

DOI: <https://doi.org/10.32782/2308-1988/2025-54-77>

УДК 656

Щербань Олена Дмитрівна

кандидат економічних наук, доцент,
доцент кафедри металургії та організації виробництва,
Товариство з обмеженою відповідальністю
«Технічний університет «Метінвест політехніка»
ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-6886-7127>

Olena Shcherban

Limited Liability Company "Technical University "Metinvest Polytechnic"

ВПЛИВ ІНДУСТРІЇ 4.0 НА ХАРАКТЕРИСТИКИ СИСТЕМИ УПРАВЛІННЯ ЛАНЦЮГАМИ ПОСТАЧАНЬ

IMPACT OF INDUSTRY 4.0 ON THE CHARACTERISTICS OF THE SUPPLY CHAIN MANAGEMENT SYSTEM

Анотація. Дослідження аналізує вплив Індустрії 4.0 на трансформацію ключових характеристик систем управління ланцюгами поставок (СУЛП). Під дією технологій (кіберфізичні системи, IoT, Big Data, ШІ) СУЛП еволюціонують від лінійних моделей до гнучких, адаптивних мереж з підвищеною прозорістю та інтегрованістю. Робота зосереджена на 4 логістичних сферах: закупівлі, транспорт, склад, виконання замовлень. Для кожної визначено ключові показники ефективності (KPI) та детально досліджено, як технології I4.0 змінюють ці KPI, формуючи нові характеристики (прозорість, адаптивність, інтероперабельність, ефективність, резильєнтність, інноваційність). Запропоновано інноваційний підхід оцінки через «описовий профіль характеристик СУЛП», який замість жорстких матриць дозволяє визначати поточний стан, цільові рівні, драйвери змін та ризики для кожної характеристики. Цей профіль є інструментом для виявлення «вузьких місць», пріоритезації інвестицій у цифрові рішення (IoT-платформи, блокчейн) та формування стратегій трансформації. Висновок: цифровізація СУЛП є ключем до підвищення клієнтоорієнтованості, оптимізації витрат і адаптації до швидкозмінного ринку в епоху Індустрії 4.0.

Ключові слова: інформаційні технології, логістикаЮ система управління ланцюгами поставок, цифрова економіка, ключові показники ефективності, Індустрія 4.0.

Summary. This study examines the transformative impact of Industry 4.0 (I4.0) technologies on the core characteristics of Supply Chain Management (SCM) systems. Driven by cyber-physical systems (CPS), the Internet of Things (IoT), Big Data analytics, Artificial Intelligence (AI), cloud computing, and robotics, traditional linear and stable SCM models are evolving into hyper-connected, agile, and intelligent networks. The research focuses on the logistical dimensions of SCM: Procurement, Transportation, Warehousing, and Order Fulfillment. For each functional area, critical Key Performance Indicators (KPIs) are identified and justified, serving as quantitative measures of characteristics like speed, accuracy, cost efficiency, flexibility, reliability, and customer-centricity. The core contribution lies in a systematic analysis of how specific I4.0 technologies impact these KPIs within each SCM function. For instance: CPS/IoT enable unprecedented end-to-end visibility and real-time tracking of assets/orders. Big Data & AI facilitate predictive analytics for demand forecasting, route optimization, and proactive issue resolution, enhancing agility and responsiveness. Robotics & Automation (e.g., autonomous guided vehicles, smart warehouses) significantly improve speed and accuracy in warehousing and fulfillment. Additive Manufacturing (3D Printing) influences localization and customization potential, impacting supply chain structure. Cloud Computing & Interoperability Standards (APIs, blockchain) underpin seamless data exchange (interoperability) across the network. Recognizing the limitations of rigid assessment matrices, the study proposes a novel "Descriptive SCM Characteristics Profile" framework. This dynamic framework enables managers to: Identify critical bottlenecks ("weakest" characteristics). Prioritize digital investments based on potential impact on target characteristics/KPIs. Develop actionable roadmaps combining technology implementation (e.g., IoT platforms, AI controllers) with organizational process changes. Track progress through regular KPI measurement against targets. The study concludes that digital transformation, guided by this characteristics-centric approach, is essential for SCM systems to achieve superior customer orientation, optimize costs across the chain, enhance resilience, and maintain competitiveness in the dynamic global market shaped by Industry 4.0.

Keywords: information technology, logistics, supply chain management system, digital economy, key performance indicators, Industry 4.0.

Постановка проблеми. Глобальна економіка сьогодні формується під впливом революційних змін у ІТ за останні десятиліття. Прогрес виразився у переході від комп'ютерів до інтелектуальних пристроїв, які працюють через хмарні сервіси, ознаменували новий етап Інтернету з його інтегрованою автоматизацією, повсюдними обчисленнями та бездротовими мережами. Це призвело до появи кіберфізичних систем, що забезпечують не лише інтенсивний зв'язок людей і машин (на основі різноджерельних даних), але й прямий машинно-машинний зв'язок. Цей феномен, відомий як Індустрія 4.0, кардинально змінює виробництво та характеристики систем управління ланцюгами поставок (СУЛП).

Впровадження Індустрії 4.0 трансформує ключові параметри СУЛП: енд-ту-енд прозорість усього життєвого циклу продукту (від сировини до утилізації), глибоку інтеграцію та кооперацію між усіма ланками ланцюга (постачальники, виробники, логістика, споживачі), а також підвищену адаптивність та швидкість реакції на зміни ринку. Ефективне функціонування таких систем вимагає тісної взаємодії всіх учасників. Оцінка потенціалу та ризиків цих змін вимагає комплексного аналізу впливу технологій Індустрії 4.0 на архітектуру, гнучкість та ефективність управління ланцюгами поставок.

Світові дослідження підтверджують, що цифрова трансформація СУЛП пріоритетно спрямована на підвищення клієнтоорієнтованості: PwC/Oxford Economics (40%), IDC (52%), IDG (46%), Altimeter-Prophet (54%) вказують на покращення сервісу та досвіду клієнтів як головні рушії. Опитування ІТ-керівників великих компаній (фінанси, телеком, ТЕК) визначає ключові цілі трансформації систем управління ланцюгами поставок: підвищення задоволеності клієнтів (58%), оптимізація витрат по всьому ланцюгу (54%) та розширення можливостей для виходу на нові ринки/адаптація асортименту (33%).

Враховуючи трансформаційний вплив Індустрії 4.0 на ключові характеристики СУЛП (прозорість, інтегрованість, адаптивність, ефективність ресурсів), виникає нагальна потреба у: подальшому розвитку теоретичних основ щодо сучасних моделей СУЛП; обґрунтуванні науково-методичних підходів до оцінки та проектування цифрових ланцюгів поставок; розробці практичних рекомендацій з цифрової трансформації систем управління ланцюгами поставок з урахуванням глобальних економічних трендів та нових вимог до їх функціонування.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Безпосереднім аналізом впливу CPS, IoT, Big Data, AI, хмари на трансформацію СУЛП займалися Frederico G.F., Kumar V., [1]; Ivanov D., Dolgui A. [2]; Kamble S.S., Gunasekaran A.,

[6], Ralston P., & Blackhurst J. [8], Zekhnini K., Cherrafi A., [11], Zhou C., Damgaard C.M., Zhao M., & Christensen T.H. [12]. Frederico G.F., Kumar V. [1], Mastos T.D., Nizamis A. [5], Queiroz M.M., Pereira S.C F., [7], Ralston P., & Blackhurst J. [8], Tortorella G.L., Saurin T.A. [9] аналізують переваги цифровізації СУЛП та пов'язані з нею ризики (кібербезпека, інвестиції, навички). Рамки та моделі для розуміння та дослідження цифрових СУЛП пропонують Frederico G.F., Kumar V. [1]; Ivanov D., Dolgui A. [2]; Ralston P., & Blackhurst J. [8], Zhou C., Damgaard C.M. [12], а також містять інсайти для практичного впровадження.

Подальшого розвитку потребують особливості теоретичних основ щодо сучасних моделей СУЛП, обґрунтування науково-методичних підходів до оцінки проектування цифрових ланцюгів поставок з урахуванням глобальних економічних трендів та нових вимог до їх функціонування.

Мета статті. Визначити напрями трансформації основних характеристик СУЛП під дією Індустрії 4.0 та створити гнучкий інструмент («описовий профіль») для підвищення їх ефективності шляхом цілеспрямованої цифрової трансформації.

Виклад основного матеріалу дослідження. Незважаючи на існуючий значний науковий доробок у галузі логістики та управління ланцюгами поставок, динамічно еволюціонуючі характеристики сучасних систем управління ланцюгами поставок (СУЛП) під тиском інформаційних технологій та концепції Індустрії 4.0 вимагають поглибленого та систематизованого вивчення. Традиційні моделі СУЛП, орієнтовані на лінійність та стабільність, поступаються місцем гнучким, адаптивним та гіперзв'язаним мережевим структурам. Ця трансформація обумовлює критичну потребу в переосмисленні теоретико-методологічних засад аналізу та проектування СУЛП [1]. Таке переосмислення особливо актуальне в умовах стрімкого розвитку цифрової економіки, яка характеризується високою швидкістю інновацій, глобалізацією бізнес-середовища та постійними змінами інституційних рамок, що впливають на правила гри та вимоги до ефективності ланцюгів поставок. Основна мета цієї статті полягає у комплексному визначенні та аналізі нових особливостей, функціональних змін та, найголовніше, ключових показників ефективності (KPI), що визначають стан СУЛП, зосереджуючись на критичних функціональних сферах: закупівлях, транспортній логістиці, складській діяльності та процесах виконання замовлень, саме через призму революційних принципів Індустрії 4.0.

Концепція Індустрії 4.0 (I4.0) передбачає не просто модернізацію, а радикальну перебудову фундаментальних принципів організації виробництва та супутніх ланцюгів поставок. Цей фено-

мен часто інтерпретують як четверту промислову революцію – глобальну трансформацію обробної промисловості, спричинену конвергенцією фізичного та цифрового світів завдяки всепроникній цифровізації та інтернетизації («Internet of Everything»). Суть цієї революції полягає у категоричному стрибку в ефективності, гнучкості та інтелектуальності процесів проектування, виробництва, обслуговування та доставки продукції та послуг. Хоча термінологія може відрізнитися в різних регіонах («Розумні фабрики» в ЄС, «Індустріальний Інтернет речей» (IIoT) в США, «Розумна промисловість», «Прогресивне виробництво»), суттєві риси та вплив на базові характеристики СУЛП є спільними [2].

Розумна фабрика є матеріалізацією I4.0 і визначається як комплексне використання інноваційних цифрових технологій, що інтегруються у єдиний операційний простір глобального ланцюга доданої вартості.

До ключових технологій відносяться автономні системи для виробництва, логістики всередині заводу, контролю якості. Бездротовий збір даних у реальному часі з усіх точок ланцюга (обладнання, продукти, транспорт, склади). Потужність обчислень та спеціалізоване ПЗ доступне за запитом, забезпечуючи масштабованість та гнучкість СУЛП. Обробка величезних масивів даних для прогнозування, оптимізації маршрутів, управління запасами, проактивного обслуговування. Швидке прототипування, кастомне виробництво, децентралізація виробництва, що впливає на локальність та структуру СУЛП. Оптимізація транспорту (навігація, карпулінг, доставка), включаючи автономні транспортні засоби, що революціонізують характеристики транспортної логістики СУЛП [3].

Інтеграція цих технологій у глобальну, операційно сумісну мережу створення вартості є ключем до формування нових мережевих та адаптивних характеристик СУЛП.

Кіберфізичні системи є основою I4.0, де фізичні об'єкти (машини, продукти, складські системи, транспорт) отримують цифрових «двійників» і можуть комунікувати між собою та з людьми через Інтернет. Для СУЛП це означає безпрецедентну прозорість (End-to-End Visibility) – можливість відстежувати стан та місцезнаходження будь-якого активу чи замовлення в реальному часі по всьому ланцюгу. Підвищена адаптивність та швидкість реакції; системи можуть автономно реагувати на зміни (попит, затримки, поломки) шляхом переналаштування маршрутів, планів виробництва, рівнів запасів [4].

Конвергенція Big Data, IoT та III створює середовище для прямої комунікації між, наприклад, системою планування виробництва, складськими роботами та вантажівками безпосередньо,

мінімізуючи людське втручання. III-алгоритми аналізують Big Data для прогнозування збоїв, попиту, оптимальних маршрутів, рівнів запасів, виходячи за рамки простої реактивності до проактивності. Автоматизація рутинних завдань, точніше прогнозування, зменшення простоїв та відходів. Хоча на виробництво спрямовано первинний фокус I4.0, трансформація характеристик СУЛП неминуче поширюється на точніше прогнозування попиту, автоматизація складів, персоналізовані пропозиції, швидку доставку; автономний транспорт, оптимізацію маршрутів у реальному часі, «розумні» склади; нові сервісні моделі (предиктивне обслуговування обладнання замовника на основі даних IoT) [4].

Виділяють чотири основоположні риси, які безпосередньо визначають ключові характеристики СУЛП майбутнього [5]. Вертикальна інтеграція інтелектуальних виробничих систем (на базі CPS). Це будівництво «цифрового підприємства», де всі рівні – від робочого центру до корпоративної ERP-системи – інтегровані та обмінюються даними в реальному часі. Для СУЛП це означає реконфігуровність та гнучкість: можливість швидко переналаштовувати виробничі лінії та логістичні потоки для випуску дрібних партій кастомної продукції (справжня масова кастомізація). Автономність управління: системи можуть самоорганізувати виробництво, технічне обслуговування, маршрутизацію вантажів на основі поточних умов. Мережева організація ресурсів та продуктів: віртуальне об'єднання фізично розподілених ресурсів (сировина, потужності, складські площі) для оптимального використання. Сквозна цифровізація та автоматичний моніторинг: кожна дія, кожен етап переробки реєструються цифрово, аномалії виявляються та аналізуються автоматично, що забезпечує неперевершену точність та контроль як характеристику СУЛП.

Система управління ланцюгами поставок перетворюється на справжню мережу взаємопов'язаних компаній (постачальники, виробники, логістичні оператори, дистриб'ютори, клієнти). Реалізація цього через CPS вимагає: стандартизовані інтерфейси, безпечний обмін даними, спільні платформи (наприклад, на базі blockchain для трекінгу та смарт-контрактів). Мережа може швидко адаптуватися до змін попиту, порушень у ланцюгу, нових можливостей за рахунок перерозподілу завдань між учасниками. Кожен учасник мережі має погляд на потік матеріалів, інформації та фінансів по всьому ланцюгу. Це дозволяє виробнику (або будь-якому іншому учаснику) не лише виявляти зміни вимог клієнтів, але й миттєво відображати ці зміни на всіх етапах – від спільної розробки продукту до дистрибуції та сервісу. Прозорість стає ключовою конкурентною перевагою СУЛП.

Інновації в машинобудуванні (CAD/CAM/CAE, цифрові двійники) інтегруються у весь життєвий цикл продукту та виробничих систем. Це впливає на інноваційність та технологічність СУЛП. Спільна робота над новими продуктами та виробничими/логістичними процесами в віртуальному середовищі. Симуляція роботи майбутньої СУЛП, виявлення «вузьких місць» до фізичної реалізації.

Дані з експлуатації продуктів та роботи систем (через IoT) використовуються для вдосконалення наступних поколінь та оптимізації обслуговування. Швидке впровадження технологій, що розвиваються за експонентою (ШІ, роботика, безпілотники, нанотехнології, доповнена реальність – AR), безпосередньо покращує операційну ефективність, гнучкість та швидкість як характеристики СУЛП [5]. До них відносяться автоматизація, оптимізація, зменшення відходів; роботизовані клітини, 3D-друк дозволяють швидко переналаштовуватися на нові продукти чи дрібні партії; автономна внутрішньозаводська логістика, швидша доставка дронами, AR-інструкції для персоналу підвищують швидкість виконання операцій; роботи та ШІ забезпечують високу повторюваність та мінімізацію людських помилок у логістиці та на складі.

Дослідження ґрунтувалося на ретельному кабінетному аналізі, що передбачав систематичний пошук, оцінку та синтез інформації з різноманітних джерел: рецензовані наукові журнали з логістики, операційного менеджменту, IT; офіційні звіти та директиви Європейського Союзу щодо Індустрії 4.0 та цифрової єдиного ринку; бізнес-звіти провідних компаній-піонерів І4.0; аналітичні звіти великих консалтингових компаній (McKinsey, PwC, Deloitte, BCG); матеріали галузевих конференцій [13; 14].

Метою дослідження було не лише зібрати дані, але й виявити тенденції, що формують нові характеристики СУЛП. Етапи дослідження були ретельно структуровані.

Визначення структури та КРІ СУЛП. Детальний аналіз для виділення ключових функціональних компонентів (сфер), що визначають ланцюг поставок. Основна увага приділена: Закупівлям, Транспортній логістиці, Складській діяльності та Виконанню замовлень (Від продажу до доставки). Для кожної виділеної сфери СУЛП були визначені та обґрунтовані КРІ. Ці КРІ є критичними вимірниками конкретних характеристик СУЛП, таких як ефективність використання ресурсів, швидкість, точність, гнучкість, надійність, вартість, клієнтоорієнтованість. КРІ слугують інструментом кількісної оцінки стану та змін характеристик. (Виробнича функція («Зробити») була свідомо виключена з глибокого аналізу в даній роботі, щоб зосередити ресурси на логістичних аспектах СУЛП, хоча її важливість визнається).

Встановлення зв'язків між СУЛП та Індустрією 4.0: аналіз технологічного ландшафту І4.0 (CPS, IoT, Big Data, AI, Роботика, 3D-друк, Хмара, тощо). Визначення потенційних точок впливу кожної технології на виділені функціональні сфери СУЛП (Закупівлі, Логістика, Склад, Виконання замовлень). Метою було зрозуміти, як технології можуть змінювати характеристики кожної сфери.

Глибинний аналіз впливу технологій на КРІ. Для кожної пари «Технологія І4.0 – Сфера СУЛП» проводився аналіз впливу на конкретні КРІ цієї сфери. Цей етап є ключовим для розуміння трансформації характеристик СУЛП: наскільки технологія покращує/погіршує швидкість (наприклад, час доставки), точність (наприклад, точність замовлення), ефективність витрат (наприклад, витрати на зберігання), клієнтський досвід (наприклад, задоволеність клієнта) у конкретній сфері.

Систематизація можливостей та загроз. На основі аналізу впливу на КРІ, для кожної технології в контексті кожної сфери СУЛП та її КРІ визначалися потенційні можливості (+) (напр., скорочення витрат, підвищення швидкості, поліпшення якості) та загрози (-) (наприклад, високі інвестиції, кіберризики, залежність від постачальників, соціальна напруга). Це дозволило оцінити не лише напрямок зміни КРІ (покращення/погіршення), але й ризики, пов'язані з досягненням цих змін характеристик.

Розробка гіпотетичної моделі СУЛП. Для візуалізації та перевірки знайдених закономірностей була створена концептуальна модель СУЛП. Модель включала вибрані сфери (Закупівлі, Транспорт, Склад, Виконання замовлень) з призначеними їм КРІ, що відображали поточні характеристики системи. Модель дозволила ілюструвати, як впровадження технологій І4.0 може потенційно змінити значення цих КРІ, а отже, і базові характеристики ефективності СУЛП [6].

Ефективність сучасної системи управління ланцюгами поставок як цілісної системи критично залежить від інтеграції та узгодженої координації всіх її внутрішніх та зовнішніх процесів. Лише така узгодженість дозволяє досягти оптимального балансу між попитом і пропозицією, мінімізуючи витрати та максимізуючи рівень сервісу. Для структурування аналізу в дослідженні були виділені чотири ключові функціональні важелі управління ланцюгом поставок, кожен з яких відповідає за певну сферу діяльності та має свої характерні показники ефективності (КРІ), що вимірюють його внесок у загальні характеристики СУЛП [7].

Важелі «Закупівлі» охоплює всі процеси, пов'язані з пошуком, вибором, замовленням, отриманням та оплатою товарів і послуг у постачальників. Ключові характеристики СУЛП у цій сфері, що вимірюються КРІ, включають:

стандарти якості сировини/комплектуючих, відсоток бракованої продукції від постачальників, рівень обслуговування постачальників (наприклад, % своєчасних та повних поставок), точність обробки замовлень (відсутність помилок у замовленнях), витрати на закупівлі, стабільність цін.

Важель «Виробництво» відповідає за перетворення вхідних матеріалів (сировини, комплектуючих) у кінцеві готові вироби або послуги. Він включає операції, технології, управління якістю та виробничими потужностями. Вхід – ресурси та інформація, вихід – те, що отримує кінцевий споживач. Хоча цей важель є важливим, дані дослідження свідомо зосереджені на логістичних важелях (Закупівлі, Склад, Транспорт, Виконання замовлень) [7].

Складська логістика – охоплює управління запасами (сировиною, незавершеним виробництвом, готовою продукцією) та всі операції, пов'язані з прийманням, зберіганням, комплектацією та відпусканням товарів на складі. Еволюція характеристик СУЛП у цій сфері була значною через скорочення життєвих циклів продуктів та зростання коливальності попиту. Ключові KPI, що вимірюють ефективність складу як частини СУЛП: Час простою вантажівок під розвантаженням/завантаженням (док-час), Точність приймання товарів (відповідність документам, відсутність пошкоджень), Час від моменту приймання товару до розміщення на місце зберігання, Продуктивність комплектації замовлень (напр., рядків/годину), Час від початку комплектації замовлення до його готовності до відправлення, Точність комплектації (відсутність помилок), Коефіцієнт використання складської площі/об'єму, Рівень запасів, Витрати на зберігання.

Транспортна логістика – відповідає за фізичне переміщення товарно-матеріальних цінностей між точками ланцюга поставок (постачальник – виробник, виробник – склад, склад – клієнт) у потрібний час, у потрібному обсязі та з мінімальними витратами. Ключові KPI, що характеризують ефективність транспортної ланки СУЛП: коефіцієнт використання вантажопідйомності транспортних засобів, час обороту транспорту (від відправлення до повернення за новим вантажем), можливість відстеження вантажу у реальному часі (Visibility), відсоток вантажів, отриманих споживачем у зазначений термін (своєчасність доставки), відсоток вантажів, доставлених без пошкоджень, транспортні витрати на одиницю вантажу/замовлення, витрати на паливо [7].

Важель «виконання замовлень» охоплює всі процеси від отримання замовлення від клієнта до його успішної доставки та, часто, післяпродажного обслуговування. Характеристики СУЛП у цій сфері є критичними для клієнтської лояльності та значно варіюються між компаніями. Ключовими

KPI є рівень доступності продукту для негайного замовлення (In-Stock Availability), загальний досвід споживача (Customer Experience), час реакції на запит/скаргу клієнта, час від отримання замовлення до його відправлення (Order Cycle Time), час від відправлення до доставки клієнту, відсоток повних і точних замовлень, виконаних у строк (Perfect Order Fulfillment), рівень задоволеності клієнтів (Customer Satisfaction – CSAT/NPS), час виходу нового продукту на ринок (Time-to-Market).

Одна з найбільших проблем в управлінні характеристиками СУЛП полягає в глибокій взаємозалежності виділених важелів та їх KPI. Оптимізація одного показника в одній сфері може негативно вплинути на показники в іншій сфері, ускладнюючи оцінку загальної ефективності системи [8]. Наприклад, збільшення обсягів закупівель для отримання знижок та скорочення транспортних витрат за одиницю може призвести до значного зростання запасів на складі, що збільшує витрати на зберігання та ризик морального застарівання товарів. І навпаки, скорочення запасів для зниження складських витрат може призвести до частих нестач товару та збільшення витрат на експрес-доставку дрібних партій. Ця взаємозалежність підкреслює важливість системного, інтегрованого підходу до оцінки та оптимізації характеристик СУЛП в цілому, а не окремих її частин [9].

У сучасних умовах, коли І4.0 лише починає набирати повного оберту, для всебічного вивчення трансформації характеристик СУЛП було обрано підхід, що базується не на жорстких таблицях чи матрицях, а на системному описі ключових рис самої системи управління ланцюгами постачань. Замість декомпозиції за технологіями й показниками створено описовий профіль СУЛП, який охоплює наступні взаємопов'язані характеристики [10].

Прозорість (Visibility). Забезпечення можливості відстежувати рух товарів і інформації на всіх етапах – від постачальника сировини до кінцевого споживача. У цифрову епоху це означає інтеграцію даних з IoT датчиків, GPS трекерів і ERP систем у єдину інформаційну панель, де будь-яка зміна статусу замовлення чи транспортної одиниці відображається в реальному часі.

Адаптивність (Agility). Здатність швидко реагувати на коливання попиту, порушення у постачанні та форс-мажори. Гнучкі планувальні й алгоритмічні інструменти дозволяють автоматично перегруповувати замовлення, перенаправляти потоки вантажів і змінювати пріоритети задач без втручання людини.

Інтероперабельність (Interoperability). Можливість безшовного обміну даними між різними учасниками ланцюга: постачальниками, перевізниками, операторами складів, дистриб'юторами

та клієнтами. Це досягається через використання відкритих API, стандартів EDI й технологій blockchain для гарантії цілісності обміну.

Відповідальність (Responsiveness). Швидкість та точність виконання запитів клієнтів і внутрішніх замовлень. Оцінюється не лише середнім часом обробки, але й рівнем автоматичного реагування на виклики (наприклад, перевантаження складу чи затримки транспорту) через вбудовані системи сповіщень та коригувальних дій.

Ресурсоефективність (Efficiency). Оптимальне використання матеріальних, фінансових і трудових ресурсів. Аналітика великих даних дає змогу прогнозувати пік завантаження, знижувати простої й мінімізувати запаси без ризику зриву обслуговування.

Резильєнс (Resilience). Стійкість ланцюга до зовнішніх потрясінь: перебоїв у постачанні, змін регуляторних вимог, форс-мажорів. Для цього СУЛП проєктують із запасними маршрутами, альтернативними постачальниками й модульними схемами розміщення виробничих потужностей та складів.

Інноваційність (Innovativeness). Здатність впроваджувати новітні рішення від децентралізованого виробництва (3D друк) до предиктивного обслуговування обладнання та автономних транспортних засобів – і швидко масштабувати їх у межах всіх логістичних процесів.

Оцінка кожної з цих характеристик здійснюється шляхом ретельного аналізу фактичних процесів та показників у кожній функціональній сфері СУЛП (закупівлі, транспорт, склад, виконання замовлень). Замість підрахунку «так/ні» для впливу окремих технологій застосовується якісно кількісна матриця готовності: для кожної характеристики визначаються поточний рівень, бажаний таргет та ключові драйвери трансформації. Такий профіль дозволяє: виявити «вузькі місця» (характеристики, що найбільш відстають від цільового рівня та потребують першочергового втручання); пріоритетувати інвестиції (оцінювати, які цифрові рішення принесуть найбільший ефект у вигляді підвищення видимості, адаптивності чи ефективності); формувати план заходів, а саме поєд-

нувати технологічні впровадження (наприклад, впровадження централізованої платформи IoT або SI-контролеру) із змінами в організаційних процесах і навчанні персоналу; відстежувати прогрес шляхом регулярного вимірювання ключових індикаторів за встановленими таргетами та коригування стратегії в разі відхилень [11].

Такий підхід, сфокусований не на жорстких матрицях, а на динамічному профілі характеристик СУЛП, забезпечує гнучкість і можливість швидкого перегляду пріоритетів у міру того, як нові технології та бізнес моделі розвиваються або з'являються нові виклики.

Використання цього описового профілю характеристик дає менеджерам і дослідникам змогу краще розуміти, як саме цифрові рішення змінюють природу управління ланцюгами постачань, і дозволяє швидше адаптувати стратегії до реальних потреб бізнесу й умов ринку. Це створює міцний фундамент для подальшого впровадження інновацій та безперервного покращення роботи СУЛП в епоху Індустрії 4.0 [12].

Висновки. проведене дослідження вказує на глибоку трансформацію систем управління ланцюгами поставок (СУЛП) під впливом Індустрії 4.0. Ключові технології (CPS, IoT, Big Data, AI, хмара, роботика) радикально змінюють архітектуру СУЛП, формуючи гіперзв'язані мережі з новими характеристиками: повною прозорістю (End-to-End Visibility), адаптивністю, інтероперабельністю, ресурсоефективністю, резильєнтністю та інноваційністю. Дослідження фокусується на логістичних аспектах (закупівлі, транспорт, склад, виконання замовлень), визначаючи для кожної сфери ключові показники ефективності (KPI) та аналізуючи вплив технологій І4.0 на ці KPI. Замість традиційних матриць пропонується «описовий профіль характеристик СУЛП», що дозволяє оцінювати поточний стан, цільові показники, драйвери трансформації та ризики. Цей підхід дає змогу пріоритетувати інвестиції, виявляти «вузькі місця» та формувати стратегії цифрової трансформації, спрямовані на підвищення клієнтоорієнтованості, оптимізацію витрат і конкурентоспроможності в умовах динамічного ринку.

Список використаних джерел:

1. Frederico, G. F., Kumar, V., Garza-Reyes, J. A., Kumar, A., & Agrawal, R. (2023). Impact of I4.0 technologies and their interoperability on Supply Chain Performance: A systematic literature review. *The International Journal of Logistics Management*, № 34 (Vol.2), P. 437–473.
2. Ivanov, D., Dolgui, A., & Sokolov, B. (Eds.). (2021). *Handbook of Ripple Effects in the Supply Chain*. Springer.
3. Kamble, S. S., Gunasekaran, A., & Gawankar, S. A. (2020). Achieving sustainable performance in a data-driven agriculture supply chain: A review for research and applications. *International Journal of Production Economics*, № 219, P. 179–194.
4. Luthra, S., & Mangla, S. K. (2023). Evaluating challenges to Industry 4.0 initiatives for supply chain sustainability in emerging economies. *Process Safety and Environmental Protection*, № 170, P. 1119–1132.
5. Mastos, T. D., Nizamis, A., Vafeiadis, T., Alexopoulos, N., Ntinis, C., Gkortzis, D., & Tzovaras, D. (2021). Industry 4.0 sustainable supply chains: An application of an IoT enabled scrap metal management solution. *Journal of Cleaner Production*, № 312, 127–654.

6. Müller, J. M., Buliga, O., & Voigt, K. I. (2021). The role of absorptive capacity and innovation strategy in the design of Industry 4.0 business Models-A comparison between SMEs and large enterprises. *International Journal of Production Economics*, № 240, 108–244.
7. Queiroz, M. M., Pereira, S. C. F., Telles, R., & Machado, M. C. (2021). Industry 4.0 and digital supply chain capabilities: A framework for understanding digitalisation challenges and opportunities. *Benchmarking: An International Journal*, № 28(Vol. 5), P. 1761–1782.
8. Ralston, P., & Blackhurst, J. (2020). Industry 4.0 and resilience in the supply chain: A driver of capability enhancement or capability loss? *International Journal of Production Research*, № 58 (Vol. 16), P. 5006–5019.
9. Tortorella, G. L., Saurin, T. A., Fogliatto, F. S., Tlapa, D., Moyano-Fuentes, J., Gaiardelli, P., ... & Narayanamurthy, G. (2023). The impact of Industry 4.0 technologies on operational resilience. *Production Planning & Control*, № 34 (Vol. 16), P. 1537–1554.
10. Winkelhaus, S., & Grosse, E. H. (2023). Logistics 4.0: a systematic review towards a new logistics system. *International Journal of Production Research*, № 61 (Vol. 18), P. 6207–6236.
11. Zekhnini, K., Cherrafi, A., Bouhaddou, I., Chaouni Benabdellah, A., & Bag, S. (2024). Supply chain management 4.0: a literature review and research framework. *Benchmarking: An International Journal*, № 31 (Vol. 1), P. 211–242.
12. Zhou, C., Damgaard, C. M., Zhao, M., & Christensen, T. H. (2023). How does digitalization affect the environmental performance of solid waste management? A systematic review. *Waste Management*, № 169, P. 61–75.
13. European Commission. (2023). *Digitalising the European Economy: Policies for a thriving and inclusive digital transformation*. Directorate-General for Communications Networks, Content and Technology.
14. McKinsey & Company. (2023). *The State of Supply Chain Technology: What's Now, What's Next, and What's Needed to Win*.

Стаття надійшла до редакції 13.06.2025