УДК 004.896:621.9.048

Ковалевський С.В., докт. техн. наук, професор
Донбаська державна машинобудівна академія, м. Краматорськ, kovalevskii61@gmail.com

ІНТЕЛЕКТУАЛЬНІ ЦИФРОВІ ДВІЙНИИКИ ЯК ДРАЙВЕР ІННОВАЦІЙНОГО РОЗВИТКУ МАШИНОБУДУВАННЯ

Історичний контекст промислових революцій демонструє, що якщо Industry 4.0 фокусувалася на кіберфізичних системах (CPS), зв'язності та ефективності, то Industry 5.0 ставить у центр людину, сталий розвиток та стійкість (resilience). Цифрові двійники в цій новій парадигмі розглядаються як інтелектуальні помічники, що підсилюють когнітивні можливості інженера, забезпечуючи перехід від автоматизації до справжньої колаборації людини та машини. Інноваційні процеси в сучасному машинобудуванні характеризуються високою складністю, оскільки вони одночасно охоплюють нові матеріали, складні конструкції та динамічні технології обробки. Традиційні CAD-рішення втрачають ефективність, коли мова йде про прогнозування поведінки системи під час різання на високих швидкостях або в умовах адитивного виробництва. Саме тому нове покоління інтелектуальних цифрових двійників (DT) базується на гібридному підході, де фундаментальні фізичні закономірності поєднуються з алгоритмами штучного інтелекту [1].

Узагальнена математична структура інтелектуального цифрового двійника може бути представлена як часова функція:

$$DT(t)=F(Mp, Ds, AI, \Delta t) ,$$

де: Mp – фізична модель процесу (mechanistic model), що базується на першопринципах (рівняння мас-балансу, енергії, кінематики);
Ds – потік сенсорних даних у реальному часі (sensor data), що забезпечує актуальність стану;
AI – модуль штучного інтелекту, що відповідає за розпізнавання аномалій та самонавчання на накопичених даних;
Δt – часовий інтервал оновлення, який у сучасних системах 2026 року скорочується до мілісекунд (менше 50 мс для критичних систем захисту).

Одним із найбільш перспективних напрямків є використання фізико-інформованих нейронних мереж (Physics-Informed Neural Networks – PINN). Традиційний глибокий розвиток AI часто критикують за "фізичну невігластво", коли модель видає математично вірні, але фізично неможливі результати. PINN вирішує цю проблему шляхом вбудовування фізичних законів (диференціальних рівнянь у частинних похідних) безпосередньо у функцію втрат нейронної мережі.

Переваги використання PINN у цифрових двійниках машинобудування:

1. Навчання на малих вибірках, оскільки фізика виступає як додатковий регуляризатор, а мережа потребує значно менше розмічених даних для навчання.
2. Гарантована фізична коректність, оскільки прогнози моделі завжди відповідають законам збереження енергії, маси та імпульсу, що критично для розрахунку міцності деталей.
3. Відсутність сітки (Mesh-free), оскільки, на відміну від класичного методу скінченних елементів (FEM), PINN не потребують ресурсомісткої генерації сітки для складних геометрій, що прискорює симуляцію в рази.

У 2025-2026 роках спостерігається стрімка конвергенція цифрових двійників з великими мовними моделями (LLM). Це перетворює DT з пасивних аналітичних дашбордів на інтелектуальних експертів, з якими персонал може взаємодіяти природною мовою.

Попри очевидний прогрес, впровадження інтелектуальних цифрових двійників стикається з низкою бар'єрів, які потребують системного вирішення:

1. Дані часто замкнені у "функціональних колодязях" – конструктори тримають CAD-дані, виробництво – дані SCADA, а сервіс – дані про ремонти в SAP. Створення цілісного двійника потребує руйнування цих бар'єрів та впровадження єдиних стандартів (ISO, Digital Twin Consortium).

2. Цифровий двійник, що містить повну інформацію про технологічний процес, є критично вразливою ціллю для промислового шпигунства та саботажу. Забезпечення безпеки каналів зв'язку та довіри до моделей є пріоритетом №1.
3. Створення цифрового двійника, який би адекватно відображав знос інструменту на мікрорівні або хімічні перетворення матеріалу, потребує величезних обчислювальних потужностей та складних алгоритмів, що здорожує проект.
4. Перехід до управління на основі даних вимагає зміни мислення від керівництва до лінійного персоналу. Багато підприємств побоюються втрати контролю на користь алгоритмів ШІ.

Розвиток інтелектуальних цифрових двійників до 2026 року визначався трьома ключовими трендами:

1. Виконувані цифрові двійники, якими є компактні, самодостатні моделі, які можуть бути розгорнуті безпосередньо на граничних пристроях або вбудованих контролерах верстатів. Вони не потребують постійного зв'язку з хмарою для виконання симуляцій, що забезпечує миттєву реакцію системи на зміну умов обробки.

2. Мультиагентні системи та Enterprise Twins, які спілкуються між собою. Так, цифровий двійник верстата буде домовлятися з двійником логістичного робота про підвезення заготовок, а двійник енергосистеми — оптимізувати графік роботи всього цеху залежно від тарифів на електроенергію в реальному часі.

3. Цифровим паспортом продукту, що відстежуватимуть історію навантажень на кожну критичну деталь, дозволяючи точно визначати момент, коли її потрібно не просто замінити, а відновити (remanufacture) або переробити, максимізуючи збереження цінності матеріалів.

Висновки та рекомендації.

Інтелектуальні цифрові двійники перетворюються на центральну нервову систему сучасного машинобудування. Вони є не просто засобом візуалізації, а фундаментальним інструментом генерації інновацій, який дозволяє підприємствам бути гнучкими, сталими та людиноцентричними в умовах Industry 5.0.

Для успішної реалізації потенціалу DT підприємствам машинобудівної галузі рекомендується:

1. Сфокусуватися на гібридних моделях, оскільки поєднання фізичних знань (PINN) та аналізу великих даних забезпечує надійність, необхідну для критичних промислових застосунків.
2. Інтегрувати LLM як експертні системи, що дозволить скоротити розрив між складними даними та прийняттям рішень персоналом, створюючи проактивне середовище управління.
3. Впроваджувати DT поетапно, починати з критичних вузлів (наприклад, шпинделя верстата або лінії зварювання), де ROI від предиктивного обслуговування є найбільш очевидним, з поступовим розширенням до рівня "підприємства-двійника".
4. Інвестувати в людський капітал, оскільки технологія є ефективною лише тоді, коли персонал володіє навичками інтерпретації результатів моделювання та довіряє підказкам інтелектуальних систем.

Завдяки синергії граничних обчислень, штучного інтелекту та людиноцентричного підходу, цифрові двійники стають не просто відображенням сьогодення, а справжнім оракулом майбутнього для промислового сектору, забезпечуючи стійкий розвиток у світі, що постійно змінюється. Використання таких систем дозволяє скоротити шлях від ідеї до готового продукту, мінімізуючи ризики та максимізуючи цінність для суспільства.

Список посилань

1. Tripicchio, P., Satler, M., & Alberto Avizzano, C. (2026). Artificial Intelligence and Digital Twins Applications in Industry 4.0 and 5.0. In Industry 4.0 - Transforming the Future Beyond Manufacturing - Volume 1, Digital Technologies and Smart Industrial Systems [Working Title]. IntechOpen. https://doi.org/10.5772/intechopen.1013146 .