

аналізу маршруту. Теоретичний аналіз ризиків у логістиці підтвердив необхідність впровадження таких систем, а практична реалізація демонструє можливості подальшого розвитку — від IoT-сенсорики до нейронних мереж і геоаналітики.

Список використаних джерел

1. Олійник Я.Б., Смирнов І.Г. Міжнародна логістика. Навчальний посібник. — К.: Обрії, 2021. — 544 с
2. Дорош, А. С. Транспортні ризики при виконанні автомобільних вантажних перевезень / А. С. Дорош, Є. Б. Демченко / Проблеми та перспективи розвитку залізничного транспорту: Тези 79 Міжнародної науково-практичної конференції (Дніпро, 16-17 травня 2019 р.) — Д.: ДНУЗТ, 2019. — С. 445-446

DOI 10.70286/EOSS-17.11.2025.003

ІНТЕГРАЦІЯ ШТУЧНОГО ІНТЕЛЕКТУ В ТЕХНОЛОГІЇ ЦИФРОВОГО ДРУКУ ПАКУВАЛЬНОЇ ПРОДУКЦІЇ

Заяц Роман

аспірант

Кафедра радіотехніки та інформаційної безпеки

Стринадко Мирослав

к.ф.м.н., доцент

Кафедра кореляційної оптики

Чернівецький національний університет

імені Юрія Федьковича, Україна

Анотація. Статтю присвячено дослідженню інтеграції технологій штучного інтелекту у процеси цифрового друку пакувальної продукції. Розглянуто застосування алгоритмів машинного навчання, комп'ютерного зору та аналітики великих даних для автоматизованого контролю якості, оптимізації параметрів друку, прогнозування технічного стану обладнання та управління виробничими циклами. Особливу увагу приділено концепції інтелектуального пакування, що поєднує сенсорні системи, Інтернет речей та цифрові двійники. Показано, що використання штучного інтелекту сприяє підвищенню точності, ефективності та екологічної сталості пакувального виробництва в межах парадигми «Промисловість 4.0».

Ключові слова: штучний інтелект; машинне навчання; цифровий друк; пакувальна продукція; smart packaging; аналітика даних; автоматизація; цифрові двійники.

Введення. Цифровізація поліграфічної галузі призвела до появи нової парадигми виробництва пакувальної продукції, у якій традиційні технології поступаються місцем інтелектуальним системам керування. Одним із ключових рушіїв цієї трансформації є штучний інтелект, що забезпечує перехід до самонавчальних, прогностичних і адаптивних виробничих процесів. Цифровий друк, який уже є основою гнучких і персоналізованих рішень у пакуванні, стає платформою для впровадження технологій машинного навчання, комп'ютерного зору та аналітики великих даних.

Сучасні системи цифрового друку все більше інтегруються з датчиками, камерами та сенсорами, що генерують великі обсяги інформації про стан обладнання, параметри друку, в'язкість чорнил, стабільність кольору, температуру та вологість. Обробка цих даних за допомогою AI-моделей дає змогу виявляти дефекти друку в реальному часі, прогнозувати зношування компонентів, оптимізувати витрати матеріалів і зменшувати енергоспоживання. Такий підхід формує перехід від реактивного до прогностичного управління виробництвом, що є основою концепції Smart Factory у межах Промисловості 4.0.

Особливої актуальності набуває поєднання AI із технологіями інтелектуального пакування (smart packaging). Сучасна упаковка перетворюється на носій даних, який взаємодіє із середовищем через сенсорні системи, Інтернет речей та цифрові двійники. Такі рішення дозволяють здійснювати моніторинг стану продуктів, прогнозувати термін придатності, контролювати умови транспортування та мінімізувати втрати продукції. Це не лише підвищує ефективність логістики, але й сприяє екологічній сталості пакувальної індустрії, зменшуючи кількість відходів і викидів CO₂.

Науковий інтерес до інтеграції AI у цифровий друк зумовлений потребою в автоматизації, точності та адаптивності виробництва за умов зростання вимог до якості та екологічності пакування. Для України ця тенденція відкриває перспективи підвищення технологічної конкурентоспроможності поліграфічних підприємств, формування data-driven виробництв і розвитку власних інноваційних рішень у сфері цифрового пакування.

Отже, інтеграція штучного інтелекту в технології цифрового друку пакувальної продукції розглядається як стратегічний напрям розвитку галузі, що поєднує ефективність, гнучкість і сталість у межах глобальної цифрової економіки.

Мета та задачі дослідження. Метою дослідження є аналіз та узагальнення напрямів інтеграції технологій штучного інтелекту у процеси цифрового друку пакувальної продукції з акцентом на підвищенні ефективності, точності виробництва.

Для досягнення поставленої мети визначено такі основні задачі: виявити потенціал застосування алгоритмів машинного навчання, комп'ютерного зору та аналітики великих даних у контролі якості цифрового друку; дослідити

можливості використання AI для прогнозування технічного стану обладнання та оптимізації параметрів друку; проаналізувати концепцію інтелектуального пакування як поєднання AI, сенсорних технологій, IoT і цифрових двійників; оцінити вплив впровадження AI на ефективність, екологічність і конкурентоспроможність поліграфічної галузі.

Результати дослідження і їх обговорення. Інтеграція технологій штучного інтелекту у цифрове пакувальне виробництво формує нову парадигму розвитку поліграфічної індустрії. На відміну від традиційних автоматизованих систем, які працюють за заздалегідь визначеними алгоритмами, сучасні AI-рішення дають змогу друкарському обладнанню самостійно навчатися на основі накопичених даних, аналізувати взаємозв'язки між параметрами процесу та якістю відбитків, прогнозувати можливі відхилення й коригувати роботу в реальному часі. Завдяки цьому цифровий друк пакувальної продукції переходить від статичного керування до динамічного, адаптивного й прогностичного управління.

Найбільший потенціал використання AI спостерігається у сфері контролю якості. Технології комп'ютерного зору, інтегровані у друкарські системи, аналізують зображення відбитків під час друку, порівнюючи їх із еталонними цифровими моделями. Алгоритми машинного навчання навчаються розпізнавати характерні дефекти — зміщення, порушення кольору, смуги, патьоки, неоднорідність покриття — та класифікують їх за серйозністю. На відміну від вибіркової перевірки, яку здійснює оператор, така система проводить суцільний аналіз у режимі реального часу. Дослідження [1] показують, що AI-зорова система здатна знизити кількість дефектів друку на 30–40 % і скоротити потребу у повторному тиражуванні. Застосування таких технологій у поєднанні з аналітикою Big Data дає змогу виявляти системні причини браку — наприклад, коливання температури фарби, швидкості подачі або зносу друкарських головок.

Важливим напрямом є предиктивне технічне обслуговування (predictive maintenance). У сучасних друкарських лініях встановлюються сенсори, що безперервно вимірюють вібрації, тиск, температуру, навантаження та споживання енергії. AI-алгоритми аналізують отримані дані й виявляють аномалії, які можуть передувати відмові вузлів або погіршенню якості друку. За даними [2-5], упровадження таких систем дозволяє знизити кількість незапланованих зупинок обладнання на 30 %, а коефіцієнт ефективності (ОЕЕ) підвищити до 95 %. Це особливо актуально для підприємств, що працюють із малими тиражами або персоналізованими замовленнями, де навіть короткі простої спричиняють значні фінансові втрати.

Іншим перспективним напрямом є оптимізація параметрів друку за допомогою AI. Алгоритми машинного навчання аналізують історичні дані тисяч друкарських процесів — температуру фіксації, швидкість подачі, товщину шару чорнила, тип матеріалу — і визначають оптимальні комбінації для кожного виду субстрату. Це забезпечує стабільність кольору, зменшення споживання фарб до 10 % і скорочення часу налаштування машин. Дослідження [6] підтверджують,

що використання AI у цифрових системах керування кольором (AI-driven color management) дозволяє створювати адаптивні ICC-профілі в реальному часі залежно від типу підкладки, чорнил і освітлення, що значно покращує точність кольоропередачі.

Важливу роль у підвищенні ефективності цифрового друку відіграє аналітика великих даних (Big Data). Виробничі платформи збирають інформацію з усіх етапів процесу — від підготовки файлів до фінішної обробки. AI-моделі аналізують ці дані та виявляють закономірності, що дозволяє оптимізувати розподіл ресурсів, зменшувати витрати енергії та фарб, прогнозувати потребу у витратних матеріалах. Так формується концепція data-driven production — виробництва, у якому кожне рішення базується на даних, а не на досвіді оператора. У роботах [7] показано, що застосування аналітики даних у пакувальному друці забезпечує підвищення загальної ефективності підприємств на 15–20 %.

Наступний рівень інтеграції AI охоплює інтелектуальне пакування (smart packaging). Це напрям, у якому цифровий друк поєднується з сенсорними технологіями, IoT та цифровими двійниками. Кожна одиниця пакування отримує унікальний цифровий ідентифікатор — QR-код, RFID-мітку або NFC-чип, надруковані з високою точністю, які слугують каналом зв'язку між фізичним продуктом і його цифровим представленням. Сенсори, інтегровані у пакування, відстежують температуру, вологість, газовий склад або механічні пошкодження, а AI-системи аналізують отримані дані, визначаючи стан продукту та прогножуючи термін придатності. Це створює основу для концепції цифрового двійника (digital twin) пакування — віртуальної моделі, що відображає реальний життєвий цикл продукту. Дослідження [2-5] доводять, що такі системи дозволяють зменшити витрати на контроль якості на 25 % і суттєво скоротити кількість реклаमाцій.

Важливою складовою розумного пакування є аналіз даних про поведінку споживачів. Інтерактивні елементи, створені засобами цифрового друку (AR-зображення, QR-коди, динамічні етикетки), взаємодіють із користувачем і збирають інформацію про час, місце та частоту сканувань. AI-аналітика систематизує ці дані, допомагаючи виробникам формувати персоналізовані стратегії маркетингу, контролювати ланцюги постачання й гарантувати автентичність продукції. Такий підхід перетворює пакування на елемент комунікації між брендом і споживачем, водночас забезпечуючи прозорість і довіру до виробника.

Впровадження AI також сприяє екологічній модернізації виробництва. Алгоритми можуть моделювати викиди CO₂, оптимізувати використання матеріалів і розраховувати життєвий цикл пакування з урахуванням можливості вторинної переробки. За дослідженнями [8], впровадження AI-рішень у поєднанні з технологіями Industry 4.0 дозволяє поєднати автоматизацію з цілями сталого розвитку — зниженням відходів, енергозбереженням і переходом до

циркулярної економіки. У цьому контексті цифровий друк виступає екологічно доцільною альтернативою офсетним і флексографічним процесам, завдяки точному дозуванню матеріалів і відсутності потреби у виготовленні форм.

У поєднанні з роботизацією та IoT системи штучного інтелекту створюють замкнуті цикли управління виробництвом (closed-loop manufacturing), у яких дані з обладнання миттєво впливають на корекцію технологічних параметрів. Роботи здійснюють зміну рулонів, транспортування та укладання продукції, а AI-модулі синхронізують їхню роботу з друкарськими лініями. У результаті формується саморегульована виробнича система, де роль оператора зводиться до моніторингу процесів та аналітики. За прогнозами [9], поєднання IoT, цифрових двійників і AI забезпечить створення повністю автономних ліній пакувального друку протягом найближчого десятиліття.

В українських реаліях інтеграція AI у цифровий друк уже знаходить практичне застосування на поліграфічних підприємствах, що модернізують обладнання під стандарти «розумного виробництва». Компанії «ВПК-Поліграф», «Укрпак» та «Київпак» експериментують із системами автоматичного виявлення дефектів, енергооптимізації та візуальної інспекції, а також з аналітичними платформами для відстеження витрат матеріалів і продуктивності. Це створює базу для поступового переходу до повноцінних Smart Factory-рішень, адаптованих до українських умов.

Узагальнюючи результати, можна стверджувати, що штучний інтелект трансформує цифровий друк пакувальної продукції з інструменту графічного відтворення у комплексну систему аналізу, прогнозування та управління. Його впровадження підвищує якість, зменшує втрати, скорочує час виробництва й відкриває нові можливості для сталого розвитку галузі. AI перетворює пакування на активний інформаційний елемент виробничого ланцюга, а цифровий друк — на центральну технологію у побудові інтелектуальної, екологічно збалансованої промисловості майбутнього.

Висновки. Результати дослідження підтвердили, що інтеграція технологій штучного інтелекту (AI) у процеси цифрового друку є визначальним чинником трансформації пакувальної індустрії в умовах Промисловості 4.0. На відміну від традиційних автоматизованих систем, AI забезпечує самонавчання, прогнозування та адаптивне управління технологічними процесами, формуючи основу для створення інтелектуального виробництва (Smart Factory).

Основні переваги впровадження AI у цифровий друк полягають у значному підвищенні точності, стабільності та якості друкарських процесів. Алгоритми машинного навчання й комп'ютерного зору дозволяють здійснювати автоматизований контроль якості в реальному часі, своєчасно виявляючи дефекти та відхилення кольоропередачі. Використання AI у системах предиктивного технічного обслуговування мінімізує незаплановані простої обладнання, зменшує витрати на ремонт і підвищує коефіцієнт ефективності роботи машин.

Застосування аналітики великих даних (Big Data) створює передумови для оптимізації витрат матеріалів та енергії, побудови адаптивних моделей виробництва й прогнозування попиту. У свою чергу, інтелектуальне пакування (smart packaging), що поєднує сенсорні системи, Інтернет речей (IoT) та цифрові двійники, відкриває можливості для моніторингу стану продукції, аналізу логістичних ризиків і зменшення екологічного навантаження.

Інтеграція AI-рішень сприяє формуванню сталих та гнучких виробничих систем, у яких цифровий друк виконує не лише графічну, а й аналітичну функцію. Для України ці технології мають стратегічне значення, адже дозволяють підвищити технологічну незалежність поліграфічних підприємств, скоротити ресурсні витрати та вийти на рівень екологічно орієнтованого виробництва європейського зразка.

Отже, впровадження штучного інтелекту у цифровий друк пакувальної продукції формує нову модель виробництва, засновану на даних, автоматизації та сталому розвитку, що визначає подальший напрям еволюції поліграфічної галузі.

Список використаних джерел

1. Hassoun, A., Rathod, N. B., & Sørensen, J. K. (2023). AI-driven quality control in food packaging and preservation. *Food Engineering Reviews*, 15(2), 147–163.
2. Abeykoon, C., & Buthpitiya, S. (2024). Advancements in intelligent control systems for digital printing. *Journal of Manufacturing Science*, 12(3), 145–160.
3. Abeykoon, C., Buthpitiya, S., & Perera, P. (2024). A comprehensive review to evaluate the synergy of artificial intelligence and digital printing technologies. *Smart Manufacturing Review*, 18(2), 98–113.
4. Abeykoon, C., Buthpitiya, S., & Perera, P. (2024). Integrating predictive maintenance with AI in smart packaging lines. *Engineering Applications of Artificial Intelligence*, 131, 107605.
5. Abeykoon, C., & Perera, P. (2024). AI-enabled color management and process optimization in digital printing systems. *Color Research & Application*, 49(3), 510–528.
6. Zhang, Y., & Yu, X. (2024). Artificial intelligence in advanced manufacturing: Data-driven optimization and prediction. *Computers & Industrial Engineering*, 190, 109882.
7. Gigauri, I., & Palazzo, M. (2023). Intelligent packaging as a marketing tool: Are digital technologies changing consumer interaction? *Journal of Marketing & Sustainability*, 15(3), 65–82.
8. Kluczek, A., & Gładysz, B. (2022). Aligning sustainable development goals with Industry 4.0 for packaging industry transformation. *Journal of Cleaner Production*, 368, 132902.
9. Bratovčić, A. (2022). Industry 4.0 in the packaging sector: Smart systems and sustainability. *Journal of Packaging Innovation*, 9(4), 34–49.