

**Д. О. ДМИТРІЄВ**професор кафедри автоматизації, робототехніки і мехатроніки  
Херсонський національний технічний університет  
ORCID: 0000-0001-8200-351X**А. М. КИРИЧЕНКО**професор кафедри машинобудування, мехатроніки і робототехніки  
Центральноукраїнський національний технічний університет  
ORCID: 0000-0002-4335-9588**М. Ф. КУЗМІЧОВ**аспірант кафедри автоматизації, робототехніки і мехатроніки  
Херсонський національний технічний університет  
ORCID: 0009-0003-1501-6865

## ЦИФРОВІ ДВІЙНИКИ СМАРТПРОМИСЛОВОСТІ В МАШИНОБУДІВНИХ ТЕХНОЛОГІЯХ І ІНЖЕНЕРНІЙ ОСВІТІ

У статті проведено теоретичні дослідження модельного інструментарію, що застосовується в інженерії та підготовці фахівців у вигляді програмних комплексів для опису в промисловому машинобудівному комплексі сучасних технологічних процесів як цифрових двійників. Наведено аналіз імітаційної моделі окремої технологічної ділянки реального Українського підприємства з виробництва дерев'яних вікон, за допомогою системи *Product Lifecycle Management Tecnomatix Plant Simulation*, проаналізовано останні дослідження що застосовують дане програмне забезпечення. Запропоновано заходи для модернізації підприємства, у вигляді, структурної перебудови логістичних процесів в технологічній ділячці та впровадження на окремих операціях верстатів з числовим програмним керуванням замість існуючого обладнання на підприємстві. В результаті параметричного аналізу роботи модернізованої технологічної лінії визначено технічні заходи для підвищення ефективності роботи виробництва.

Детально розглянуто вплив даних про завантаженість верстатів на основі їх технічних характеристик та виконано порівняльний аналіз ключових показників ефективності за стандартом ISO 22400. Зокрема виконано оцінку коефіцієнту браку після структурних і логістичних перебудов віртуальної технологічної лінії виробництва дерев'яних вікон. В результаті імітаційного моделювання отримано значущу кількість статистично оброблених показань віртуальних датчиків, для створення можливості побудови і додавання до архітектури моделі цифрових двійників промислового комплексу нейромережєвих моделей. Зроблено технічні пропозиції на рівні модельних рішень та візуалізовано роботу технологічної ділячці для симуляцій, оцінки і прийняття інженерних рішень для застосування в *Product Lifecycle Management* системі *Tecnomatix Plant Simulation*. Окремі отримані дані імітаційного моделювання виробничих процесів, послідовність процедур моделювання, прийоми оцінки та візуалізації прийнято для застосування у підготовці фахівців магістерської освітньої програми «Смартпромисловість» Херсонського національного технічного університету та бакалаврської освітньої програми «Інжиніринг технологій, мехатроніка та 3D друк» в Центральноукраїнському національному технічному університеті в рамках спеціальності G9 «Прикладна механіка».

**Ключові слова:** цифрові двійники, моделювання, ключові показники ефективності, коефіцієнт браку, виробництво.

**D. O. DMYTRIIEV**Professor at the Department of Automation, Robotics and Mechatronics  
Kherson National Technical University  
ORCID: 0000-0001-8200-351X**A. M. KYRYCHENKO**Professor at the Department of Mechanical Engineering, Mechatronics and Robotics  
Central Ukrainian National Technical University  
ORCID: 0000-0002-4335-9588

M. F. KUZMICHOV

Postgraduate Student at the Department of Automation, Robotics and Mechatronics

Kherson National Technical University

ORCID: 0009-0003-1501-6865

## TECHNICAL AND TECHNOLOGICAL SOLUTIONS IN THE COMPONENT DESIGN OF METAL ALLOY 3D-PRINTING EQUIPMENT

*The article presents theoretical research on model-based tools used in engineering practice and specialist training in the form of software systems for describing modern technological processes in the industrial machine-building sector as digital twins. An analysis of a simulation model of a specific technological section of a real Ukrainian enterprise engaged in the production of wooden windows is conducted using the Product Lifecycle Management (PLM) system Tecnomatix Plant Simulation, along with a review of recent studies applying this software.*

*Measures for enterprise modernization are proposed, including structural reorganization of logistics processes within the technological section and the implementation of computer numerical control (CNC) machines for selected operations to replace existing equipment. As a result of a parametric analysis of the operation of the modernized technological line, technical measures aimed at improving production efficiency are identified.*

*The impact of machine utilization data based on technical characteristics is analyzed in detail, and a comparative analysis of key performance indicators in accordance with the ISO 22400 standard is performed. In particular, the defect rate coefficient after structural and logistical reconfiguration of the virtual technological line for wooden window production is evaluated. Simulation modeling produced a significant amount of statistically processed virtual sensor data, enabling the development and integration of neural network models into the digital twin architecture of the industrial system.*

*Technical proposals at the level of model-based solutions are formulated, and the operation of the technological section is visualized to support simulation, evaluation, and engineering decision-making within the PLM system Tecnomatix Plant Simulation. Selected results of simulation modeling of production processes, the sequence of modeling procedures, as well as methods for evaluation and visualization are adopted for use in the training of specialists within the master's educational program "Smart Industry" at Kherson National Technical University and the bachelor's educational program "Engineering Technologies, Mechatronics, and 3D Printing" at Central Ukrainian National Technical University under the specialty G9 "Applied Mechanics."*

**Key words:** digital twins, simulation, key performance indicators, defect rate, manufacturing.

### Постановка проблеми

Сучасна промисловість вже широко використовує науково і практично обумовлені передумови для тісної інтеграції з інструментами CAD/CAM/CAE однак це потребує достовірних даних для моделювання та оптимізації виробничих процесів, тому суттєвим потенціалом здатним надати проривний розвиток машинобудівній галузі є можливість побудови цифрових двійників технологічного, верстатного і роботизованого обладнання, що входять до технологічних та промислових комплексів на всіх ієрархічних рівнях виробничих систем. Такі дослідження узгоджуються з національними пріоритетами цифрового розвитку, інноваційної діяльності та промислової модернізації як ключовий елемент цифрової трансформації машинобудування, що визначено: Розпорядженням Кабінету Міністрів України № 1467-р від 17.11.2021 р. «Про схвалення Стратегії здійснення цифрового розвитку на період до 2030 року» (стратегічні напрями цифровізації промисловості, запровадження інтелектуальних виробничих систем і підвищення ефективності управління на основі даних); Постановою КМУ № 1317 від 01.12.2023 р. «Деякі питання цифровізації діяльності державних органів» (вимоги до цифрової інфраструктури, інтероперабельності та захисту даних, що безпосередньо враховується під час розроблення архітектури цифрових двійників промислових систем); Стратегією цифрового розвитку та інновацій «WINWIN 2030», затвердженою Урядом України у 2025 р. (розробка цифрових двійників машинобудівних підприємств є складовою розвитку штучного інтелекту та індустріальної аналітики як створення національних технологічних центрів досконалості). Цифрові двійники у інженерному моделюванні традиційно містять CAD/CAE-модель, що постійно отримує дані від сенсорів (наприклад, температурних, тензометричних тощо) та оновлює свій стан. Така інтеграція дозволяє не лише відображати поточний стан системи, а й прогнозувати майбутні зміни, аналізувати «що-якщо» сценарії та тестувати різні режими роботи без ризику для обладнання. Тому одним і досить впливовим аспектом смартизації машинобудування полягатиме у створенні віртуального відображення фізичних процесів як «цифрового двійника» (Digital Twin) на підприємстві з можливістю аналізу, оптимізації та прогнозування подій включаючи моделювання виробничих систем як процес використання спеціального комплексу програмного забезпечення для створення комп'ютерних абстракцій реальних виробничих процесів з метою їх аналізу та отримання важливих даних.

### Аналіз останніх досліджень і публікацій

Створення цифрових двійників саме в машинобудівній галузі ускладнюється наявністю не лише інформаційних потоків, а і явищ фізична сутність яких вимагає специфічних міждисциплінарних досліджень з різних феноменологічних і методологічних напрямів таких як процеси автоматизованого проектування, процеси різання

і механічної обробки, інженерія поверхні і трибологія, теорія автоматизованого управління, віртуальна і доповнена реальність і ін. [5]. На сьогодні дану потребу можна забезпечити виключно дотримуючись розвитку машинобудівних технологій згідно принципів Industry 4.0/5.0 [1–4].

Поняття, сутність і тенденції розвитку цифрових двійників в сфері машинобудування висвітлено в роботах [7; 8]. Ідея створення і перспективність використання цифрових двійників металорізальних верстатів висвітлена в роботах [6, 7]. Виокремлення недосліджених частин загальної проблеми доводиться тим, що попри достатню кількість праць, присвячених розробкам цифрових двійників в техніці, робіт, у яких було б акцентовано увагу на розробці їх в технологічних процесах машинобудуванні дуже мало [8, 9]. В закордонних працях переважно приділено увагу здебільшого проблемам та питанням перспективності створення цифрових двійників технологічних систем загалом. Роботи українських вчених, в яких би висвітлювалася концепція створення цифрових двійників тільки починаються [10]. Пропонується застосувати інструменти модельно-орієнтованого системного інжинірингу.

#### Формулювання мети дослідження

Метою даного дослідження є розробка підходів і виокремлення сфер застосування в інженерії та підготовці фахівців, включаючи вищу світу програмних комплексів здатних адаптовано описати в промисловому машинобудівному комплексі сучасні технологічні процеси як цифрові двійники, застосовуючи мультифізичне моделювання, де враховуються як різні технологічні процеси, їх взаємний вплив та структурна оптимізація машинобудівного виробництва на рівні встановлених стандартами ключових показників ефективності.

#### Викладення основного матеріалу дослідження

Україна прагне до стандартів ЄС включаючи машинобудівне виробництво, де принципи Industry 4.0 є стратегічними для розвинених в промисловому і соціальному плані країн. Машинобудівне виробництво за Європейськими стандартами тісно пов'язане з інтелектуалізацією соціуму, розвитком STEM освіти, та високих стандартів життя людини її безпекового середовища, відповідність умовам сталого розвитку суспільства. Машинобудування є серцевиною реального сектору економіки із значною зайнятістю населення, що разом з високою кваліфікаційною підготовкою має вузьку спеціалізацію в промисловості. Тому необхідні впровадження нових освітніх програм в технічних університетах, які базуються на сучасних реалізованих дослідженнях реальних виробництв, що забезпечить стабільність зайнятості молоді України залучивши до високоінтелектуальних технологій в сфері смартіндустрії. Тому починаючи з 2023 року в Херсонському національному технічному університеті запроваджено перспективну магістерську освітню програму «Смартпромисловість» та в Центральноукраїнському національному технічному університеті бакалаврську освітню програму «Інжиніринг технологій, мехатроніка та 3D друк» в рамках спеціальності G9 «Прикладна механіка». Основною науковою складовою та інструментом реалізації смарттехнологій в даних освітніх програмах є побудова і дослідження цифрового двійника окремого підприємства певної галузі на основі імітаційної моделі в PLM системі Tecnomatix Plant Simulation компанії Siemens [11, 12].

Зміст випускної кваліфікаційної роботи магістра містить в загальному вигляді такі розділи: 1. Сучасний стан виробництва, аналіз наукових публікацій, визначення мети. 2. Математична, імітаційна модель цифрового двійника підприємства або технічного об'єкта. 3. Опис смартсистеми підприємства, технічні характеристики, ключові показники ефективності. До виконання випускної кваліфікаційної роботи магістра здобувачі розробляють комплексний курсовий проект цифрового (Digital Twin) двійника підприємства в предметній області спеціальності та за умов професійної зацікавленості якщо вже працюють офіційно в сфері механічної інженерії на робочих місцях.

Нижче наведено реалізовані випускні кваліфікаційні роботи магістрів освітньої програми «Смартпромисловість»:

- проект гірничо-металургійного підприємства та дослідження смарттехнологій метрологічної служби.
- проект смартфабрики та дослідження інтелектуальних технологій серійного виготовлення деревообробної продукції.
- проект та дослідження машинобудівного підприємства з інтелектуальними технологіями виготовлення гідроапаратури та гідравлічної техніки.
- проект машинобудівного підприємства з технологіями промислової смартреальності та дослідження ключових показників ефективності.
- проект автомобілебудівного підприємства з дослідженням смарттехнологій та цифрових двійників
- проект підприємства побутової техніки з дослідженням смарттехнологій та цифрових двійників
- проект підприємства виготовлення та ремонту сільгосптехніки з дослідженням смарттехнологій та цифрових двійників
- проект авіабудівного підприємства з дослідженням смарттехнологій та цифрових двійників

Нижче наведено реалізацію імітаційної моделі технологічної дільниці реального підприємства з виробництва дерев'яних вікон у середовищі Tecnomatix Plant Simulation з магістерського дослідження «Проект смартфабрики та дослідження інтелектуальних технологій серійного виготовлення деревообробної продукції». Розроблено імітаційну модель потокового виробництва, на базі існуючого підприємства (рис. 1).

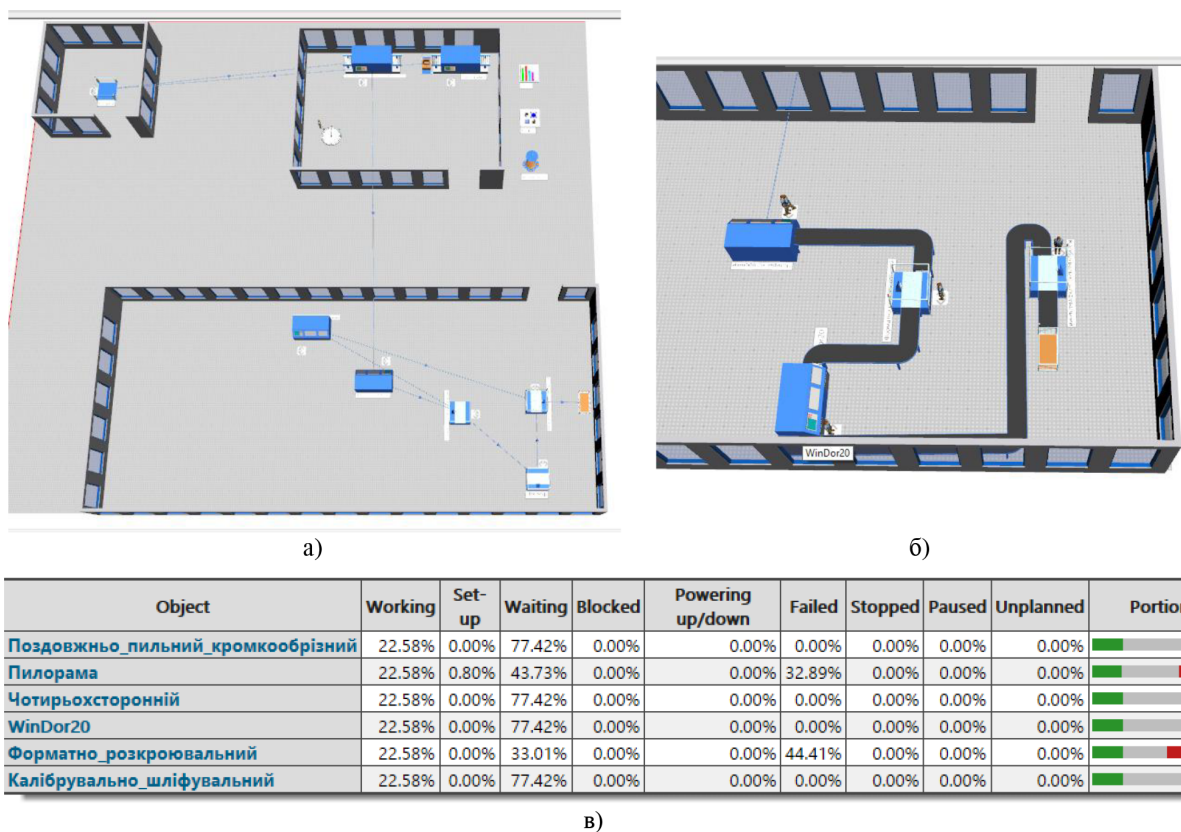


Рис. 1. Імітаційна модель потокового виробництва дерев'яних віконних рам, на базі існуючого підприємства:

а) – імітаційна модель потокового існуючого виробництва; б) – модернізована імітаційна модель потокового виробництва; в) – статистика завантаженості верстатів

Кожен елемент автоматизованої лінії (конвеєри, робочі станції) мають цифрову деталізацію, а їх робота програмується з урахуванням реальних умов виробництва. В наведеному прикладі запропоновано заходи для модернізації підприємства, у вигляді, встановлення конвеєрних стрічок, використання фрезерного верстата з числовим програмним забезпеченням WinDor20. В результаті спостерігається прискорення виробництва, збільшення якості, зменшення браку, та рівномірне розподілення навантаження на всі верстати (рис. 1, б).

Під час аналізу моделі отримано такі показники, як (рис. 1, в) [12, 13]:

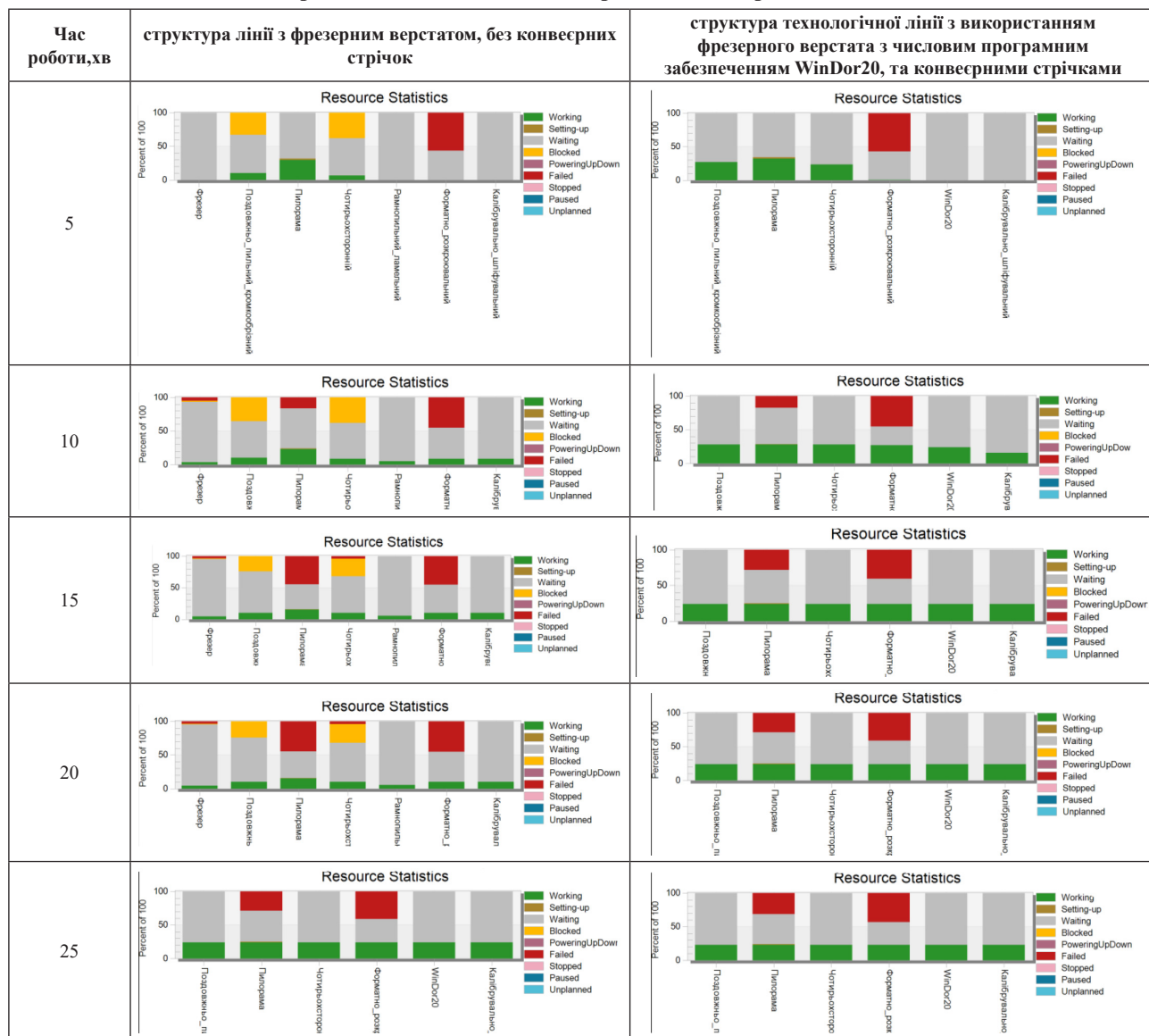
- кількість вироблених деталей за одиницю часу;
- час, який деталі проводять у системі;
- час, який деталі проводять у черзі;
- час, витрачений на транспортування з одного місця в інше;
- час, коли відбуваються поставки;
- створення та використання інвентарю;
- інвентаризація під час процесу;
- відсоток використання машин та працівників.

Для аналізу у реальному часі навантаження на групу верстатів застосовано інструмент «Chart», що будує діаграму статистики стану робочих станцій. В таблиці 1 наведено порівняння потокової лінії під час 25 – хвилин часу симуляції традиційної лінії без застосування фрезерного верстата з числовим програмним забезпеченням WinDor20, та технологічної дільниці з конвеєрними стрічками і з застосуванням фрезерного верстата з числовим програмним забезпеченням WinDor20. Отримавши дані завантаженості верстатів виконаємо порівняльний аналіз ключових показників ефективності (КПЕ) за стандартом ISO 22400, що надає узагальнену методику опису ключових показників ефективності, їх структури та використання. представляється через його визначення, тобто складається з контенту та контексту [14]. Його зручно представляти у табличному вигляді, хоча він пристосований і до інших способів відображення – формату обміну даними, графічному форматі тощо.

Нижче наведені щомісячні КПЕ коефіцієнту браку до і після модернізації технологічної лінії за статистичними даними отриманими в імітаційній моделі потокового виробництва.

Таблиця 1

Порівняння завантаженості верстатів за час роботи 25 хв.



Таблиця 2

???

| Опис КІПЕ              |   |
|------------------------|---|
| Інформація по контенту |   |
| Назва                  | Коефіцієнт браку  |
| Ідентифікатор (ID)     | 001764  |
| Опис                   | Коефіцієнт браку – це відношення між обсягом браку (SQ) та обсягом виробленою продукції (PQ). |
| Сфера застосування     | Виробниче замовлення вікон, дефекти деревини, сировини  |
| Формула                | Коефіцієнт браку = SQ/ PQ   |
| Одиниця вимірювання    | %   |
| Діапазон               | Мінімальне значення: 0 %<br>Максимальне значення: 100 %                                       |
| Тренд                  | Чим нижчий цей показник, тим краще  |
| Контекстна інформація  |   |
| Період часу            | Щомісячний запит  |
| Цільова аудиторія      | Керівництво підприємства  |
| Тип виробництва        | Постійне  |
| Діаграма моделі впливу | Рисунок 4.1   |
| Примітки               | Коефіцієнт браку також використовується рейтингів   |



9. Wang, Yübo. Integration of model based system engineering into the digital twin concept / Wang Yübo, Steinbach Tanja, Klein Jonathan, Anderl Reiner // Procedia CIRP. 2021. Vol. 100. Pp. 19–24.–DOI 10.1016/j.procir.2021.05.003

10. Сапон С. П. Цифрові двійники в металообробці: термінологія і проблематика / Сапон С. П., Данильченко Ю. М., Петраков Ю. В., Охріменко О. А. // Сучасні технології промислового комплексу – 2024: матеріали VIII міжнар. наук.-практ. конференції (17–19 вересня 2024 р., м. Херсон, м. Хмельницький) / за ред. Д. О. Дмитрієва. Херсон : Книжкове видавництво ФОП Вишемирський В. С., 2024. с. 215–217. <http://eir.kntu.net.ua/jspui/handle/123456789/2014>

11. Tecnomatix Plant Simulation: Compact Student Training. Siemens PLM Software, 2017. 177 p.

12. Комп'ютерне моделювання технологічних процесів [Електронний ресурс]: навч. посіб. для студ. за спеціальністю 131 «Прикладна механіка» за освітньо-науковою програмою магістерської підготовки – Технологія машинобудування / Б. С. Воронцов, Ю. М. Бецко, О. О. Мельник; КПІ ім. Ігоря Сікорського. Київ : КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2023. 186 с.

13. Воронцов Б. С. Імітаційне моделювання механоскладального виробництва/ Б. С. Воронцов, І. А. Бочарова // Нові технології в машинобудуванні. Харків: ТОВ «Планета-Прінт», 2021. С. 38–39.

14. ДСТУ ISO 22400 -2:2019 Ключові показники ефективності (КПЕ) для керування виробничими операціями Частина 2: Визначення та описи. ДП «УкрНДНЦ». 60 с.

### References

1. Wang, Z. (2020). Digital twin technology in Industry 4.0. In Impact on intelligent logistics and manufacturing (pp. 95–114). IntechOpen. <https://doi.org/10.5772/intechopen.80974>

2. Grieves, M. (2014). Digital twin: Manufacturing excellence through virtual factory replication (White paper No. 1, pp. 1–7).

3. Uhlemann, T. H.-J., Steinhilper, C. L. R., & Steinhilper, R. (2017). The digital twin: Realizing the cyber-physical production system for Industry 4.0. Procedia CIRP, 61, 335–340. <https://doi.org/10.1016/j.procir.2016.11.152>

4. Tao, F., Zhang, M., & Nee, A. Y. C. (2019). Digital twin driven smart manufacturing. Academic Press.

5. Lai, X., Zhou, Y., Jiang, L., & Ding, G. (2021). A review: Machine tools digital twin modeling and application. In Proceedings of the 26th International Conference on Automation and Computing (ICAC) (pp. 1–6). <https://doi.org/10.23919/ICAC50006.2021.9594151>

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

7. Cao, H., Zhang, X., & Chen, X. (2017). The concept and progress of intelligent spindles: A review. International Journal of Machine Tools and Manufacture, 112, 21–52. <https://doi.org/10.1016/j.ijmachtools.2016.10.005>

8. Wójcicki, J., Leonesio, M. P., & Bianchi, G. (2021). Potential for smart spindles adoption as edge computing nodes in Industry 4.0. Procedia CIRP, 99, 86–91.

9. Wang, Y., Steinbach, T., Klein, J., & Anderl, R. (2021). Integration of model-based systems engineering into the digital twin concept. Procedia CIRP, 100, 19–24. <https://doi.org/10.1016/j.procir.2021.05.003>

10. Sapon, S. P., Danylchenko, Yu. M., Petrakov, Yu. V., & Okhrimenko, O. A. (2024). Digital twins in metalworking: Terminology and problem statement. In D. O. Dmytriiev (Ed.), Modern technologies of the industrial complex – 2024: Proceedings of the 8th International Scientific and Practical Conference (pp. 215–217). FOP Vyshemyrskyi V. S. <http://eir.kntu.net.ua/jspui/handle/123456789/2014>

11. Siemens PLM Software. (2017). Tecnomatix Plant Simulation: Compact student training.

12. Vorontsov, B. S., Betsko, Yu. M., & Melnyk, O. O. (2023). Computer modeling of technological processes (Electronic textbook). Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute.

13. Vorontsov, B. S., & Bocharova, I. A. (2021). Simulation modeling of mechanical assembly production. In New technologies in mechanical engineering (pp. 38–39). Planeta-Print.

14. Ukrainian Research and Training Center for Standardization, Certification and Quality. (2019). DSTU ISO 22400-2:2019 Key performance indicators (KPIs) for manufacturing operations management – Part 2: Definitions and descriptions.

*Дата першого надходження статті до видання: 10.01.2026*

*Дата прийняття статті до друку після рецензування: 16.02.2026*

*Дата публікації (оприлюднення) статті: 30.04.2026*