УДК 656.073

РОЛЬ ЦИФРОВИХ ДВІЙНИКІВ У ЗАБЕЗПЕЧЕННІ СТІЙКОСТІ ЛАНЦЮГІВ ПОСТАЧАННЯ В ЕПОХУ ІНДУСТРІЇ 4.0

Доц. Орда О.О., Слюсарев М.
Харківський національний автомобільно-дорожній університет,
orda@khadi.kharkov.ua

Індустрія 4.0 в ланцюгах постачання (ЛП) розглядається як концепція цифрової трансформації логістичних і виробничих процесів, що передбачає інтеграцію кіберфізичних систем, Інтернету речей (IoT), великих даних (Big Data) та інтелектуальних аналітичних інструментів у єдине інформаційне середовище управління [1-3]. Умови розвитку Industry 4.0 зумовлюють суттєву трансформацію ЛП, що проявляється у зростанні їхньої складності, динамічності та вразливості глобальних виробничо-логістичних систем. У зв'язку з цим особливої актуальності набуває проблема забезпечення їхньої стійкості до збурень різної природи. Сучасні кризові процеси продемонстрували обмеженість традиційних підходів до планування та управління, що базуються переважно на статичних моделях, ретроспективних даних і фрагментарній інформації. Разом з тим, підвищення складності логістичних систем супроводжується збільшенням ризиків виникнення так званого «ефекту хвилі», коли локальні збої поширюються на всю мережу постачання та призводять до значних економічних втрат. Результати досліджень [1, 4] показують, що цифрові технології можуть відігравати ключову роль у запобіганні таким явищам шляхом підвищення прозорості та аналітичних можливостей управління ЛП.

Питанням цифровізації ЛП привертається багато уваги у сучасній науковій літературі останнім часом. Однією з ключових технологій цифрової трансформації логістичних систем є цифрові двійники (Digital Twin), що являє собою цифрову модель фізичного об'єкта або системи, яка відображає її стан у реальному часі та дозволяє проводити моделювання різних сценаріїв розвитку подій [5-14]. Світовий ринок цифрових двійників оцінювався у 36,19 млрд дол. США у 2025 р. і, за прогнозами, зросте до 228,46 млрд дол. США до 2031 р. із середньорічним темпом зростання (CAGR 35,95%). Основними драйверами розвитку є поширення Industrial IoT, впровадження штучного інтелекту, цифровізація промисловості та підвищені вимоги до безпеки критичної інфраструктури, при цьому виробництво залишається ключовою сферою застосування, рисунок 1 [15].

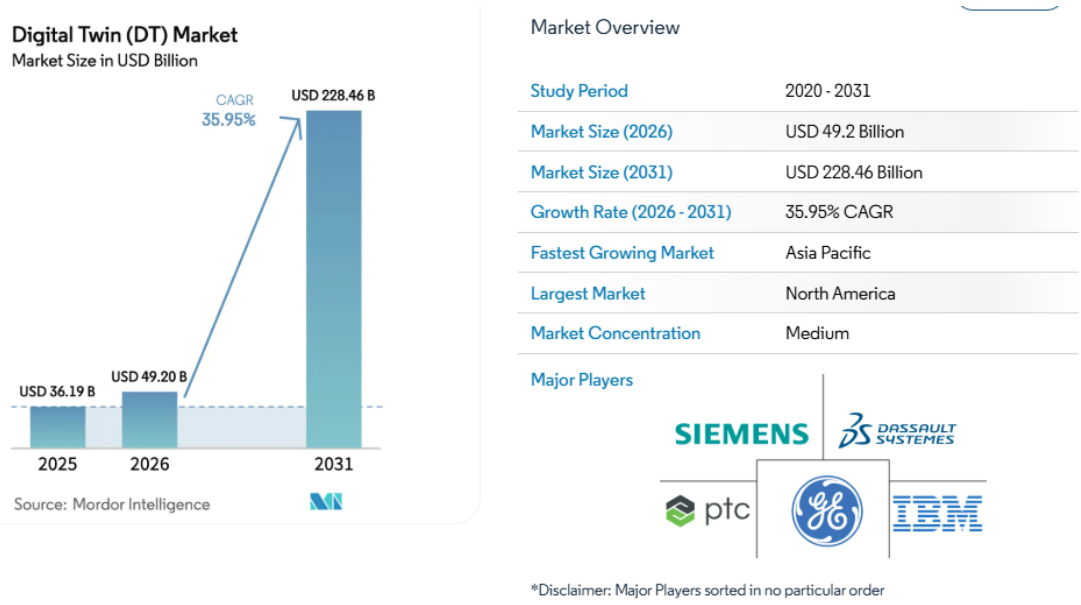


Рисунок 1 – Прогноз розвитку світового ринку цифрових двійників [15]

Значний внесок у розвиток цієї тематики зробили D. Ivanov та A. Dolgui [1], які запропонували концепцію цифрового двійника ЛП (Digital Supply Chain Twin). Згідно з їхнім підходом, цифровий двійник є комп'ютерною моделлю, що відображає стан логістичної мережі у будь-який момент часу та дозволяє аналізувати ризики, моделювати збурення та оцінювати ефективність управлінських рішень. У роботі авторів [5] наголошується, що поєднання методів моделювання, оптимізації та аналізу даних створює нові можливості для прогнозування збоїв у ЛП та підвищення їхньої стійкості.

Дослідники [6] також підкреслюють значний потенціал цифрових двійників у забезпеченні прозорості логістичних систем. Зокрема, запропоновані моделі цифрових двійників дозволяють інтегрувати інформацію з різних джерел даних, включаючи сенсори, системи відстеження вантажів та інформаційні платформи, що забезпечує більш ефективне управління логістичними процесами.

Застосування цифрових двійників сприяє підвищенню таких характеристик стійкості ЛП, як гнучкість, адаптивність, прозорість та швидкість реагування на ризики [7]. Досвід використання цифрових двійників демонструє можливості для моделювання сценаріїв розвитку логістичних систем та оцінки ефективності стратегій відновлення після кризових ситуацій [8].

Стійкість ЛП визначається як здатність логістичної системи передбачати, адаптуватися та відновлюватися після збурень [1, 5, 7-9]. У сучасних умовах забезпечення такої стійкості стає одним із ключових завдань управління логістикою. Роль цифрових двійників у забезпеченні стійкості ланцюгів постачання проявляється через комплекс взаємопов'язаних механізмів, які охоплюють підвищення видимості, аналіз ризиків, адаптивне планування та операційне відновлення:

– моніторинг у реальному часі на підставі інтеграції даних з різних джерел та створення повної цифрової моделі ЛП, що дозволяє відстежувати стан логістичної мережі у режимі реального часу своєчасно виявляти вузькі місця, накопичення запасів, порушення строків доставки та інші збої [10, 12, 14];

– моделювання різних сценаріїв розвитку подій та оцінка їхніх впливів на ефективність логістичних операцій, що створює основу для системного управління ризиками (від відмов постачальників і транспортних блокад до коливань попиту чи виробничих збоїв) [11-13];

– прогнозування ризиків за алгоритмами штучного інтелекту та з використанням аналітики даних для розробки стратегії їх попередження [11-12];

– адаптивне планування, що надає можливість оперативно переглядати тактичні та оперативні рішення з урахуванням змін у попиті, пропозиції чи обмеженнях логістичної мережі - у поєднанні з алгоритмами оптимізації це дозволяє швидко коригувати маршрути, виробничі графіки, плани розподілу та політику управління запасами;

– підтримка прийняття управлінських рішень щодо оптимізації потоків вантажів та оцінки ефективності альтернативних стратегій на підставі отримання комплексної інформації про стан логістичних мереж та ідентифікації найбільш вразливих їхніх елементів [10, 13-14].

Таким чином, цифрові двійники забезпечують перехід від реактивного до проактивного управління ланцюгами постачання, що є ключовою умовою підвищення їхньої стійкості.

Ефективне використання цифрових двійників можливе лише за умови їхньої інтеграції з іншими технологіями Індустрії 4.0, що дозволяє створити основу для формування так званих розумних ланцюгів постачання (Smart Supply Chains), які характеризуються високим рівнем автоматизації та інтеграції інформаційних потоків.

Таким чином, використання цифрових двійників у транспортних системах сприяє підвищенню ефективності управління перевезеннями, оптимізації використання транспортних ресурсів та зниженню витрат на логістичні операції. Крім того, цифрові двійники дозволяють здійснювати прогнозування можливих збоїв у транспортних мережах і своєчасно розробляти стратегії реагування на такі збурення.

Література

1. Ivanov D., Dolgui A. A digital supply chain twin for managing the disruption risks and resilience in the era of Industry 4.0. *Production Planning & Control*, 2020. https://doi.org/10.1080/09537287.2020.1768450.

2. Li Q., Tian W., Zhang H. Digital Transformation for Sustainability in Industry 4.0: Alleviating the Corporate Digital Divide and Enhancing Supply Chain Collaboration. Systems, 2025. https://doi.org/10.3390/systems13020123.

3. Koleshnia Y., Zhaldak H. Digital Technologies in Logistics. *Research Reviews Of Czestochowa University Of Technology. Management.* Vol. 43. 2021. P. 43–51 DOI:10.17512/znpcz.2021.3.04.

4. Naumov V., Shulika O., Orda O., Vasiutina H., Bauer M. & Oliskevych M. Shaping the Optimal Technology for Servicing the Long-Distance Deliveries of Packaged Cargo by Road Transport. *Sustainability* 2022, 14, 7283. https://doi.org/10.3390/su14127283.

5. Ivanov D., Dolgui A., Das A. & Sokolov B. Digital Supply Chain Twins: Managing the Ripple Effect, Resilience, and Disruption Risks by Data-Driven Optimization, Simulation, and Visibility in , International Series in Operations Research & Management Science. *Springer*, 2019, P. 309-332.

6. Sani S., Zarifnia A., Salonitis K., Milisavljevic-Syed J. Supply Chain 4.0 and the Digital Twin Approach: A Framework for Improving Supply Chain Visibility. *Procedia CIRP*, 2024. DOI: https://doi.org/10.1016/j.procir.2024.03.014.

7. Marinagi C., Reklitis P., Trivellas P., Sakas D. The Impact of Industry 4.0 Technologies on Key Performance Indicators for a Resilient Supply Chain 4.0. *Sustainability*. 2023; 15(6):5185. https://doi.org/10.3390/su15065185.

8. Liu C., Wang Y., Purvis L., Potter A. Can Digital Twin Technology Enhance Supply-Chain Resilience? A Systematic Literature Review. *Sustainability*, 2026. https://doi.org/10.3390/su18052361.

9. Choi T., Dolgui A., Ivanov D., Pesch E. OR and analytics for digital, resilient, and sustainable manufacturing 4.0. *Annals of Operations Research*, 2022. Vol. 310, pages 1–6. DOI:10.1007/s10479-022-04536-3.

10. Moshood T., Nawanir G., Sorooshian S., Okfalisa O. Digital Twins Driven Supply Chain Visibility within Logistics: A New Paradigm for Future Logistics. *Applied System Innovation*, 2021, 4(2), 29. https://doi.org/10.3390/asi4020029.

11. Xu L., Mak S., Schoepf S., Ostroumov M., Brintrup A. Multi-Agent Digital Twinning for Collaborative Logistics: Framework and Implementation. *Computers & Industrial Engineering*, 2023. https://doi.org/10.1016/j.jii.2025.100799.

12. Le T., Fan R. Digital Twins for Logistics and Supply Chain Systems: Literature Review, Conceptual Framework, Research Potential, and Practical Challenges. *Computers & Industrial Engineering*, 2023. https://doi.org/10.1016/j.cie.2023.109768.

13. Gorgas B., Kliewer J., Wringe T., Bähring M., Straube F. Digital Twins in Logistics: Opportunities and Barriers. *Industry 4.0 Science*, 2023. P. 34–40. https://doi.org/10.30844/I4SE.25.3.34

14. Werbińska-Wojciechowska S., Giel R., Winiarska K. Digital Twin Approach for Operation and Maintenance of Transportation Systems - A Systematic Review. *Sensors*, 2024. DOI: 10.3390/asi4020029.

15. Digital Twin (DT) Market Size & Share Analysis - Growth Trends And Forecast (2026 - 2031). Веб-сайт : Mordor Intelligence Research & Advisory. URL: https://www.mordorintelligence.com/industry-reports/digital-twin-market (дата звернення 10.03.2026).