

Михайло Михайлович Саліхов

аспірант Харківського національного університету радіоелектроніки (Харків, Україна)

E-mail: mykhailosalikhov@gmail.com. ORCID: <https://orcid.org/0009-0003-7356-5344>

ВИКОРИСТАННЯ ШТУЧНОГО ІНТЕЛЕКТУ В МАШИНОБУДУВАННІ ДЛЯ ПРИСКОРЕННЯ ТЕХНОЛОГІЧНИХ ІННОВАЦІЙ

У статті узагальнено підходи до тлумачення поняття «штучний інтелект» (ШІ) у контексті його використання в машинобудуванні. Встановлено, що ШІ виходить за межі імітації людських функцій і ґрунтується на здатності систем сприймати, аналізувати інформацію, діяти автономно й адаптуватися. На основі підходу ЄС до визначення ШІ-систем окреслено шість ключових їхніх характеристик, релевантних для машинобудування. Виявлено категорії ШІ, які мають широке застосування в машинобудуванні, а також десять сфер, де вони використовуються. Показано, що в кожній сфері застосовуються різні категорії ШІ, які забезпечують інновації продуктів і процесів. Досліджено приклади програмних рішень, що реалізують ШІ та сприяють прискоренню інновацій у машинобудуванні.

Ключові слова: штучний інтелект, машинобудування, інновації, машинне навчання, глибоке навчання, робототехніка, проектування, автоматизація виробництва.

Табл.: 4. Бібл.: 28.

Актуальність теми дослідження. Сучасне машинобудування переживає період глибоких трансформацій, зумовлених як переходом до Індустрії 4.0, так і рядом глобальних викликів: збройними конфліктами, епідеміями, демографічними змінами, зокрема старінням населення, зміною клімату, а також обмеженістю природних та енергетичних ресурсів. Ці виклики формують нові завдання для галузі та спонукають до пошуку нових інструментів прискорення технологічних інновацій: створення нових та вдосконалення наявних товарів, процесів, послуг. У цьому контексті штучний інтелект (ШІ) розглядається як один з ключових факторів технологічних змін. Як зазначено в заяві Союзу німецьких машинобудівників (*Verbum Domini Manet in Aeternum*), ШІ – це шанс для європейського машинобудування зберегти глобальне лідерство, а компанії галузі – ключовий рушій впровадження цих технологій у промислове виробництво [1].

Постановка проблеми. З метою підвищення конкурентоспроможності сучасне машинобудування зосереджується не лише на впровадженні інновацій, а й на вирішенні завдань, пов'язаних із забезпеченням енергоефективності, ресурсоощадності, технологічної точності та складності, екологічної безпеки. Розв'язання цих завдань ускладнюється дефіцитом кваліфікованих кадрів, а також потребою досягати балансу між якістю, довговічністю, собівартістю, швидкістю розробки та виробництва і мінімальним впливом на довкілля. Обмеженість традиційних інженерних підходів уже не дозволяє оперативно та ефективно реагувати на динамічні технологічні зміни й зростаючі ринкові вимоги. Це створює структурну прогалину, яка актуалізує потребу в пошуку нових, гнучких рішень для забезпечення інновацій у проектуванні, моделюванні, виробництві та інших сферах машинобудування.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Фундаментальна праця Стюарта Рассела та Пітера Норвіґа (4-те видання, 2021 р.) [2] охоплює широкий спектр теоретичних і практичних аспектів застосування ШІ й показує, що це широка наукова, технічна і філософська концепція. Хоча автори безпосередньо не розглядають проблематику застосування цих технологій в машинобудуванні, книга надає знання з машинного навчання (ML), глибокого навчання (DL), обробки природної мови (NLP), робототехніки, етики та безпеки ШІ, які є базовими для застосування в будь-якій галузі промисловості.

У контексті цифрової трансформації, що охоплює всі сектори промисловості концепція Індустрії 4.0 набула особливої актуальності у наукових працях. Результати досліджень демонструють особливості інтеграції ШІ в реальне виробництво та бар'єри – технічні, організаційні, кадрові, а також виклики, пов'язані з прозорістю моделей і фрагментацією даних [3].

Дослідження свідчить [4], що ІІІ перетворюється на ключовий рушій трансформації галузі – від оптимізації виробничих ліній до автоматизації та екологізації технологічних процесів. Наголошується, що ці технології дедалі активніше впроваджується як великими корпораціями, так і малим і середнім бізнесом для модернізації, підвищення енергоефективності та гнучкості промислового виробництва.

Особливу увагу приділено ролі ІІІ в інноваціях у машинобудуванні [5; 6]. Зазначено, що такі технології впливає на ключові сфери діяльності галузі, включаючи операційне управління, планування, контроль якості, прогнозування енергоспоживання, оптимізацію процесів, безпеку, проектування продукції, автоматизацію та взаємодію людини з машиною.

Робота [7] показує, що широке використання технологій ІІІ у машинобудуванні здатне докорінно змінити традиційні процеси проектування, виробництва та обслуговування. Обґрунтовано, що завдяки інструментам проектування на основі нових цифрових технологій інженери тепер можуть швидше та ефективніше створювати оптимізовані конструкції, що веде до підвищення продуктивності виробів і скорочення циклів розробки. Показано, що прогностичні методи, які застосовують ці технології в системах технічного обслуговування, сприяють ранньому виявленню відмов обладнання, мінімізуючи час простою та витрати на обслуговування.

Автори [8] приділили увагу інтеграції ІІІ із системами автоматизованого проектування й виробництва – CAD (Computer-Aided Design), CAE (Computer-Aided Engineering), CIM (Computer-Integrated Manufacturing). Обґрунтовано, що це сприяє підвищенню точності інженерних рішень і скороченню життєвого циклу розробки продукції.

У багатьох дослідженнях [9; 10] проаналізовано вплив ІІІ та машинного навчання (ML). Показано, що ключовими напрямками застосування цих систем у машинобудуванні є предиктивне обслуговування, оптимізація проектування, моніторинг стану конструкцій, контроль якості, оптимізація використання ресурсів. У [11] зазначено, що метод глибокого навчання є перспективним для виявлення дефектів і розпізнавання образів у машинобудуванні; як приклад наведено досвід його застосування для технічної діагностики в автомобільному виробництві.

Загалом доведено, що ІІІ сприяє інноваціям, трансформуючи традиційні інженерні підходи, впливаючи на вибір матеріалів, адаптивне проектування та гнучке управління виробничими лініями. Водночас порушуються питання етики, стандартизації та прозорості використання таких технологічних рішень [12; 13]. Ці питання набули державної ваги: у ЄС було прийнято Закон про ІІІ, положення якого, зокрема, вказують на заборонені сценарії використання технологій, що створюють неприйнятні ризики для суспільства [14].

Виділення недосліджених частин загальної проблеми. Попри детальне вивчення внеску ІІІ у розв'язання сучасних проблем індустрії, зокрема машинобудування, небагато наукових робіт приділяють увагу особливостям практичного використання інструментів (програмних продуктів) зі штучним інтелектом та сферам їх застосування для прискорення інновацій у машинобудуванні.

Мета роботи – дослідити понятійний апарат, роль і значення штучного інтелекту як чинника інновацій у машинобудуванні, проаналізувати категорії ІІІ та сфери їх застосування, а також програмні продукти які забезпечують використання цих технологій у машинобудуванні.

Виклад основного матеріалу. Аналіз наукових праць, інтернет-ресурсів, енциклопедій та офіційних документів міжнародних організацій дозволив виявити характерні ознаки ІІІ, що подаються у визначеннях (табл. 1) і мають значення для дослідження його застосування в машинобудуванні.

Таблиця 1 – Визначення ІІІ із характеристиками, які мають значення для дослідження застосування цих технологій в машинобудуванні

Джерело	Визначення ІІІ
Russell S.J., Norvig P. [2]	Наука про агентів, які отримують інформацію з навколишнього середовища та виконують дії, реалізуючи функції, що перетворюють послідовності сприйняття у відповідні реакції, при цьому враховуючи різноманітні типи агентів ІІІ – від реактивних і планувальників у реальному часі до систем на основі теорії прийняття рішень і глибокого навчання, де навчання виступає ключовим засобом формування компетентності й адаптації в нових умовах, а робототехніка та комп'ютерний зір слугують інструментами для досягнення цілей з урахуванням специфіки середовища задачі, що визначає оптимальний дизайн агента.
Monostori L. [15]	Наука та інженерія створення інтелектуальних машин і програм, які проявляють властивості, притаманні людському інтелекту, такі як міркування, навчання, цілеспрямованість, розв'язання проблем і адаптивність, при цьому не обов'язково імітуючи людський інтелект, оскільки рішення можуть базуватися на унікальних здібностях, недоступних людям чи тваринам, наприклад, на масштабних обчисленнях.
IBM [16]	Технологія, що дозволяє комп'ютерам і машинам імітувати людське навчання, розуміння, розв'язання проблем, прийняття рішень, креативність і автономність. Програми з використанням ІІІ можуть розпізнавати об'єкти, розуміти людську мову, навчатися на новій інформації, надавати рекомендації і діяти самостійно, без втручання людини
DigitalDefynd [17]	Конвергенція обчислювальної потужності та високорозвинених алгоритмів з метою імітації й розширення людських когнітивних процесів. Ефективна ІІІ-система ґрунтується на: надійних механізмах збору та попередньої обробки даних; адаптивних і масштабованих алгоритмах, здатних навчатися на різноманітних наборах даних; динамічному середовищі для навчання моделей у поєднанні з безперервною оцінкою та зворотним зв'язком; а також етичному рівні, що забезпечує прозорість і справедливість.
ЄС [14]	Система на основі машини, яка призначена для роботи з різними рівнями автономності, може виявляти адаптивність після впровадження та, діючи відповідно до явних або неявних цілей, робить висновки на основі отриманих вхідних даних щодо формування результатів, таких як прогнози, контент, рекомендації або рішення, що можуть впливати на фізичне або віртуальне середовище.

Джерело: складено автором.

Узагальнення цих формулювань дало змогу зробити висновок, що ІІІ пов'язаний зі створенням інтелектуальних систем або агентів, здатних сприймати інформацію, аналізувати її та діяти. Як наука й інженерія створення машин і програм із властивостями людського інтелекту (міркування, навчання, цілеспрямованість, розв'язання проблем, адаптивність), ці технології не обмежуються імітацією людських здібностей, а може ґрунтуватися на унікальних можливостях, зокрема масштабних обчисленнях. Навчання є ключовим методом формування компетентності та адаптації в нових середовищах. ІІІ застосовується в різних задачах, має різні рівні автономії, здатний адаптуватися та впливати на фізичне чи віртуальне середовище.

Для цілей регулювання в ЄС на законодавчому рівні запроваджено поняття «ІІІ-система» (AI system) як технічного об'єкта. З огляду на це для дослідження важливо враховувати такі ключові характеристики:

1. Машинна система. Йдеться не лише про програму, а про комплекс апаратних і/або програмних компонентів, що функціонують разом. У машинобудуванні, наприклад, інтелектуальна виробнича лінія з роботами і системами контролю якості – це поєднання сенсорів, роботизованих маніпуляторів та алгоритмів керування.

2. Різні рівні автономії. Від систем, які виконують базові завдання під контролем людини, до повністю автономних. У машинобудуванні це можуть бути частково автономні

роботи для складання деталей (з використанням, наприклад, алгоритмів графового пошуку) або повністю автономні комплекси, що самостійно налаштовують параметри зварювання чи фарбування на основі методів машинного навчання.

3. Здатність адаптуватися після впровадження. Система може навчатися, змінюючи свою поведінку в реальному часі на основі нових даних. У машинобудуванні це, зокрема, системи предикативного обслуговування, які аналізують сенсорні дані (температура, вібрація тощо), оновлюючи моделі прогнозування несправностей за допомогою методів глибокого навчання.

4. Аналіз вхідних даних. Система робить висновки на основі інформації, отриманої з сенсорів, баз даних або іншого оточення. Наприклад, аналіз показників температури, вібрації та тиску дозволяє здійснювати автоматичне коригування процесів або планувати обслуговування.

5. Генерація вихідних даних. Система створює результати у вигляді прогнозів, рішень або команд. У машинобудуванні це можуть бути, наприклад, команди роботам, прогнози часу до відмови обладнання або рекомендації щодо оптимізації виробничих параметрів – з використанням методів оптимізації, таких як генетичні алгоритми чи навчання з підкріпленням.

6. Вплив на фізичне чи віртуальне середовище. Результати роботи ІІІ-систем можуть проявлятися як у фізичному (керування машинами, маніпуляторами), так і у віртуальному просторі (оновлення цифрових двійників, аналітичних панелей). У машинобудуванні це, зокрема, реалізується через технології Інтернету речей (IoT) та цифрових близнюків (digital twins).

Зважаючи на наведене, ІІІ-система в машинобудуванні – це комплексна машинна система, що об'єднує апаратні та програмні компоненти, здатна виконувати завдання з різними рівнями автономії: від частково керованих процесів до повністю автономних виробничих комплексів. Така система адаптується після впровадження, навчається в реальному часі, аналізує вхідні дані зі середовища (сенсори, бази даних) і генерує вихідні сигнали, прогнози або команди, які впливають як на фізичні процеси, так і на цифрові представлення виробництва.

У цій роботі ІІІ та ІІІ-системи використовуються як синоніми.

Як показало дослідження, для досягнення цілей у машинобудуванні, насамперед підвищення ефективності, ІІІ-системи охоплюють широкий спектр методів – від класичних систем на основі правил до складних нейронних мереж і еволюційних алгоритмів. Кожен із цих методів має власні особливості та сфери застосування в конкретних інженерних завданнях. Для систематизації цих методів і наочності їхнього практичного використання в машинобудуванні сформовано табл. 2.

Для того щоб досліджувати зв'язок ІІІ з інноваціями в машинобудуванні, слід уточнити понятійний апарат. Відповідно до Керівництва Осло (яке є настановою ОЕСР щодо збору, представлення та використання даних про інновації) [18], інновація – це новий або вдосконалений продукт або процес (або їхня комбінація), який значно відрізняється від попередніх продуктів або процесів і який став доступним потенційним користувачам (продукт) або впроваджений у виробництво (процес). Також Керівництво Осло виділяє такі поняття:

- продуктова інновація – це нова або вдосконалена продукція або послуга, яка суттєво відрізняється від попередніх товарів або послуг підприємства та яка була представлена на ринку;

- інновація бізнес-процесу – це новий або вдосконалений бізнес-процес для однієї або декількох бізнес-функцій, який суттєво відрізняється від попередніх бізнес-процесів підприємства і який був впроваджений у виробництво підприємством.

Аналіз наукових праць [2–13] та інших джерел свідчить, що низка досліджень обґрунтовує вплив ІІІ як на продуктові інновації, так і на інновації бізнес-процесів у машинобудуванні. Водночас важливо розрізняти категорії цих технологій, оскільки саме вони зумовлюють різні типи інновацій у ключових сферах галузі – від проєктування та виробництва до обслуговування, управління й оптимізації.

З-поміж ряду категорій ІІІ, згаданих у літературі, у контексті інновацій в машинобудуванні найчастіше згадуються такі (табл. 2).

Машинне навчання (Machine Learning, ML) забезпечує прогнозування дефектів, оптимізацію технологічних параметрів та контроль якості продукції.

Глибинне навчання (Deep Learning, DL) допомагає в обробці складних зображень для виявлення дефектів на деталях, аналізі технічних даних і розпізнаванні складних шаблонів.

Правила та логіка (Rule-Based Systems) використовуються для автоматизації діагностики обладнання, підтримки прийняття рішень у проєктуванні та виробничому контролі.

Комп'ютерний зір (Computer Vision, CV) застосовується для візуального контролю якості, виявлення дефектів, а також для автоматизації виробничих ліній.

Робототехніка (Robotics) дозволяє автоматизувати збірку, навігацію та контроль рухів робітників і маніпуляторів на виробництві. Хоча робототехніка фактично є однією з ключових складових машинобудування, особливо в сучасних промислових процесах (вона забезпечує створення, програмування й експлуатацію роботизованих систем, які автоматизують виробничі операції індустрії), у контексті дослідження ІІІ її виділяють як окрему категорію, де існують специфічні технології та задачі (наприклад, автономні роботи, маніпулятори, взаємодія з людьми), що підкреслює особливості «втіленого інтелекту» [14].

Прогнозна аналітика (Predictive Analytics) дає змогу передбачати відмови устаткування і планувати профілактичне обслуговування.

Пояснюваний ІІІ (Explainable AI) дає пояснення рішень, прийнятих із застосуванням цих технологій. У машинобудуванні це особливо актуально, оскільки критично важливим є розуміння логіки й обґрунтованість дій ІІІ у складних, високовартісних або ризикованих процесах.

Таблиця 2 – Категорії ІІІ, що мають широке застосування в машинобудуванні

Категорія	Приклади застосування в машинобудуванні
1	2
Машинне навчання (Machine Learning)	Побудова моделей, які аналізують виробничі дані і оптимізують параметри процесу (наприклад, швидкість обробки, температура, витрата ресурсів) Прогнозування енергоспоживання, виявлення аномалій та зменшення втрат Навчання промислових роботів новим завданням на основі демонстрацій або симуляцій
Глибинне навчання (Deep Learning)	Аналіз зображень деталей для виявлення тріщин, подряпин, деформацій Аналіз часових рядів сенсорних даних (вібрація, шум, температура) з метою прогнозування зносу або відмов обладнання Моделювання складних фізичних процесів у режимі реального часу за допомогою нейронних мереж Прогнозування вихідних характеристик виробу на основі вхідних параметрів виробничого процесу
Правила та логіка (Rule-Based Systems)	Діагностика несправностей (наприклад, системи експертної підтримки операторів) Керування технологічними процесами (задання умов для включення / вимкнення обладнання) Проектування конструкцій (вибір матеріалів або технічних рішень залежно від умов)

1	2
Комп'ютерний зір (Computer Vision)	Перевірка правильності складання, наявності необхідних компонентів, маркування або позиціонування деталей Допомога роботизованим системам розпізнавати об'єкти, орієнтуватися в просторі, виконувати точні маніпуляції Контроль стану верстатів чи систем подачі матеріалів
Робото-техніка (Robotics)	Автоматизації виробничих процесів (роботи виконують операції з монтажу, зварювання, фарбування, пакування та інші повторювані або небезпечні задачі) Роботизовані маніпулятори виконують точні операції з переміщення, сортування та складання деталей Колаборативні роботи (cobots), які працюють поруч із людьми, допомагають їм підвищувати продуктивність і безпеку
Прогнозна аналітика (Predictive Analytics)	Алгоритми прогнозують ймовірність відмови обладнання на основі даних сенсорів (температура, вібрація, шум), що дозволяє запланувати ремонт до настання несправності; потребу в матеріалах, деталях, інструментах – оптимізуючи запаси та мінімізуючи простой Системи аналізують виробничі параметри та прогнозують, чи буде продукція відповідати стандартам якості Моделі оцінюють ризики технологічних збоїв або затримок, підказуючи варіанти реагування
Пояснюваний ШІ (Explainable AI)	Якщо система прогнозує поломку, ШІ показує, які саме дані та закономірності вплинули на цей висновок (наприклад, вібрація, температура, шум) При виявленні дефектів системи комп'ютерного зору, пояснює, які ознаки зображення класифікували деталь як браковану

Джерело: складено автором.

Крім зазначених вище категорій, виділяють також: еволюційні алгоритми (Evolutionary Algorithms) – переважно застосовуються для складних оптимізаційних задач (проектування, оптимізація); фуззі-логіку (Fuzzy Logic) – корисну там, де потрібно моделювати невизначеність (оптимізація, обслуговування, проектування); нейросимволічні системи (Neuro-Symbolic AI) – які поєднують логіку та ML, перспективні для складних інженерних задач; планування і пошук (Planning and Search) – важливі для робототехніки та співпраці людина – машина; обробку сигналів і датчиків – часто інтегровану з ML, критичну для діагностики й обслуговування; інтелектуальну автоматизацію – комплексні рішення, що включають ML, робототехніку та логіку; інтерпретованість і пояснюваність ШІ (Explainable AI) – критично важливі для довіри, безпеки та регулювання, є ключовою вимогою, хоч і не окремою технологією. Цифрові двійники (Digital Twins) використовуються для моделювання, симуляції й моніторингу обладнання та процесів, що допомагає оптимізувати виробництво й знижувати ризики.

Перелік категорій ШІ, наведений у табл. 2, ілюструє різноманіття технологій, що застосовуються в сучасному машинобудуванні для вдосконалення всіх етапів виробничого циклу – від проектування та моделювання до контролю якості й технічного обслуговування.

Джерела [5; 6; 9; 19; 20; 21] вказують на ключові напрями використання ШІ в галузі. Агрегування цих даних дало змогу визначити етапи та сфери машинобудування, у яких застосування цих технологій стало найбільш поширеним і має значний потенціал для подальших інновацій. Ці сфери подано нижче.

1. Проектування та оптимізація конструкцій – етап створення та вдосконалення технічних виробів. У межах цієї сфери здійснюється оптимізація форми, структури, параметрів виробу; створення нових конструкцій на основі заданих обмежень і цілей; удосконалення традиційного CAD-програмного забезпечення (автоматичне моделювання, перевірка помилок тощо). ШІ забезпечує автоматизоване генерування численних варіантів

конструкцій з урахуванням заданих вимог, сприяє прискоренню створення проєктної документації та зменшенню кількості помилок і повторних ітерацій у процесі розробки.

2. Передбачувальне обслуговування (Predictive Maintenance) – етап експлуатації та обслуговування в життєвому циклі машинобудівного виробу. ШІ застосовується для збору та обробки даних з датчиків (використовуються сенсори для моніторингу параметрів обладнання). Моделі ML навчаються на історичних даних про роботу обладнання, включаючи інформацію про несправності, щоб виявляти закономірності, які передують поломкам, класифікувати типи зносу, прогнозувати ймовірний час відмови. Нові цифрові технології може автоматично виявляти приховані ознаки несправностей та генерувати прогнози щодо стану обладнання. Камери та алгоритми комп'ютерного зору можуть виявляти знос, тріщини або іржу на поверхнях машин. Моделі цифрових двійників імітують поведінку обладнання.

3. Автоматизація виробництва та верстатів – етап виробництва в життєвому циклі машинобудівного продукту. У межах цієї сфери відбувається автоматизація виробництва (використання систем, які автоматично виконують технологічні операції, зменшуючи або повністю усуваючи потребу у втручанні людини); робототехніка (розробка, програмування і використання роботів); комп'ютерне числове керування (технологія, у якій верстатами керує комп'ютерна програма замість оператора). ШІ забезпечує підвищення точності та продуктивності виробничих операцій завдяки використанню інтелектуальних роботизованих систем, що дозволяє зменшити трудові витрати та підвищити якість кінцевої продукції.

4. Контроль якості та візуальна інспекція – етап завершення виробничого циклу. ШІ автоматизує процес виявлення дефектів, зокрема за допомогою систем комп'ютерного зору, що забезпечує стабільну якість продукції та зниження витрат на повернення і переробку. Машинне та глибинне навчання забезпечують класифікацію продукції на придатну / непридатну.

5. Оптимізація виробничих процесів – етап операційного управління виробництвом, що передбачає постійний аналіз, коригування та вдосконалення параметрів і послідовностей виробничих операцій. Використання алгоритмів ШІ, зокрема машинного та глибинного навчання, дозволяє налаштовувати параметри технологічних процесів і досягати вищої продуктивності, зниження витрат, скорочення часу виробництва, зменшення відходів, підвищення якості, зменшення енергоспоживання та матеріальних витрат.

6. Моделювання та симуляції, цифрові двійники – один із ключових етапів життєвого циклу виробу, який реалізується на етапах проєктування, тестування та виробництва. Такі категорії ШІ, як машинне та глибинне навчання, застосовуються для аналізу даних, прогнозування поломок, оптимізації процесів. Ці технології забезпечують створення віртуальних моделей виробничих систем і компонентів для тестування та оптимізації без ризику для фізичного обладнання, що сприяє підвищенню надійності та зниженню витрат на прототипування.

7. Управління ланцюгами постачання – процес, що охоплює весь життєвий цикл виробництва, зосереджуючись на забезпеченні своєчасного надходження матеріалів, комплектуючих і ресурсів для випуску та доставки готової продукції. Цілу низку функцій у цій сфері забезпечують такі категорії ШІ: машинне навчання – для аналізу великих обсягів даних з метою прогнозування попиту, оптимізації запасів і планування закупівель; обробка природної мови – для автоматизації обробки документів, контрактів, комунікацій з постачальниками; роботизація й автоматизація процесів – для автоматизації рутинних операцій, наприклад, оформлення замовлень, відстеження статусу поставок.

Такі технології забезпечують прогнозування попиту, оптимізацію запасів і логістичних операцій на основі аналізу історичних і зовнішніх даних, що дозволяє підтримувати безперервність виробництва та мінімізувати витрати.

8. Адитивне виробництво (3D-друк) використовується на етапах проєктування, прототипування, виробництва та ремонту. III (зокрема машинне та глибинне навчання, комп'ютерний зір) забезпечує створення цифрових моделей виробів, формування геометрій, неможливих при традиційній обробці; 3D-друк дозволяє швидко створювати фізичні прототипи для тестування функціональності або форми, а також виготовляти кінцеві деталі або малі серії без використання традиційних інструментів (пресформ, штампів тощо). Загалом, ці технології сприяють підвищенню якості друку та оптимізації конструкції виробів шляхом топологічної оптимізації, що забезпечує зменшення ваги деталей без втрати міцності та зниження матеріальних витрат.

9. Енергетична ефективність та сталий розвиток – це сфера застосування III, у якій аналізується робота машин та обладнання, виявляються неефективні режими, пропонуються енергозберігаючі налаштування, а також прогнозується вплив виробничих рішень на викиди CO₂ та споживання енергії. Цифрові технології оптимізують теплові та енергетичні процеси у виробничих системах, що сприяє зниженню енергоспоживання, підвищенню екологічної безпеки та стійкості виробництва. У цьому випадку III виконує роль інструменту оптимізації, що допомагає машинобудівним підприємствам зменшити екологічний слід, витрати ресурсів і вплив на довкілля.

10. Взаємодія людина – машина. Роботи зі III, які працюють пліч-о-пліч з людьми, розпізнають дії оператора, адаптуються до змін і навчаються з досвіду. Застосування симуляцій і віртуального навчання на основі сучасних технологій дає змогу безпечно й швидко готувати працівників до роботи з новим обладнанням. Системи на базі комп'ютерного зору здійснюють моніторинг дій персоналу, запобігаючи помилкам і аваріям. III підтримує інженерів у процесах прийняття рішень, автоматизує рутинні операції та розширює професійні можливості працівників, що сприяє підвищенню ефективності праці та безпеки на виробництві.

Зіставлення сфер застосування III у машинобудуванні та відповідних категорій технологій, що використовуються в кожній з них дозволило сформулювати табл. 3.

Таблиця 3 – Категорії III та етапи (сфери) їх застосування у машинобудуванні

Сфера застосування	ML	DL	Rule-Based	Explainable AI	Predictive Analytics	CV	Robotics	Fuzzy Logic	NLP	Digital Twins
Проєктування та оптимізація конструкцій	+	+	+							
Передбачувальне обслуговування	+	+	+	+	+		+			+
Автоматизація виробництва та верстатів	+		+			+	+			
Контроль якості та візуальна інспекція	+	+		+		+				
Оптимізація виробничих процесів	+	+	+	+	+			+		
Моделювання, симуляції, цифрові двійники	+	+								+
Управління ланцюгами постачання	+		+		+			+	+	
Адитивне виробництво (3D-друк)	+					+				
Енергоефективність та сталий розвиток	+		+	+	+			+		
Взаємодія людина – машина	+		+	+		+	+		+	

Джерело: складено автором.

Таблиця 4 – Програмні продукти (інструменти) з використанням ІІІ для машинобудування

Назва продукту	Призначення	Пояснення	Основні можливості	Розробник, країна
Siemens NX	CAD / CAE / PLM	Платформа для проектування, симуляцій та управління життєвим циклом продукту. Інтегрує ІІІ та машинне навчання для оптимізації процесів проектування й виробництва.	Топологічна оптимізація, інтеграція з виробництвом	Siemens (Німеччина)
Altair Inspire / HyperWorks	CAE, оптимізація	Платформи для симуляцій, аналізу та оптимізації конструкцій і виробничих процесів із фокусом на мінімізацію ваги та підвищення міцності.	Оптимізація форми, ваги, підготовка до 3D-друку	Altair (США)
Autodesk Fusion 360	CAD / CAE / CAM, генеративне проектування	Комплексний інструмент для 3D-моделювання (CAD), інженерного аналізу (CAE) та виробничого програмування (CAM). Підтримує генеративне проектування через модуль <i>Generative Design Extension</i> , який застосовує ІІІ для автоматичного створення оптимальних конструкцій з урахуванням заданих параметрів (матеріали, методи виробництва, обмеження).	3D-моделювання, симуляції, ІІІ-проектування	Autodesk (США)
PTC Creo + GTO	CAD / CAE, топологічна оптимізація	Система для моделювання та інженерного аналізу з функціями топологічної оптимізації. <i>Generative Topology Optimization</i> (GTO) і <i>Generative Design Extension</i> (GDX) дозволяють автоматично створювати кілька варіантів конструкцій з різними матеріалами та методами виробництва, скорочуючи час розробки та знижуючи витрати.	Параметричне проектування, генеративне проектування	PTC (США)
ANSYS Discovery	CAE, ІІІ-симуляції	Інструмент для швидкого моделювання та симуляцій фізичних процесів (механіка, теплообмін, вібрації) із застосуванням ІІІ для пришвидшення аналізу.	Швидке моделювання, аналіз структур і тепла	Ansys (США)
Dassault CATIA + 3DEXPERIENCE	CAD / PLM	Інструмент для комплексного проектування та управління життєвим циклом продукту. Підтримує генеративний ІІІ для автоматичного створення конструкцій, оптимізованих за продуктивністю, а також моделювання складних систем і цифрових двійників. Забезпечує колаборацію в межах великих інженерних проєктів.	Складне моделювання, цифрові двійники, колаборація	Dassault Systèmes (Франція)

Джерело: складено автором.

На практиці використання ІІІ у машинобудуванні реалізується через програмні продукти. Дослідження показало, що найпоширенішими з них є Siemens NX, Altair Inspire / HyperWorks, PTC Creo та GTO, Autodesk Fusion 360, ANSYS Discovery, Dassault CATIA та 3DEXPERIENCE (табл. 4). Ці рішення об'єднує одна мета — підвищення якості, скорочення часу розробки й зниження витрат [22–28]. Вони застосовують комплексний підхід до розв'язання завдань машинобудування та промислового дизайну й забезпечують: проектування (CAD – Computer-Aided Design), аналіз і симуляції (CAE – Computer-Aided

Engineering), виробниче програмування (CAM – Computer-Aided Manufacturing, доступне в окремих програмних продуктах), управління життєвим циклом продукції (PLM – Product Lifecycle Management, у деяких), оптимізацію конструкцій і процесів (генеративне проєктування, топологічна оптимізація, ІІІ-симуляції).

Висновки. Як показало дослідження, ІІІ-системи інтегруються в різні етапи і сфери машинобудування, набуваючи стратегічного значення як ключовий чинник інноваційного розвитку галузі. Машинобудівні корпорації можуть виступати інтеграторами та користувачами цих технологій. Хоча лідерами впровадження залишаються великі корпорації, стартапи та малі й середні підприємства також активно використовують ці технології, адаптуючи їх до власних бізнес-моделей.

З одного боку, ІІІ відкриває нові можливості для технологічних трансформацій продуктів (товарів і послуг) та процесів; з іншого — сприяє оптимізації ресурсів, покращенню управлінських рішень і зменшенню негативного впливу на довкілля.

Завдяки широкому спектру технологій, на яких базуються ІІІ-системи, істотно прискорюються продуктивні інновації. Зокрема, машинне та глибоке навчання дозволяють інженерам створювати нові конструкції з оптимальними характеристиками — легші, міцніші, енергоефективніші. Комп'ютерний зір підвищує точність і якість продукції, забезпечуючи автоматичне виявлення мікродфектів.

Інновації бізнес-процесів, зокрема перехід до передового (smart) виробництва, стають можливими завдяки прогностичній аналітиці (яка дає змогу впровадити предиктивне обслуговування замість планового, зменшуючи простої та витрати), робототехніці (що автоматизує небезпечні або трудомісткі процеси та гарантує стабільну якість), а також системам правил і логіки (які формалізують експертні знання у вигляді систем підтримки прийняття рішень, особливо в нестандартних або кризових ситуаціях).

ІІІ сприяє реалізації інновацій, що підвищують гнучкість, адаптивність і масштабованість виробництва. Моделі на основі цих технологій в цифрових двійниках дозволяють тестувати й оптимізувати виробничі сценарії без ризику для реального середовища. Роботизовані системи здатні адаптувати свою поведінку до нових продуктів без потреби в повній перебудові виробничої лінії.

Завдяки сучасному програмному забезпеченню (зокрема CAD/CAE-системам), ІІІ-системи стають рушієм інноваційного поступу машинобудування в умовах Індустрії 4.0. Майбутнє галузі пов'язане з розвитком адаптивного виробництва в реальному часі, автономних систем, інтелектуальної робототехніки та повністю автоматизованих середовищ проєктування, що докорінно змінює підходи до створення техніки.

Водночас, попри широку інтеграцію ІІІ, він не замінює інженерів, а розширює їхні можливості, залишаючи за ними ключову роль у прийнятті інноваційних рішень. Для ефективного впровадження нових цифрових технологій в машинобудуванні необхідно нарощувати міждисциплінарні компетентності: програмування, аналіз даних, знання алгоритмів ІІІ та глибоке розуміння механічних систем.

Отже, ІІІ не лише трансформує підходи до проєктування й виробництва, а й формує нову парадигму машинобудування — інтелектуальну, адаптивну та стійку до викликів сучасності.

Заява про використання генеративного ІІІ та технологій на основі ІІІ в процесі написання тексту статті.

Під час написання цього матеріалу автор використовував ChatGPT для оформлення списку використаних джерел за міжнародним бібліографічним стандартом APA, а також для перевірки граматики. Після використання цього інструменту/сервісу автор бере на себе повну відповідальність за зміст публікації.

Список використаних джерел

1. Artificial Intelligence in Industry - the road to a European success: Statement of the VDMA on the White Paper of the EU Commission (COM (2020) 65 final) (2020). https://www.vdma.eu/documents/34570/1052572/White%2520Paper%2520AI%2520European%2520Commission%2520June%25202020_1592311336948.pdf.
2. Russell, S. J., & Norvig, P. (2021). *Artificial intelligence: A modern approach* (4th ed.). Pearson.
3. Windmann, A., Wittenberg, P., Schieseck, M., & Niggemann, O. (2024). Artificial intelligence in Industry 4.0: A review of integration challenges for industrial systems. *2024 IEEE 22nd International Conference on Industrial Informatics (INDIN)*, 1–8. <https://doi.org/10.1109/INDIN58382.2024.10774364>.
4. Plathottam, S. J., & Illoeje, C. O. (2023). A review of artificial intelligence applications in manufacturing operations. *Journal of Advanced Manufacturing and Processing*. <https://doi.org/10.1002/amp2.10159>.
5. Santos, M., Martinez, E., & Hernandez, C. (2024). The role of artificial intelligence in modernizing mechanical engineering and industrial innovation. *International Journal of Industrial Innovation and Mechanical Engineering*, 1(2), 13–17. <https://doi.org/10.61132/ijiime.v1i2.54>.
6. Mondal, S., & Goswami, S. S. (2024). Rise of intelligent machines: Influence of artificial intelligence on mechanical engineering innovation. *Spectrum of Engineering and Management Sciences*, 2(1), 46–55. <https://doi.org/10.31181/sems1120244h>.
7. Balagopal, P. (2024). Impact of artificial intelligence on mechanical engineering: A comprehensive overview. *International Journal of Innovative Science and Research Technology*. <https://doi.org/10.38124/ijisrt/ijisrt24jul1389>.
8. Yoo, S., Lee, S., Kim, S., et al. (2021). Integrating deep learning into CAD/CAE system: Generative design and evaluation of 3D conceptual wheel. *Structural and Multidisciplinary Optimization*, 64, 2725–2747. <https://doi.org/10.1007/s00158-021-02953-9>.
9. Fatima, Z., Mohiuddin, G., & Khan, M. U. (2023). An overview: Revolutionizing mechanical engineering through the application of artificial intelligence. B *An Overview: Revolutionizing Mechanical Engineering through the Application of Artificial Intelligence* (pp. 275–293). MKSES Publication. <https://doi.org/10.5281/zenodo.10321773>.
10. Dhandapani, C. (2019). Implementation of machine learning (ML) in mechanical engineering application using artificial intelligence (AI). *Science, Technology and Development*. <https://ssrn.com/abstract=3687863>.
11. Zajacko, I., Gal, T., Sagova, Z., Mateichyk, V., & Wiecek, D. (2012). Application of artificial intelligence principles in mechanical engineering. *MATEC Web of Conferences*, 244, 1–7. <https://doi.org/10.1051/mateconf/201824401027>.
12. Blake, R. W., Mathew, R., George, A., & Papakostas, N. (2021). Impact of artificial intelligence on engineering: Past, present and future. *Procedia CIRP*. <https://doi.org/10.1016/j.procir.2021.11.291>.
13. Park, J., & Kang, D. (2024). Artificial intelligence and smart technologies in safety management: A comprehensive analysis across multiple industries. *Applied Sciences*, 14(24), 11934. <https://doi.org/10.3390/app142411934>.
14. AI Act (2024). <https://digital-strategy.ec.europa.eu/en/policies/regulatory-framework-ai>.
15. Monostori, L. (2014). Artificial intelligence. In L. Laperrière & G. Reinhart (Eds.), *CIRP Encyclopedia of Production Engineering*. Springer. https://doi.org/10.1007/978-3-642-20617-7_16703.
16. IBM. (2024). What is artificial intelligence (AI)? <https://www.ibm.com/think/topics/artificial-intelligence>.
17. 50 AI Scientist Interview Questions & Answers (2025). <https://digitaldefynd.com/IQ/ai-scientist-interview-questions/>.
18. OECD/Eurostat (2018), Oslo Manual 2018: Guidelines for Collecting, Reporting and Using Data on Innovation, 4th Edition, The Measurement of Scientific, Technological and Innovation Activities <https://doi.org/10.1787/9789264304604-en>.
19. Khan, S. A., Chowdhury, M. M. H., & Nandy, U. (2023). AI robotics technology: A review. *Journal of Engineering Research and Reports*, 25(10), 187–194. <https://doi.org/10.9734/jerr/2023/v25i101011>.
20. Arinez, J. F., Chang, Q., Gao, R. X., Xu, C., & Zhang, J. (2020). Artificial intelligence in advanced manufacturing: Current status and future outlook. *Journal of Manufacturing Science and Engineering*, 142(11), 110804. <https://doi.org/10.1115/1.4047855>.

21. Nti, I. K., Adekoya, A. F., Weyori, B. A., et al. (2022). Applications of artificial intelligence in engineering and manufacturing: A systematic review. *Journal of Intelligent Manufacturing*, 33, 1581–1601. <https://doi.org/10.1007/s10845-021-01771-6>.
22. Autodesk. Fusion: More than CAD, it's the future of design and manufacturing. <https://www.autodesk.com/nz/products/fusion-360/overview>.
23. Autodesk Fusion Blog. <https://www.autodesk.com/products/fusion-360/blog#case-studies>.
24. Siemens. AI in manufacturing: Transforming engineering, production and supply chains. https://blogs.sw.siemens.com/tecnomatix/ai-in-manufacturing-transforming-engineering-production-and-supply-chains/?utm_source=chatgpt.com.
25. Altair. (2024). Introducing the new Altair® HyperMesh® experience. <https://altair.com/blog/executive-insights/introducing-the-new-altair-hypermesh-experience>.
26. PTC. (2022). Creo GTO and GDX – Which one to use, and when. <https://www.ptc.com/en/blogs/cad/creo-gto-gdx-which-use-when>.
27. Ansys. Ansys Discovery: Rapid design exploration. <https://www.ansys.com/products/3d-design/ansys-discovery>.
28. Dassault Systèmes. 3DEXPERIENCE Make within CATIA. <https://www.3ds.com/make/solutions/addin/catia>.

Отримано 19.08.2025

UDC 004.896:007.52

Mykhailo Salikhov

Postgraduate student

Kharkiv National University of Radio Electronics (Kharkiv, Ukraine)

E-mail: mykhailosalikhov@gmail.com. ORCID: <https://orcid.org/0009-0003-7356-5344>

USE OF ARTIFICIAL INTELLIGENCE IN MECHANICAL ENGINEERING TO ACCELERATE TECHNOLOGICAL INNOVATIONS

In the article, the approaches to interpreting the concept of the Artificial Intelligence (AI) in the context of its application in mechanical engineering are summarized. It is established that AI goes beyond merely imitating human functions and is based on the ability of systems to perceive, analyze information, act autonomously, and adapt. Based on the EU's approach to defining AI systems, six key characteristics relevant to mechanical engineering are outlined, namely: machine nature, autonomy, post-deployment learning, input data processing, output generation, and influence on physical or virtual environments. It is specified that an AI system in mechanical engineering is an integrated hardware-software complex capable of self-learning and optimization.

The study identifies AI categories widely used in mechanical engineering, including Machine Learning, Deep Learning, Rule-Based Systems, Computer Vision, Robotics, Predictive Analytics, and Explainable AI. The influence of different AI categories on innovations in mechanical engineering is analyzed. It is shown that each category plays a specific role in design, manufacturing, maintenance, and optimization.

Ten areas within mechanical engineering where AI is actively applied are identified, namely: design and structural optimization, predictive maintenance, manufacturing and machine tool automation, quality control and visual inspection, production process optimization, modeling and simulation, digital twins, supply chain management, additive manufacturing (3D printing), energy efficiency and sustainable development, and human-machine collaboration. It is demonstrated that different AI categories are employed in each area, facilitating innovation in products and processes.

Examples of software solutions implementing AI and accelerating innovation in mechanical engineering are also examined.

Keywords: artificial intelligence; mechanical engineering; innovation; machine learning; deep learning; robotics; design; production automation.

Table: 4. References: 28.