

# КІБЕРНЕТИКА та КОМП'ЮТЕРНІ ТЕХНОЛОГІЇ

*Розглянуто питання актуальності та проблем Індустрії 4.0. Під час аналізу виявлено суттєве зростання зацікавленості щодо впровадження рішень Індустрії 4.0 в підприємства, про що свідчить збільшення кількості наукових статей на цю тематику, а також аналіз ринку програмних продуктів. Серед основних переваг використання технологій та підходів Індустрії 4.0 виділено оптимізацію використання ресурсів, підтримку прийняття рішень, прогнозоване обслуговування та підвищення якості товарів. Серед основних проблем виділено застарілі IT-системи, проблеми із сумісністю, нестача навичок персоналу, обмеженість ресурсів, складнощі в управліннях великими системами, а також кібербезпеку. В статті запропоновано архітектуру IT-системи для підтримки прийняття для оптимізації використання ресурсів за допомогою використання цифрових двійників, графових нейронних мереж та навчання з підкріпленням.*

**Ключові слова:** глибоке машинне навчання, навчання з підкріпленням, IoT, IIoT, цифрові двійники, Індустрія 4.0, графові нейронні мережі.

© Є.Д. Щербина, І.М. Шпінарева, 2025

УДК 004.8

DOI:10.34229/2707-451X.25.4.10

Є.Д. ЩЕРБИНА, І.М. ШПІНАРЕВА

## ІНДУСТРІЯ 4.0. ОГЛЯД ТРЕНДІВ, ПРОБЛЕМ ТА ШЛЯХІВ ЇХ ВИРІШЕННЯ

**Вступ.** З розвитком науки та техніки людство отримувало дедалі більше можливостей щодо лікування хвороб, виготовлення їжі, будівництва споруд, полювання тощо. Однак до XVIII століття людська праця була виключно ручною, механічною, що значно обмежувало кількість і якість виготовлених товарів, оскільки справжніх майстрів завжди була невелика кількість.

У XVIII столітті відбулася Перша індустріальна революція, яка дозволила збільшити кількість і якість товарів завдяки використанню перших примітивних машин та водяної або парової енергії.

Через століття відбулася Друга індустріальна революція, яка впровадила використання газу, нафти та електрики як джерел енергії, конвеєрні стрічки для підвищення автоматизації та перші сучасні засоби комунікації, такі як телефони й телеграфи, у виробничий процес. Друга індустріальна революція дозволила виробляти значно складніші вироби, а також вивести промисловість на рівень масового виробництва.

У середині XX століття відбулася Третя індустріальна революція, яка активно залучила комп'ютери, автоматизовані контролери, новітні способи комунікації та аналітику даних. Це дозволило суттєво збільшити якість і складність товарів або послуг, а також зменшити вплив людського фактора на виробничий процес [1].

Наразі ми знаходимося на межі переходу до Четвертої індустріальної революції, або Індустрії 4.0. Вперше «Індустрія 4.0» була згадана у 2011 році на індустріальній виставці в Ганновері, де уряд Німеччини поставив завдання розширити застосування інформаційних технологій у виробництві. У подальшому цю ідею розширив Клаус Шваб у своїй книжці «Четверта промислова революція» [1–4].

Основними властивостями є:

1. Використання технології IIoT (Industrial Internet of Things) – індустріальне використання технології IoT (Internet of Things). Internet of Things – прилади, оснащені датчиками, програмним забезпеченням та іншими технологіями, що дозволяють отримувати та передавати дані для сповіщення користувачів або для автоматизації певних дій [5, 6].

2. Використання цифрових двійників (Digital Twins) – віртуальних репрезентацій об'єктів або систем, створених для точного відображення фізичного об'єкта [7].

3. Використання штучного інтелекту. Штучний інтелект – це набір технологій, що дозволяють комп'ютерам виконувати різноманітні функції, включаючи здатність бачити, розуміти та перекладати усну й письмову мову, аналізувати дані, надавати рекомендації тощо [8].

4. Використання хмарних обчислень – доступність обчислювальних ресурсів (таких як сховище та інфраструктура) на вимогу як послуг через Інтернет. Використання хмарних обчислень дозволяє знизити вартість функціонування системи [9].

5. Акцент на кібербезпеці. Оскільки більшість технологій Індустрії 4.0 пов'язані з обробкою великої кількості даних, то виникає потреба в їхньому надійному та безпечному збереженні.

6. Використання граничних обчислень – підхід до розподіленого обчислення, який наближає корпоративні програми до джерел даних, таких як пристрої Інтернету речей або локальні периферійні сервери [10].

За допомогою цих нововведень бізнес може отримати наступні переваги [11, 12]:

Оптимізація використання ресурсів: зниження споживання електропостачання або використання електропостачання в субсидований час, скорочення часу простою тощо.

1. Підтримка в прийнятті рішень: за допомогою збору даних та їхнього аналізу сучасними методами штучного інтелекту можна виявити невідомі раніше шаблони поведінки системи чи, наприклад, повідомляти користувача про виникнення критичних помилок та надавати потенційні причини й рішення в конкретній ситуації.

2. Прогнозоване обслуговування: за допомогою зібраних з датчиків даних можна проводити своєчасне й профілактичне обслуговування, що зменшує кількість витрат та покращує безпеку підприємства.

3. Підвищення якості товарів: новітня автоматизація дозволяє ще більше знизити людський фактор, а також відкрити шлях до виробництва товарів, індивідуально підібраних під клієнта.

Індустрія 4.0 активно розвивається в контексті інвестицій, розробки технологій та популярності. Так, наприклад, за даними з Web of Science з 2020 по 2023 роки кількість статей на тему Індустрії 4.0, її підходів та технологій досягла 1069, із зростанням у 30.77 % кожен рік. До того ж, за опитуванням у 2025 році 92 % виробників вважають, що інтелектуальне виробництво буде основним рушієм конкурентоспроможності протягом наступних трьох років, що на 6 % більше ніж наведено в опитуванні 2019 року. 85% респондентів вважають, що впровадження інтелектуального виробництва покращують гнучкість, змінюють способи виробництва та заохочують нові кадри. Респонденти відмічали, що після впровадження технологій та підходів Індустрії 4.0 зафіксували в середньому покращення обсягів виробництва на 10–20 %, покращення продуктивності праці на 7–20 % та розблоковані потужності на 10–15 % [13, 14].

Метою даної роботи – розвиток теоретико-методологічних засад щодо впливу технологій четвертої промислової революції на автоматизацію підприємств за рахунок впровадження систем підтримки прийняття рішень та предикативного обслуговування IoT систем.

Аналітика даних, що надаються пристроями IoT, у реальному часі оптимізує управління ланцюжком поставок, знижує витрати на запаси та підвищує операційну ефективність. Оскільки галузі продовжують впроваджувати IoT, сукупний ефект цієї економії коштів сприяє підвищенню конкурентоспроможності та фінансової стійкості промислового сектору. А можливість предикативного обслуговування дозволяє компаніям передбачати відмови обладнання та виконувати своєчасний ремонт, тим самим уникаючи дорогих простоїв та продовжуючи термін служби обладнання.

### **Проблеми інтеграції технологій Індустрії 4.0**

Однак треба зазначити, що існують проблеми в адаптації виробництв до стандартів Індустрії 4.0 [15–17].

1. Застарілі ІТ-системи: програмне забезпечення може не мати потрібного функціоналу для забезпечення обробки даних на належному рівні, а також має погану сумісність з новими додатками, що робить інтеграцію дуже коштовною.

2. Сумісність: новітнє обладнання може бути несумісним зі старим, до того ж старе обладнання може не мати потрібної кількості датчиків, що значно ускладнює збір та використання даних.

3. Вартість та обмеженість ресурсів: для того щоб адаптувати старе виробництво до Індустрії 4.0, іноді потрібно витратити багато грошей та часу, що впливає на готовність менеджменту до впровадження нових технологій.

4. Нестача навичок персоналу: з впровадженням нових технологій та підходів змінюється процес керування підприємствами, а отже, персонал має навчитися використовувати нове програмне забезпечення або іноді перекваліфікуватися, щоб приносити більшу користь на новій посаді. До того ж, для деяких особливо складних підприємств потрібно наймати в штат фахівців, які будуть інтегрувати нові системи. Усе це потребує інвестицій, а також часу для адаптації, що впливає на ефективність.

5. Управління змінами: у великих підприємствах існує багато відділів, які залежать від роботи один одного, що означає, що впровадження новітніх технологій має бути добре скоординоване та мати найменший вплив на роботу інших частин компанії.

6. Кібербезпека: навіть компанії, які не мали потреби у впровадженні практик інформаційної безпеки на високому рівні, тепер потребуватимуть впровадження захисту обладнання та даних від доступу зловмисників.

### **Аналіз сучасних методів та технологій**

Останнім часом особливу увагу приділяють згаданим вище технологіям цифрових двійників та штучного інтелекту в ІоТ. Про це свідчить стрімке збільшення наукових публікацій в останні роки. Саме ці технології та їхнє поєднання дозволяють вирішити ключові задачі у сферах впровадження Індустрії 4.0 [18, 19].

Цифрові двійники, спроектовані з урахуванням потреб безпеки, сумісності пристроїв та неоднорідності даних, дозволяють отримувати аналітику щодо роботи підприємства зі значно більшою деталізацією, ніж раніше, що відкриває можливості до якіснішого прийняття рішень щодо використання ресурсів на підприємстві, прогнозувати роботи з обслуговування, відстежувати якість наданих послуг або вироблених товарів.

Незважаючи на значні переваги використання цифрових двійників у контексті збору та систематизації даних, аналіз даних та прийняття рішень на їхній основі здійснюють люди, що може впливати на ефективність роботи в системах з великою кількістю процесів та змінних параметрів. Для вирішення цієї проблеми активно впроваджують рішення на основі штучного інтелекту, які дозволяють сповіщати користувачів про аномалії, пропонувати сценарії управління системою, зменшувати використання ресурсів (таких як електроенергія) тощо.

Наразі поєднання цих двох технологій найбільше розвивається у напрямках прогнозування, підтримки прийняття рішень та оптимізації витрат. Наприклад, для вирішення задач економії енергоспоживання у готелях компанія SensorFlow використовує власні пристрої для збору даних про температуру, рух у приміщенні, енергоспоживання, а також для виконання дій з автоматизації. Хмарна система дозволяє співробітникам готелів бачити у реальному часі інформацію про кожну кімнату окремо [20]. Іншою системою, яка допомагає автоматизувати використання систем вентиляції та обігріву, збирає дані про споживання та оптимізує витрати енергоспоживання за допомогою машинного навчання, є система від компанії Verdigris. За допомогою датчиків власного виробництва – Verdigris EV2 Power Meter та Verdigris EV2 Pro Power Quality Meter – збираються дані, які перенаправляються

до системи управління. За допомогою декількох навчених, нормалізованих відносно погоди моделей система дозволяє спрогнозувати витрати електроенергії на опалення та вентиляцію. Також існує система, яка може відстежувати шаблони використання приладів на основі пікового навантаження та коригувати ці шаблони для зменшення пікового навантаження [21, 22].

Вищенаведені рішення задач підвищення ефективності використання ресурсів мають декілька проблем.

По-перше, обидві системи потребують встановлення додаткових, спеціалізованих пристроїв та датчиків, що може бути надлишковим у системах, в яких вже побудована система збору даних на основі інших датчиків.

По-друге, вищеописані системи вирішують лише вузьку задачу з урахуванням обмеженої кількості факторів. Наприклад, система від SensorFlow вирішує задачу визначення присутності мешканця в приміщенні і вже відносно цього приймає рішення щодо включення або відключення приладів. Цей підхід не враховує інші можливі шаблони користування – наприклад, використання системи обігріву, коли мешканця немає, для збереження заданої температури в залежності від погоди – тож його не можна легко перенести на інші підприємства. Система від Verdigris вирішує тільки проблему автоматизації вентиляційної системи під час навантажень і може не враховувати специфіку бізнес-процесів підприємства, що обмежує можливості для інтеграції у систему з чіткими бізнес-правилами.

По-третє, постійний збір даних за допомогою датчиків або, більш загально, формування цифрових двійників потребує витрат електроенергії, що знижує ефективність подальших оптимізацій. Отже, існує потреба у створенні технології, що дозволить гнучко налаштовувати критичні бізнес-правила підприємства, зможе знаходити приховані бізнес-процеси, а також зможе оптимізувати використання ресурсів у багатьох задачах [20 – 22].

Одним із можливих рішень є впровадження методів машинного навчання з підкріпленням в IoT-системи. Навчання з підкріпленням – це метод машинного навчання, який навчає програмне забезпечення приймати рішення для досягнення найбільш оптимальних результатів. Він імітує процес навчання шляхом спроб і помилок, який використовують люди для досягнення своїх цілей. Дії програмного забезпечення, які сприяють досягненню вашої мети, підкріплюються, тоді як дії, що віддаляють від мети, ігноруються. Розробка моделі на основі цього методу дозволить вивчати бізнес-процеси без потреби в тонкому налаштуванні під кожне окреме підприємство, оскільки середовище (тобто підприємство) буде самостійно навчати модель потрібним діям та станам. Також цей метод дозволить знаходити приховані залежності та швидко перенавчатися, коли шаблони використання змінюються [23].

Для збереження шаблонів роботи IoT-системи та постійного аналізу можна використовувати просторово-часові графи. Просторово-часовий граф – це граф, який відображає часові закономірності та просторову інформацію про події використання речей. У цьому графі вузли представляють місця розташування, часові мітки та самі речі, а ребра відображають зв'язки між місцями розташування, часовими мітками та речами на основі подібностей і періодичних шаблонів. Такі графи, в поєднанні з спеціалізованими векторними базами даних, можуть бути зручною та швидкою базою для побудови цифрових двійників [24].

Поєднання просторово-часових графів та машинного навчання з підкріпленням показало гарні результати в задачі побудови цифрових двійників з використанням найменшої кількості ресурсів, таких як електроенергія та оперативна пам'ять. Так, використання оперативної пам'яті зменшилось на 20 %, а електроенергії – на 25 %. Це доводить, що подібна комбінація технологій дозволяє успішно аналізувати мінливі дані отримані з IoT-системи та має перспективи для дослідження щодо вирішення в задачах регресії та підтримки прийняття рішень [25].

Інший метод, що показав ефективність в IoT-системах, це графові нейронні мережі. Графові нейронні мережі – це нейронні моделі, які відображають залежності в графах шляхом обміну повідомленнями між вузлами графів. Вони дозволяють знаходити взаємозв'язки з іншими пристроями в IoT-системах та ефективно виконувати задачі пошуку аномалій, зменшення використання енергії, відбиття кібератак тощо. Деякі реалізації графових нейронних мереж проводять обчислення на кінцевих пристроях, що дозволяє суттєво покращити продуктивність моделі та використовувати вільні обчислювальні ресурси. Усе це робить графові нейронні мережі критично важливими для розвитку IoT-систем нового покоління [26, 27].

**Архітектура інформаційної системи із модулями підтримки прийняття рішень**

Отже, побудова інформаційної системи з впровадженням моделі підтримки прийняття рішень та управління ресурсами на підприємствах зі складними бізнес-процесами на основі машинного навчання з підкріпленням, цифрових двійників, просторово-часових графів та графових нейронних мереж виглядає перспективною, оскільки поєднання цих технологій дозволяє всебічно аналізувати IoT-систему та постійно покращувати якість прийняття рішень. На рисунку запропонований варіант реалізації подібної системи.

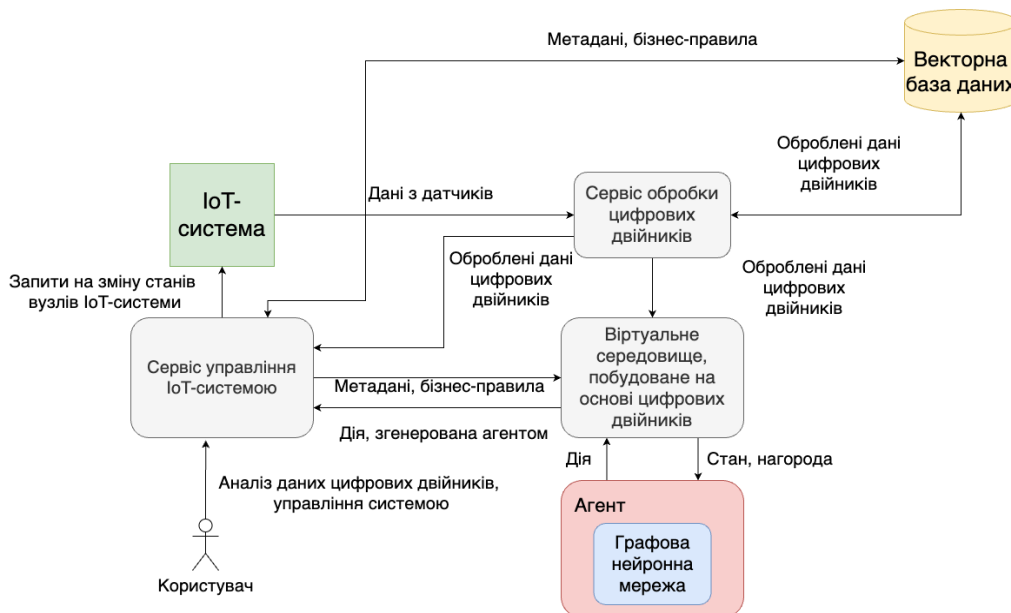


РИСУНОК. Запропонована архітектура IT-системи із модулями підтримки прийняття рішень

Блок “IoT-система” відображає реальну, фізичну IoT-систему, яка може передавати дані з датчиків та отримувати запити на зміну станів вузлів системи (наприклад, переключення реле).

Блок “Сервіс обробки цифрових двійників” відповідає за опитування приладів у системі та форматування даних, отриманих з датчиків. Головна вимога – можливість отримувати велику кількість даних, нормалізувати їх та формувати до вигляду, який може бути оброблений іншими сервісами системи. Ця система може мати вбудовані методи машинного навчання для оптимізації кількості запитів для синхронізації. Важливий аспект це підтримка основних протоколів та драйверів для роботи із пристроями.

Блок “Векторна база даних” відповідає за збереження даних у векторній базі даних. Векторна база даних зберігає, керує та індексує багатовимірні векторні дані. Точки даних зберігаються як масиви чисел, що називаються "векторами", які кластеризуються на основі схожості. Ця архітектура

забезпечує низьку затримку запитів, що робить її ефективною для застосувань штучного інтелекту [28].

Блок “Віртуальне середовище, побудоване на основі цифрових двійників” відповідає за створення середовища, яке відображає реальну IoT-систему для агента. Для дій агента середовище надає стани залежно від стану всієї системи, бізнес-правил, метаданих, зібраних під час взаємодії з системою, а також надсилає результати роботи агента в інші сервіси. Важливою частиною є адаптація середовища відносно дій та реакцій користувача відносно рекомендацій наданих за системою. Іншою функціональністю, яка має бути присутня є можливість інтеграції відомих бізнес-правил підприємства, що були надані користувачами за допомогою користувацького інтерфейсу.

Блок “Агент” відповідає за агента, який має навчатися під час взаємодії з середовищем. Модель, яка використовується для виконання задач, це графова нейронна мережа. Важливим є врахування того, що навчання та використання моделі має відбуватися одночасно без втрати ефективності.

Блок “Сервіс управління IoT-системою” відповідає за надання інформації користувачу про стан IoT-системи, управління вузлами системи, аналітику щодо використання системи, а також інформацію про рекомендовані кроки щодо оптимізації її роботи, які були отримані з агента за допомогою методів машинного навчання.

Така архітектура дозволить отримувати точну і своєчасну інформацію про стан системи, автоматично підлаштовувати моделі підтримки прийняття рішень під змінені потреби, а також надавати користувачу інструменти для повного контролю над IoT-системою. До того ж, оскільки система є мікросервісною, є можливість прибирати або навпаки додавати нові сервіси в залежності від зміни задач. Так, для покращення захищеності системи від кібератак, можливе додавання модуля, який буде оцінювати дані, отримані з цифрових двійників, та виявляти інциденти, що можуть вказувати на вразливість або повноцінну атаку на систему. Подібна можливість розширення архітектури є критичною в стрімко змінному середовищі Індустрії 4.0.

**Висновки.** В роботі проведено аналіз актуальності, переваг та проблем впровадження технологій Індустрії 4.0 у сучасні підприємства. Виявлено, що ця сфера активно розвивається, про що свідчать дані про кількість підприємств, що впроваджують автоматизацію за допомогою технологій Індустрії 4.0 та отримують позитивні результати, а також зростаюча кількість статей, що досліджують нові технології та методи їх інтеграції з існуючими системами.

Ключові технології це IoT системи, цифрові двійники, штучних інтелект, хмарні обчислення, граничні обчислення та технології захисту даних. Серед переваг впровадження виділено: оптимізацію використання ресурсів, підтримку в прийнятті рішень, прогнозоване обслуговування, підвищення якості товарів. А також виділено такі складнощі інтеграції технологій у підприємства: застарілі IT-системи, сумісність обладнання, вартість та обмеженість ресурсів, нестача навичок персоналу, управління змінами, проблеми кібербезпеки.

В статті проведено аналіз таких технологій як цифрові двійники, просторово-часові графи, графові нейронні мережі та навчання з підкріпленням, а також наведено приклади їхнього використання в існуючих системах, виділено такі проблеми: потреба у провадженні додаткового обладнання у підприємство та вузьку спеціалізацію наведених систем. Для вирішення цих проблем запропоновано архітектуру IT-системи, що спрямована на вирішення задачі підтримки прийняття рішень для оптимізації використання ресурсів у IoT системах. Вона оснований на трьох ключових технологіях: цифрові двійники, машинне навчання з підкріпленням та графові нейронні мережі. Ці технології доводять ефективність для роботи із даними з IoT систем, а гнучка архітектура системи дозволяє у май-

бутньому адаптувати ІТ-систему до роботи із іншими завданнями. Адаптивність та модульність такої системи дозволяє її впровадження у багато підприємств із відмінними бізнес-умовами. Надані такі зони для подальшого дослідження як: динамічна адаптація до середовища із поєднанням заздалегідь відомих бізнес-правил; навчання агента із мінімальним погіршенням продуктивності; модель цифрового двійника та механізмів очищення та трансформації даних.

**Авторські внески:** Щербина Є. – дослідження, концептуалізація, аналіз, розробка архітектури системи, методологія, написання – оригінальний варіант. Шпінарева І. – ресурси, редагування, узгальнення.

#### Список літератури

1. Sharma A., Singh B. Evolution of Industrial Revolutions: A Review. *International Journal of Innovative Technology and Exploring Engineering*. 2020. **9** (11). P. 1634–1638. <https://doi.org/10.35940/ijitee.I7144.0991120>
2. Castro H., Pinheiro P., Putnik G., Castro A., Fontana, R., Romero F. Industry 4.0 and industrial revolutions: An assessment based on complexity. *FME Transactions*. 2019. **47** (4). P. 831–840. <https://doi.org/10.5937/fmet1904831P>
3. Schwab K. The Fourth Industrial Revolution. *World Economic Forum*. June 7. 2025. <https://www.weforum.org/about/the-fourth-industrial-revolution-by-klaus-schwab/> (звернення: 01.06.2025)
4. Fourth Industrial Revolution. *World Economic Forum*. June 7. 2025. <https://intelligence.weforum.org/topics/a1Gb0000001RihBEAW> (звернення: 01.06.2025)
5. Hussein A.H. Internet of Things (IOT): Research Challenges and Future Applications. *International Journal of Advanced Computer Science and Applications*. 2019. **10** (6). P. 84–90. <https://doi.org/10.14569/IJACSA.2019.0100611>
6. Alabadi M., Habbal A., Wei X. Industrial Internet of Things: Requirements, Architecture, Challenges, and Future Research Directions. *IEEE Access*. 2022. **10**. P. 66374–66400. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2022.3185049>
7. Liuță M., Moisescu M., Pop E., Ionita A., Caramihai S., Mitulescu T. Digital Twin – A Review of the Evolution from Concept to Technology and Its Analytical Perspectives on Applications in Various Fields. *Applied Sciences*. 2024. **14** (13). P. 1–38. <https://doi.org/10.3390/app14135454>
8. Ghosh A., Chakraborty D., Law A. Artificial intelligence in Internet of things. *CAAI Transactions on Intelligence Technology*. 2018. **3** (4). P. 208–218. <https://doi.org/10.1049/trit.2018.1008>
9. Ahmad I., Bakht H., Mohan U. Cloud Computing – A Comprehensive Definition. *Journal of Computing and Management Studies*. 2017. **1** (1). P. 1–9. <https://journals.indexcopernicus.com/api/file/viewByFileId/234155.pdf>
10. Liang S., Jin S., Chen Y. A Review of Edge Computing Technology and Its Applications in Power Systems. *Energies*. 2024. **17** (13). P. 1–31. <http://dx.doi.org/10.3390/en17133230>
11. Filgueiras I.F.L.V., de Melo F.J.C., Sobral E.F.M., Barbosa A.A.L., de Medeiros D.D., de Almeida Pinto P.A.L., Amorim B. P. Analyzing the Benefits of Industry 4.0 Technologies That Impact Sustainability 4.0 in Banking Services. *Sustainability*. 2024. **16** (14). 6179. <https://doi.org/10.3390/su16146179>
12. Fonseca L.M. Industry 4.0 and the digital society: concepts, dimensions and envisioned benefits. *In Proceedings of the International Conference on Business Excellence*. 2018. **12** (1). P. 386–397. <https://doi.org/10.2478/picbe-2018-0034>
13. Domínguez D.R., Abreu M.B.I., Parv A.L. Main Trend Topics on Industry 4.0 in the Manufacturing Sector: A Bibliometric Review. *Applied Sciences*. 2024. **14** (15). P. 1–21. <https://doi.org/10.3390/app14156450>
14. Gaus T., Schlotterbeck M. Smart Manufacturing and Operations Survey: Navigating challenges to implementation. *Deloitte*. Retrieved. 2025. <https://www2.deloitte.com/us/en/insights/industry/manufacturing/2025-smart-manufacturing-survey.html> (звернення: 01.06.2025)
15. Bakhtari A., Kumar V., Waris M., Sanin C., Szczerbicki E. Industry 4.0 Implementation Challenges in Manufacturing Industries: an Interpretive Structural Modelling Approach. *Procedia Computer Science*. 2020. **176**. P. 2384–2393. <https://doi.org/10.1016/j.procs.2020.09.306>
16. Alqoud A., Schaefer D., Milisavljevic-Syed J. Industry 4.0: Challenges and Opportunities of Digitalisation Manufacturing Systems. *In Advances in Manufacturing Technology XXXV*. 2022. **25**. P. 25–30. <https://doi.org/10.3233/ATDE220560>
17. Avdibasic E., Toksanovna A.S., Durakovic B. Cybersecurity challenges in Industry 4.0: A state of the art review. *Defense and Security Studies*. 2022. **3**. P. 32–49. <https://doi.org/10.3233/ATDE220560>

18. Khadam U., Davidsson P., Spalazzese R. Exploring the Role of Artificial Intelligence in Internet of Things Systems: A Systematic Mapping Study. *Sensors*. 2024. **24** (20). P. 6511. <https://doi.org/10.3390/s24206511>
19. Alnaser A., Maxi M., Elmousalami H. AI-Powered Digital Twins and Internet of Things for Smart Cities and Sustainable Building Environment. *Applied Sciences*. 2024. **14** (24). P. 1–28. <https://doi.org/10.3390/app142412056>
20. Smart hotel software technology. *SensorFlow*. <https://www.sensorflow.co/hotel-energy-saving-solutions/smart-hotel-software-technology/> (звернення: 01.06.2025)
21. Fast, Reliable M&V – Without the Hassle. *Verdigris*. <https://www.verdigris.co/products/analytics> (звернення: 01.06.2025)
22. Adaptive Automation Delivers Responsive Energy Savings. *Verdigris*. <https://www.verdigris.co/products/adaptive-automation> (звернення: 01.06.2025)
23. Ghasemi M., Ebrahimi D. Introduction to Reinforcement Learning. *Computer Science*. 2024. P. 1–19. <https://doi.org/10.48550/arXiv.2408.07712>
24. Zeghina A., Leborgne A., Le Ber F., Vacavant A. Deep learning on spatiotemporal graphs: A systematic review, methodological landscape, and research opportunities. *Neurocomputing*. 2024. P. 1–21. <https://doi.org/10.1016/j.neucom.2024.127861>
25. Cakir L.V., Duran K., Thomson C., Broadbent M., Canberk B. AI in Energy Digital Twinning: A Reinforcement Learning-based Adaptive Digital Twin Model for Green Cities. In *ICC 2024 - IEEE International Conference on Communications*. 2024. <https://doi.org/10.1109/ICC51166.2024.10622773>
26. Tung N.X., Tung L., & et al. Graph Neural Networks for Next-Generation-IoT: Recent Advances and Open Challenges. *Computer Science*. 2025. P. 1–37. <https://doi.org/10.48550/arXiv.2412.20634>
27. Zhou J., Cui G. & et al. Graph neural networks: A review of methods and applications. *Computer Science*. 2020. P. 57–81. <https://doi.org/10.48550/arXiv.1812.08434>
28. Taipalus T. Vector database management systems: Fundamental concepts, use-cases, and current challenges. *Cognitive Systems Research*. 2024. **85**. P. 1–8. <https://doi.org/10.1016/j.cogsys.2024.101216>

Одержано 16.06.2025

**Щербина Євгеній Дмитрович,**

аспірант, кафедра математичного забезпечення комп'ютерних систем,  
Одеський національний університет І.І. Мечникова,  
<https://orcid.org/0009-0002-0150-3091>  
[scherbinag2001@gmail.com](mailto:scherbinag2001@gmail.com)

**Шпінарева Ірина Михайлівна,**

кандидат фізико-математичних наук, доцент кафедри математичного забезпечення комп'ютерних систем,  
Одеський національний університет І.І. Мечникова.  
<https://orcid.org/0000-0001-9208-4923>

UDC 004.8

Yevhenii Shcherbyna \*, Iryna Shpinareva

**Industry 4.0. Overview of Trends, Challenges, and Solutions***Odesa I.I. Mechnikov National University*\* Correspondence: [scherbinag2001@gmail.com](mailto:scherbinag2001@gmail.com)

**Introduction.** The development of science and technology has significantly changed approaches to enterprise organization, product manufacturing, and service provision. Currently, the world is transitioning to a new technological paradigm – Industry 4.0. This involves the use of IIoT systems, digital twins, artificial intelligence, cloud computing, edge computing, and data protection technologies. Integrating these technologies into an enterprise allows for the creation of a system that can handle tasks such as optimizing resource utilization, supporting decision-making, predictive maintenance, and improving product quality.

**Purpose of the Work.** The main goal of this article is to form a theoretical and methodological basis for analyzing the impact of Fourth Industrial Revolution technologies on enterprise automation processes, which is realized through the implementation of decision support systems and predictive maintenance of IoT systems. Specifically, this includes: studying the optimization of resource utilization and decision support in IoT systems; analyzing the main problems in solving these tasks; analyzing existing technologies and IT systems, as well as developing an IT system architecture that would have the capabilities to solve these problems and avoid identified issues.

**Results.** During the analysis of articles and existing market systems, it was found that the following problems exist in the implementation of Industry 4.0 technologies: outdated IT systems, equipment compatibility, cost and resource limitations, lack of personnel skills, change management, and cybersecurity issues. To solve the problems of decision support and resource optimization, key technologies were identified: digital twins, which allow obtaining up-to-date information about devices in IoT systems; spatio-temporal graphs and graph neural networks, configured to work with data that have certain patterns and interconnections; reinforcement learning, which allows training a model while interacting with the environment, enabling the model to adapt to changes in enterprise operations.

A microservice architecture for an IT system was developed to solve the aforementioned problems, integrating graph neural networks, reinforcement learning, digital twins, and an IoT system. Some of the main advantages of such an IT system are scalability, modularity, and adaptability to business needs.

**Conclusions.** This study demonstrates the relevance, trends, and effectiveness of implementing Industry 4.0 technologies in enterprises based on articles and existing software products. Challenges were identified, and key technologies to overcome them were determined. A microservice IT system architecture based on graph neural networks and digital twins was developed, which has prospects for solving resource utilization optimization and decision support tasks. Areas for additional research on the specific implementation of the proposed architecture's modules were identified, such as: dynamic adaptation to the environment with the combination of pre-known business rules; agent training with minimal performance degradation; digital twin model and data cleaning and transformation mechanisms.

**Keywords:** deep machine learning, reinforcement learning, IoT, IIoT, digital twins, Industry 4.0, graph neural networks.