4-координатний верстат (Siemens 840D) та координатно-вимірювальну машину в єдиний закритий цикл. Використання «цифрової нитки» (Digital Thread) та оптимізаційних алгоритмів на базі даних ЦД дозволило зменшити час обробки лопатки на 26,3 % і одночасно скоротити максимальні геометричні деформації деталі на 23,4 % порівняно з традиційним підходом.

Інший успішний кейс стосується прогнозування зношування кульково-гвинтових передач (КГП) у фрезерних верстатах [13, 14]. Оскільки КГП зазнають складних аксіальних навантажень і тертя, традиційне технічне обслуговування за графіком є неефективним. Створений ЦД використовує В-сплайнові нечіткі нейронні мережі для аналізу сигналів від оптичних і термічних датчиків. Система розраховує залишковий корисний термін служби компонента, сигналізуючи про необхідність заміни безпосередньо перед критичним рівнем зношування, тим самим усуваючи ризик зниження показників точності верстата.

Попри значний потенціал, масове промислове впровадження цифрових двійників стикається з низкою серйозних технічних та організаційних перешкод.

Найбільшою проблемою є закритість більшості комерційних систем ЧПК, що перетворює їх на інформаційні «чорні ящики». Виробники верстатів неохоче відкривають доступ до внутрішніх контурів керування (струми сервоприводів, програмовані логічні контролери). Окрім того, промислові дані часто є зашумленими, містять пропуски і є сильно незбалансованими. Кількість цифрових записів роботи верстата в нормальному режимі на порядки перевищує кількість записів з аномаліями, що ускладнює навчання нейронних мереж.

Високоточне фізичне моделювання, особливо нелінійний скінчено-елементний аналіз та CFD-аналіз термодинаміки, вимагає колосальних обчислювальних ресурсів і годин машинного часу. Тому їх пряма інтеграція у цикл керування верстатом у режимі реального часу (з латентністю < 10 мс) на цьому етапі розвитку апаратних засобів є неможливою. Це змушує розробників іти на компроміси, використовуючи менш точні, але швидкі сурогатні моделі.

У міру фізичного зношення напрямних і деталей приводів верстата, його початкова ідеалізована віртуальна модель поступово втрачає релевантність через зміни стану підсистем верстата протягом його життєвого циклу. Відбувається так зване явище «model drift». Створення надійних автоматизованих алгоритмів самокалібрування ЦД протягом усього багаторічного циклу експлуатації технологічного обладнання залишається відкритим науковим завданням.

Незважаючи на появу стандартів (ISO 23247, OPC UA), інтеграція різноманітного обладнання, старих систем, датчиків від різних виробників та корпоративних ІТ-систем (ERP/MES) у єдину «цифрову нитку» залишається надзвичайно трудомістким і дорогим процесом проектування.

Подальший розвиток технологій цифрових двійників рухатиметься в напрямках підвищення рівня їх когнітивних здатностей, швидкодії та глобальної конвергенції.

Використання сучасних передових моделей і засобів штучного інтелекту, графових баз знань (Knowledge Graphs) та навчання з підкріпленням (Reinforcement Learning) дозволить перевести ЦД з рівня предиктивної оптимізації на найвищий (5-й) рівень автономії (див. рис. 1) – самонавчальні когнітивні ЦД (Cognitive Digital Twins). Когнітивні ЦД будуть не просто реагувати на запрограмовані сценарії, а й самостійно генерувати нові знання, аналізувати контекст і ухвалювати рішення у непередбачуваних ситуаціях, наприклад, перебудова стратегії обробки деталі за раптової поломки різального інструмента.

Синергія технологій граничних обчислень (Edge Computing) із бездротовими промисловими мережами стандарту 5G та 6G забезпечить мінімізацію часових затримок (Real-Time Twins) та високу пропускну здатність. Це уможливить перенесення частини функцій самого контролера системи ЧПК безпосередньо в кіберпростір, реалізуючи концепцію хмарного або програмно визначеного керування верстатом у реальному часі.

Розвиток концепції «Система систем», де ЦД окремих верстатів та роботів об'єднуються у локальні ЦД всього цеху (Digital Twin Shop-floor) у поєднанні з технологіями доповненої та віртуальної реальності формуватимуть «Індустріальний Метавесвіт» (Industrial Metaverse), у якому інженери можуть імерсивно взаємодіяти з даними обладнання, проводити віртуальне введення в експлуатацію (Virtual Commissioning) та дистанційне обслуговування з ефектом повної присутності.

Висновки. Впровадження цифрових двійників металообробного технологічного обладнання є ключовим інструментом цифрової трансформації машинобудування та практичної реалізації парадигми Smart Manufacturing. Цифровий двійник, який еволюціонував від статичної 3D-моделі до комплексної гібридної системи, здатний докорінно оптимізувати всі етапи життєвого циклу обладнання: від проектування процесу обробки до предиктивного технічного обслуговування.

Аналіз існуючих методик та інструментарію доводить, що найвища ефективність досягається під час використання гібридного (Grey-box) підходу, який синергетично об'єднує достовірність детермінованих фізичних моделей (кінематичних, динамічних, термодинамічних) зі швидкодією та адаптивністю алгоритмів штучного інтелекту, що обробляють потоки даних з інтегрованих у верстат датчиків у режимі реального часу. Важливим кроком на шляху до масового впровадження ЦД стало затвердження міжнародного стандарту ISO 23247 та розвиток інтероперабельних комунікаційних протоколів (OPC UA у поєднанні з MTConnect). Практичні промислові кейси підтверджують здатність таких кіберфізичних оброблювальних систем суттєво скорочувати час технологічної підготовки виробництва, мінімізувати вібрації та похибки внаслідок температурних деформацій, а також радикально підвищувати загальну ефективність використання обладнання.

Найперспективнішими напрямками подальших досліджень є:

- подолання проблеми закритості архітектури систем ЧПК (усунення «чорних ящиків») для забезпечення безперешкодного і безпечного доступу до внутрішньої телеметрії;
- розробка ефективних математичних методів самокалібрування та адаптивної модифікації імітаційних моделей верстата з урахуванням його природного зношування протягом тривалого життєвого циклу;
- розвиток технологій когнітивних цифрових двійників, здатних до автономного прийняття рішень на основі графових моделей знань, та їх інтеграція в мережеві архітектури індустріальних метавсесвітів.

Реалізація цих напрямів остаточно перетворить цифрові двійники з потужного аналітичного інструмента на невід'ємний автономний інтелект розумного виробництва майбутнього.

Заява про використання генеративного ШІ та технологій на основі ШІ в процесі написання тексту статті

Для перекладу англійських статей, прояснення та вибору вірного трактування англійської термінології у використаних в статті літературних джерелах авторами використано інструменти штучного інтелекту Perplexity.ai та Deepseek.com. Після використання цих інструментів автори переглянули та відредагували відповідний текст і взяли на себе повну відповідальність за зміст публікації.

Список використаних джерел

1. Liu, Chao & Xu, Xun. (2017). Cyber-physical machine tool – the era of machine tool 4.0. *Procedia CIRP*, 63, 70-75. <https://doi.org/10.1016/j.procir.2017.03.078>.
2. Liu, C., Vengayil, H., Zhong, R. Y., & Xu, X. (2018). A systematic development method for cyber-physical machine tools. *Journal of Manufacturing Systems*, 48, 13-24. <https://doi.org/10.1016/j.jmsy.2018.02.001>.
3. Segovia, M., & Garcia-Alfaro, J. (2022). Design, modeling and implementation of digital twins. *Sensors*, 22(14), 5396. <https://doi.org/10.3390/s22145396>.
4. Bergs, T., Gierlings, S., Auerbach, T., Klink, A., Schraknepper, D., & Augspurger, T. (2021). The concept of digital twin and digital shadow in manufacturing. *Procedia CIRP*, 101, 81-84. <https://doi.org/10.1016/j.procir.2021.02.010>.
5. Kritzinger, W. et al. (2018). Digital Twin in manufacturing: A categorical literature review and classification. *IFAC-PapersOnLine*, 51(11), 1016-1022.
6. Seipolt, A., Buschermöhle, R., & Hasselbring, W. (2025). Digital Twins in manufacturing: A systematic literature review with retrieval-augmented generation. *IEEE Access*, 13, 172562-172583.
7. Emmert-Streib, F. (2023). Defining a digital twin: A data science-based unification. *Machine Learning and Knowledge Extraction*, 5(3), 1036-1054. <https://doi.org/10.3390/make5030054>.
8. Grieves, M. (2014). *Digital twin: manufacturing excellence through virtual factory replication*. White paper, (1), 1-7.
9. Grieves, M., & Vickers, J. (2017). Digital twin: Mitigating unpredictable, undesirable emergent behavior in complex systems. In B. Kahlen, S. Flumerfelt, & A. Alves (Eds.), *Transdisciplinary perspectives on complex systems* (pp. 85-113). Springer. https://doi.org/10.1007/978-3-319-38756-7_4.

10. Zhang, He & Qi, Qinglin & Tao, Fei. (2022). A multi-scale modeling method for digital twin shop-floor. *Journal of Manufacturing Systems*, 62, 417-428. <https://doi.org/10.1016/j.jmsy.2021.12.011>.
11. Tao, F., & Zhang, M. (2017). Digital twin shop-floor: a new shop-floor paradigm towards smart manufacturing. *IEEE Access*, 5, 20418-20427.
12. Armendia, M., Ghassempouri, M., Ozturk, E., & Peysson, F. (Eds.). (2019). *Twin-control: A digital twin approach to improve machine tools lifecycle*. Springer. <https://doi.org/10.1007/978-3-030-02203-7>.
13. Luo, W., Hu, T., Zhang, C., & Wei, Y. (2018). Digital twin for CNC machine tool: Modeling and using strategy. *Journal of Ambient Intelligence and Humanized Computing*, 10(3), 1129-1140. <https://doi.org/10.1007/s12652-018-0946-5>.
14. Luo, W., Hu, T., Ye, Y., Zhang, C., & Wei, Y. (2020). A hybrid predictive maintenance approach for CNC machine tool driven by Digital Twin. *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*, 65, 101974. <https://doi.org/10.1016/j.rcim.2020.101974>.
15. Zhao, P., & Sun, B. (2021). Adaptive modification of digital twin model of CNC machine tools coordinately driven by mechanism model and data model. *Journal of Physics: Conference Series*, 1875, 012003. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/1875/1/012003>.
16. Shao, G., Frechette, S. P., & Srinivasan, V. (2023). An analysis of the new ISO 23247 series of standards on digital twin framework for manufacturing. In *Proceedings of the ASME 2023 18th International Manufacturing Science and Engineering Conference*. ASME.
17. International Organization for Standardization. (2021). *Automation systems and integration—Digital twin framework for manufacturing—Part 1: Overview and general principles (ISO 23247-1:2021)*. <https://www.iso.org/standard/75066.html>.
18. International Organization for Standardization. (2021). *Automation systems and integration—Digital twin framework for manufacturing—Part 2: Reference architecture (ISO 23247-2:2021)*. <https://www.iso.org/standard/75067.html>.
19. Stark, R., & Damerau, T. (2019). Digital Twin. In *CIRP Encyclopedia of Production Engineering*. Springer, Berlin, Heidelberg. https://doi.org/10.1007/978-3-642-35950-7_16870-1.
20. Jones, D., Snider, C., Nassehi, A., Yon, J., & Hicks, B. (2020). Characterising the Digital Twin: A systematic literature review. *CIRP Journal of Manufacturing Science and Technology*, 29, 36-52. <https://doi.org/10.1016/j.cirpj.2020.02.002>.
21. Liu, M., Fang, S., Dong, H., & Xu, C. (2020). Review of digital twin about concepts, technologies, and industrial applications. *Journal of Manufacturing Systems*. <https://doi.org/10.1016/j.jmsy.2020.06.017>.
22. Сапон, С. (2023). Концепція створення моделі цифрового двійника інтелектуального шпиндельного вузла. *Технічні науки та технології*, 4 (30), 80-90. [https://doi.org/10.25140/2411-5363-2022-4\(30\)-80-90](https://doi.org/10.25140/2411-5363-2022-4(30)-80-90).
23. International Organization for Standardization & International Electrotechnical Commission. (2025). *Digital twin—Maturity model and guidance for a maturity assessment (ISO/IEC TR 30186:2025)*. <https://www.iso.org/standard/>.
24. Kim, Y.-W. (2020). *Digital twin maturity models*. <https://doi.org/10.13140/RG.2.2.28750.48967>.
25. International Organization for Standardization. (2020). *Automation systems and integration—Assessment on convergence of informatization and industrialization for industrial enterprises. Part 2: Maturity model and evaluation methodology (ISO 22549-2:2020)*. <https://www.iso.org/standard/>.
26. Aivaliotis, P., Georgoulas, K., & Makris, S. (2019). Methodology for enabling digital twin using advanced physics-based modelling in predictive maintenance. *Procedia CIRP*, 81, 417-422. <https://doi.org/10.1016/j.procir.2019.03.072>.
27. Hundt, J. M., Ochono, T. S., Senevirathne, D., Eneyew, D. D., Bitsuamlak, G. T., Capretz, M. A. M., & Grolinger, K. (2025). Data-driven and physics-based modeling approaches and their integration in building digital twins: A systematic review. *Journal of Building Engineering*, 114, 114214. <https://doi.org/10.1016/j.jobe.2025.114214>.
28. Wagner, M., Sousa, F., Klar, M., & Aurich, J. (2025). Theoretical analyses and performance comparison of physics-based, data-driven, and hybrid models for digital twin applications in manufacturing. *Research Square (Preprint)*. <https://doi.org/10.21203/rs.3.rs-7807793/v1>.
29. Owen, S., & James, A. (2025). Exploring the integration of model-based systems engineering and digital twins in complex system lifecycle management: efficacy, challenges, and potential outcomes. *Australian Journal of Multi-Disciplinary Engineering*, 1-12. <https://doi.org/10.1080/14488388.2025.2559551>.

30. Wei, Y., Hu, T., Yue, P. et al. Study on the construction theory of digital twin mechanism model for mechatronics equipment. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology* 131, 5383-5401 (2024). <https://doi.org/10.1007/s00170-022-09144-w>.

31. Lopez, Viviana & Akundi, Aditya. (2022). A Conceptual Model-based Systems Engineering (MBSE) approach to develop Digital Twins. *IEEE International Systems Conference* 1-5. <https://doi.org/10.1109/SysCon53536.2022.9773869>.

32. Liu, Z., Zheng, P., & Xu, X. (2021). Digitalisation and servitisation of machine tools in the era of Industry 4.0: a review. *International Journal of Production Research*, 59(14), 4304-4322.

33. Cabral, J. V. A., Rodriguez, E., & Alvares, A. (2023). Digital Twin Implementation for Machining Center Based on ISO 23247 Standard. *IEEE Latin America Transactions*, 21(5), 628-635.

34. Liu, C., Vengayil, H., Lu, Y., & Xu, X. (2019). A Cyber-Physical Machine Tools Platform using OPC UA and MTConnect. *Journal of Manufacturing Systems*, 51, 61-74. <https://doi.org/10.1016/j.jmsy.2019.04.006>.

35. Qi, Q., Tao, F., et al. (2021). Enabling technologies and tools for digital twin. *Journal of Manufacturing Systems*, 58, 3-21. <https://doi.org/10.1016/j.jmsy.2019.10.001>.

36. Singh, S., Weeber, M., & Birke, K.-P. (2021). Advancing digital twin implementation: A toolbox for modelling and simulation. *Procedia CIRP*, 99, 567-572. <https://doi.org/10.1016/j.procir.2021.03.078>.

37. Zhang, X., & Zhu, W. (2019). Application framework of digital twin-driven product smart manufacturing system: A case study of aeroengine blade manufacturing. *International Journal of Advanced Robotic Systems*, 16(5), 172988141988066. <https://doi.org/10.1177/1729881419880663>.

References

1. Liu, Chao & Xu, Xun. (2017). Cyber-physical machine tool – the era of machine tool 4.0. *Procedia CIRP*, 63, 70-75. <https://doi.org/10.1016/j.procir.2017.03.078>.

2. Liu, C., Vengayil, H., Zhong, R. Y., & Xu, X. (2018). A systematic development method for cyber-physical machine tools. *Journal of Manufacturing Systems*, 48, 13-24. <https://doi.org/10.1016/j.jmsy.2018.02.001>.

3. Segovia, M., & Garcia-Alfaro, J. (2022). Design, modeling and implementation of digital twins. *Sensors*, 22(14), 5396. <https://doi.org/10.3390/s22145396>.

4. Bergs, T., Gierlings, S., Auerbach, T., Klink, A., Schraknepper, D., & Augspurger, T. (2021). The concept of digital twin and digital shadow in manufacturing. *Procedia CIRP*, 101, 81-84. <https://doi.org/10.1016/j.procir.2021.02.010>.

5. Kritzinger, W. et al. (2018). Digital Twin in manufacturing: A categorical literature review and classification. *IFAC-PapersOnLine*, 51(11), 1016-1022.

6. Seipolt, A., Buschermöhle, R., & Hasselbring, W. (2025). Digital Twins in manufacturing: A systematic literature review with retrieval-augmented generation. *IEEE Access*, 13, 172562-172583.

7. Emmert-Streib, F. (2023). Defining a digital twin: A data science-based unification. *Machine Learning and Knowledge Extraction*, 5(3), 1036-1054. <https://doi.org/10.3390/make5030054>.

8. Grieves, M. (2014). *Digital twin: manufacturing excellence through virtual factory replication*. White paper, (1), 1-7.

9. Grieves, M., & Vickers, J. (2017). Digital twin: Mitigating unpredictable, undesirable emergent behavior in complex systems. In B. Kahlen, S. Flumerfelt, & A. Alves (Eds.), *Transdisciplinary perspectives on complex systems* (pp. 85-113). Springer. https://doi.org/10.1007/978-3-319-38756-7_4.

10. Zhang, He & Qi, Qinglin & Tao, Fei. (2022). A multi-scale modeling method for digital twin shop-floor. *Journal of Manufacturing Systems*. 62. 417-428. <https://doi.org/10.1016/j.jmsy.2021.12.011>.

11. Tao, F., & Zhang, M. (2017). Digital twin shop-floor: a new shop-floor paradigm towards smart manufacturing. *IEEE Access*, 5, 20418-20427.

12. Armendia, M., Ghassempouri, M., Ozturk, E., & Peysson, F. (Eds.). (2019). *Twin-control: A digital twin approach to improve machine tools lifecycle*. Springer. <https://doi.org/10.1007/978-3-030-02203-7>.

13. Luo, W., Hu, T., Zhang, C., & Wei, Y. (2018). Digital twin for CNC machine tool: Modeling and using strategy. *Journal of Ambient Intelligence and Humanized Computing*, 10(3), 1129-1140. <https://doi.org/10.1007/s12652-018-0946-5>.

14. Luo, W., Hu, T., Ye, Y., Zhang, C., & Wei, Y. (2020). A hybrid predictive maintenance approach for CNC machine tool driven by Digital Twin. *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*, 65, 101974. <https://doi.org/10.1016/j.rcim.2020.101974>.

15. Zhao, P., & Sun, B. (2021). Adaptive modification of digital twin model of CNC machine tools coordinately driven by mechanism model and data model. *Journal of Physics: Conference Series*, 1875, 012003. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/1875/1/012003>.
16. Shao, G., Frechette, S. P., & Srinivasan, V. (2023). An analysis of the new ISO 23247 series of standards on digital twin framework for manufacturing. In *Proceedings of the ASME 2023 18th International Manufacturing Science and Engineering Conference*. ASME.
17. International Organization for Standardization. (2021). *Automation systems and integration—Digital twin framework for manufacturing—Part 1: Overview and general principles (ISO 23247-1:2021)*. <https://www.iso.org/standard/75066.html>.
18. International Organization for Standardization. (2021). *Automation systems and integration—Digital twin framework for manufacturing—Part 2: Reference architecture (ISO 23247-2:2021)*. <https://www.iso.org/standard/75067.html>.
19. Stark, R., & Damerau, T. (2019). Digital Twin. In *CIRP Encyclopedia of Production Engineering*. Springer, Berlin, Heidelberg. https://doi.org/10.1007/978-3-642-35950-7_16870-1.
20. Jones, D., Snider, C., Nassehi, A., Yon, J., & Hicks, B. (2020). Characterising the Digital Twin: A systematic literature review. *CIRP Journal of Manufacturing Science and Technology*, 29, 36-52. <https://doi.org/10.1016/j.cirpj.2020.02.002>.
21. Liu, M., Fang, S., Dong, H., & Xu, C. (2020). Review of digital twin about concepts, technologies, and industrial applications. *Journal of Manufacturing Systems*. <https://doi.org/10.1016/j.jmsy.2020.06.017>.
22. Сапон, С. (2023). Концепція створення моделі цифрового двійника інтелектуального шпиндельного вузла. *Технічні науки та технології*, 4 (30), 80-90. [https://doi.org/10.25140/2411-5363-2022-4\(30\)-80-90](https://doi.org/10.25140/2411-5363-2022-4(30)-80-90).
23. International Organization for Standardization & International Electrotechnical Commission. (2025). *Digital twin—Maturity model and guidance for a maturity assessment (ISO/IEC TR 30186:2025)*. <https://www.iso.org/standard/>.
24. Kim, Y.-W. (2020). *Digital twin maturity models*. <https://doi.org/10.13140/RG.2.2.28750.48967>.
25. International Organization for Standardization. (2020). *Automation systems and integration—Assessment on convergence of informatization and industrialization for industrial enterprises. Part 2: Maturity model and evaluation methodology (ISO 22549-2:2020)*. <https://www.iso.org/standard/>.
26. Aivaliotis, P., Georgoulas, K., & Makris, S. (2019). Methodology for enabling digital twin using advanced physics-based modelling in predictive maintenance. *Procedia CIRP*, 81, 417-422. <https://doi.org/10.1016/j.procir.2019.03.072>.
27. Hundt, J. M., Ochono, T. S., Senevirathne, D., Eneyew, D. D., Bitsuamlak, G. T., Capretz, M. A. M., & Grolinger, K. (2025). Data-driven and physics-based modeling approaches and their integration in building digital twins: A systematic review. *Journal of Building Engineering*, 114, 114214. <https://doi.org/10.1016/j.jobe.2025.114214>.
28. Wagner, M., Sousa, F., Klar, M., & Aurich, J. (2025). Theoretical analyses and performance comparison of physics-based, data-driven, and hybrid models for digital twin applications in manufacturing. *Research Square (Preprint)*. <https://doi.org/10.21203/rs.3.rs-7807793/v1>.
29. Owen, S., & James, A. (2025). Exploring the integration of model-based systems engineering and digital twins in complex system lifecycle management: efficacy, challenges, and potential outcomes. *Australian Journal of Multi-Disciplinary Engineering*, 1-12. <https://doi.org/10.1080/14488388.2025.2559551>.
30. Wei, Y., Hu, T., Yue, P. et al. Study on the construction theory of digital twin mechanism model for mechatronics equipment. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology* 131, 5383-5401 (2024). <https://doi.org/10.1007/s00170-022-09144-w>.
31. Lopez, Viviana & Akundi, Aditya. (2022). A Conceptual Model-based Systems Engineering (MBSE) approach to develop Digital Twins. *IEEE International Systems Conference* 1-5. <https://doi.org/10.1109/SysCon53536.2022.9773869>.
32. Liu, Z., Zheng, P., & Xu, X. (2021). Digitalisation and servitisation of machine tools in the era of Industry 4.0: a review. *International Journal of Production Research*, 59(14), 4304-4322.
33. Cabral, J. V. A., Rodriguez, E., & Alvares, A. (2023). Digital Twin Implementation for Machining Center Based on ISO 23247 Standard. *IEEE Latin America Transactions*, 21(5), 628-635.
34. Liu, C., Vengayil, H., Lu, Y., & Xu, X. (2019). A Cyber-Physical Machine Tools Platform using OPC UA and MTConnect. *Journal of Manufacturing Systems*, 51, 61-74. <https://doi.org/10.1016/j.jmsy.2019.04.006>.

35. Qi, Q., Tao, F., et al. (2021). Enabling technologies and tools for digital twin. *Journal of Manufacturing Systems*, 58, 3-21. <https://doi.org/10.1016/j.jmsy.2019.10.001>.
36. Singh, S., Weeber, M., & Birke, K.-P. (2021). Advancing digital twin implementation: A toolbox for modelling and simulation. *Procedia CIRP*, 99, 567-572. <https://doi.org/10.1016/j.procir.2021.03.078>.
37. Zhang, X., & Zhu, W. (2019). Application framework of digital twin-driven product smart manufacturing system: A case study of aeroengine blade manufacturing. *International Journal of Advanced Robotic Systems*, 16(5), 172988141988066. <https://doi.org/10.1177/1729881419880663>.

Дата першого надходження статті до видання: 26.02.2026
Дата прийняття статті до друку після рецензування: 19.03.2026

UDC 621.9:681.5:004.94

Serhii Sapon¹, Volodymyr Frolov², Vasyly Prykhodko³, Olesya Drachuk⁴

¹PhD in Technical Sciences, Associate Professor of the Department of Manufacturing Engineering National Technical University of Ukraine "Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute" (Kyiv, Ukraine)

E-mail: s.sapon@gmail.com. **ORCID:** <https://orcid.org/0000-0003-1082-6431>. **ResearcherID:** [IZE-2184-2023](https://orcid.org/0000-0003-1082-6431)

²PhD in Technical Sciences, Associate Professor of the Department of Manufacturing Engineering National Technical University of Ukraine "Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute" (Kyiv, Ukraine)

E-mail: v.k.frolov@gmail.com. **ORCID:** <https://orcid.org/0000-0002-3697-286X>. **ResearcherID:** [ACH-0071-2022](https://orcid.org/0000-0002-3697-286X)

³PhD in Technical Sciences, Associate Professor of the Department of Manufacturing Engineering National Technical University of Ukraine "Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute" (Kyiv, Ukraine)

E-mail: privas0718@gmail.com. **ORCID:** <https://orcid.org/0000-0003-1852-3777>. **ResearcherID:** [HDM-7277-2022](https://orcid.org/0000-0003-1852-3777)

⁴Assistant Lecturer Department of Automation and Non-Destructive Testing Systems National Technical University of Ukraine "Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute" (Kyiv, Ukraine)

E-mail: o.drachuk@kpi.ua. **ORCID:** <https://orcid.org/0000-0003-2541-0316>. **ResearcherID:** [ABT-2392-2022](https://orcid.org/0000-0003-2541-0316)

TOOLKIT FOR CREATING DIGITAL TWINS OF METAL-CUTTING MACHINE TOOLS

The article presents a systematic analysis of modern approaches, methodologies, and tools for creating digital twins of metal-cutting machine tools as a key element of cyber-physical production systems within the Smart Manufacturing paradigm. The relevance of transitioning from isolated technological systems to integrated intelligent environments, where continuous real-time synchronization between production equipment and its virtual representation is ensured, is substantiated. The essence of a digital twin is defined as a multi-physics, multi-scale, and data-oriented model with bidirectional information feedback.

A classification of modeling approaches is carried out, including physics-based (White-box), data-driven (Black-box), and hybrid (Grey-box) models. The advantages of the latter for ensuring high accuracy, adaptability, and computational efficiency are demonstrated. The role of multi-physics and multi-scale modeling, as well as the Model-Based Systems Engineering (MBSE) methodology, in creating digital twins of complex mechatronic systems is examined.

Architectural approaches to building digital twins are systematized in accordance with the ISO 23247 series of standards, including the levels of physical elements, communication, digital representation, and user services. The stages of creating a digital twin are described in detail: integration of sensor infrastructure, data processing and fusion, construction of mathematical models, implementation of virtual-real synchronization, and validation and self-calibration procedures.

Special attention is paid to the role of the Industrial Internet of Things (IIoT), edge and cloud computing technologies, as well as standardized data exchange protocols (OPC UA, MTConnect) in ensuring interoperability and scalability of solutions. Practical cases of using digital twins for optimizing machining processes, reducing vibrations, predicting wear, and implementing predictive maintenance of metal-cutting machine tools are analyzed.

The main implementation challenges are identified, including limited access to CNC data, the difficulty of integrating heterogeneous equipment, and the need to adapt models to changes in the state of machine subsystems throughout their life cycle. Prospects for development related to the creation of cognitive digital twins, the use of advanced artificial intelligence models and tools, and the formation of industrial metaverses that will provide a new level of autonomy and production efficiency are outlined.

Keywords: digital twin; metal-cutting machine tools; cyber-physical systems; Smart Manufacturing.

Fig.: 1. References: 37.