

КІБЕРФІЗИЧНІ СИСТЕМИ В МОДЕЛЮВАННІ ТА ОРГАНІЗАЦІЇ
КОМП'ЮТЕРНИХ СИСТЕМ ЛОГІСТИКИ

Тези аналізують цифровізацію як ключовий фактор розвитку цифрового суспільства та демократичного врядування в Україні. Цифровізація розглядається як інструмент модернізації державного управління, що базується на співпраці з громадянами, захисті суспільних інтересів та розвитку державно-приватних партнерств з бізнес-структурами. Особливу увагу приділено тому, як цифрові технології сприяють об'єднанню зусиль для досягнення цілей сталого розвитку країни. У контексті сталого розвитку підкреслюється важливість добровільної ініціативи як індивідуумів, так і держав, а також необхідність підвищення прозорості державного управління, що дозволяє зменшити можливості для фальсифікацій і забезпечити доступ до необхідної інформації для всіх зацікавлених сторін.

Ключові слова: цифровізація, цифрові технології, електронізація, інтернет речей, кіберфізичні системи, логістичні процеси, оптимізація, сталий розвиток.

Сучасна логістика вимагає застосування інноваційних підходів до управління складними системами, оскільки обсяги даних, що обробляються, постійно зростають, а попит і транспортні умови змінюються в режимі реального часу. У такому середовищі важливими інструментами стають кіберфізичні системи (КФС) (рис. 1), які пропонують інтеграцію фізичних об'єктів – транспортних засобів, складів і товарів – з кібернетичними компонентами, такими як алгоритми, датчики та програмне забезпечення. Це дозволяє створювати гнучкі та адаптивні комп'ютерні системи, здатні автоматично налаштовуватися під зміни умов, оптимізуючи процеси перевезень і управління ресурсами в реальному часі [1].

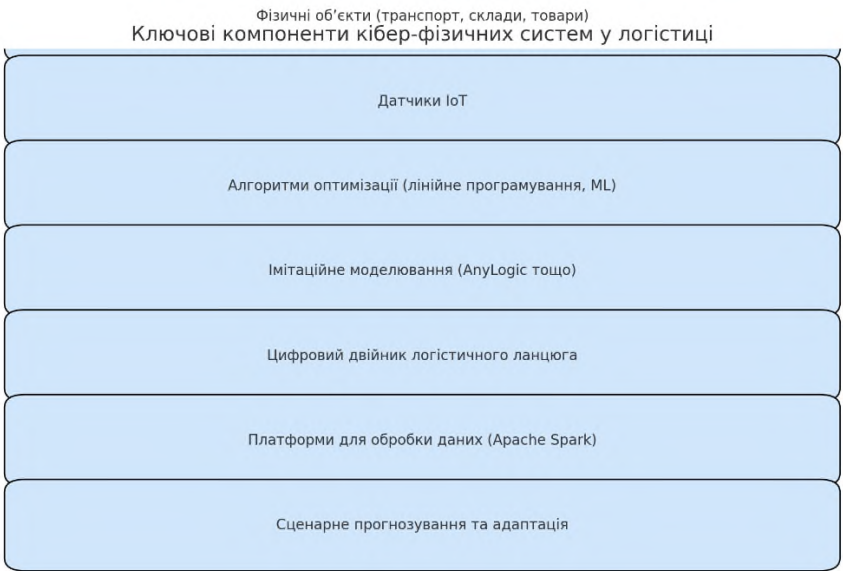


Рисунок 1 – Ключові компоненти кібер-фізичних систем у логістиці
Джерело: розроблено авторами

Однією з основних характеристик КФС у логістиці є синхронізація фізичного та віртуального світів. Цей процес реалізується через використання датчиків Інтернету речей (IoT), що встановлюються на транспортних засобах і в логістичних вузлах. Вони збирають дані про стан транспортної мережі, залишки товарів, запити та попит на різних етапах ланцюга постачання. Ці дані обробляються за допомогою потужних інструментів моделювання, таких як імітаційні платформи, наприклад, AnyLogic, і алгоритмів оптимізації, зокрема лінійного програмування та методів машинного навчання [2].

Цифровий двійник, що створюється за допомогою таких технологій, є віртуальним відображенням реального логістичного ланцюга. Цей двійник дозволяє здійснювати детальне прогнозування розвитку

процесів, враховуючи випадкові або непередбачувані фактори, такі як затримки, зміни попиту чи коливання в доступності ресурсів. Завдяки можливості моделювання різних сценаріїв і варіантів розвитку ситуацій, КФС сприяють підвищенню ефективності управління ресурсами і скороченню витрат на доставку товарів.

Впровадження КФС у логістику також дає змогу реалізувати більш інтелектуальні системи управління, здатні не лише реагувати на зміни в реальному часі, а й самостійно оптимізувати маршрутні плани, контролювати запаси і передбачати проблеми до їх виникнення. Оскільки попит на швидку і ефективну доставку товарів тільки зростає, застосування таких інноваційних технологій дозволяє підтримувати високий рівень обслуговування клієнтів і забезпечувати безперебійну роботу логістичних процесів.

Математична основа транспортної задачі, яка включає мінімізацію цільової функції та обмеження на запаси і потреби, має тісний зв'язок із концепцією кіберфізичних систем (КФС) у контексті моделювання та організації комп'ютерних систем логістики. У такій системі цільова функція, яка мінімізує витрати на транспортування вантажів між постачальниками і споживачами, є важливим елементом для оптимізації логістичних процесів. КФС дозволяють створювати автоматизовані системи, які враховують не лише фізичні обмеження, такі як обсяги транспортування або географічні умови, але й інформацію, отриману через датчики та інші кібернетичні компоненти, що стежать за станом транспорту і процесами доставки.

Обмеження на запаси і потреби, що використовуються в транспортній задачі, є важливими для моделювання логістичних процесів у КФС. Дані, що постійно збираються за допомогою датчиків, дозволяють реальним системам, таким як автоматизовані склади або транспортні мережі, оперативно коригувати маршрути і планування, оптимізуючи потоки товарів. КФС інтегрують ці дані в автоматизовані алгоритми управління, що забезпечують доставку з урахуванням фізичних обмежень, наприклад, ємності складів або вантажопідйомності транспорту.

Таким чином, математичні моделі транспортної задачі стають основою для побудови ефективних автоматизованих логістичних систем, які є частиною кіберфізичних систем. Важливою є інтеграція фізичних та інформаційних компонентів, що дозволяє враховувати як реальні умови, так і математичні обмеження для досягнення мінімальних витрат і ефективного управління доставкою товарів.

Математична основа транспортної задачі виражається у вигляді мінімізації цільової функції:

$$\min Z = \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n C_{ij} x_{ij} \quad (1)$$

– за умов обмежень на запаси:

$$\sum_{j=1}^n x_{ij} = a_i, \quad i = 1, 2, \dots, m \quad (2)$$

– за умов обмежень на потреби:

$$\sum_{i=1}^m x_{ij} = b_j, \quad j = 1, 2, \dots, n, \quad (3)$$

де

C_{ij} – вартість перевезення одиниці товару,

x_{ij} – кількість товару, що перевозиться з пункту i до пункту j ,

a_i – запаси у пункті відправлення,

b_j – потреби у пункті призначення.

Після визначення математичної основи транспортної задачі, яка включає мінімізацію цільової функції та обмеження на запаси і потреби, можна стверджувати, що ці формули є важливими інструментами для досягнення оптимізації в реальних кіберфізичних системах. Завдяки використанню таких математичних моделей, які відображають як економічні, так і фізичні обмеження, можна розробляти ефективні алгоритми для автоматизованого управління логістичними процесами.

Зокрема, цільова функція, яка мінімізує витрати на транспортування, є основою для оптимізації маршрутів та розподілу товарів між різними пунктами. У реальних умовах, коли обсяги даних, що надходять від сенсорів і систем моніторингу, постійно зростають, ці математичні моделі допомагають зберегти високий рівень ефективності управління. Інтеграція таких моделей із кіберфізичними системами дозволяє швидко реагувати на зміни умов доставки, такі як затримки, зміни в попиті або доступності ресурсів.

Обмеження на запаси і потреби (формули (2) і (3)) визначають допустимі межі для кількості товару, який можна транспортувати з певних пунктів відправлення до пунктів призначення, і дозволяють адаптувати систему до змін у реальному часі. У контексті КФС ці обмеження можуть бути динамічно адаптовані в залежності від актуальних даних, що надходять із датчиків IoT, створюючи гнучкі системи, які враховують зміни у запасах або потребах на різних етапах ланцюга постачання.

У вирішенні задачі застосування принципів кіберфізичних систем (КФС) до комп'ютерних систем логістики важливими є три основні етапи, які дозволяють досягти оптимізації та ефективності в управлінні логістичними процесами. Першим етапом є розробка структурно-алгоритмічних моделей, що поєднують фізичні об'єкти, такі як транспортні засоби та склади, з алгоритмами управління. Це дозволяє створювати моделі для оптимізації маршрутів доставки та розподілу ресурсів, враховуючи динамічні зміни в реальному часі, наприклад, зміни попиту, затримки чи зміни в транспортних умовах. За допомогою таких моделей

можна розробити адаптивні системи управління, які забезпечують максимальну ефективність логістичних операцій навіть в умовах постійних змін.

Другим етапом є створення засобів опису та стандартизації компонентів, що взаємодіють у системі. Використання формальних специфікацій дозволяє стандартизувати взаємодію між різними елементами системи, такими як датчики IoT, транспортні засоби, склади і програмне забезпечення. Це є необхідним для забезпечення безперебійного збору даних та їх обміну між різними компонентами, що створює стабільну основу для подальшої обробки і аналізу інформації. Завдяки цьому, система стає здатною ефективно взаємодіяти з різними технологіями, забезпечуючи надійність і точність у зборі та обробці даних.

Третім етапом є моделювання логістичних процесів і аналіз різних сценаріїв. За допомогою імітаційного моделювання можна прогнозувати різні варіанти розвитку подій, враховуючи непередбачувані фактори [3], такі як зміни в попиті, затримки або коливання ресурсів. Моделювання дозволяє протестувати різні сценарії і вибрати найбільш оптимальний, що допомагає в прийнятті обґрунтованих рішень щодо управління запасами та транспортними потоками. Це дає можливість зменшити витрати, підвищити ефективність і адаптивність логістичних операцій до змін у реальному часі.

Практична реалізація цього підходу включає інтеграцію даних з Інтернету речей (IoT) з платформами для обробки великих даних, такими як Apache Spark, що дозволяє обробляти великі обсяги інформації, зібраної від сенсорів і пристроїв в реальному часі. Ці дані постійно оновлюються, що дає змогу адаптувати алгоритми управління до змін у логістичних умовах. Імітаційне моделювання дає змогу оцінити оптимальність маршрутів і розподілу товарів, а також прогнозувати потреби і змінювати стратегії управління залежно від ситуації. Це дозволяє зменшити витрати на перевезення та підвищити гнучкість логістичних операцій, забезпечуючи більш ефективне використання ресурсів.

Таким чином, інтеграція КФС, IoT-технологій та алгоритмів оптимізації дозволяє створити адаптивні системи, здатні ефективно управляти величезними обсягами даних і оперативно реагувати на зміни в умовах доставки. Це є важливим кроком до досягнення більш високої ефективності, гнучкості та сталості в управлінні логістичними процесами.

References

1. Lee J., Bagheri B., Kao H.-A. A Cyber-Physical Systems architecture for Industry 4.0-based manufacturing systems. *Manufacturing Letters*, 2015, Vol. 3, pp. 18–23. DOI: 10.1016/j.mfglet.2014.12.001.
2. Wang S., Wan J., Zhang D., Li D., Zhang C. Towards smart factory for Industry 4.0: A self-organized multi-agent system with big data based feedback and coordination. *Computer Networks*, 2016, Vol. 101, pp. 158–168. DOI: 10.1016/j.comnet.2015.12.017.
3. Monostori L. Cyber-physical production systems: Roots, expectations and R&D challenges. *Procedia CIRP*, 2014, Vol. 17, pp. 9–13. DOI: 10.1016/j.procir.2014.03.115.

DOI 10.34132/mspc2025.01.14.04

Bondarenko Stefaniia
Kovalchuk Mykyta

CYBER-PHYSICAL SYSTEMS IN MODELING AND ORGANIZATION OF COMPUTER SYSTEMS IN LOGISTICS

The theses present a theoretical and methodological analysis of digitalization as a crucial factor in the development of a digital society and democratic governance in Ukraine. Digitalization is characterized as a tool for modernizing public administration, based on cooperation with citizens, protection of public interests, and fostering public-private partnerships with commercial business structures. The paper emphasizes how digital technologies have contributed to uniting efforts toward achieving the global goal of sustainable development. In the context of sustainable development, the importance of voluntary initiatives from individuals, states, and the global community is highlighted, as well as the need to increase the transparency of public administration, which reduces the possibilities for falsification and ensures access to necessary information for all stakeholders.

Keywords: digitalization, digital technologies, e-governance, Internet of Things, cyber-physical systems, logistics processes, optimization, sustainable development.

Відомості про автора / Information about the Author

Бондаренко Стефанія, викладачка кафедри інженерії програмного забезпечення, Чорноморський національний університет ім. Петра Могили, м. Миколаїв, Україна. E-mail: bondarenko.stefania@chmnu.edu.ua, ORCID: <https://orcid.org/0009-0007-8767-1032>

Bondarenko Stefaniia, Lecturer, Department of Software Engineering, Petro Mohyla Black Sea National University, Mykolaiv, Ukraine. E-mail: bondarenko.stefania@chmnu.edu.ua, ORCID: <https://orcid.org/0009-0007-8767-1032>

Ковальчук Микита, здобувач третього рівня вищої освіти (PhD) зі спеціальності 123 «Комп'ютерна інженерія», Чорноморський національний університет ім. Петра Могили, м. Миколаїв, Україна. E-mail: sakovalchuk99@chmnu.edu.ua, ORCID: <https://orcid.org/0009-0002-9214-8039>

Kovalchuk Mykyta PhD student, Specialty 123 «Computer Engineering», Petro Mohyla Black Sea National University, Mykolaiv, Ukraine. E-mail: sakovalchuk99@chmnu.edu.ua, ORCID: <https://orcid.org/0009-0002-9214-8039>

© С. Бондаренко, М. Ковальчук
19.05.2025.

Стаття отримана редакцією

