

**ФІЛІПОВА МАРИНА**Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»  
<https://orcid.org/0000-0003-4910-3249>  
e-mail: [m.filippova@kpi.ua](mailto:m.filippova@kpi.ua)**ДЕМЧЕНКО МАРІЯ**Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»  
<https://orcid.org/0000-0003-0436-1092>  
e-mail: [dmariia@gmail.com](mailto:dmariia@gmail.com)**ФІЛІПОВ ОЛЕКСІЙ**Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»  
e-mail: [filippovalexv@gmail.com](mailto:filippovalexv@gmail.com)**ЗАЄЦЬ СЕРГІЙ**Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»  
<https://orcid.org/0000-0002-9954-1434>  
e-mail: [zssvp0204@gmail.com](mailto:zssvp0204@gmail.com)

## ВИКОРИСТАННЯ ЦИФРОВОГО ДВІЙНИКА ДЛЯ СКЛАДАЛЬНОГО ВИРОБНИЦТВА

Одним з сучасних підходів планування виробництва є застосування технології цифрового двійника, яка направлена на поєднання інформації від реального фізичного об'єкту та його віртуальної копії. Об'єднання цієї інформації та її синхронізація дозволяють реалізувати виробничий процес з відстеженням в реальному часі поточного стану виробу і виробництва в цілому. Використання можливостей сучасних комп'ютерних технологій та технологій створення цифрового двійника дозволяє оцінити технологічного процесу виробництва та його недоліки ще на етапі створення. Цифровий двійник фізичного виробничого процесу дає можливість своєчасно перевіряти ефективність конструкції, уникнути дорогої фізичної реконфігурації, досягти максимальної ефективності в скорочені терміни та скоротити витрати на введення в експлуатацію, за рахунок оптимізації. Побудована таким чином модель технологічного процесу складання відображає всі складові процеси та послідовності. Основою для реалізації цифрового двійника виробництва є модель самого виробу, яка вступає складовою частиною і базою всієї цифрової моделі. Оцінка складального виробу такого як об'єктив, його складових елементів та послідовності їх складання, дозволила сформувати опис цифрової моделі складання виробу. Мова опису моделі основана на наборах типів відношень деталей, складальних одиниць виробу та обмежень, які на них накладаються в рамках даної збірки. Такий аналітичний запис складових елементів виробу відображає технологічний процес складання виробу та представляє собою модель технологічної послідовності складання. Запропонований мовний опису виробу та цифровий двійник конструкції дозволяють формалізувати процес тривимірного складання при проектуванні конструкції складальних одиниць та виробів і виконати моделювання їх процесу складання на етапі конструкторського проектування.

Ключові слова: складання, цифровий двійник, розумне виробництво.

FILIPPOVA MARYNA, DEMCHENKO MARIYA, FILIPPOV OLEKSII, ZAIETS SERHII  
National Technical University of Ukraine "Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute"

### USE OF DIGITAL DOUBLE FOR COMPONENT MANUFACTURING

One of the contemporary approaches to production planning involves the application of digital twins technology, which aims to combine information from a real physical object and its virtual counterpart. The integration and synchronization of this information enable the realization of the manufacturing process with real-time tracking of the current state of the product and production. Utilizing the capabilities of modern computer technologies and digital twins creation technology allows for the assessment of the manufacturing process and its shortcomings even at the creation stage. The digital twins of the physical production process enable timely evaluation of design efficiency, avoidance of costly physical reconfigurations, attainment of maximum efficiency, shortened timelines, and reduced implementation costs through optimization. The model of the assembly process constructed in this way reflects the essential components and sequences. The foundation for implementing the digital twins of production is the model of the product itself, which serves as an integral part and basis of the entire digital model. Assessing the assembly of such a product objectively, its constituent elements, and the sequence of their assembly, allowed for the formulation of a description of the digital model of product assembly. The language used to describe the model is based on sets of relation types between components, assembly units of the product, and the constraints imposed on them within the given assembly. Such analytical notation of product components reflects the assembly process and constitutes a model of the technological assembly sequence. The proposed linguistic description of the product and the digital twins of the design enable the formalization of the three-dimensional assembly process during the design of assembly units and products, allowing for the modeling of their assembly process at the stage of design engineering.

Keywords: assembly, digital twins, smart manufacturing.

### Постановка проблеми

В сучасному світі, завдяки розвитку ІТ-технологій з'являється можливість збільшення ефективності традиційних виробничих комплектів та розширення їх можливостей, що дозволяє досягнути кращого рівня продукції, яка випускається. З використанням концепції цифрового виробництва, за допомогою сучасних ІТ-технологій, можна створювати цифрові копії як окремих частин об'єктів керування у виробництві так і виробництва в цілому. Це може бути як деталь, складальна одиниця, виробів, технологічний процес, кожна з яких буде описувати одну з властивостей об'єкту, а в цілому складуть повний опис об'єкта. Цифрове

представлення фізичної процедури або продукту прийнято називати цифровим двійником (ЦД). Використання такої моделі об'єкта дозволяє підвищити ефективність і зменшити витрати у виробничому процесі. Використовуючи ЦД, виробничі підприємства можуть досліджувати різні джерела даних про модель і зменшувати кількість помилок, щоб підвищити ефективність виробництва та скоротити час простою. Його доцільно застосовувати для візуалізації поточної ситуації, відстеження змін, розуміння та оптимізації продуктивності всіх задіяних елементів та ресурсів протягом аналізу. Крім того, зібрані дані з ЦД можуть забезпечити повний життєвий цикл продуктів і процесів для їх оптимізації, а саме: робочих процесів виробництва, управління ланцюжком поставок і управління якістю продукції.

### Аналіз останніх джерел

Виробництво стикається, зі зростаючими проблемами щодо забезпечення якості складання складних виробів, таких як об'єкти, оскільки зростає попит на підвищену якість, надійність і безпеку. Це вимагає ефективного управління відхиленнями на етапі складання виробу. Його відсутність може призвести до значних похибок у роботі виробу, збільшення вартості обслуговування та передчасного виходу з ладу [1]. Використання ЦД ефективно гарантує якість і точність складання виробу та все більше стає інноваційним методом контролю точності вимогам функціонального складання, і забезпечення продуктивності його виготовлення в цілому. Результат створення ЦД виробу, дозволяє не тільки оптимізувати виробництво, але й сприяти зниженню загальних витрат виготовлення.

Таке віртуальне представлення фізичної системи або технологічного процесу, дозволяє здійснювати моніторинг, аналіз та оптимізацію в режимі реального часу. У контексті розумного виробництва ЦД може бути використаний не тільки для оптимізації виробничого процесу, але і для прогнозування та запобігання відмовам обладнання, що в свою чергу підвищує ефективності та якості виробництва [2]. Цифрова модель забезпечує детальне та точне уявлення про фізичний об'єкт (складальний виріб), що включає в себе його поведінку, продуктивність і взаємодію з навколишнім середовищем. За допомогою аналізу даних з фізичного об'єкта, ЦД може надавати зворотний зв'язок у режимі реального часу, контролювати його продуктивність та виявляти потенційні проблеми до того, як вони виникнуть [3]. ЦД дозволяє оптимізувати роботу фізичної системи виробництва, шляхом моделювання її поведінки та визначення областей, її вдосконалення [4].

При створенні цифрового двійника, інженери та проєктувальники можуть проводити тестування розробленого виробу та вносити покращення, скорочуючи час та витрати, пов'язані з фізичним тестуванням та прототипуванням [5]. Цифрові двійники в цифровому виробництві створюються шляхом об'єднання даних у реальному часі з фізичних датчиків з моделями автоматизованого проєктування (CAD) та іншими інструментами моделювання (CAM, CAE та інші). Це дозволяє відстежувати та аналізувати продуктивність обладнання та процесів у режимі реального часу, виявляти потенційні проблеми до їх виникнення та приймати рішення на основі даних для оптимізації виробництва [6]. Створюючи цифровий двійник об'єкта, інженери можуть аналізувати її продуктивність за різних умов, таких як зміни температури, тиску, інтенсивності світлового випромінювання, навантаження тощо. Це дозволяє передбачити, як даний виріб працюватиме в реальних ситуаціях, визначити потенційні проблеми або порушення та оптимізувати її конструкцію для покращення її продуктивності [7].

Перевагою використання ЦД для організації розумного виробництва є те, що він дозволяє:

1. Контролювати виробничі процеси в режимі реального часу.
2. Швидко ідентифікувати та вирішувати проблеми.
3. Тестувати та оптимізувати продукти та процеси перед їх фізичним виробництвом, з заощадженням часу та ресурсів. [2].
4. Проводити перевірку ефективності виробничого процесу перед виготовленням компонентів.
5. Проводити моніторингу продуктивності окремих машин або виробничих ліній, за для виявлення потенційних проблем та оптимізації роботи системи, щоб мінімізувати час простою та максимізувати продуктивність.
6. Проводити моделювання та тестування нових виробничих процесів або обладнання до впровадження їх фізичну систему, що зменшує ризик дорогих помилок або збоїв [3].
7. Шляхом покращення моделі та продуктивності системи, створювати нові комерційні перспективи [5].
8. Тестувати та застосовувати безперервні вдосконалення на будь-якому етапі виробничого процесу в цифровому середовищі.
9. Моделювати цілих виробничих ліній, для визначення більш ефективних способів підвищення продуктивності часткового виробничого процесу [5].

Зростання технологічності промислових процесів потребує запровадження розумного виробництва (РВ), що розуміється як виробничий підхід, який включає передові технології, такі як штучний інтелект, інтернет речей (IoT), робототехніка та аналітика великих даних. Складність виробничого середовища зростає, а завдання, пов'язані з виробництвом, стають все більш індивідуальними [8]. Як наслідок, виробнича система вимагає високого рівня когнітивних та навчальних навичок з точки зору аналізу та модифікації виробничого процесу. Розумне виробництво також надає можливості для кастомізації та персоналізації продукції, а також управління ланцюгом поставок у режимі реального часу. Це дозволяє виробникам швидко реагувати на зміни попиту, ринкових тенденцій і переваг споживачів, а також створювати продукти, адаптовані до

індивідуальних потреб клієнтів [9]. Таке виробництво передбачає використання підключених пристроїв, автоматичної роботи, передачі та обробки даних у режимі реального часу [10]. Також воно спрямоване на створення більш гнучкого та оперативного виробничого середовища, яке може швидко адаптуватися до мінливих вимог ринку та надавати високоякісну продукцію за нижчими цінами [11]. Таким чином, РВ використовує та інтегрує цифрові інструменти та дані програмного забезпечення протягом усього життєвого циклу продукту. У РВ процесі кожен ресурс оцифровується для того, щоб бути використаним і модифікованим у віртуальному середовищі [10]. Впровадження РВ як для нового технологічного процесу так і вже фізично реалізованого дозволяє підвищити ефективність про трьом напрямом: економічному, промислового та організаційному (див. рис. 1).



Рис.1. Переваги запровадження РВ

Моніторинг стану, моделювання та візуалізація є основними складовими елементами сучасного використання ЦД у РВ. Обладнання та верстати постійно контролюються за допомогою IoT для моніторингу стану, і їх поточний стан може бути оцінений шляхом запиту її ЦД [4]. Також, ЦД фізичних активів верстатів та обладнання генеруються з метою аналізу та модифікації механізму та процесу машин у частковому виробництві [10]. ЦД виробу, систем та обладнання розробляються для моделювання з метою імітації реальних, як віртуальна копія фізичного об'єкта, яку можна використовувати для моделювання та аналізу його поведінки в режимі реального часу (рис. 2).

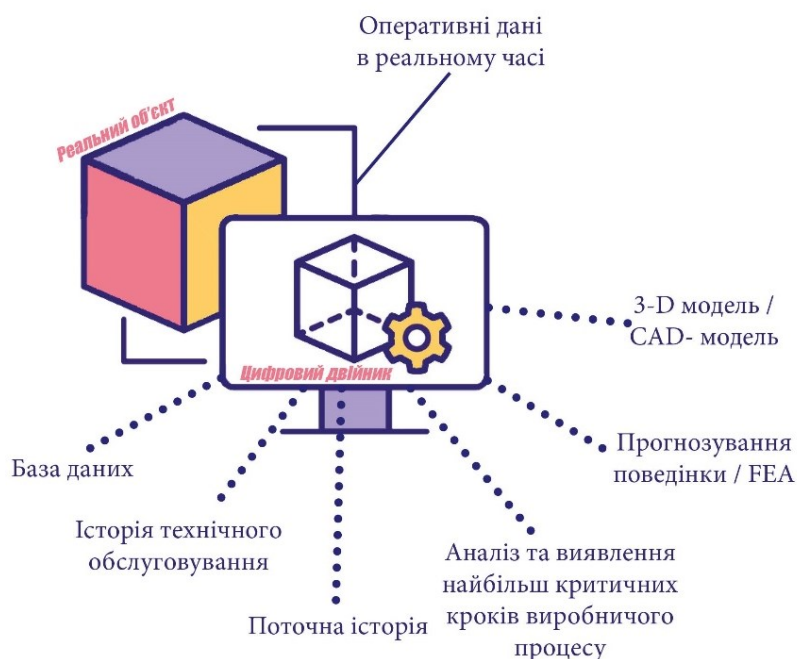


Рис. 2. Взаємодія ЦД та реального об'єкта

У разі імітаційного моделювання збірки ЦД може бути використаний для моделювання процесу складання та виявлення потенційних проблем ще на етапі проектування виробництва. Це корисно для створення прототипів з метою розробки та аналізу нових ідей та концепцій у реалізації їх нових пристроїв та методах [1]. ЦД виробничо-складальної системи може візуалізувати весь процес і дозволяє конструкторам складальних ліній визначити тонкощі процесу складання та відстежити весь технологічний процес до етапу експлуатації. Для складаних виробничих процесів застосування ЦД дозволяє проводити аналіз продуктивності, гнучкості та верифікація для прийняття рішень.

Загалом, моделювання складання за допомогою цифрового двійника є потужним інструментом для оптимізації виробничого процесу та підвищення якості продукції. Це може допомогти зменшити витрати, підвищити ефективність і гарантувати, що продукція виготовляється за найвищими стандартами. Тому метою даної роботи є створення цифрового двійника складального виробу для умов РВ.

### Виклад основного матеріалу

На початку розроблення цифрового двійника складальної одиниці необхідно мати уявлення про загальну структуру інформації, яку використовують при проектуванні, та вигляд моделей, що описують конструкцію цих виробів [12].

Опис моделей елементів конструкції елементів конструкції складальних одиниць, повинен бути достатньою спільним та здатним до представлення інформації. В його основу може бути покладено поняття реляційної системи.

Вважається, що будь-яка інформаційна структура є реляційною системою  $W = \langle X, R \rangle$ , де  $X$  - множина об'єктів конструкції виробу,  $R$  - предикат, визначений на множині  $X$ , що задає властивості або взаємозв'язки об'єктів. Ця модель  $W$  може бути визначена, як набір типів відношень  $R_i$ , де  $i=1,2,\dots,n$  - кількість наборів типів відношень, під якими розуміють множину відношень даного ступеню на можливих носіях (деталі, складальні одиниці, тощо), що задовольняє визначеним обмеженням. Такими обмеженнями тут є формули мови розрахунку предикатів. Основним елементом моделі опису елементу конструкції є набір даних, який складається з власника набору (ім'я елементів конструкції) та одного або декількох членів набору (тип елементу, поверхня зв'язку, тощо). Як власник, так і кожен з членів набору представляють собою запис, який складається з ім'ям запису, що його ідентифікує, та полів запису, що визначають властивості об'єкту. Кожен такий набір даних має власне ім'я [12].

На основі запропонованого визначення моделей представлення даних розглянемо моделі опису елементів конструкції виробів.

Нехай  $X$  - кінцева множина базових понять графічних образів, елементами якого є структуровані поняття підмножини, а саме: елемент конструкції -  $E$ ; тип конструкції -  $T$ ; поверхня його зв'язку -  $P$ . В той же час поверхні зв'язку класифіковані як структурні види: з'єднання -  $Z$ ; базування -  $B$ ; спряження -  $C$ , та конструктивно-технологічні види контролю -  $K$ . Також, визначимо універсальну множину  $R$ , що складається з усіх можливих відношень для мови графічних образів елементів конструкції складальних одиниць, які використовуються при конструюванні у тривимірному вигляді, та множину  $I$ , яка є словником імен елементів конструкції, що утворює елементарні графічні конструктивно-технологічні деталі. Більшість поверхонь у елементах конструкції можуть бути отримані переміщенням первісної у просторі по визначеному закону. Так, для класу плоских поверхонь у якості первісної буде пряма лінія, а для поверхонь обертання – коло.

Нехай множина  $P$  є сукупністю рішень, що складається з кінцевого числа допустимих рішень. Тоді множини  $X$  та  $P$  залежать від розв'язуваної технологічної задачі. Множини  $I$  та  $R$  можна вважати універсальними та незалежними від конкретної задачі. Сукупність  $X, P, I, R$  створює основу мови конструювання, яка є базовою, а її елементами є базові поняття, відношення, імена та базові рішення [12].

Елементи, що  $E_j \in E$ , можуть знаходитися у відношеннях відносно один до одного, які описуються елементами множини  $R$ , наприклад  $E_j, R_i, E_s$ , та у відношенні з елементами множини  $I_k \in I$ , наприклад  $E_j, R_i, I_k$ .

Відношення  $ERE, ERI, ERP$  можуть бути використанні для створення узагальнених понять  $E_N = ERE, E_N = ERI$ , де  $N$  - індекс нового, узагальненого поняття, яке може міститися у множині  $E$  для наступних проектів. Аналогічно процесу відтворення узагальнених понять на множині базових понять можна побудувати процес створення узагальнених відношень з множини базових відношень. Узагальнені відношення отримують шляхом заміни композиції відношень новим відношенням. Для цього необхідно, щоб всі відношення, які входять до конструкції, що зображена на рисунку 3, відповідали одним і тим самим поняттям або іменам.

Графічним образам елементів конструкції та їх сукупності можна дати інтерпретацію у вигляді графу  $G(V,R)$ , вершинам якого відповідають поняття та імена  $V = X \cup I$ , а дугам – відношення  $R$ , що існують між ними. Вершини та дуги графу визначені (таблиця 1) через синтез конструкції виробу та згідно вище наведеної методики.

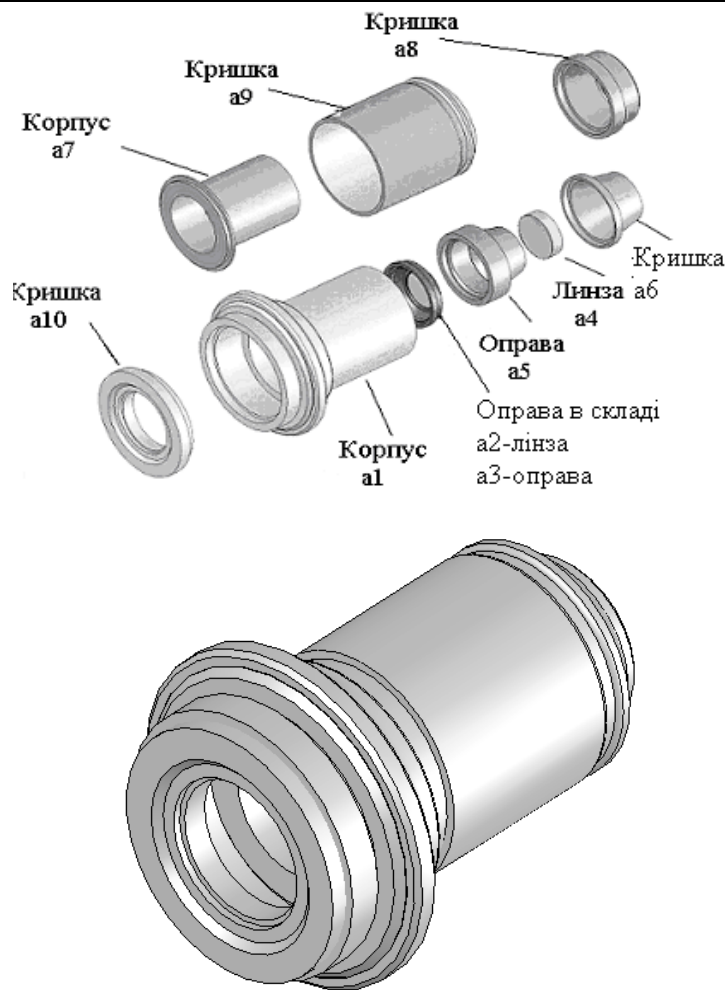


Рис. 3. 3D модель об'єктива та його складальних одиниць

Таблиця 1

**Визначення елементів графа конструкції мікрооб'єктиву**

Вершини графу	Дуги графу
Е – елемент; А – ім'я деталі; Т – тип поверхні; Л – тип поверхні, що з'єднує Н – несучий тип поверхні; П – поверхня зв'язку; С – поверхня зв'язку ; В – поверхня зв'язку базування; З – поверхня зв'язку з'єднання	R1 – мати ім'я; R3 – стикатися; R4 – бути зверху; R7 – мати; R8 – бути всередині;

Користуючись введеними позначеннями атрибутів графу, опишемо кожний елемент збірки відповідно до конструкції об'єктиву:

- E1=((ER1a3)R7(TR1H)R7(PIR13)) – визначення поняття оправа;
- E2=((ER1a2)R7(TR1H)R7(PIR13)) – визначення поняття лінза;
- E3=((ER1a4)R7(TR1H)R7(PIR1C)) – визначення поняття лінза;
- E4=((ER1a5)R7(TR1L)R7(PIR13)) – визначення поняття оправа;
- E5=((ER1a7)R7(TR1H)R7(PIR13)) – визначення поняття корпус;
- E6=((ER1a6)R7(TR1L)R7(PIR1C)) – визначення поняття кришка;
- E7=((ER1a8)R7(TR1L)R7(PIR1C)) – визначення поняття кришка;
- E8=((ER1a1)R7(TR1L)R7(PIR1B)) – визначення поняття корпус;
- E9=((ER1a9)R7(TR1H)R7(PIR1C)) – визначення поняття кришка;
- E10=((ER1a10)R7(TR1H)R7(PIR1C)) – визначення поняття кришка;
- E11=((ER1a11)R4E1R3E2) – визначення поняття оправа в складі;
- E12=((ER1a12)R7(PIR1C)R2E3R2E4R4E6R2E11) – визначення поняття кришка в складі;
- E13=((ER1a13)R7(PIR1C)R2E7R4E5R2E8R2E12) – визначення поняття корпус в складі;
- E14=((ER1a14)R7(PIR1C)R4E9R4E105R2E13) – визначення поняття мікрооб'єктив.

Аналітичний опис елементів конструкцій складеного виробу повторює технологічний процес складання виробу та дає повну та оперативну інформацію про перебіг процесу його виготовлення. Кожна описана технологічна операція складання розташована на певному операційному рівні, що зумовлює черговість виконання операцій технологічного процесу.

Інсципування технологічних операцій процесу складання виробів дозволяє забезпечити синхронність при збірці окремих складальних одиниць, визначити черговість їх входження в основний процес та рівень, на якому виконується та чи інша технологічна операція.

### Висновки

Запропонована мова опису виробу та цифровий двійник конструкції дозволяють формалізувати процес тривимірного складання при проектуванні конструкцій складальних одиниць та виробів і виконати моделювання їх процесу складання на етапі конструкторського проектування.

Розроблений опис елементів цифрового двійника може використовуватись при створенні інтерфейсу автоматизованої системи проектування технологічних процесів складання виробів, що дозволяє моделювати процес складання виробу на екрані монітору та створювати у діалоговому режимі технологічну документацію у вигляді маршрутних та операційних карт. Що скоротить терміни впровадження нових виробів у виробництво та час, як на проектування технологічних процесів, так і планування виробництва.

Крім того, моделювання складання за допомогою ЦД знижує витрати та підвищує ефективність, виявляючи потенційні проблеми до того, як вони виникнуть у фізичному світі. Це також дозволяє скоротити час і ресурси, необхідні для фізичного створення прототипів і тестування, оскільки такий ЦД може бути використаний для тестування різних сценаріїв і визначення оптимального процесу складання.

### Література

1. Madni A.M. Digital Twin Technology in Model-Based Systems Engineering / Madni, A.M.; Madni, C.C.; Lucero, S.D. // *Systems*. – 2019. - Volume 7(1). DOI: <https://doi.org/10.3390/systems7010007>
2. Aheleroff S. Digital twin as a service (DTaaS) in industry 4.0: an architecture reference model / S. Aheleroff, X. Xu, R.Y. Zhong, Y. Lu // *Adv. Eng. Inf.* – 2021. - Volume 47(2). DOI: <https://doi.org/10.1016/j.aei.2020.101225>
3. Negri E. Field-synchronized digital twin framework for production scheduling with uncertainty / E. Negri, E. Negri, V. Pandhare, L. Cattaneo, J. Singh, M. Macchi, J. Lee // *J. Intell. Manuf.* – 2021. – Volume 32. - P. 1207–1228. - DOI: <https://doi.org/10.1007/s10845-020-01685-9>
4. Yan D. Digital twin-driven variant design of a 3C electronic product assembly line. / D. Yan, W. Sha, D. Wang // *Sci Rep.* – 2022. - Volume 12. - DOI: <https://doi.org/10.1038/s41598-022-07894-x>
5. Yao B. Digital twin-based multi-level task rescheduling for robotic assembly line / B. Yao, W. Xu, T. Shen // *Sci Rep.* – 2023. - Volume 13. - DOI: <https://doi.org/10.1038/s41598-023-28630-z>
6. Leng, J. W. et al. Digital twins-based remote semi-physical commissioning of flow-type smart manufacturing systems./ J. Leng, M. Zhou, Y. Xiao, H. Zhang, Q. Liu, W. Shen, Q. Su, L. Li // *J. Clean. Prod.* – 2021. - Volume 306. - DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2021.127278>
7. Tao, F., Zhang, H. & Zhang, C. Advancements and challenges of digital twins in industry / Tao, F., Zhang, H. & Zhang, C. // *Nat Comput Sci.* – 2024. - Volume 4. - P. 169–177. - DOI: <https://doi.org/10.1038/s43588-024-00603-w>
8. Проскурєнко Д.М. Автоматизоване планування послідовності складання / Д.М. Проскурєнко, О.В. Третяк, М.О. Демченко, М.В. Філіппова // *Енергетика і автоматика.* – 2021. - №5. - С. 28-34. - DOI: <http://doi.org/10.31548/energiya2021.05.028>
9. Mahmoodian, M. Development of Digital Twin for Intelligent Maintenance of Civil Infrastructure/ M. Mahmoodian, F. Shahrivar, S. Setunge, S. Mazaheri // *Sustainability.* – 2022. - Volume 14. - DOI: <https://doi.org/10.3390/su14148664>
10. Ricondo, I. A digital twin framework for the simulation and optimization of production systems / I. Ricondo, A. Porto, M. Ugarte // *Procedia CIRP.* – 2021. Volume 104. – P. 762–767. - DOI: <https://doi.org/10.1016/j.procir.2021.11.128>
11. Borangiu T. Embedded Digital Twin for ARTI-Type Control of Semi-continuous Production Processes / T. Borangiu, E. Oltean, S. Răileanu, F. Anton, S. Anton, I. Iacob // *Service Oriented, Holonic and Multi-agent Manufacturing Systems for Industry of the Future.* – 2019. - Volume 853. - DOI: [https://doi.org/10.1007/978-3-030-27477-1\\_9](https://doi.org/10.1007/978-3-030-27477-1_9)
12. Філіппова М.В. Формалізація задачі створення конструкції оптико-механічних виробів на етапі структурного проектування / М.В. Філіппова, С.П. Вислоух // *Вісник Національного технічного університету України “Київський політехнічний інститут”.* Приладобудування. – 2005. – Вип. 30. - С. 109-115.

### References

1. Madni A.M. Digital Twin Technology in Model-Based Systems Engineering / Madni, A.M.; Madni, C.C.; Lucero, S.D. // *Systems*. – 2019. - Volume 7(1). DOI: <https://doi.org/10.3390/systems7010007>
2. Aheleroff S. Digital twin as a service (DTaaS) in industry 4.0: an architecture reference model / S. Aheleroff, X. Xu, R.Y.

Zhong, Y. Lu // *Adv. Eng. Inf.* – 2021. – Volume 47(2). DOI: <https://doi.org/10.1016/j.aei.2020.101225>

3. Negri E. Field-synchronized digital twin framework for production scheduling with uncertainty / E. Negri, E. Negri, V. Pandhare, L. Cattaneo, J. Singh, M. Macchi, J. Lee // *J. Intell. Manuf.* – 2021. – Volume 32. – P. 1207–1228. – DOI: <https://doi.org/10.1007/s10845-020-01685-9>

4. Yan D. Digital twin-driven variant design of a 3C electronic product assembly line. / D. Yan, W. Sha, D. Wang // *Sci Rep.* – 2022. – Volume 12. – DOI: <https://doi.org/10.1038/s41598-022-07894-x>

5. Yao B. Digital twin-based multi-level task rescheduling for robotic assembly line / B. Yao, , W. Xu, T. Shen // *Sci Rep.* – 2023. – Volume 13. – DOI: <https://doi.org/10.1038/s41598-023-28630-z>

6. Leng, J. W. et al. Digital twins-based remote semi-physical commissioning of flow-type smart manufacturing systems./ J. Leng, M. Zhou, Y. Xiao, H. Zhang, Q. Liu, W. Shen, Q. Su, L. Li // *J. Clean. Prod.* – 2021. – Volume 306. – DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2021.127278>

7. Tao, F., Zhang, H. & Zhang, C. Advancements and challenges of digital twins in industry / Tao, F., Zhang, H. & Zhang, C. // *Nat Comput Sci.* – 2024. – Volume 4. – P. 169–177. – DOI: <https://doi.org/10.1038/s43588-024-00603-w>

8. Proskurenko D.M. Avtomatyzovane planuvannya poslidovnosti skladannya / D.M. Proskurenko, O.V. Tretiak, M.O. Demchenko, M.V. Filippova // *Enerhetyka i avtomatyka.* – 2021. – №5. – S. 28-34. – DOI: <http://doi.org/10.31548/energiya2021.05.028>

9. Mahmoodian, M. Development of Digital Twin for Intelligent Maintenance of Civil Infrastructure/ M. Mahmoodian, F. Shahriver, S. Setunge, S. Mazaheri // *Sustainabili.* – 2022. – Volume 14. – DOI: <https://doi.org/10.3390/su14148664>

10. Ricondo, I. A digital twin framework for the simulation and optimization of production systems / I. Ricondo, A. Porto, M. Ugarte // *Procedia CIRP.* – 2021. Volume 104. – P. 762–767. – DOI: <https://doi.org/10.1016/j.procir.2021.11.128>

11. Borangiu T. Embedded Digital Twin for ARTI-Type Control of Semi-continuous Production Processes / T. Borangiu, E. Oltean, S. Răileanu, F. Anton, S. Anton, I. Iacob // *Service Oriented, Holonic and Multi-agent Manufacturing Systems for Industry of the Future.* – 2019. – Volume 853. – DOI: [https://doi.org/10.1007/978-3-030-27477-1\\_9](https://doi.org/10.1007/978-3-030-27477-1_9)

12. Filippova M.V. Formalizatsiia zadachi stvorennia konstruktсии optyko-mekhanichnykh vyrobiv na etapi strukturnoho proektuvannya / M.V. Filippova, S.P. Vysloukh // *Visnyk Natsionalnoho tekhnichnoho universytetu Ukrainy “Kyivskiy politekhnichnyi instytut”. Pryladobuduvannya.* – 2005. – Vyp. 30. C. 109-115.