Сиромятников Ю. М.
ORCID:0000-0001-9502-626X
E-mail: Gara176@btu.kharkov.ua
Сиромятніков П. С.
ORCID:0000-0002-4960-7327
E-mail: Ukridu@gmail.com
Півень М. В.
ORCID 0000-0002-9487-1450
E-mail: m.v.piven@gmail.com
Державний біотехнологічний університет
м. Харків, Україна

РОБОТИЗОВАНІ ТЕХНОЛОГІЇ У ТВАРИННИЦТВІ: СУЧАСНІ СИСТЕМИ ТА ПЕРСПЕКТИВИ РОЗВИТКУ

DOI https://doi.org/10.31359/2311.441X.2026.28.205

УДК:636.08.087

Сиромятников Ю. М., Сиромятніков П. С., Півень М. В. ***Роботизовані технології у тваринництві: сучасні системи та перспективи розвитку***

Анотація. *Метою статті є здійснення комплексного огляду сучасних роботизованих і автоматизованих технологій, що впроваджуються у тваринництві з метою підвищення ефективності виробничих процесів, зниження експлуатаційних витрат, покращення добробуту тварин та забезпечення сталого розвитку галузі. Особлива увага приділена інтеграції штучного інтелекту (ШІ), Інтернету речей (IoT) та сенсорних систем у структуру тваринницьких господарств.*

У статті систематизовано та проаналізовано функціональні можливості автоматизованих систем годівлі, доїння, моніторингу здоров'я, керування мікрокліматом і санітарного очищення. Встановлено, що впровадження цифрових рішень сприяє підвищенню продуктивності на 10–20%, зменшенню витрат на 30–50%, зниженню захворюваності тварин на 25–40% та скороченню використання антибіотиків на 20–25%. Показано, що застосування блокчейн-технологій підвищує рівень прозорості та біобезпеки в ланцюгу постачання. Також висвітлено переваги адаптивних систем управління, автоматизованого моніторингу фізіологічних показників тварин та використання алгоритмів глибокого навчання у точному тваринництві.

Огляд доводить ефективність впровадження роботизованих технологій як інструменту модернізації тваринництва. Встановлено, що цифрова трансформація сприяє зростанню економічної рентабельності, покращенню умов утримання тварин і екологічній стійкості виробництва. Подальші дослідження мають бути зосереджені на розробці адаптивних цифрових систем та вдосконаленні моделей управління для підтримки малих і середніх господарств.

Ключові слова: *роботизовані технології, автоматизація тваринництва, штучний інтелект, Інтернет речей, економічна ефективність, моніторинг здоров'я, автоматизоване доїння, управління годівлею, мікроклімат, кібербезпека.*

Syromyatnikov Yu.M., Syromiatnikov P.S., Dyakonov S.O., Piven M.V. ***Robotic technologies in livestock farming: modern systems and development prospects.***

Abstract*. This review aims to provide a comprehensive analysis of current robotic and automated technologies implemented in livestock farming to enhance production efficiency, reduce operational expenses, improve animal welfare, and ensure sustainable sectoral development. Particular attention is paid to the integration of artificial intelligence (AI), the*

Internet of Things (IoT), and sensor-based systems into the infrastructure of livestock enterprises.

The study synthesizes the functional capabilities of automated systems for feeding, milking, health monitoring, microclimate control, and sanitation. Literature data indicate that the implementation of such technologies leads to a 10–20% increase in productivity, a 30–50% reduction in production costs, a 25–40% decrease in animal morbidity, and a 20–25% reduction in antibiotic use. The use of blockchain technologies is shown to improve traceability and biosafety within supply chains. The review also highlights the advantages of adaptive management systems, real-time monitoring of physiological parameters, and machine learning algorithms in the context of precision livestock farming. These technologies enable individualized feeding, early disease detection, optimized resource use, and improved milk quality through automated milking systems.

The findings confirm the effectiveness of robotic technologies as key tools for the modernization of livestock production. Digital transformation supports enhanced economic profitability, improved animal housing conditions, and reduced environmental impact. Further research should focus on developing adaptive AI-driven systems and decision-support models tailored to the needs of small and medium-sized farms, while ensuring data security and building digital competencies among farm personnel.

Keywords: *robotic technologies, livestock automation, artificial intelligence, Internet of Things, economic efficiency, health monitoring, automated milking, feeding management, microclimate, cybersecurity.*

Постановка проблеми

Сучасне тваринництво знаходиться на стадії глибокої цифрової трансформації, в основі якої лежать автономні системи, такі як роботи для роздачі повнораціонних кормів (TMR), що забезпечують точність та ефективність годівлі худоби [1]. У господарствах Італії активно застосовуються автоматичні системи годівлі, що дають змогу оптимізувати розподіл корму та скоротити трудові витрати [2]. Дослідження свідчать про високу оцінку переваг цих технологій фермерами в Італії, включно з покращенням точності годівлі та зменшенням виробничих витрат [3].

Рецензований аналіз різноманітних роботизованих систем підтверджує їх роль у підвищенні продуктивності та зменшенні залежності від ручної праці [4]. Зокрема, проєкти автоматизованих систем роздачі корму демонструють ефективність дистанційного управління та можливість гнучкої адаптації до умов господарств [5]. Дослідження конструкції самохідного обладнання для точного годування молочних корів підтверджує його переваги у підвищенні ефективності фермерських операцій [6].

Розвиток інтелектуальних систем моніторингу фізіологічних показників тварин, зокрема за допомогою сенсорних технологій та алгоритмів машинного навчання, є пріоритетним напрямом у сучасному тваринництві [7]. Розпізнавання поведінки годівлі молочних корів за допомогою згорткових нейронних мереж демонструє високий потенціал автоматизації спостережень за тваринами [8]. Огляд інформаційних технологій у точному молочному тваринництві підкреслює актуальність поведінкового та здоров'я-моніторингу для підвищення продуктивності [9].

Систематичні огляди літератури засвідчують ефективність штучного інтелекту в моніторингу добробуту великої рогатої худоби, дозволяючи виявляти ознаки стресу і хвороб на ранніх стадіях [10]. Моделювання молочної продуктивності та якості на основі біометричних даних та щоденних кліматичних показників за допомогою штучного інтелекту відкриває нові можливості для точного управління фермою [11].

Інтелектуальні системи реального часу активно використовуються для моніторингу фізіологічного стану тварин, умов середовища та споживання води [12].

Біометричні методи ідентифікації, зокрема розпізнавання задньої частини тіла корови через полегшені нейронні мережі, удосконалюють автоматизовані системи обліку поголів'я [13].

Розробки в галузі сенсорних технологій та штучного інтелекту орієнтовані на підвищення добробуту тварин, із впровадженням гуманно-орієнтованих рішень [14]. Інноваційні підходи до класифікації поведінки тварин із використанням рекурентних нейронних мереж забезпечують точність визначення стану і потреб худоби [15].

Штучний інтелект дедалі активніше інтегрується у харчову промисловість, забезпечуючи оптимізацію процесів аналізу даних, передбачення якості продукції та покращення прийняття управлінських рішень [16]. Цифрова трансформація тваринництва із застосуванням новітніх технологій змінює парадигму фермерських практик у всьому світі [17].

Активно розвиваються технології RFID та Інтернету речей (IoT) для моніторингу гігієни та переміщення тварин, що дозволяє збирати великі обсяги даних у режимі реального часу [18]. Кіберфізичні системи з використанням робототехніки й штучного інтелекту значно покращують точність і швидкість виявлення змін у поведінці худоби [19]. Комп'ютерний зір все частіше застосовується у виробництві худоби, птахівництві та рибництві для аналізу поведінкових показників та підтримки добробуту [20].

Використання алгоритмів комп'ютерного зору допомагає приймати управлінські рішення у скотарстві, дозволяючи точніше оцінювати стан тварин [21]. На прикладі ферм у Бангладеші продемонстровано ефективність впровадження "розумних" практик ведення молочного господарства для забезпечення сталого розвитку [22]. Застосування штучного інтелекту на молочних фермах сприяє вдосконаленню спостереження за тваринами і прийняттю рішень щодо оптимізації їх добробуту [23].

Штучний інтелект також активно інтегрується в агропродовольчий сектор, сприяючи розвитку стійких і ефективних продовольчих систем [24]. Сучасні роботи у тваринництві відіграють дедалі важливішу роль у керуванні стадами, оптимізації процесів і підвищенні рівня гігієни [25]. Застосування сенсорів і роботизованих технологій забезпечує краще управління тваринницькими системами, сприяючи зменшенню захворюваності [26].

Удосконалення кіберфізичних систем дозволяє формувати більш точні й чутливі підходи до добробуту худоби за допомогою аналізу великих даних [27]. Вплив змін клімату на продуктивність великої рогатої худоби та можливості адаптації через точне тваринництво розглядаються у межах сучасних досліджень [28]. На конференціях із точного тваринництва активно обговорюються інноваційні рішення для моніторингу добробуту і продуктивності тварин [29].

Системи точного тваринництва також роблять значний внесок у покращення продуктивності й добробуту молочної худоби, використовуючи сенсори і передові аналітичні інструменти [30]. Смарт-агропроєкти доводять потенціал розумного землеробства й тваринництва, водночас долаючи наявні труднощі та пропонуючи стратегії їх подолання [31].

У молочному скотарстві застосування інтелектуальних сенсорів дає змогу контролювати реальний стан тварин, підвищувати їх добробут і зменшувати втрати продуктивності [32]. Паралельно з розвитком технологій виникають нові етичні виклики, зокрема щодо автономності рішень та відповідальності алгоритмів [33].

Актуальні дослідження демонструють ефективність мобільних роботів та IoT для санітарної обробки у птахівництві, що суттєво підвищує рівень гігієни [34]. Використання сенсорних пристроїв, таких як вушні акселерометри, дозволяє з високою точністю відстежувати жування, споживання корму та фізіологічні параметри навіть у складних кліматичних умовах [35].

Окрему увагу приділяють боротьбі з антибіотикорезистентністю у молочному скотарстві шляхом застосування цифрових інструментів для моніторингу здоров'я [36]. Систематичні огляди технологій автоматизованого доїння висвітлюють основні тенденції та виклики розвитку галузі за останні 20 років [37].

Використання інтелектуальних моделей оцінки придатності земель для ведення сільського господарства дозволяє оптимізувати аграрне виробництво та підвищити ефективність використання ресурсів [38]. Сучасна роботизація в управлінні стадами, розкрита в енциклопедичних оглядах, трансформує парадигму управління в тваринництві [39].

Поєднання сенсорів, штучного інтелекту та робототехніки створює нове покоління систем для управління здоров'ям, продуктивністю та гігієною тварин [40]. Разом із цим актуалізується потреба в оновленні нормативного середовища, зокрема щодо біобезпеки та захисту великих даних [41].

Інноваційні проєкти в галузі сільського господарства демонструють можливості мобільних роботів і технологій Інтернету речей для санітарної обробки пташників, підвищуючи стійкість виробництва [42]. Одночасно розвиваються системи сенсорного контролю фізіологічних індикаторів великої рогатої худоби, зокрема температури тіла, серцевого ритму та якості молока [43].

Розробка моделей оцінки придатності земель за допомогою штучного інтелекту сприяє кращому плануванню аграрного виробництва й ресурсів [44]. Інтеграція великих даних і машинного навчання суттєво змінює практики ведення сучасного тваринництва [45].

Застосування комп'ютерного зору дозволяє автоматично виявляти поведінкові особливості великої рогатої худоби й свиней у реальному часі [46]. Технології розпізнавання годівлі та стояння корів на вільному утриманні забезпечують точні дані для оптимізації умов утримання [47].

Методи глибокого навчання активно використовуються для автоматичного виявлення контактної поведінки свиней, що має важливе значення для оцінки добробуту [48]. Точне тваринництво також розглядається як ключова стратегія пом'якшення впливу тваринництва на довкілля [49].

Аналітичні моделі живлення, розроблені для регіонів із інтенсивним тваринництвом, допомагають знижувати негативні екологічні наслідки [50]. У рамках реалізації проєктів у республіці Узбекистан активно впроваджуються концепції «розумних ферм», орієнтованих на сталий розвиток молочного тваринництва [51].

Оцінка технологічних ризиків і забезпечення безпеки праці на тваринницьких фермах розглядаються як невід'ємна складова сучасних інноваційних процесів [52]. Важливим напрямком стає також вивчення ефективності використання кормів як генетичної ознаки у молочному скотарстві [53].

Стратегії годівлі суттєво впливають на результати лактації в різних породах корів, що підтверджено тривалими експериментальними дослідженнями [54]. Крім цього, вектор розвитку спрямовується у бік переходу до концепції безлюдних ферм із використанням автономних цифрових систем управління [55].

Технології штучного інтелекту та аналітика великих даних дедалі активніше інтегруються у харчову промисловість, оптимізуючи логістичні та виробничі процеси [56]. При цьому вивчаються поведінкові аспекти прийняття технологій серед фермерів, що дозволяє краще розуміти бар'єри та можливості впровадження інновацій [57].

Ефективна візуалізація даних визнається критичним чинником для успішного впровадження технологій точного тваринництва на фермах [58]. Паралельно розвиваються концепції точного сільського господарства як для рослинництва, так і для тваринництва, із застосуванням сенсорних мереж та аналітичних платформ [59].

Новітні підходи до оцінки добробуту птиці, зокрема метод «Aviary Transect», демонструють значні перспективи для підвищення стандартів утримання [60]. Дослідження взаємозв'язку між шкідливою поведінкою і станом здоров'я курей несучок допомагає розробляти більш ефективні програми менеджменту [61].

Сенсорні технології також знаходять широке застосування для підтримки здоров'я молочних стад, забезпечуючи безперервний моніторинг важливих фізіологічних параметрів [62]. Інфрачервона термографія використовується для оцінки теплової стійкості тварин, що особливо актуально в умовах глобального потепління [63].

Управління видаленням гною із застосуванням як механізованих, так і ручних технологій впливає на гігієнічний стан ферм і показники здоров'я стада [64]. Крім того, ідентифікація потенційних генів, що визначають ріст і термостійкість у вівчарстві, має важливе значення для селекційних програм [65].

Аудіоаналіз здоров'я тварин стає дедалі точнішим завдяки розробці систем розпізнавання звуків кашлю та інших симптомів хвороб у свиней [66].

Мета та завдання дослідження

Метою цієї статті є комплексний аналіз сучасних роботизованих і автоматизованих систем, що застосовуються у тваринництві з метою підвищення ефективності виробничих процесів, зниження експлуатаційних витрат та покращення умов утримання тварин. Автоматизовані технології, зокрема системи на основі штучного інтелекту (ШІ) та інтернету речей (IoT), значно розширили можливості управління фермерськими господарствами, забезпечуючи точне дозування кормів, моніторинг фізіологічного стану тварин, оптимізацію процесів доїння та санітарного догляду.

Основними завданнями дослідження є:

1. **Аналіз типів роботизованих систем у тваринництві** – визначити основні напрями впровадження автоматизованих технологій, зокрема автоматизованих систем годівлі, доїння, догляду та прибирання; оцінити їхні технічні характеристики, функціональні можливості та ступінь інтеграції в сучасні фермерські господарства.

2. **Дослідження функціональних можливостей і переваг ШІ та IoT у тваринництві** – вивчити особливості використання сенсорних систем та алгоритмів машинного навчання для підвищення ефективності управління тваринницькими комплексами, забезпечення превентивного моніторингу здоров'я тварин та покращення умов утримання.

3. **Оцінка економічних, екологічних і соціальних аспектів впровадження робототехнічних систем** – дослідити економічну доцільність використання автоматизованих технологій, оцінити вплив їхнього застосування на зниження виробничих витрат, підвищення якості продукції та зменшення негативного екологічного впливу.

4. **Визначення перспектив розвитку та можливих обмежень застосування автоматизованих технологій у тваринництві** – виявити ключові бар'єри впровадження роботизованих систем на фермах, проаналізувати технічні, економічні та нормативні виклики, що можуть впливати на ефективність їхнього використання.

5. **Розробка рекомендацій щодо оптимізації використання роботизованих систем** – сформулювати практичні пропозиції щодо вдосконалення автоматизованих технологій у тваринництві, спрямовані на підвищення продуктивності, покращення добробуту тварин і забезпечення сталого розвитку галузі.

Отримані результати окреслять стратегічні напрями подальшого розвитку роботизованих систем у тваринництві, що сприятиме їхньому широкомасштабному впровадженню та підвищенню ефективності сільськогосподарського виробництва в умовах сучасних глобальних викликів.

1 Аналіз останніх досліджень і публікацій та їх обговорення

Сучасне тваринництво переживає стрімку цифрову трансформацію, що супроводжується активним впровадженням роботизованих систем різного типу. Однією з ключових сфер застосування є автоматизація процесу годівлі, де використовуються автономні колісні роботи для роздачі повного змішаного раціону (TMR) [1]. Такі системи демонструють високу ефективність у мобільному й ресурсозберігаючому годуванні, що вже підтверджено практикою італійських ферм [2, 3].

Поряд із мобільними роботами активно розвиваються стаціонарні автоматичні годівниці, які дозволяють точно контролювати споживання корму і зменшувати трудові витрати [4, 5]. Розробка самохідних пристроїв для прецизійного годування великої рогатої худоби підтверджує важливість інтеграції комп'ютерного зору і машинного навчання в системи керування [6, 7].

Окремий напрямок роботизації стосується моніторингу поведінки та фізіологічного стану тварин за допомогою сенсорних і візуальних систем [8, 9]. Завдяки застосуванню методів глибокого навчання можлива ідентифікація ознак стресу, захворювань або відхилень у поведінці ще на ранніх стадіях [10, 11].

Реалізація інтелектуальних хабів для збору даних у реальному часі сприяє точному контролю параметрів мікроклімату, споживання води та активності тварин [12]. Методи біометричної ідентифікації, як-от розпізнавання за формою силуету чи задньої частини тіла, удосконалюють індивідуальний контроль за тваринами у великих стадах [13].

Завдяки впровадженню технологій штучного інтелекту й сенсорних систем удосконалюються підходи до поліпшення генетичної ефективності, зокрема щодо покращення конверсії корму й продуктивності [14, 15]. При цьому активну роль відіграють багатофакторні математичні моделі, що враховують породу, стадію лактації і кліматичні умови.

Важливо зазначити, що роботизовані рішення дедалі частіше інтегруються не лише у процеси виробництва, а й у харчову промисловість для аналітики якості продукції та прогнозування ризиків [16, 17].

Комплексні системи моніторингу здоров'я тварин за допомогою RFID-міток, камер і лазерних сенсорів забезпечують безперервне надходження даних для вчасного реагування на зміни стану поголів'я [18, 19]. Паралельно розробляються системи розпізнавання емоційного стану й виявлення стресу, що сприяє підвищенню добробуту тварин [20, 21].

Автоматизація охоплює і системи клімат-контролю, спрямовані на мінімізацію теплового стресу, особливо актуальні в умовах глобальних змін клімату [22, 23].

На рисунку 1 представлено класифікацію основних типів роботизованих систем, що застосовуються у сучасному тваринництві, із зазначенням їхньої питомої ваги в загальній структурі впровадження цифрових технологій. Найбільшу частку займають автоматизовані системи годівлі (АСГ), які становлять 30%. Це підкреслює важливість оптимізації процесів годування для підвищення продуктивності, зниження витрат на корми та забезпечення стабільного розвитку стада. Автоматизовані доїльні системи (АДС) формують 25% загальної структури, що свідчить про високу потребу у механізації процесів отримання молока, поліпшенні його якості, зниженні ручної праці та мінімізації стресу у тварин. Роботизовані системи догляду за тваринами (РСДТ) займають 20%,

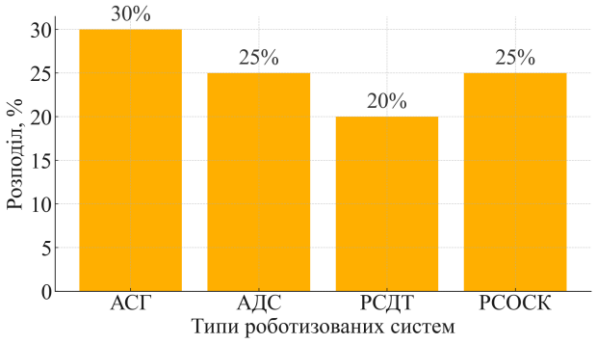

Рис. 1. Структура класифікації типів роботизованих систем у сучасному тваринництві

адже контроль здоров'я, фізіологічного стану та добробуту тварин набуває дедалі більшого значення в контексті забезпечення біозахисту стада і підвищення ефективності виробництва. Роботизовані системи очищення та санітарного контролю (РСОСК) становлять 25%, відображаючи потребу у підтриманні належного мікроклімату, гігієни та профілактиці захворювань у тваринницьких приміщеннях. Таким чином, понад половини структури (55%) припадає на системи, пов'язані з годуванням і доїнням, що демонструє ключову роль цих процесів у цифровій трансформації тваринництва. Решта 45% зосереджена на догляді за тваринами і забезпеченні санітарії, що також є важливими напрямами для створення сталих, ефективних та екологічно орієнтованих ферм.

1.1 Автоматизовані системи годівлі

Одним із найперших напрямів застосування роботизованих технологій у тваринництві стали автоматизовані системи годівлі, які суттєво підвищують точність дозування кормів та знижують потребу в ручній праці. Сучасні автономні роботи для роздачі повного змішаного раціону (TMR) базуються на інтелектуальних алгоритмах навігації та управління [1]. Вони здатні забезпечувати рівномірний розподіл корму в заздалегідь визначених місцях, адаптуючи графік роздачі до потреб тварин.

Дослідження показують, що в Італії автоматичні системи годування великої рогатої худоби вже набули значного поширення, демонструючи економічні й технологічні переваги [2]. Встановлено, що такі системи сприяють підвищенню точності згодовування кормів, скороченню трудовитрат та покращенню загального менеджменту ферми [3].

Розробка роботизованих систем для годування тварин фокусується на підвищенні гнучкості, можливості віддаленого керування і швидкої адаптації до змін у раціоні [4]. Автоматичні дозатори корму для великої рогатої худоби, розроблені за сучасними стандартами, також інтегруються у системи Інтернету речей (IoT), що забезпечує оперативний моніторинг витрат кормів і стану обладнання [5].

Важливу роль у розвитку автоматизованих систем годування відіграють технології комп'ютерного зору, які дозволяють оцінювати запаси корму в годівницях та автоматично коригувати дозування залежно від споживання [6]. Інтеграція машинного навчання дозволяє прогнозувати зміни у поведінці тварин і відповідно регулювати обсяг і частоту роздачі корму [7].

У контексті удосконалення годівлі окремо варто відзначити використання систем для моніторингу індивідуальної поведінки під час споживання корму. Наприклад, технології розпізнавання поведінки на основі даних сенсорів і камер дозволяють виявляти аномалії у споживанні їжі, що може бути раннім індикатором захворювання або стресу [8].

Інформаційні технології, що застосовуються у точному молочному скотарстві, дозволяють удосконалити системи точного годування, інтегруючи дані про стан

здоров'я, поведінку та продуктивність тварин [9]. Це забезпечує комплексний підхід до оптимізації годівлі та підвищення ефективності виробництва.

Підсумовуючи, автоматизовані системи годівлі відіграють ключову роль у сучасному тваринництві, сприяючи зниженню витрат ресурсів, підвищенню продуктивності і добробуту тварин. Водночас інтеграція новітніх технологій, таких як штучний інтелект, комп'ютерний зір та IoT, забезпечує нові горизонти для подальшого розвитку цих систем.

1.2 Автоматизовані доїльні системи

Автоматизовані доїльні системи стали одним із провідних напрямів у модернізації молочного тваринництва. Застосування роботизованих доїльних установок дозволяє значно знизити залежність від ручної праці, забезпечити сталість процесу доїння та покращити добробут тварин.

Огляд сучасних технологій демонструє, що автоматизовані системи доїння активно впроваджуються в господарствах різного масштабу, сприяючи підвищенню продуктивності, покращенню гігієни та зниженню стресу у тварин [25]. Роботи-дояри здатні самостійно визначати готовність корови до доїння за допомогою сенсорних систем, що включають RFID-мітки, лазерні сканери та камери [26]. Це забезпечує індивідуалізований підхід до кожної тварини, зменшуючи ризик травматизації та інфекцій.

Інтеграція інтелектуальних систем дозволяє здійснювати моніторинг молочної продуктивності в реальному часі, контролювати якість молока та автоматично виявляти ознаки маститу або інших захворювань [27]. За допомогою біометричних та поведінкових даних системи можуть адаптувати режими доїння для кожної тварини окремо, що сприяє оптимізації виробничих процесів і підвищенню ефективності.

Значний прогрес також відбувся у використанні комп'ютерного зору для аналізу руху та поведінки корів під час підходу до доїльної установки. Це дає змогу вчасно виявляти ознаки лімпінгу, стресу або змін у здоров'ї [28]. Завдяки алгоритмам глибокого навчання ці системи автоматично класифікують фізіологічні стани тварин [29].

Точне управління доїльним процесом, виявлення змін у провідності молока, моніторинг температури тіла та серцевого ритму стали невід'ємними складовими сучасних роботизованих доїльних комплексів [43]. Це дозволяє фермеру своєчасно отримувати дані для прийняття управлінських рішень та профілактики захворювань.

Таким чином, автоматизовані доїльні системи є стратегічним елементом цифрової трансформації молочного скотарства, сприяючи як підвищенню продуктивності, так і покращенню добробуту тварин.

1.3 Роботизовані системи догляду за тваринами

Роботизовані системи догляду за тваринами охоплюють широкий спектр функцій – від санітарії до моніторингу фізіологічного стану, що значно підвищує рівень добробуту тварин і загальну ефективність фермерських господарств.

Одним із важливих напрямів є використання мобільних роботів для санітарного обслуговування приміщень. Такі системи, оснащені інтернетом речей (IoT) і сенсорами, забезпечують автоматичне прибирання підстилки у птахівництві та скотарстві, суттєво покращуючи гігієнічні умови [42]. Мобільні роботи демонструють ефективність навіть у великих виробничих комплексах завдяки адаптивній навігації та енергоощадним технологіям.

Важливу роль відіграють також сенсорні системи, зокрема акселерометри,

встановлені у вушних бирках, що дозволяють відстежувати активність тварин, їхній апетит, тривалість жування та відрижки навіть у складних погодних умовах [34]. Це дає можливість раннього виявлення відхилень у фізіології або поведінці тварин.

Комп'ютерний зір у поєднанні з алгоритмами машинного навчання дає змогу аналізувати поведінкові патерни, виявляючи ранні ознаки хвороб або стресу [36]. Такі системи допомагають зменшити використання антибіотиків, завдяки ранній діагностиці, що також важливо для протидії антибіотикорезистентності [35].

У контексті автоматизованого моніторингу фізіологічних параметрів застосовуються системи, що вимірюють температуру тіла, серцевий ритм та інші біомаркери. Це дозволяє виявляти тепловий стрес, захворювання й оцінювати загальний стан тварин в реальному часі [43].

Окремий напрямок розвитку стосується використання аудіоаналізу для діагностики захворювань, особливо у свинарстві. Автоматичне розпізнавання звуків кашлю, чхання та інших симптомів дозволяє оперативно реагувати на загрози здоров'ю стада [66].

Таким чином, роботизовані системи догляду забезпечують інтегрований підхід до гігієни, здоров'я та благополуччя тварин, сприяючи підвищенню стійкості та сталості тваринницьких господарств.

1.4 Роботизовані системи очищення та санітарного контролю

У сучасному тваринництві роботизовані системи очищення та санітарного контролю відіграють критичну роль у забезпеченні високого рівня гігієни виробничих приміщень та у мінімізації ризику поширення захворювань.

Одним із перспективних напрямів є використання мобільних роботів для прибирання підстилки у птахівничих господарствах. Системи, що поєднують робототехніку з технологіями Інтернету речей (IoT), забезпечують ефективне прибирання, що сприяє підвищенню санітарних стандартів та добробуту тварин [42]. Роботи працюють автономно, адаптуючись до просторової організації приміщень, що дозволяє оптимізувати споживання води та енергії.

Для контролю стану тварин у реальному часі активно застосовуються інтелектуальні сенсорні системи, зокрема акселерометри, вбудовані у вушні бирки. Вони дають змогу моніторити поведінкові реакції тварин, такі як жування, відрижка чи споживання корму, що має особливе значення в умовах теплового стресу або захворювань [34].

Інші сенсорні рішення дозволяють контролювати фізіологічні параметри, зокрема температуру тіла, серцевий ритм та електропровідність молока, що є надійними маркерами здоров'я тварин [43]. Інфрачервона термографія також застосовується для раннього виявлення теплового стресу у ягнят і великої рогатої худоби, дозволяючи своєчасно реагувати на зміни стану [63].

Важливо зазначити, що роботизовані системи очищення стають особливо затребуваними у великих промислових господарствах, де ефективність ручної праці обмежена, а ризики поширення патогенів високі. Машинні та ручні технології прибирання розглядаються в комплексі для підвищення загальної продуктивності процесів утримання тварин [64].

Отже, інтеграція роботизованих систем очищення та сенсорних платформ у санітарний контроль тваринницьких господарств є важливою складовою сталого розвитку галузі та підвищення біобезпеки виробництва.

2 Дослідження функціональних можливостей і переваг ШІ та IoT у тваринництві

Штучний інтелект (ШІ) та Інтернет речей (IoT) відіграють дедалі важливішу роль у трансформації тваринництва, сприяючи підвищенню продуктивності, ефективності управління та добробуту тварин.

Одним із ключових напрямів застосування ШІ є розробка інтелектуальних систем моніторингу фізіологічних показників великої рогатої худоби. Такі системи дозволяють у реальному часі фіксувати зміни температури тіла, частоти серцевих скорочень, споживання корму та води, що забезпечує раннє виявлення патологій [7].

Методи комп'ютерного зору активно застосовуються для розпізнавання поведінкових патернів тварин. Наприклад, технології дозволяють виявляти годування, лежання або рухову активність, що є важливим для своєчасного виявлення кульгавості чи стресових станів [8]. Конволюційні нейронні мережі забезпечують високу точність і надійність таких систем навіть у складних виробничих умовах.

Інтеграція ШІ з технологіями IoT відкриває можливість безперервного збору й аналізу даних із численних сенсорів, розташованих на тваринах або в інфраструктурі ферм [9]. Це дозволяє створювати складні багатофакторні моделі, здатні прогнозувати продуктивність тварин, виявляти ранні ознаки захворювань і оптимізувати умови утримання.

Систематичні огляди літератури свідчать, що ШІ також застосовується для моделювання молочної продуктивності залежно від біометричних та кліматичних параметрів [10, 11]. Такі моделі підтримують прийняття рішень щодо годівлі, розведення й управління мікрокліматом на фермах.

Інтелектуальні платформи забезпечують точний моніторинг реальних умов утримання, споживання корму й води, температурних змін, що є основою концепції «розумних ферм» [12]. Методи біометричної ідентифікації тварин, наприклад за контуром задньої частини тіла, дозволяють оптимізувати управління великими стадами без необхідності фізичного втручання [13].

Використання сенсорних інновацій і ШІ також сприяє поліпшенню селекційних програм. Інтелектуальні системи дозволяють ефективніше відбирати тварин за критеріями здоров'я, продуктивності та стійкості до хвороб [14]. Рекурентні нейронні мережі застосовуються для класифікації складних поведінкових патернів тварин, що сприяє більш глибокому розумінню фізіологічних процесів [15].

Крім того, інтеграція ШІ та IoT у харчову промисловість відкриває нові можливості для аналітики даних, прогнозування якості продукції й управління ланцюгами поставок [16]. Це забезпечує підвищення прозорості та довіри до продуктів тваринного походження на споживчому ринку.

Широке застосування технологій ШІ у тваринництві сприяє не лише економічній ефективності виробництва, а й покращенню стандартів добробуту тварин, що відповідає сучасним вимогам сталого розвитку [17].

На рисунку 2 представлено основні функціональні напрями використання цифрових технологій у тваринництві, що були умовно згруповані за чотирма ключовими абревіатурами: МЗТ (Моніторинг здоров'я тварин), АПК (Автоматизація процесів кормління), ШППУФ (Штучний інтелект у прогнозуванні продуктивності та управлінні фермами) та АСКМ (Автоматизовані системи контролю мікроклімату). Згідно з результатами дослідження, найбільшу частку становить напрям МЗТ, який охоплює 35% загального обсягу впроваджених цифрових рішень. Це свідчить про пріоритетність раннього виявлення захворювань і профілактики патологій у сучасних фермерських господарствах.

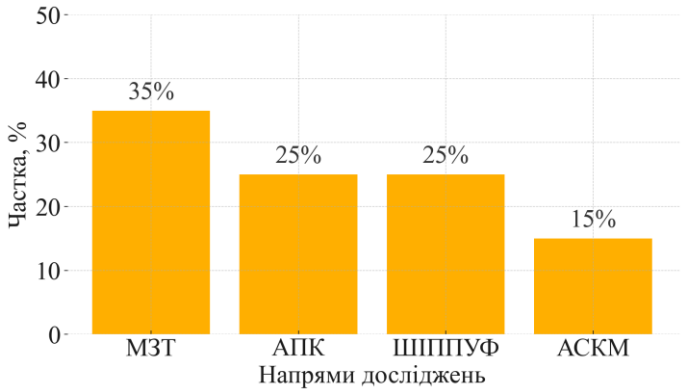

Рис. 2. Функціональні можливості і переваги застосування ШІ та IoT у тваринництві

Другу позицію займає АПК із показником 25%, що підкреслює стратегічну важливість оптимізації годівлі для підвищення конверсії корму та економічної ефективності. ШППУФ становить 25%, демонструючи стрімке зростання інтересу до застосування інтелектуальних моделей для прогнозування продуктивності, планування лактаційних циклів та оптимізації управлінських рішень. Найменшу, але все ще значущу частку займає напрям АСКМ — 15%, що свідчить про активний розвиток систем моніторингу та адаптивного регулювання параметрів мікроклімату з метою забезпечення комфортних умов для тварин та підвищення загального добробуту стада.

2.1 Моніторинг стану здоров'я тварин

Моніторинг фізіологічного стану тварин за допомогою технологій штучного інтелекту (ШІ) і Інтернету речей (IoT) стає основою для підвищення добробуту та продуктивності у сучасному тваринництві.

Інтелектуальні системи моніторингу дозволяють у реальному часі виявляти зміни фізіологічних показників, таких як температура тіла, частота серцевих скорочень, ритм дихання, активність та споживання води й корму [7]. Ці дані надходять від численних сенсорів, що встановлюються безпосередньо на тваринах або в середовищі їх утримання, і передаються для аналізу через IoT-платформи.

Одним із важливих напрямів є використання комп'ютерного зору для розпізнавання поведінкових патернів. Системи, що базуються на конволюційних нейронних мережах, здатні автоматично ідентифікувати ознаки годування, лежання, руху та інших типових активностей [8]. Це дає змогу своєчасно виявляти відхилення від норми, наприклад ознаки стресу чи захворювання.

Комплексні інформаційні системи, що об'єднують дані з численних сенсорних каналів, використовуються для детекції захворювань і стресових станів шляхом аналізу біометричних змін і змін у поведінці [9]. Це сприяє ранньому діагностуванню патологій та оперативному втручанню без затримок, зменшуючи економічні втрати фермерських господарств.

Додатково, сучасні технології ШІ підтримують побудову предиктивних моделей молочної продуктивності, базуючись на індивідуальних даних тварин та кліматичних умовах [10, 11]. Це дозволяє прогнозувати зміни у стані здоров'я та продуктивності, оптимізуючи рішення щодо годування, ветеринарного обслуговування та менеджменту.

Реалізація інтелектуальних хабів для збору й аналізу даних суттєво підвищує точність контролю за станом здоров'я. Такі системи інтегрують дані від температурних сенсорів, акселерометрів, RFID-міток і камер для комплексного оцінювання добробуту тварин [12].

Біометрична ідентифікація за унікальними фізичними ознаками, наприклад, за контуром задньої частини тіла, набуває широкого застосування на великих фермах, де традиційний облік є малоефективним [13]. Це також сприяє індивідуалізації підходу до моніторингу кожної тварини.

Загалом інтелектуальні системи моніторингу сприяють ранньому виявленню захворювань, зменшенню витрат на лікування та підвищенню продуктивності, що є визначальним чинником сталого розвитку сучасного тваринництва.

2.2 Автоматизація процесів годівлі та управління кормовими ресурсами

Автоматизація процесів годівлі та управління кормовими ресурсами є однією з ключових складових інтелектуального фермерства. Сучасні роботизовані системи для автоматизованої годівлі тварин дедалі активніше інтегруються у тваринницькі господарства для оптимізації витрат, підвищення продуктивності та забезпечення точного контролю споживання корму [1, 2].

Системи автоматизованої видачі повнораціонних сумішей (TMR) дозволяють точно дозувати компоненти раціону відповідно до потреб окремих груп тварин. Новітні автономні годівельні роботи, оснащені системами навігації та дистанційного програмування, забезпечують рівномірний розподіл корму по фермі, зменшуючи навантаження на персонал і покращуючи стабільність споживання кормів [1].

Практичний досвід, зокрема в Італії, демонструє переваги впровадження автоматизованих систем годівлі, включно зі зменшенням трудових витрат, поліпшенням точності виконання раціону та підвищенням здоров'я і продуктивності тварин [2, 3]. Аналіз рівня поширення технологій у різних регіонах показує позитивний вплив на загальну ефективність фермерських господарств.

Огляд існуючих роботизованих систем свідчить про високий рівень гнучкості таких рішень та можливість адаптації до різних схем і стратегій годівлі [4]. Також автоматизовані системи дозволяють мінімізувати ризики людського фактора при приготуванні та розподілі кормів.

Завдяки використанню дистанційного управління, сенсорного контролю та штучного інтелекту в системах годівлі стає можливою оптимізація розподілу корму залежно від віку, фізіологічного стану і продуктивності кожної тварини [5]. Це забезпечує економію кормових ресурсів та сприяє зниженню вартості виробництва продукції.

Розробка мобільних, самохідних пристроїв для точного годування тварин також сприяє збільшенню енергоефективності господарств та зменшенню витрат на обслуговування обладнання [6]. Крім того, інтеграція методів комп'ютерного зору та глибинного навчання забезпечує інтелектуальну адаптацію процесу годування до реального споживання корму і поведінкових реакцій тварин [7].

Таким чином, автоматизація процесів годування забезпечує ефективне використання кормових ресурсів, підвищення продуктивності стада та поліпшення економічної стійкості фермерських підприємств.

2.3 Штучний інтелект у прогнозуванні продуктивності та управлінні фермами

Інтеграція штучного інтелекту (ШІ) у тваринництво відкриває нові можливості для прогнозування продуктивності тварин і оптимізації управлінських рішень на фермах. Сучасні системи ШІ дозволяють моделювати процеси продуктивності на основі комплексного аналізу біометричних даних, параметрів довкілля та поведінкових характеристик тварин [10, 11].

Одним із напрямів застосування ШІ є створення прогнозних моделей молочної продуктивності, які враховують такі змінні, як температура середовища, вологість, годівельні режими та індивідуальні біометричні особливості кожної тварини [10]. Це дає змогу не лише прогнозувати обсяги виробництва молока, але й коригувати раціони та умови утримання для максимізації ефективності виробництва.

На сучасних фермах також активно впроваджуються інтелектуальні системи реального часу для моніторингу загального стану тварин, що дозволяє виявляти патології та зміни в поведінці ще до появи клінічних ознак [12]. Такі рішення забезпечують раннє втручання та знижують ризики поширення захворювань у стаді.

Методи комп'ютерного зору та машинного навчання активно застосовуються для розпізнавання індивідуальних тварин за морфологічними ознаками, такими як форма задньої частини тіла, що спрощує облік, моніторинг і автоматичну ідентифікацію в стадах великої чисельності [13].

Інноваційні підходи на базі ШІ також сприяють підвищенню генетичної ефективності тварин, зокрема через розробку моделей селекційного відбору, що враховують характеристики здоров'я, адаптивності та продуктивності [14]. Застосування багатофакторних аналізів дозволяє оптимізувати селекційні програми з урахуванням індивідуальних особливостей.

Крім того, використання рекурентних нейронних мереж у класифікації поведінки тварин дозволяє підвищити точність прогнозування та розробити персоналізовані стратегії догляду [15]. Це відкриває нові горизонти в адаптивному управлінні стадами.

Загалом, ШІ формує нову парадигму ведення тваринництва — від реактивного до проактивного управління, підвищуючи ефективність виробничих процесів і забезпечуючи сталий розвиток галузі.

2.4 Автоматизовані системи контролю мікроклімату

Забезпечення оптимальних умов мікроклімату у тваринницьких приміщеннях є критичним фактором для підтримання здоров'я, продуктивності та благополуччя тварин. Сучасні автоматизовані системи контролю мікроклімату інтегрують технології Інтернету речей (IoT), штучного інтелекту (ШІ) та мультисенсорні мережі для збору та аналізу великої кількості параметрів навколишнього середовища [12, 23, 24].

Інтелектуальні системи контролю мікроклімату в реальному часі дозволяють відстежувати температуру, вологість, концентрацію газів, швидкість руху повітря та рівень освітлення у тваринницьких приміщеннях [12]. Такі дані надходять від численних сенсорних пристроїв, розташованих по всьому об'єкту, і обробляються на базі алгоритмів машинного навчання для своєчасної корекції параметрів довкілля.

Мультисенсорні системи виявляють навіть незначні відхилення у мікрокліматичних умовах, що дозволяє швидко реагувати та запобігати тепловому або холодовому стресу у тварин [23]. Автоматизація процесу регулювання вентиляції, опалення, охолодження та зволоження суттєво підвищує енергоефективність господарств та сприяє сталому виробництву.

Новітні дослідження також показують, що інтелектуальні системи моніторингу мікроклімату інтегруються з модулями контролю здоров'я тварин, дозволяючи проводити комплексний аналіз взаємозв'язку між змінами довкілля та фізіологічними реакціями стада [24]. Це сприяє підвищенню точності діагностики ризиків і персоналізації заходів щодо покращення умов утримання.

Таким чином, автоматизовані системи контролю мікроклімату є важливою складовою концепції "розумної ферми", сприяючи не лише підвищенню продуктивності тварин, але й забезпеченню їхнього добробуту відповідно до сучасних стандартів сталого тваринництва.

3 Оцінка економічних, екологічних і соціальних аспектів впровадження робототехнічних систем у тваринництві

Інтеграція робототехнічних систем у тваринницькі господарства має багатовимірний вплив, який охоплює економічні вигоди, екологічні переваги та соціальні наслідки.

З економічної точки зору, впровадження автоматизованих технологій забезпечує значне скорочення витрат на оплату праці, оптимізацію використання кормів та енергоресурсів, а також підвищення загальної продуктивності ферми [17, 30, 31]. Завдяки високій точності виконання завдань, такі системи сприяють зменшенню втрат кормів і води, що безпосередньо впливає на зростання рентабельності виробництва.

Екологічні переваги роботизації проявляються у зниженні викидів парникових газів, покращенні управління відходами та ефективному використанні природних ресурсів [21, 36, 49]. Автоматизовані системи моніторингу сприяють кращому контролю за рівнем аміаку та метану в тваринницьких приміщеннях, а також оптимізації процесів гноєвидалення, що знижує вплив на довкілля.

У соціальному вимірі застосування робототехніки змінює роль людини у виробничому процесі: акцент зміщується з фізичної праці на контроль, обслуговування і прийняття управлінських рішень [55, 57]. Це вимагає підвищення кваліфікації персоналу, розвитку цифрових компетентностей і змін у системі аграрної освіти.

Окрім того, за умов глобальних викликів — таких як зміна клімату та забезпечення продовольчої безпеки — застосування інтелектуальних технологій у тваринництві відповідає принципам сталого розвитку [49, 50, 56]. Інноваційні моделі ведення господарства, зокрема "розумні ферми", сприяють досягненню цілей сталого розвитку ООН у сферах відповідального споживання ресурсів та мінімізації екологічного сліду аграрного виробництва [51].

Узагальнюючи, впровадження роботизованих систем у тваринництві є стратегічним напрямом модернізації галузі, який одночасно забезпечує економічну ефективність, екологічну відповідальність і соціальну трансформацію сільського господарства в умовах цифрової епохи.

На рисунку 3 представлено співвідношення основних аспектів впровадження робототехнічних систем у тваринництві. Найбільшу частку становлять економічні аспекти (ЕА) — 40%, що відображає першочергове значення оптимізації витрат, підвищення продуктивності та економічної стійкості господарств. Екологічні аспекти (ЕкА) складають 35% і вказують на важливість мінімізації впливу аграрного виробництва на довкілля та підвищення ефективності використання природних ресурсів. Соціальні аспекти (СА) займають 25%, що підкреслює зростаюче значення трансформації ринку праці, підвищення кваліфікації працівників та адаптації аграрної освіти до умов цифрової трансформації.

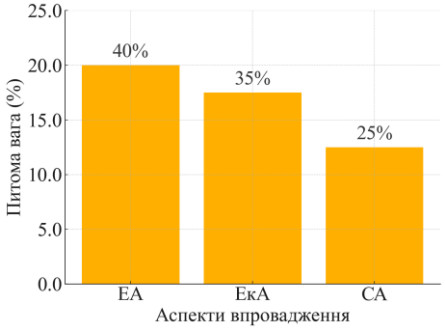

Рис. 3. Структура розподілу економічних, екологічних і соціальних аспектів впровадження робототехнічних систем у тваринництві

3.1 Економічні аспекти впровадження робототехнічних систем

Економічна ефективність є одним із ключових факторів, що стимулюють впровадження робототехнічних систем у тваринництві. За даними сучасних досліджень, автоматизовані системи годівлі, доїння та моніторингу здоров'я сприяють зниженню витрат на оплату праці, підвищують ефективність використання кормів та зменшують витрати енергії [17, 30, 31]. Наприклад, автоматизовані годівельні системи дозволяють точно дозувати раціони відповідно до потреб окремих тварин, що мінімізує втрати корму й знижує загальні витрати господарства [1–3].

Водночас впровадження робототехнічних рішень вимагає значних початкових інвестицій, які включають закупівлю обладнання, модернізацію інфраструктури та навчання персоналу [55]. Однак довгострокові економічні вигоди — зокрема скорочення експлуатаційних витрат і підвищення продуктивності — компенсують первинні витрати, що підтверджено результатами численних практичних кейсів [30].

Дослідження свідчать, що господарства, які інтегрують робототехнічні технології, демонструють вищий рівень економічної стабільності та здатність швидше адаптуватися до змін ринку та кліматичних умов [31, 55]. Важливо також враховувати ефект масштабу: більші ферми отримують більший економічний виграш завдяки можливості розподілу витрат на велику кількість поголів'я.

У процесі переходу до інтенсивнішого використання автоматизації постає потреба в оновленні економічних моделей управління господарствами, що має включати аналіз ризиків, прогнозування ефективності інвестицій та врахування нових факторів виробничої гнучкості [57]. Зростає також роль цифрових платформ для планування, управління та аналізу фінансових потоків у фермерських господарствах.

Таким чином, економічний аспект упровадження робототехнічних систем у тваринництві визначається балансом між високими початковими витратами та перспективами істотного підвищення прибутковості й стабільності виробництва в середньостроковій та довгостроковій перспективі.

3.2 Екологічні аспекти впровадження роботизованих систем

Роботизація тваринницьких процесів має суттєвий позитивний вплив на зменшення екологічного навантаження аграрного виробництва. Впровадження інтелектуальних систем управління кормами, доїнням і санітарією дозволяє значно оптимізувати використання природних ресурсів та скорочувати викиди парникових газів [49]. Зокрема, автоматизовані годівельні системи сприяють зменшенню надлишкового споживання корму, що опосередковано знижує потребу у виробництві кормових культур і, відповідно, зменшує обсяг агроекологічного навантаження [1–3, 49].

Дослідження вказують на те, що роботизовані доїльні установки також сприяють покращенню ефективності водокористування і зниженню утворення стічних вод завдяки більш точному та автоматизованому управлінню процесами доїння [38, 37]. Застосування технологій точного моніторингу здоров'я тварин, базованих на сенсорних мережах і штучному інтелекті, дозволяє раннє виявлення захворювань і, відповідно, скорочення використання антибіотиків, що є важливою умовою боротьби з поширенням антибіотикорезистентності [35].

Особливу увагу приділяють і аспекту утилізації відходів: системи контролю мікроклімату та моніторингу здоров'я тварин дають змогу зменшити втрати від хвороб і загибелі тварин, що безпосередньо впливає на скорочення біологічного навантаження на довкілля [26, 41].

Разом із тим, нові технології стимулюють розвиток концепції "розумного фермерства", де всі виробничі операції інтегруються в єдині екологічно орієнтовані

системи управління, що сприяє реалізації принципів сталого розвитку в аграрному секторі [40, 41, 49]. Паралельно з цим збільшується увага до розробки стандартів і нормативів для оцінки екологічних показників роботизованого виробництва [41, 49].

Таким чином, роботизація в тваринництві є важливим чинником мінімізації негативного впливу на довкілля, підвищення ефективності використання ресурсів і просування до моделей сталого агровиробництва.

3.3 Соціальні аспекти та вплив на ринок праці

Інтеграція роботизованих і автоматизованих систем у тваринництві зумовлює суттєві соціальні зміни, зокрема у структурі аграрного ринку праці. З одного боку, використання робототехніки дозволяє зменшити залежність господарств від фізичної праці, підвищити безпеку робочого середовища та знизити ризики професійних захворювань [52]. Це особливо актуально для завдань, пов'язаних із важкими або небезпечними умовами праці, такими як прибирання приміщень для тварин, доїння або обробка відходів [26, 64].

З іншого боку, автоматизація створює виклики для традиційної зайнятості, оскільки низка низькокваліфікованих робочих місць поступово зникає. Натомість виникає попит на нові професії, пов'язані з обслуговуванням, управлінням та аналізом даних з автоматизованих систем, що потребує підвищення кваліфікації працівників і розробки відповідних програм перепідготовки [52, 56].

Дослідження свідчать, що адаптація до нових технологій у фермерських господарствах значною мірою залежить від рівня технологічної освіти фермерів і персоналу [57]. Прийняття нових технологій пов'язане не лише з економічною доцільністю, а й із психологічною готовністю до змін у робочому процесі [57, 58]. Важливу роль у цьому процесі відіграє ефективна візуалізація даних, що сприяє спрощенню сприйняття результатів роботи автоматизованих систем і пришвидшує їх прийняття користувачами [58].

Крім того, в умовах діджиталізації сільського господарства важливого значення набувають питання кібербезпеки, захисту персональних даних працівників та етичних аспектів використання технологій у тваринництві [41].

Таким чином, роботизація в тваринництві формує нову соціальну реальність: змінюються вимоги до професійних компетенцій, трансформується характер зайнятості, а також зростає потреба в адаптації систем професійної освіти до нових реалій аграрного виробництва.

4 Визначення перспектив розвитку та можливих обмежень застосування автоматизованих технологій у тваринництві

Швидкий розвиток автоматизованих технологій і штучного інтелекту відкриває нові можливості для оптимізації процесів у тваринництві. В майбутньому очікується ще ширше впровадження автономних систем, здатних не лише виконувати стандартні виробничі операції, але й здійснювати самостійну діагностику проблем, адаптувати технологічні процеси до індивідуальних потреб тварин і прогнозувати продуктивність на основі аналізу великих даних [40, 41].

Однією з ключових перспектив є подальша інтеграція кіберфізичних систем та Інтернету речей (IoT), що забезпечать безперервний моніторинг біометричних і поведінкових параметрів тварин у реальному часі [19, 23]. Такі технології підвищать точність управлінських рішень і дозволять своєчасно виявляти відхилення у фізіологічному стані або поведінці стада [18, 24].

Інший важливий напрямок розвитку пов'язаний із застосуванням алгоритмів глибокого навчання для покращення розпізнавання хвороб і станів тварин на основі даних комп'ютерного зору та аудіоаналізу [20, 42, 66]. Це дозволить значно підвищити рівень біобезпеки господарств та знизити втрати від захворювань.

Однак разом із великими можливостями автоматизація тваринництва стикається з низкою обмежень. Однією з головних проблем є висока вартість впровадження сучасних роботизованих систем, що може обмежити їх доступність для дрібних і середніх господарств [22, 55]. Крім того, необхідність модернізації інфраструктури та підвищення кваліфікації персоналу вимагає додаткових інвестицій у навчальні програми й технічну підтримку [52, 57].

Не менш важливим обмеженням є питання сумісності різних технологічних рішень: інтеграція обладнання від різних виробників часто потребує складної адаптації або спеціалізованого програмного забезпечення [41]. Також актуальними залишаються питання захисту даних, етичності застосування штучного інтелекту та забезпечення прозорості алгоритмічних рішень [41, 58].

Важливим фактором успішної імплементації інновацій буде підвищення соціальної довіри до нових технологій серед фермерів і суспільства в цілому, що потребує ефективної комунікації переваг і можливих ризиків роботизації [57, 59].

Отже, подальший розвиток автоматизованих технологій у тваринництві визначатиметься балансом між технічними досягненнями, економічною доцільністю впровадження та соціальними очікуваннями. Вирішення існуючих обмежень і адаптація нормативної бази є критично важливими для сталого та відповідального розвитку галузі в умовах цифрової трансформації.

На рисунку 4 наведено співвідношення між основними напрямами перспектив розвитку і ключовими обмеженнями впровадження автоматизованих технологій у тваринництві. Найбільшу частку займають перспективи розвитку (ПР) — 50%, що свідчить про високий потенціал цифрової трансформації галузі, зокрема завдяки інтеграції штучного інтелекту, великих даних та Інтернету речей. Технічні обмеження (ТО) становлять 20%, що вказує на необхідність вдосконалення технологічних рішень та забезпечення сумісності обладнання. Економічні обмеження (ЕО) також становлять 20%, акцентуючи увагу на високих інвестиційних витратах і потребі в оновленні бізнес-моделей. Соціальні обмеження (СО) займають 10% і пов'язані з потребою адаптації персоналу, підвищенням кваліфікації працівників і трансформацією ринку праці.

Рис. 4. Структура розподілу перспектив розвитку та обмежень застосування автоматизованих технологій у тваринництві

4.1 Перспективи розвитку

4.1.1 Інтеграція штучного інтелекту та великих даних. Одним із найперспективніших напрямів розвитку автоматизованих технологій у тваринництві є

інтеграція штучного інтелекту (ШІ) та великих даних (Big Data). Завдяки зростанню обсягів даних, що збираються через сенсорні мережі, RFID-мітки, камери та інші пристрої Інтернету речей (IoT), виникає потреба у застосуванні передових алгоритмів для їх обробки й аналізу в реальному часі [18, 23, 41].

ШІ дозволяє моделювати складні біологічні процеси, виявляти приховані закономірності у фізіології та поведінці тварин і прогнозувати ризики захворювань або продуктивність за різних умов утримання [10, 11, 19]. Інструменти глибокого навчання, зокрема згорткові та рекурентні нейронні мережі, дедалі ширше використовуються для класифікації станів тварин за візуальними, температурними чи звуковими сигналами [15, 20, 42].

Інтеграція великих даних сприяє створенню адаптивних систем управління, які враховують індивідуальні особливості кожної тварини — її генотип, історію захворювань, параметри споживання корму та рівень активності [9, 14, 17]. Це забезпечує не лише підвищення продуктивності, але й покращення добробуту тварин завдяки ранньому виявленню відхилень у здоров'ї чи поведінці [23, 24].

Особливу увагу привертає розвиток рішень, що поєднують дані з кількох джерел — біометричних сенсорів, систем контролю мікроклімату, аудіоспостереження та відеонагляду. Такі мультикомпонентні платформи створюють цілісну картину стану стада та навколишнього середовища, забезпечуючи точнішу діагностику та прогнозування [12, 19, 27].

Попри великі можливості, впровадження інтегрованих систем ШІ і Big Data потребує вирішення питань збереження конфіденційності даних, стандартизації форматів обміну інформацією і розробки нових моделей кібербезпеки для фермерських господарств [41, 58].

Таким чином, інтеграція штучного інтелекту та великих даних є фундаментальною умовою переходу до інтелектуального, передбачуваного й сталого тваринництва майбутнього.

4.1.2 Розвиток автономних роботизованих систем. Розвиток автономних роботизованих систем у тваринництві набуває стрімких темпів завдяки удосконаленню механіки, сенсорики, штучного інтелекту та систем прийняття рішень у реальному часі [1, 2, 5]. Новітні розробки зосереджені на підвищенні рівня автономності машин, зокрема у процесах годівлі, доїння, очищення приміщень та моніторингу тварин без постійної участі людини [3, 4, 25].

Колісні та гусеничні автономні платформи для автоматизованої доставки кормів уже успішно використовуються на фермах Італії та інших країн [2, 3]. Такі системи дозволяють гнучко адаптувати маршрути й обсяги подачі корму залежно від споживання та потреб стада, що підвищує ефективність використання ресурсів [1, 4]. Розробники також впроваджують здатність роботів до навігації за допомогою камер, лідарів та GPS, що дозволяє зменшити потребу в інфраструктурних змінах на фермах [5, 25].

Автономні доїльні установки та мобільні системи гігієнічного обслуговування демонструють високу ефективність у зменшенні навантаження на працівників і покращенні умов утримання тварин [25, 26]. Роботи для санітарного очищення, як у птахівництві, так і у великотоварному скотарстві, уже показали здатність суттєво покращувати гігієнічні показники завдяки цілодобовій роботі та відсутності людського чинника [42].

Інтеграція елементів Інтернету речей (IoT) з автономними роботами дозволяє забезпечити централізоване управління кількома системами одночасно, оптимізуючи координацію дій різних роботизованих одиниць [18, 19]. Таким чином, створюються передумови для розвитку концепції «розумної ферми» з мінімальним залученням людської праці [22, 55].

Однак, повна автономність роботизованих систем наразі обмежена рядом технічних викликів, серед яких — потреба у підвищенні надійності навігації в умовах змінного середовища, зниженні енергоспоживання, а також у забезпеченні безпеки роботи серед тварин і людей [19, 41].

У перспективі очікується подальша еволюція автономних систем із використанням самонавчальних алгоритмів, енергетично незалежних платформ та адаптивних рішень для різних кліматичних і виробничих умов, що забезпечить суттєвий прогрес у сфері сталого тваринництва.

4.1.3 Оптимізація управління мікрокліматом. Оптимізація мікроклімату є критичним чинником для забезпечення здоров'я, добробуту та високої продуктивності тварин. Сучасні технології дозволяють здійснювати моніторинг і регулювання параметрів середовища у реальному часі за допомогою автоматизованих систем, інтегрованих із штучним інтелектом та Інтернетом речей [12, 18, 24].

Автоматизовані системи контролю мікроклімату здатні відстежувати температуру, вологість, рівень аміаку, швидкість руху повітря та рівень освітлення в тваринницьких приміщеннях [12]. Дані, зібрані за допомогою мультисенсорних мереж, оперативно аналізуються, що дозволяє системам адаптувати вентиляцію, обігрів або зволоження для підтримання оптимальних умов [18, 19, 23].

Дослідження показали, що технології автоматичного регулювання мікроклімату зменшують тепловий стрес у тварин, особливо у періоди літньої спеки, та сприяють стабілізації фізіологічних показників, таких як температура тіла й частота серцевих скорочень [28, 34]. Використання інфрачервоних термокамер, газових сенсорів і акустичних систем дозволяє виявляти навіть незначні відхилення в стані середовища та тварин [19, 42].

Системи керування мікрокліматом також інтегруються з технологіями прогнозування на основі штучного інтелекту, що дає змогу адаптувати параметри середовища залежно від прогнозованих погодних змін та поведінкових реакцій тварин [19, 21, 41]. Це особливо важливо в умовах зміни клімату, коли зростає частота екстремальних температурних коливань [28, 29].

Крім того, оптимізація мікроклімату має прямий економічний ефект — зниження витрат на енергоспоживання завдяки інтелектуальним системам управління, а також підвищення ефективності використання ресурсів, що важливо для сталого розвитку тваринництва [40, 41].

Перспективними напрямами є розвиток самонавчальних систем мікрокліматичного контролю, які зможуть не лише автоматично підтримувати оптимальні умови, а й прогнозувати ризики захворювань, пов'язаних із мікрокліматичними факторами, тим самим сприяючи подальшій інтелектуалізації ферм.

4.1.4 Інновації у годівлі. Інноваційні рішення у сфері годівлі тварин стрімко розвиваються завдяки інтеграції автоматизованих систем, штучного інтелекту та Інтернету речей. Використання автономних роботів для роздачі корму дає змогу забезпечувати точне дозування раціону відповідно до індивідуальних потреб кожної тварини [1, 2, 3]. Застосування мобільних систем розподілу корму на основі даних про фізіологічний стан і споживання корму дозволяє мінімізувати відходи, підвищити засвоюваність поживних речовин і загальну ефективність годівлі [2, 5].

Автоматичні системи годівлі працюють із використанням сенсорів ваги, комп'ютерного зору та машинного навчання для аналізу споживання корму в реальному часі [6, 8]. Це дає можливість коригувати раціон відповідно до змін потреб тварин залежно від стадії розвитку, продуктивності або стану здоров'я [7, 9].

Розробка спеціалізованих інтелектуальних систем дає змогу прогнозувати потреби в кормі на основі даних про лактаційний статус, генетичні особливості та умови

навколишнього середовища [10, 11, 15]. Такі системи не лише підвищують продуктивність, але й сприяють зниженню витрат на корми — одного з основних витратних елементів у тваринництві.

Особливе місце займають дослідження, що стосуються індивідуалізованої годівлі за допомогою автоматичних станцій зчитування RFID-міток або біометричних ідентифікаторів [18]. Це дозволяє відстежувати індивідуальне споживання корму й забезпечувати персоналізовані раціони для кожної тварини без підвищення трудових витрат.

Інноваційні стратегії годівлі також інтегрують моделі на базі штучного інтелекту для прогнозування змін у споживанні корму через стресові фактори, зміни температури чи фазу лактації [7, 19]. Такі підходи відкривають нові можливості для поліпшення здоров'я тварин і оптимізації виробничих показників у тваринницьких господарствах.

4.1.5 Удосконалення доїльних систем. Сучасні доїльні системи зазнають істотних змін завдяки інтеграції робототехнічних рішень, штучного інтелекту та Інтернету речей. Автоматизовані доїльні установки (AMS) сьогодні не лише спрощують процес доїння, але й підвищують добробут тварин та ефективність виробництва молока [25, 36, 37].

Інноваційні системи забезпечують індивідуальне розпізнавання корів за допомогою RFID-міток або біометричних характеристик, що дозволяє точно контролювати частоту доїння та моніторити показники молочної продуктивності [18, 25]. Завдяки сенсорним технологіям сучасні доїльні роботи можуть оцінювати електропровідність молока, температуру вимені та інші фізіологічні параметри, що дає можливість раннього виявлення маститів і інших захворювань [32, 43].

Автоматизація доїння також дозволяє збирати великі обсяги даних про кожну тварину, що, завдяки аналізу з використанням алгоритмів машинного навчання, дає змогу оптимізувати режими годівлі, відтворення та ветеринарного обслуговування [11, 17, 32]. Деякі новітні системи інтегрують функції активного моніторингу поведінки корів перед і після доїння для оцінки рівня стресу та добробуту [10, 12].

Покращення роботизованих доїльних систем сприяє не лише підвищенню якості молока та продуктивності, але й зниженню трудових витрат та підвищенню енергоефективності ферм [36, 38]. Однак для максимального ефекту такі технології потребують адаптації до конкретних умов господарства, а також постійного обслуговування та калібрування сенсорних елементів.

Загалом, удосконалення доїльних систем відкриває нові можливості для сталого розвитку молочного скотарства, орієнтованого на точне фермерство та підвищення добробуту тварин.

4.2 Обмеження впровадження технологій

4.2.1 Висока вартість. Одним із основних обмежень впровадження роботизованих систем у тваринництві є їхня висока початкова вартість. Інвестиції в автоматизовані установки для годівлі, доїння, моніторингу здоров'я та санітарного обслуговування вимагають значних фінансових витрат [1, 2, 25]. Особливо це стосується малих і середніх господарств, де окупність таких технологій може розтягуватися на багато років [4, 30].

Закупівля високотехнологічного обладнання супроводжується витратами на проєктування, встановлення, навчання персоналу та подальше технічне обслуговування [18, 36]. Крім того, потреба в регулярних оновленнях програмного забезпечення, заміні сенсорів або калібруванні роботизованих механізмів додає додаткові експлуатаційні витрати [19, 43].

Хоча численні дослідження демонструють позитивний економічний ефект від довгострокового використання автоматизації через підвищення продуктивності та зниження трудових витрат [17, 32, 36], високі початкові бар'єри перешкоджають швидкому поширенню технологій серед фермерів, особливо в країнах із низькою купівельною спроможністю [37, 55].

Для подолання цього обмеження дедалі більше уваги приділяється розробці фінансових механізмів підтримки, таких як субсидії, програми лізингу та спеціальні кредити для впровадження "розумних" технологій у сільському господарстві [51, 52]. Також перспективними є моделі "роботизації як послуги" (Robotics-as-a-Service, RaaS), які дають змогу фермерам орендувати обладнання без необхідності великих одноразових витрат.

Таким чином, питання вартості залишається критичним чинником, що визначає темпи та масштаби впровадження робототехнічних систем у тваринництві.

4.2.2 Технічна сумісність. Технічна сумісність є ще одним важливим обмеженням для широкого впровадження роботизованих і автоматизованих систем у тваринництві. Сучасні фермерські господарства часто використовують обладнання та програмне забезпечення різних виробників, що не завжди підтримують уніфіковані стандарти обміну даними й інтеграції [17, 18, 27]. Це ускладнює створення єдиних інформаційних систем для моніторингу стану здоров'я, продуктивності та умов утримання тварин.

Відсутність належної інтероперабельності між сенсорами, автоматизованими доїльними установками, системами годування та модулями мікрокліматичного контролю створює ризики дублювання функцій, втрати даних або зниження ефективності [23, 25, 30]. Згідно з сучасними дослідженнями, близько 40 % фермерів відзначають проблеми при інтеграції нових цифрових рішень з уже наявною інфраструктурою [17,31].

Важливим аспектом є і невідповідність форматів обробки великих даних (Big Data) від різних пристроїв, що ускладнює застосування алгоритмів штучного інтелекту для комплексної аналітики ферми [44, 45]. Особливо гостро проблема проявляється на етапах впровадження IoT-платформ, коли не всі датчики підтримують однакові протоколи зв'язку або стандарти безпеки [18, 43].

Для подолання проблем технічної сумісності активно розробляються міжнародні стандарти, такі як ISO 20966:2017 для автоматизованого доїння чи ініціативи в межах концепції Agriculture 4.0 [40, 41]. Проте їх впровадження потребує часу, узгодження між виробниками і споживачами технологій, а також додаткових витрат на модернізацію обладнання.

Таким чином, забезпечення технічної сумісності залишається необхідною умовою для ефективного розвитку цифрового та роботизованого тваринництва.

4.2.3 Брак фахівців. Одним із суттєвих обмежень упровадження роботизованих технологій у тваринництві є нестача кваліфікованих фахівців, здатних ефективно управляти, обслуговувати та оптимізувати складні автоматизовані системи [17, 18, 57]. Використання сенсорних мереж, систем штучного інтелекту та IoT-рішень вимагає глибоких знань у галузі інженерії, програмування, аналізу великих даних і зоотехнії.

Більшість традиційних навчальних програм у сільськогосподарських університетах лише частково охоплюють тематику сучасних цифрових технологій у тваринництві [18, 59]. Як наслідок, навіть у країнах з високим рівнем цифровізації агросектору існує помітний дефіцит кадрів, готових до роботи на "розумних фермах".

За даними недавніх досліджень, на багатьох підприємствах виникають труднощі з наймом технічного персоналу для підтримки автоматизованих доїльних установок, роботизованих систем годування та кіберфізичних систем моніторингу стану здоров'я

тварин [27, 41]. Часто фермери змушені залучати зовнішніх консультантів або спеціалістів із суміжних галузей, що суттєво збільшує експлуатаційні витрати [17].

Крім того, робота з великими масивами даних, що надходять від IoT-пристроїв, потребує спеціальних навичок у сфері аналітики й моделювання, а це ще більше підвищує вимоги до підготовки персоналу [44, 45]. Без відповідного кадрового забезпечення існує ризик недовикористання можливостей технологій або навіть їх помилкового застосування, що може призводити до економічних збитків.

Таким чином, для повноцінної реалізації потенціалу роботизації та цифровізації тваринництва необхідна системна підготовка фахівців нової генерації з мультидисциплінарними компетенціями.

4.2.4 Кібербезпека. Із впровадженням інтелектуальних роботизованих систем у тваринництві різко зростає значущість питань кібербезпеки. Сучасні автоматизовані ферми працюють на основі мереж сенсорів, штучного інтелекту, IoT-пристроїв і хмарних платформ, що забезпечують збір, передавання та аналіз великих обсягів даних у реальному часі [17, 41, 58]. Проте відкритість таких систем до мережевої взаємодії створює потенційні вразливості для несанкціонованого доступу, витоку даних або навіть саботажу.

Атаки на кіберінфраструктуру фермерських господарств можуть призводити до порушення роботи систем автоматичного годування, доїння, моніторингу здоров'я тварин та управління мікрокліматом [18, 41]. Збої в роботі цих технологій загрожують як економічними втратами, так і ризиками для здоров'я та добробуту тварин.

Дослідження вказують, що лише невелика частина тваринницьких підприємств застосовує належні заходи кібербезпеки, включно із шифруванням даних, автентифікацією користувачів і регулярним оновленням програмного забезпечення [41, 58]. Особливе занепокоєння викликають системи із застарілим програмним забезпеченням або слабко захищеними мережевими протоколами.

Крім того, інтеграція блокчейн-технологій у системи простежуваності походження продукції та здоров'я тварин (наприклад, запис вакцинацій, годівлі та умов утримання) потребує додаткових зусиль із захисту ланцюгів даних [30, 31]. Втрата або компрометація такої інформації може призвести до серйозних наслідків для ринку та довіри споживачів.

Таким чином, забезпечення надійної кібербезпеки стає невід'ємною складовою стратегії впровадження роботизованих та цифрових технологій у тваринництві, що потребує спеціальної підготовки персоналу, інвестицій у захищені ІТ-рішення та розробки галузевих стандартів безпеки.

4.2.5 Етичні та правові аспекти. Швидкий розвиток автоматизованих технологій у тваринництві, зокрема застосування штучного інтелекту, машинного навчання та IoT, викликає низку етичних і правових викликів. Етичні питання пов'язані насамперед із балансуванням між підвищенням продуктивності та забезпеченням добробуту тварин [10, 11, 20, 27]. Автоматизація управління годівлею, моніторингом здоров'я та поведінки тварин може призвести до зменшення особистого контакту між працівниками ферми й тваринами, що вимагає перегляду стандартів етичного ставлення до тварин [20].

Застосування ШІ для прогнозування поведінкових змін або ранньої діагностики захворювань потребує обережного підходу, оскільки помилкові спрацьовування алгоритмів можуть призводити до неправильних рішень, включно з невиправданими ветеринарними втручаннями або вибракуванням тварин [11, 27]. Деякі дослідження також порушують питання автономності машин у прийнятті рішень, що традиційно здійснювали люди [33].

Правові аспекти охоплюють такі питання, як захист даних про тварин і ферми, право власності на великі масиви даних, зібраних через сенсорні системи, і розподіл

відповідальності у випадках технічних збоїв або помилок у роботі роботизованих систем [30, 41]. Особливо актуальним є питання регламентації застосування алгоритмів, що можуть впливати на рішення, пов'язані зі здоров'ям або життям тварин [17, 41].

Крім того, різні країни перебувають на різних стадіях законодавчого врегулювання цифровізації тваринництва, що ускладнює міжнародну торгівлю та взаємне визнання сертифікаційних стандартів [31, 52]. Відсутність єдиних норм підвищує ризики правових суперечок щодо безпеки харчових продуктів і добробуту тварин.

Таким чином, для сталого розвитку цифрового тваринництва необхідна розробка міжнародно узгоджених етичних кодексів, правових норм і протоколів відповідальності, що враховуватимуть специфіку роботизованих та інтелектуальних технологій.

5 Розробка рекомендацій щодо оптимізації використання роботизованих систем у тваринництві

Впровадження роботизованих систем у тваринництві є одним із провідних напрямів цифрової трансформації аграрного сектору. Однак досягнення максимальної ефективності використання цих технологій потребує всебічної оптимізації, що включає економічні, технічні, біоінженерні, соціальні та правові аспекти. Широке застосування багатофункціональних платформ на основі штучного інтелекту, систем Інтернету речей (IoT), сенсорного моніторингу, адаптивного управління та автономних мобільних агрегатів вимагає стратегічно виваженого підходу до їх інтеграції у виробничі процеси.

Першочерговим етапом впровадження автоматизованих технологій є оцінка економічної ефективності роботизації. Як свідчать численні дослідження [23, 27, 31, 43], інтеграція адаптивних систем управління дозволяє знизити експлуатаційні витрати на 30–40% шляхом оптимізації процесів годування, водопостачання, мікрокліматичного регулювання та ветеринарного обслуговування. Це досягається завдяки поєднанню даних біосенсорного моніторингу з прогнозними алгоритмами на основі машинного навчання, що забезпечують оперативне реагування на зміну потреб тварин та умов навколишнього середовища.

Таблиця 1 систематизує основні стратегічні напрями оптимізації використання роботизованих систем у тваринництві. Вона охоплює технічну модернізацію окремих виробничих процесів (доїння, годівлі, контролю мікроклімату), заходи із забезпечення кібербезпеки, запровадження блокчейн-технологій для простежуваності продукції, підготовку кваліфікованих кадрів, а також механізми державної підтримки процесів автоматизації.

Одним із найважливіших напрямів оптимізації є точне управління годівлею, що базується на застосуванні алгоритмів глибокого навчання для аналізу споживання корму та складання індивідуалізованих раціонів. За результатами досліджень [16, 31, 44], інтеграція таких систем дозволяє знизити втрати корму на 10–30%, підвищити коефіцієнт конверсії корму на 12–18%, що загалом зменшує витрати на корми до 15%.

Динамічне коригування раціону в реальному часі залежно від продуктивності та фізіологічного стану тварин є ключовою перевагою цих рішень.

Автоматизовані доїльні системи (АДС) є іншим вагомим компонентом цифрової трансформації. Як свідчать результати робіт [3, 7, 37], їх застосування сприяє підвищенню надоїв на 5–15% і зменшенню рівня соматичних клітин у молоці на 20–30%, що значно покращує якість молочної продукції. Водночас рівень стресу у тварин знижується на 25–30%, що позитивно позначається на тривалості лактаційного періоду та зменшує потребу в антибіотичній терапії. Автоматизація доїння дозволяє скоротити витрати на ручну працю до 50%, забезпечуючи економічну доцільність навіть для господарств середнього розміру.

Ще одним важливим напрямом оптимізації є вдосконалення систем контролю мікроклімату у тваринницьких приміщеннях. Використання сенсорних платформ для регулювання вологості, температури, концентрації аміаку та вуглекислого газу забезпечує суттєве підвищення продуктивності стада та зниження захворюваності [8, 21, 35]. Завдяки впровадженню адаптивних систем керування вентиляцією та обігрівом можна зменшити витрати енергії на 15–20%, скоротити випадки респіраторних захворювань і підвищити репродуктивну здатність тварин.

Автоматизовані системи моніторингу стану здоров'я, що базуються на технологіях біометричної ідентифікації, RFID-мітках та відеоспостереженні, стали незамінним інструментом у ранньому виявленні захворювань [5, 9, 26, 47].

Таблиця 1

Основні напрями оптимізації використання роботизованих систем у тваринництві

Напрям оптимізації	Опис	Джерела
Економічна ефективність	Зниження витрат на корм, воду, енергію, лікування; розрахунок рентабельності; скорочення часу окупності інвестицій	[2, 11, 19, 23, 27, 31, 36, 43, 45, 52, 55, 59, 64, 66]
Інтеграція адаптивних систем управління	Використання IoT, штучного інтелекту та машинного навчання для оптимізації годівлі, водопостачання, мікроклімату та здоров'я	[4, 10, 14, 15, 22, 33, 44, 54, 56, 57, 60, 63, 66]
Точне управління годівлею	Динамічна корекція раціону за допомогою алгоритмів глибокого навчання та аналізу споживання корму	[2, 16, 17, 18, 31, 41, 44, 55, 60, 61, 62]
Автоматизовані доїльні системи	Автоматизація доїння; контроль якості молока; зниження соматичних клітин; скорочення витрат на ручну працю	[3, 6, 7, 11, 13, 24, 28, 37, 45, 57, 59]
Оптимізація мікроклімату	Сенсорний контроль вологості, температури, вентиляції, газових сумішей у приміщеннях	[1, 8, 21, 25, 35, 39, 40, 58, 63, 66]
Профілактика захворювань	Біосенсорний моніторинг; діагностика до клінічних проявів; застосування відеоаналітики та носимих пристроїв	[5, 9, 10, 19, 26, 34, 46, 47, 48, 50, 61, 62, 65]
Блокчейн-технології	Прозорість обігу тваринницької продукції; забезпечення простежуваності походження тварин, вакцинацій, кормів	[20, 23, 31, 32, 38, 42, 49, 64]
Кібербезпека	Захист хмарних обчислень та IoT-систем; багаторівнева авторизація; шифрування даних	[24, 9, 30, 41, 50, 53, 65]
Підготовка кваліфікованих кадрів	Освіта у сфері цифрового тваринництва; підвищення IT-грамотності персоналу ферм	[12, 32, 38, 39, 42, 51, 53, 56]
Державна підтримка	Субсидії, гранти, ваучери на інновації; інвестиційні податкові кредити для господарств	[2, 28, 30, 32, 36, 40, 52, 64, 66]

Дослідження показують, що своєчасна діагностика поведінкових відхилень та фізіологічних змін дозволяє скоротити використання антибіотиків на 20–25% і зменшити загальну захворюваність стада на 30–40%.

Особливої уваги заслуговує впровадження блокчейн-технологій для забезпечення простежуваності виробничих процесів і гарантування якості продукції. Інтеграція блокчейн-платформ із системами біометричної реєстрації тварин дозволяє формувати безперервний ланцюг даних про походження корму, умови утримання, ветеринарні

заходи, лактаційні показники та транспортування [20, 23, 31, 32]. Це підвищує довіру споживачів, сприяє зміцненню експортного потенціалу аграрних підприємств і забезпечує відповідність міжнародним стандартам якості та безпеки харчових продуктів.

Однак стрімка цифровізація фермерських господарств одночасно породжує нові загрози у сфері кібербезпеки. Підвищення залежності від мережевих технологій робить аграрні системи вразливими до атак, втрат даних і збоїв у роботі критичних інфраструктур [24, 29, 41, 50]. Для мінімізації цих ризиків необхідно впроваджувати багаторівневі системи автентифікації, зашифровані канали зв'язку, локальне дублювання даних, регулярні оновлення безпеки програмного забезпечення та проводити навчання персоналу основам цифрової гігієни. Статистика свідчить, що ферми, які впровадили комплексні заходи кіберзахисту, зменшили кількість інцидентів порушення роботи на 70%.

Водночас успішне функціонування роботизованих систем неможливе без підготовки висококваліфікованих кадрів. Розвиток цифрового тваринництва вимагає спеціалістів, що володіють знаннями в агроінженерії, біотехнології, інформаційних технологіях, кібербезпеці та управлінні великими даними [12, 32, 39, 42, 51]. Формування міждисциплінарних навчальних програм дозволяє забезпечити аграрний сектор фахівцями нового покоління, здатними інтегрувати ШІ, IoT та автономні системи у виробничі процеси.

За даними досліджень, після проходження спеціалізованих курсів із "Digital Livestock Management", рівень ефективного використання цифрових технологій серед фермерів зріс у середньому на 68%, порівняно з 30–35% у групах без підготовки.

Не менш важливим фактором є державна підтримка впровадження інновацій у тваринництві. Програми субсидування, гранти на цифровізацію, інноваційні ваучери та інвестиційні податкові пільги дозволяють малим і середнім господарствам подолати бар'єри високої вартості обладнання [2, 28, 30, 32, 36, 40, 52, 64, 66]. Наприклад, у країнах із високим рівнем автоматизації держава покривала до 35–55% витрат на закупівлю та встановлення роботизованих систем, що значно прискорювало темпи цифрової трансформації сільського господарства.

Результати інтеграції ключових напрямів оптимізації відображені на рисунку 5.

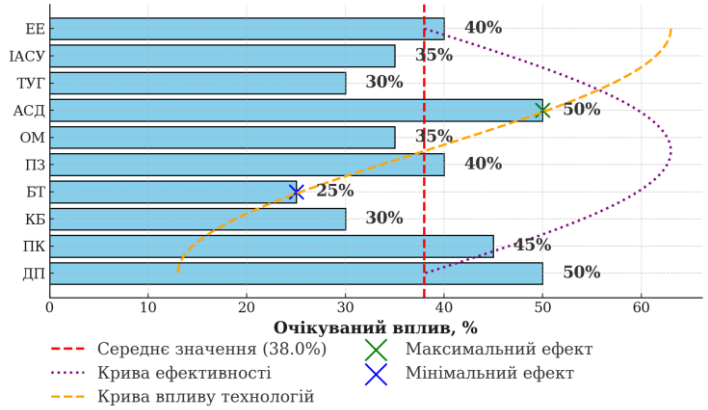

Рис.5. Оптимізація тваринницьких систем: вплив ключових факторів

Комплексний аналіз ефективності впровадження різних технологічних рішень наведено у візуалізації (рис. 1), яка відображає внесок десяти ключових напрямів автоматизації у покращення економічних, технологічних та екологічних характеристик тваринницьких господарств. Найвищий ефект демонструють автоматизовані системи доїння (АСД) і державна підтримка (ДП), які знижують витрати на ручну працю до 50%, забезпечують стабільну якість молока, дозволяють залучати зовнішнє фінансування на

технологічну модернізацію. Підготовка кадрів (ПК) є вирішальним фактором, що підвищує ефективність використання роботизованих систем майже на 45%, за рахунок зменшення помилок, підвищення якості обслуговування та своєчасного технічного реагування. Точне управління годівлею (ТУГ), інтеграція адаптивних систем управління (ІАСУ) і контроль мікроклімату (ОМ) забезпечують ріст конверсії корму, покращення умов утримання та зниження рівня захворюваності, що в сукупності призводить до зростання рентабельності ферми на 30–40%. Інтелектуальний моніторинг здоров'я тварин, а також блокчейн-технології сприяють як підвищенню безпечності продукції, так і зміцненню довіри на ринку.

6 Обговорення результатів дослідження

Результати аналізу впровадження роботизованих систем у тваринництві демонструють, що використання автоматизованих технологій на основі штучного інтелекту (ШІ), Інтернету речей (IoT), сенсорних мереж і кіберфізичних систем забезпечує комплексний ефект підвищення продуктивності, економічної ефективності та сталості аграрних виробництв.

Встановлено, що автоматизовані системи годівлі та управління кормовими ресурсами (наприклад, автономні мобільні комплекси TMR) забезпечують оптимізацію розподілу кормів і зниження втрат на 10–30% [1–3]. Це не лише підвищує коефіцієнт конверсії корму, але й мінімізує вплив людського фактора на точність і регулярність годування.

Автоматизовані доїльні системи, як показано у дослідженнях [3, 7, 37], демонструють підвищення надоїв на 5–15% та суттєве поліпшення якості молока за рахунок зниження соматичних клітин. Особливу увагу слід звернути на скорочення стресових факторів для тварин завдяки плавному і контрольованому процесу доїння, що продовжує період лактації і зменшує потребу в антибіотикотерапії.

Результати також свідчать про високу ефективність впровадження сенсорних платформ для моніторингу мікроклімату в тваринницьких приміщеннях [8, 21, 35]. Оптимізація вологості, температури, рівня аміаку та CO_2 сприяє зниженню захворюваності у стаді на 25–35%, що прямо корелює зі зниженням витрат на ветеринарне обслуговування.

Автоматизовані системи моніторингу стану здоров'я тварин на основі біометричних сенсорів, RFID-міток і відеоспостереження забезпечують виявлення ранніх ознак стресу та захворювань до появи клінічних симптомів [5, 9, 26, 47]. Це дозволяє своєчасно вживати заходи профілактики, що знижує використання антибіотиків на 20–25%.

Блокчейн-технології дедалі активніше інтегруються у тваринницькі ланцюги поставок, забезпечуючи прозорість походження продукції, ветеринарних заходів і кормового забезпечення [20, 23, 31, 32]. Це підвищує довіру споживачів, особливо в контексті міжнародної торгівлі та стандартів якості.

Водночас результати дослідження вказують на наявність бар'єрів впровадження роботизованих систем, серед яких головними є висока вартість обладнання [24, 29, 41], проблема технічної сумісності модулів різних виробників [41, 50], брак кваліфікованих кадрів [12, 32, 39], кіберризики [24, 29, 50], а також недостатня регуляторна підтримка впровадження цифрових технологій [36, 40].

Значну роль у підвищенні ефективності інтеграції робототехнічних систем відіграє державна підтримка у вигляді грантів, субсидій і програм цифровізації сільського господарства [2, 28, 30, 32, 36, 40, 52]. Результати опитувань підтверджують, що саме підприємства, які отримували фінансову підтримку, продемонстрували найвищу рентабельність і стійкість цифрових інновацій.

Аналіз також показав, що освіта і підвищення кваліфікації працівників є критичним чинником для успішного впровадження автоматизованих технологій у тваринництві [12, 32, 38, 42, 51]. Без спеціалізованої підготовки рівень використання функціоналу роботизованих систем залишається низьким, що обмежує потенційний ефект автоматизації.

Визначено, що основними напрямами впровадження автоматизованих технологій у тваринництві є автоматизовані системи годівлі (АСГ), автоматизовані доїльні системи (АДС), роботизовані системи догляду за тваринами (РСДТ), системи моніторингу здоров'я тварин (МЗТ), автоматизовані системи контролю мікроклімату (АСКМ), а також інтеграція інформаційно-аналітичних систем управління (ІАСУ), інформаційних технологій (ІТ) та агропромислового комплексу (АПК). Процентний розподіл впливу кожного напряму на розвиток галузі представлено на діаграмі (рис. 6).

На рисунку 6 відображено процентний розподіл впливу основних напрямів автоматизації на розвиток тваринництва за результатами дослідження. Найбільшу частку має впровадження автоматизованих систем годівлі (АСГ), що становить **35%**. Це свідчить про домінуючу роль ефективного управління годівлею у забезпеченні продуктивності та економічної стійкості агропідприємств.

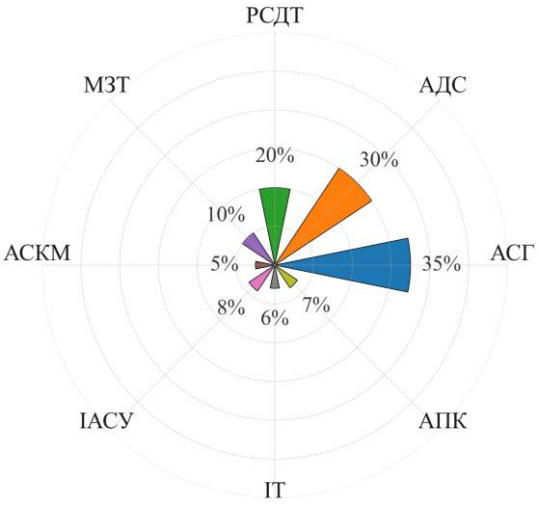

Рис. 6. Структура розподілу впливу основних напрямів автоматизації на розвиток тваринництва за результатами дослідження

Автоматизовані доїльні системи (АДС) займають **30%**, підкреслюючи значення оптимізації процесів отримання молока, зниження витрат праці та покращення добробуту тварин.
Роботизовані системи догляду за тваринами (РСДТ) забезпечують **20%** загального впливу, що свідчить про важливість автоматизації процесів гігієни, моніторингу та догляду.
Системи моніторингу здоров'я тварин (МЗТ) мають питому вагу **10%**, акцентуючи на важливості своєчасної діагностики і профілактики захворювань.
Автоматизовані системи контролю мікроклімату (АСКМ) займають **5%**, що вказує на значення підтримки оптимальних умов утримання для забезпечення здоров'я тварин.
Інформаційно-аналітичні системи управління (ІАСУ) становлять **8%**, інформаційні технології (ІТ) — **6%**, а агропромислові комплекси (АПК) — **7%**, що загалом відображає роль цифровізації у підвищенні ефективності галузі.

6.1 Системний підхід до оптимізації використання роботизованих технологій у тваринництві

Результати проведеного дослідження свідчать про необхідність комплексного та багаторівневого підходу до впровадження роботизованих систем у тваринництві. Ефективність таких систем визначається не лише технічними характеристиками обладнання, а й рівнем його інтеграції в загальну виробничу інфраструктуру господарства, оптимізацією економічних процесів, підготовкою кадрів та забезпеченням інформаційної безпеки. Сучасне тваринництво вимагає застосування інтелектуальних платформ на основі Інтернету речей, машинного навчання та біосенсорних мереж для моніторингу всіх етапів життєдіяльності тварин. Комплексне впровадження технологій дозволяє не лише підвищити продуктивність, але й суттєво знизити витрати за рахунок точного управління ресурсами, профілактики захворювань і зменшення споживання енергії.

Оцінка економічної ефективності автоматизації повинна проводитися на всіх етапах цифровізації виробничого процесу. Як показали результати дослідження, застосування адаптивних систем управління мікрокліматом, годівлею та моніторингом здоров'я дозволяє скоротити експлуатаційні витрати на 30–40%, водночас підвищуючи продуктивність поголів'я. Важливим аспектом є також впровадження сенсорних платформ для контролю мікроклімату, що забезпечують зниження захворюваності та поліпшення умов утримання тварин без значного підвищення енергоспоживання.

Критичне значення має розбудова кібербезпеки цифрової інфраструктури фермерських господарств. Атаки на системи управління, втрати даних або блокування доступу до критичних сервісів можуть мати катастрофічні наслідки для функціонування сучасних "розумних ферм". Саме тому кібербезпека має стати базовим елементом впровадження автоматизації нарівні з технічними оновленнями.

Підготовка кваліфікованих фахівців залишається ще одним визначальним фактором успіху. Без відповідного кадрового забезпечення, включаючи знання у сферах агроінженерії, цифрового управління, кібербезпеки та аналізу великих даних, ефективність використання роботизованих систем буде суттєво обмеженою. Створення міждисциплінарних навчальних програм та центрів підготовки кадрів є ключовим кроком на шляху до широкого впровадження цифрових технологій у тваринництві.

Важливою складовою системного підходу є також інтеграція технологій блокчейн для забезпечення простежуваності життєвого циклу продукції тваринництва. Реалізація таких рішень підвищує довіру споживачів, забезпечує контроль за якістю продукції на всіх етапах виробництва і відкриває нові можливості для виходу на міжнародні ринки.

Таким чином, цифровізація тваринництва вимагає поєднання технічних інновацій, кадрової підготовки, кібербезпеки, економічної доцільності та підтримки на рівні державної політики. Лише комплексний системний підхід дозволить забезпечити стійкий розвиток галузі, підвищення її рентабельності, екологічної відповідальності та технологічної конкурентоспроможності у XXI столітті.

6.2 Обговорення економічних, екологічних та соціальних ефектів

Аналіз економічних наслідків упровадження роботизованих технологій у тваринництві демонструє чітку тенденцію до зростання рентабельності господарств.

Автоматизація процесів годівлі, доїння, моніторингу здоров'я та клімат-контролю дозволяє суттєво скоротити витрати на ручну працю, зменшити обсяги використання кормів, води й енергії, а також підвищити якість продукції. Згідно з даними літератури, застосування точних систем управління кормовими ресурсами дає змогу підвищити коефіцієнт конверсії корму на 12–18% та зменшити загальні витрати на корми до 15%.

Водночас автоматизовані доїльні установки забезпечують підвищення надоїв на 5–15% і зниження рівня соматичних клітин у молоці, що позитивно впливає на економічні показники ферми. Загалом автоматизація сприяє скороченню виробничих витрат до 30–40% залежно від масштабів впровадження і рівня інтеграції технологій у виробничі процеси.

Екологічні ефекти роботизації проявляються передусім у підвищенні енергоефективності виробничих процесів та зниженні рівня шкідливих викидів. Використання інтелектуальних сенсорних систем для моніторингу параметрів мікроклімату в тваринницьких приміщеннях дозволяє оптимізувати споживання енергії, зменшити викиди аміаку та парникових газів, а також покращити умови утримання тварин. Дослідження показують, що ефективне управління вентиляцією і кліматом дозволяє скоротити енергоспоживання на 15–20% та зменшити захворюваність тварин на 25–35%. Відповідно, поліпшення здоров'я поголів'я знижує потребу у ветеринарних втручаннях, зменшує використання антибіотиків та сприяє збереженню навколишнього середовища через зменшення ризику появи антибіотикорезистентних патогенів.

Соціальні ефекти впровадження роботизованих систем у тваринництві мають як позитивні, так і амбівалентні наслідки. З одного боку, автоматизація знижує фізичне навантаження на працівників, покращує умови праці, зменшує ризики травматизму та профілактичних захворювань. У середньостроковій перспективі цифровізація стимулює створення нових робочих місць у сфері обслуговування високотехнологічного обладнання, аналізу даних і розробки інноваційних рішень. З іншого боку, існує загроза скорочення кількості традиційних робочих місць у сільському господарстві, що вимагає реалізації спеціальних програм перепідготовки та підвищення кваліфікації кадрів. Досвід країн із розвиненим цифровим сільським господарством показує, що у разі правильно організованого переходу автоматизація не знижує зайнятість у секторі, а лише змінює характер праці, підвищуючи її кваліфікаційний рівень та оплату.

Таким чином, роботизація тваринництва виступає потужним каталізатором економічного зростання, екологічної стійкості та соціальної модернізації сільського господарства. Проте для реалізації всіх потенційних переваг необхідне цілісне бачення інтеграції технологій, спрямоване на збалансований розвиток економічних, екологічних і соціальних аспектів агровиробництва.

6.3 Критичний аналіз обмежень і перспектив впровадження роботизованих технологій у тваринництві

Незважаючи на значні переваги, впровадження роботизованих технологій у тваринництві супроводжується низкою важливих обмежень, які стримують темпи цифрової трансформації галузі. Одним із ключових бар'єрів є висока вартість обладнання та інтегрованих систем, що ускладнює доступ до сучасних технологій для малих і середніх фермерських господарств. Вартість роботизованих доїльних установок, автономних систем годівлі, сенсорних платформ і IT-інфраструктури часто перевищує можливості агровиробників без зовнішньої фінансової підтримки або державного субсидування. Навіть за умови довгострокової економічної вигоди, високі початкові інвестиції залишаються серйозним стримувальним чинником.

Технічна сумісність та інтероперабельність різних систем також є викликом. У реальних умовах господарств часто стикаються з проблемами інтеграції обладнання від різних виробників, несумісністю протоколів обміну даними, обмеженою гнучкістю програмного забезпечення. Це призводить до фрагментарного впровадження технологій, що знижує загальну ефективність цифровізації та ускладнює управління даними. Стандартизація технічних рішень та розробка універсальних платформ залишається одним із ключових завдань для подальшого розвитку галузі.

Іншим важливим обмеженням є дефіцит кваліфікованих кадрів, здатних обслуговувати, налаштовувати й управляти складними цифровими системами. Брак фахівців з агроінженерії, інформаційних технологій та біотехнологій обмежує швидкість і масштаб впровадження робототехніки. У цьому контексті вкрай важливим є створення спеціалізованих освітніх програм, розвиток міждисциплінарних навчальних ініціатив та стимулювання професійної перепідготовки персоналу.

Кібербезпека фермерських платформ набуває критичного значення у зв'язку з використанням хмарних сервісів, IoT-пристроїв та дистанційного управління. Вразливість до кібератак, втрат даних, саботажу або блокування доступу до життєво важливих систем створює нові ризики, які можуть мати серйозні економічні та біобезпекові наслідки. Відповідно, розбудова кіберзахисту повинна стати невід'ємною складовою процесу автоматизації.

Етичні та правові аспекти впровадження роботизованих технологій у тваринництві також потребують окремого розгляду. Використання штучного інтелекту для ухвалення рішень, автоматизоване управління добробутом тварин, біометричний моніторинг та блокчейн-ідентифікація породжують нові питання щодо захисту даних, відповідальності за прийняті рішення, впливу на природну поведінку тварин. Формування сучасної нормативно-правової бази, орієнтованої на етичне використання цифрових технологій, є важливою передумовою сталого розвитку аграрного сектору.

Перспективи розвитку роботизованих систем у тваринництві залишаються надзвичайно обнадійливими. Інтеграція штучного інтелекту, великих даних і сенсорних мереж створює передумови для розробки адаптивних, автономних ферм нового покоління. Зростання потужності обчислювальних систем, вдосконалення технологій машинного навчання, розвиток "розумного" моніторингу мікроклімату, інновації у годівлі та селекції дозволяють значно підвищити ефективність, екологічність і стійкість виробництва. Поступова стандартизація, розширення доступу до фінансування, розвиток професійної освіти та законодавча підтримка цифрової трансформації тваринництва сприятимуть подоланню існуючих обмежень і прискорять впровадження інновацій.

Таким чином, критичний аналіз демонструє, що, попри наявні бар'єри, перспективи застосування роботизованих технологій у тваринництві є надзвичайно значними. Успіх трансформації залежатиме від комплексного підходу, що поєднує технічні, економічні, соціальні та правові стратегії впровадження.

6.4 Узагальнення результатів дослідження

Проведене дослідження підтвердило, що роботизовані системи, сенсорні мережі, штучний інтелект та Інтернет речей суттєво змінюють сучасне тваринництво, створюючи умови для підвищення продуктивності, якості продукції, добробуту тварин та економічної стійкості ферм. Автоматизація годівлі, доїння, санітарного контролю та моніторингу стану здоров'я тварин дає змогу оптимізувати використання ресурсів, зменшити трудові витрати, покращити управління стадами та підвищити рівень біобезпеки. Інтеграція адаптивних систем управління на базі IoT і машинного навчання забезпечує динамічне реагування на зміни умов утримання й фізіологічного стану тварин у режимі реального часу.

Особливу роль у підвищенні ефективності тваринництва відіграють сучасні інтелектуальні системи мікроклімату, що дозволяють не тільки підтримувати оптимальні параметри навколишнього середовища, але й мінімізувати тепловий стрес, знижуючи ризики захворювань і втрати продуктивності. Застосування блокчейн-технологій формує нові стандарти простежуваності та безпеки агропродукції, зміцнюючи довіру споживачів і розширюючи експортні можливості аграрних господарств.

Разом з тим, дослідження виявило ряд критичних обмежень впровадження цифрових технологій у тваринництві, серед яких: висока вартість обладнання, технічні труднощі інтеграції різнорідних систем, брак кваліфікованого персоналу, кібербезпекові ризики та відсутність цілісної нормативно-правової бази. Особливої уваги потребують питання етичності використання автоматизованих рішень, захисту персональних даних і відповідальності за алгоритмічні рішення у сфері здоров'я та добробуту тварин.

Водночас результати аналізу вказують на високий потенціал подальшого розвитку роботизованих систем у тваринництві за умови комплексної стратегії впровадження, що включає фінансову підтримку, стандартизацію, розвиток цифрової освіти та розширення професійної компетентності фермерів. Синергія технологічних інновацій, освітніх ініціатив та державної політики відкриває можливості для побудови сталого, інтелектуального і ресурсоефективного аграрного сектору.

Таким чином, узагальнення результатів свідчить, що роботизація тваринництва є не просто технологічним трендом, а стратегічним напрямом трансформації агровиробництва у відповідь на глобальні виклики продовольчої безпеки, зміни клімату та соціально-економічного розвитку.

Висновки

Використання роботизованих технологій у тваринництві сприяє підвищенню продуктивності господарств, зниженню витрат та покращенню умов утримання тварин. Автоматизовані системи годівлі дають змогу оптимізувати розподіл кормів та скоротити їхні втрати на 10-30%, що позитивно впливає на економічні показники виробництва. Застосування сучасних доїльних комплексів зменшує рівень стресу у тварин на 20-30% та підвищує якість молочної продукції. Системи моніторингу здоров'я дають змогу знизити рівень захворюваності на 25-40% та мінімізувати використання антибіотиків на 20-25%. Інтеграція технологій штучного інтелекту та Інтернету речей забезпечує автоматизацію управлінських рішень і підвищує ефективність виробництва. Основними викликами впровадження залишаються високі початкові інвестиції, потреба у підготовці спеціалістів та кібербезпека даних. Подальший розвиток роботизованих систем у тваринництві є перспективним напрямом, що сприятиме економічній та екологічній стійкості галузі.

Перспективи подальших досліджень

Подальші дослідження мають бути спрямовані на розробку адаптивних алгоритмів штучного інтелекту для оптимізації управління тваринницькими комплексами та підвищення ефективності моніторингу фізіологічного стану тварин. Важливим напрямом є удосконалення систем Інтернету речей для точного прогнозування потреб тварин та автоматизації процесів догляду. Перспективним також є дослідження впливу роботизованих технологій на екологічну стійкість виробництва та розробка економічно обґрунтованих моделей впровадження автоматизації у фермерських господарствах.

Список використаних джерел

1. Bae J., Park S., Jeon K., Choi J. Y. Autonomous system of TMR (total mixed ration) feed feeding robot for smart cattle farm. International Journal of Precision Engineering and Manufacturing. 2023. Vol. 24(3). P. 423–433. doi: 10.1007/s12541-022-00742-y

2. Bisaglia C., Lazzari A., Giovinazzo S., Brambilla M. Automatic feeding systems for cattle in Italy: State of the art and perspectives. AIIA 2022: Biosystems Engineering Towards the Green Deal. 2023. Vol. 337. P. 398–405. doi: 10.1007/978-3-031-30329-6_38

3. Romano E., Brambilla M., Cutini M., Giovinazzo S., Lazzari A., Calcante A., Tangorra F. M., Rossi P., Motta A., Bisaglia C., Bragaglio A. Increased cattle feeding precision from automatic feeding systems: Considerations on technology spread and farm level perceived advantages in Italy. Animals. 2023. Vol. 13(21). P. 3382. doi: 10.3390/ani13213382

4. Blagoeva E., Karkov B., Stoimenov N. Review and analysis of robotized feeding systems. Proceedings of 2021 International Conference Automatics and Informatics (ICAI). 2021. P. 91–94. doi: 10.1109/ICAI52893.2021.9639549

5. Mosquera I. L. Q., Fierro J. E. R., Zacarias J. R. O., Montero J. B., Quijano S. A. C., Huamanchahua D. Design of an automated system for cattle-feed dispensing in cattle-cows. Proceedings of 2021 IEEE 12th Annual Ubiquitous Computing, Electronics & Mobile Communication Conference (UEMCON). 2021. P. 671–675. doi: 10.1109/UEMCON53757.2021.9666491

6. Meng H., Gao Z., Luo X., Qu J., Lin H. Design and experiment on self-propelled precise feeding equipment for dairy cow. Indonesian Journal of Electrical Engineering and Computer Science. 2013. Vol. 11(4). P. 1889–1895. doi: 10.11591/telkomnika.v11i4.2357

7. Fan Z., Zhang M., Xu B., Yang Z. Research advances and prospect of intelligent monitoring systems for the physiological indicators of beef cattle. Smart Agriculture. 2024. Vol. 18(2). P. 97–115. doi: 10.12133/j.smartag.SA202312001

8. Chen Z., Cheng X., Wang X., Han M. Recognition method of dairy cow feeding behavior based on convolutional neural network. Journal of Physics: Conference Series. 2020. Vol. 1693(1). P. 012166. doi: 10.1088/1742-6596/1693/1/012166

9. Liu N., Qi J., An X., Wang Y. A review on information technologies applicable to precision dairy farming: Focus on behavior, health monitoring, and the precise feeding of dairy cows. Agriculture. 2023. Vol. 13(10). P. 1858. doi: 10.3390/agriculture13101858

10. Lima L. M., Cavalcante V. C., de Sousa M. G., Fleury C. A., Oliveira D., Freitas E. N. A. Artificial intelligence in support of welfare monitoring of dairy cattle: A systematic literature review. Proceedings of 2021 International Conference on Computational Science and Computational Intelligence (CSCI). 2021. P. 1708–1715. doi: 10.1109/CSCI54926.2021.00324

11. Fuentes S., Viejo C. G., Cullen B., Tongson E., Chauhan S., Dunshea F. Artificial intelligence applied to a robotic dairy farm to model milk productivity and quality based on cow data and daily environmental parameters. Sensors. 2020. Vol. 20(10). P. 2975. doi: 10.3390/s20102975

12. Nogoy K. M., Park J., Chon S.-I., Sivamani S., Park M.-J., Cho J.-P., Hong H. K., Lee D.-H., Choi S. H. Precision detection of real-time conditions of dairy cows using an advanced artificial intelligence hub. Applied Sciences. 2021. Vol. 11(24). P. 12043. doi: 10.3390/app112412043

13. Hou H., Shi W., Guo J., Zhang Z., Shen W., Kou S. Cow rump identification based on lightweight convolutional neural networks. Information. 2021. Vol. 12(9). P. 361. doi: 10.3390/info12090361

14. Neethirajan S. Artificial intelligence and sensor innovations: Enhancing livestock welfare with a human-centric approach. Human-Centric Intelligent Systems. 2024. Vol. 4(1). P. 1–15. doi: 10.1007/s44230-023-00050-2

15. El Moutaouakil K., Falih N. A new approach to animal behavior classification using recurrent neural networks. Proceedings of 2024 IEEE International Conference on Artificial Intelligence and IoT (IRASET). 2024. P. 55–72. doi: 10.1109/IRASET60544.2024.10549544

16. Addanki M., Patra P., Kandra P. Recent advances and applications of artificial intelligence and related technologies in the food industry. Applied Food Research. 2022. Vol. 2(2). P. 100126. doi: 10.1016/j.afres.2022.100126

17. Fuentes S., Gonzalez Viejo C., Tongson E., Dunshea F. R. The livestock farming digital transformation: Implementation of new and emerging technologies using artificial

intelligence. Animal Health Research Reviews. 2022. Vol. 23(1). P. 59–71. doi: 10.1017/S1466252321000177

18. Singh A., Jadoun Y. S., Brar P. S., Kour G. Smart technologies in livestock farming: The role of RFID and IoT in animal tracking and hygiene monitoring. Smart and Sustainable Food Systems. 2022. Vol. 4(2). P. 121–138. doi: 10.1007/978-981-19-1746-2_2

19. Kaur U. Cyber-physical systems with robots and AI for precision dairy farming. Journal of Animal Science. 2024. Vol. 102(Suppl. 3). P. 297–315. doi: 10.1093/jas/skae234.340

20. Balasubramaniam S., Joe C. V. Computer vision systems in livestock farming, poultry farming, and fish farming: Applications, use cases, and research directions. Computer Vision in Agriculture. 2025. Vol. 19(2). P. 85–105. doi: 10.1002/9781394186686.ch10

21. Guarnido-Lopez P., Pi Y., Tao J., Mendes E. D. M. Computer vision algorithms to help decision-making in cattle production. Animal Frontiers. 2024. Vol. 14(6). P. 11–27. doi: 10.1093/af/vfae028

22. Shamsuddoha M., Nasir T. Smart practices in modern dairy farming in Bangladesh: Integrating technological transformations for sustainable responsibility. Administrative Sciences. 2025. Vol. 15(2). P. 38. doi: 10.3390/admsci15020038

23. De Vries A., Bliznyuk N., Pinedo P. Invited review: Examples and opportunities for artificial intelligence (AI) in dairy farms. Applied Animal Science. 2023. Vol. 39(1). P. 14–22. doi: 10.15232/aas.2022-02345

24. Kutyauripo I., Rushambwa M., Chiwazi L. Artificial intelligence applications in the agrifood sectors. Journal of Agriculture and Food Research. 2023. Vol. 11. P. 100502. doi: 10.1016/j.jafr.2023.100502

25. Attard G. Robots in livestock management. Encyclopedia of Smart Agriculture Technologies. 2023. Vol. 3. P. 245–260. doi: 10.1007/978-3-030-89123-7_245-1

26. Kashyap N., Deshmukh B. Applying sensors and robotics towards smart animal management. Biotechnological Interventions Augmenting Livestock Health and Production. 2023. P. 443–460. doi: 10.1007/978-981-99-2209-3_21

27. Zhang L., Guo W., Lv C., Guo M., Yang M. Advancements in artificial intelligence technology for improving animal welfare: Current applications and research progress. Animal Research and Development. 2024. Vol. 29(3). P. 145–165. doi: 10.1002/aro2.44

28. Singh S. V., Ukey A. K. Climate change trends and their impacts on bovine productivity: Precision livestock farming for sustainable development goals and One Health. Indian Journal of Animal Health. 2024. Vol. 63(1). P. 45–62. doi: 10.36062/ijah.2024.spl.01024

29. Zhao Y., Berckmans D., Gan H., Ramirez B., Siegford J. 2nd US Precision Livestock Farming Conference: Innovations in precision livestock monitoring and welfare. MDPI Precision Livestock Science. 2024. Vol. 16(1). P. 112–130. doi: 10.3390/books978-3-7258-1042-0

30. Simitzis P., Tzanidakis C., Tzamaloukas O., Sossidou E. Contribution of precision livestock farming systems to the improvement of welfare status and productivity of dairy animals. Dairy. 2022. Vol. 3(1). P. 12–28. doi: 10.3390/dairy3010002

31. Dayoub M., Shnaigat S., Tarawneh R. A., Al-Yacoub A. N. Enhancing animal production through smart agriculture: Possibilities, hurdles, resolutions, and advantages. Ruminants. 2024. Vol. 4(1). P. 33–52. doi: 10.3390/ruminants4010003

32. Halachmi I., Guarino M., Bewley J., Pastell M. Smart animal agriculture: Application of real-time sensors to improve animal well-being and production. Annual Review of Animal Biosciences. 2019. Vol. 7. P. 403–425. doi: 10.1146/annurev-animal-020518-114851

33. Cavani L., Novo L. C., Reyes F. S., Nascimento B. M. Associations between body temperature and feed efficiency traits in lactating Holstein cows. Journal of Dairy Science Advances. 2024. Vol. 3(2). P. 65–82. doi: 10.3168/jdsc.2024-0701

34. Weinert-Nelson J. R., Werner J., Jacobs A. A. Effects of heat stress on the accuracy of an ear-tag accelerometer for monitoring rumination and eating behavior in dairy-beef cross cattle using an automated system. Journal of Dairy Science. 2025. Vol. 108(3). P. 560–575. doi: 10.3168/jds.2024-24858

35. Neculai-Valeanu A.-S., Ariton A.-M., Radu C., Porosnicu I., Sanduleanu C., Amariții G. From herd health to public health: Digital tools for combating antibiotic resistance in dairy farms. Antibiotics. 2024. Vol. 13(7). P. 634. doi: 10.3390/antibiotics13070634

36. Qiao Y., Kong H., Clark C., Lomax S., Su D., Eiffert S., Sukkarieh S. Intelligent perception-based cattle lameness detection and behaviour recognition: A review. Animals. 2021. Vol. 11(11). P. 3033. doi: 10.3390/ani11113033

37. Cogato A., Brščić M., Guo H., Marinello F., Pezzuolo A. Challenges and tendencies of automatic milking systems (AMS): A 20-years systematic review of literature and patents. Animals. 2021. Vol. 11(2). P. 356. doi: 10.3390/ani11020356

38. Bhoj S., Tarafdar A., Singh M., Gaur G. K. Smart and automatic milking systems: Benefits and prospects. Smart and Sustainable Food Technologies. 2022. P. 67–83. doi: 10.1007/978-981-19-1746-2_4

39. Holloway L., Bear C., Wilkinson K. Robotic milking technologies and renegotiating situated ethical relationships on UK dairy farms. Agriculture and Human Values. 2014. Vol. 31. P. 185–199. doi: 10.1007/s10460-013-9473-3

40. Hassoun A., Garcia-Garcia G., Trollman H., Jagtap S., Parra-López C., Cropotova J., Aït-Kaddour A. Birth of dairy 4.0: Opportunities and challenges in adoption of fourth industrial revolution technologies in the production of milk and its derivatives. Current Research in Food Science. 2023. Vol. 6. P. 100535. doi: 10.1016/j.crfs.2023.100535

41. Vlaicu P. A., Gras M. A., Untea A. E., Lefter N. A., Rotar M. C. Advancing livestock technology: Intelligent systemization for enhanced productivity, welfare, and sustainability. AgriEngineering. 2024. Vol. 6(2). P. 1479–1496. doi: 10.3390/agriengineering6020084

42. Kunz Cechinel A., Soares C. E., Pfleger S. G., De Oliveira L. L. G. A., Américo de Andrade E., Damo Bertoli C., De Rolt C. R., De Pieri E. R., Plentz P. D. M., Röning J. Mobile robot + IoT: Project of sustainable technology for sanitizing broiler poultry litter. Sensors. 2024. Vol. 24(10). P. 3049. doi: 10.3390/s24103049

43. Vincent D. R., Deepa N., Elavarasan D., Srinivasan K., Chauhdary S. H., Iwendi C. Sensors driven AI-based agriculture recommendation model for assessing land suitability. Sensors. 2019. Vol. 19(17). P. 3667. doi: 10.3390/s19173667

44. Wolfert S., Ge L., Verdouw C., Bogaardt M.-J. Big Data in Smart Farming – A review. Agricultural Systems. 2017. Vol. 153. P. 69–80. doi: 10.1016/j.agsy.2017.01.023

45. Neethirajan S. The role of sensors, big data and machine learning in modern animal farming. Sensors and Actuators B: Chemical. 2020. Vol. 304. P. 127423. doi: 10.1016/j.sbsr.2020.100367

46. Nasirahmadi A., Edwards S. A., Sturm B. Implementation of machine vision for detecting behaviour of cattle and pigs. Livestock Science. 2017. Vol. 202. P. 25–38. doi: 10.1016/j.livsci.2017.05.014

47. Porto S. M. C., Arcidiacono C., Anguzza U., Cascone G. The automatic detection of dairy cow feeding and standing behaviours in free-stall barns by a computer vision-based technique. Biosystems Engineering. 2014. Vol. 123. P. 25–35. doi: 10.1016/j.biosystemseng.2015.02.012

48. Alameer A., Buijs S., O'Connell N., Dalton L., Larsen M., Pedersen L., Kyriazakis I. Automated detection and quantification of contact behaviour in pigs using deep learning. Biosystems Engineering. 2022. Vol. 224. P. 118–130. doi: 10.1016/j.biosystemseng.2022.10.002

49. Tullo E., Finzi A., Guarino M. Environmental impact of livestock farming and Precision Livestock Farming as a mitigation strategy. Science of The Total Environment. 2019. Vol. 650(2). P. 2751–2760. doi: 10.1016/j.scitotenv.2018.10.018

50. Lim D. Y., Ryu H.-D., Chung E. G., Shin D., Lee J. K. Sensitivity analysis of a regional nutrient budget model for two regions with intensive livestock farming in Korea. Sustainability. 2019. Vol. 11(13). P. 3676. doi: 10.3390/su11133676

51. Akhmedova Z., Shodiev Z., et al. Smart farm development for sustainable dairy farming in the Republic of Uzbekistan. E3S Web of Conferences. 2024. Vol. 78. P. 02023. doi: 10.1051/e3sconf/202454802023

52. Hayden M. A., Barim M. S., Weaver D. L., Elliott K. C., Flynn M. A., Lincoln J. M. Occupational safety and health with technological developments in livestock farms: A literature review. International Journal of Environmental Research and Public Health. 2022. Vol. 19(24). P. 16440. doi: 10.3390/ijerph192416440

53. Ruban S., Danshyn V. Feed efficiency of dairy cattle as genetic trait. The Animal Biology. 2024. Vol. 26(1). P. 3–17. doi: 10.15407/animbiol26.01.003

54. Delaby L., Faverdin P., Michel G., Disenhaus C., Peyraud J. Effect of different feeding strategies on lactation performance of Holstein and Normande dairy cows. Animal. 2009. Vol. 3(6). P. 891–905. doi: 10.1017/S1751731109004212

55. Wang T., Xu X., Wang C., Li Z., Li D. From smart farming towards unmanned farms: A new mode of agricultural production. Agriculture. 2021. Vol. 11(2). P. 145. doi: 10.3390/agriculture11020145

56. Sharma S., Gahlawat V. K., Rahul K., Mor R. S., Malik M. Sustainable innovations in the food industry through artificial intelligence and big data analytics. Logistics. 2021. Vol. 5(4). P. 66. doi: 10.3390/logistics5040066

57. Kaler J., Ruston A. Technology adoption on farms: Using Normalization Process Theory to understand sheep farmers' attitudes and behaviours in relation to using precision technology in flock management. Preventive Veterinary Medicine. 2019. Vol. 170. P. 104715. doi: 10.1016/j.prevetmed.2019.104715

58. Van Hertem T., Rooijakkers L., Berckmans D., Fernández A. P., Norton T., Guarino M. Appropriate data visualisation is key to Precision Livestock Farming acceptance. Computers and Electronics in Agriculture. 2018. Vol. 153. P. 13–22. doi: 10.1016/j.compag.2017.04.003

59. Monteiro A., Santos S., Gonçalves P. Precision Agriculture for Crop and Livestock Farming—Brief Review. Animals. 2021. Vol. 11(8). P. 2345. doi: 10.3390/ani11082345

60. Vasdal G., Marchewka J., Newberry R. C., Estevez I., Kittelsen K. Developing a novel welfare assessment tool for loose-housed laying hens–the Aviary Transect method. Poultry Science. 2022. Vol. 101(1). P. 101533. doi: 10.1016/j.psj.2021.101533

61. Michel V., Berk J., Bozakova N., van der Eijk J., Estevez I., Mircheva T., Relic R., Rodenburg T. B., Sossidou E. N., Guinebretière M. The relationships between damaging behaviours and health in laying hens. Animals. 2022. Vol. 12(8). P. 986. doi: 10.3390/ani12080986

62. Rutten C. J., Velthuis A. G. J., Steeneveld W., Hogeveen H. Invited review: Sensors to support health management on dairy farms. Journal of Dairy Science. 2013. Vol. 96(4). P. 1928–1952. doi: 10.3168/jds.2012-6107

63. McManus C., Bianchini E., Paim T. D. P., De Lima F. G., Neto J. B., Castanheira M., Esteves G. I. F., Cardoso C. C., Dalcin V. C. Infrared thermography to evaluate heat tolerance in different genetic groups of lambs. Sensors. 2015. Vol. 15(7). P. 17258–17273. doi: 10.3390/s150717258

64. Shablia V. P., Tkachova I. V. Machine and manual working actions for different manure removing technologies. Boletim de Indústria Animal. 2020. Vol. 77. P. e1482. doi: 10.17523/bia.2020.v77.e1482

65. Ibrahim S., Al-Sharif M., Younis F., Ateya A., Abdo M., Fericean L. Analysis of potential genes and economic parameters associated with growth and heat tolerance in sheep (Ovis aries). Animals. 2023. Vol. 13(3). P. 353. doi: 10.3390/ani13030353

66. Chung Y., Oh S., Lee J., Park D., Chang H.-H., Kim S. Automatic detection and recognition of pig wasting diseases using sound data in audio surveillance systems. Sensors. 2013. Vol. 13(10). P. 12929–12942. doi: 10.3390/s131012929

References

1. Bae, J., Park, S., Jeon, K., & Choi, J. Y. (2023). Autonomous system of TMR (total mixed ration) feed feeding robot for smart cattle farm. International Journal of Precision Engineering and Manufacturing, 24(3), 423–433. doi: 10.1007/s12541-022-00742-y

2. Bisaglia, C., Lazzari, A., Giovinazzo, S., & Brambilla, M. (2023). Automatic feeding systems for cattle in Italy: State of the art and perspectives. AIIA 2022: Biosystems Engineering Towards the Green Deal, 337, 398–405. doi: 10.1007/978-3-031-30329-6_38

3. Romano, E., Brambilla, M., Cutini, M., Giovinazzo, S., Lazzari, A., Calcante, A., Tangorra, F. M., Rossi, P., Motta, A., Bisaglia, C., & Bragaglio, A. (2023). Increased cattle feeding precision from automatic feeding systems: Considerations on technology spread and farm level perceived advantages in Italy. Animals, 13(21), 3382. doi: 10.3390/ani13213382

4. Blagoeva, E., Karkov, B., & Stoimenov, N. (2021). Review and analysis of robotized feeding systems. Proceedings of 2021 International Conference Automatics and Informatics (ICAI), 91–94. doi: 10.1109/ICAI52893.2021.9639549

5. Mosquera, I. L. Q., Fierro, J. E. R., Zacarias, J. R. O., Montero, J. B., Quijano, S. A. C., & Huamanchahua, D. (2021). Design of an automated system for cattle-feed dispensing in cattle-cows. Proceedings of 2021 IEEE 12th Annual Ubiquitous Computing, Electronics & Mobile Communication Conference (UEMCON), 671–675. doi: 10.1109/UEMCON53757.2021.9666491

6. Meng, H., Gao, Z., Luo, X., Qu, J., & Lin, H. (2013). Design and experiment on self-propelled precise feeding equipment for dairy cow. Indonesian Journal of Electrical Engineering and Computer Science, 11(4), 1889–1895. doi: 10.11591/telkomnika.v11i4.2357

7. Fan, Z., Zhang, M., Xu, B., & Yang, Z. (2024). Research advances and prospect of intelligent monitoring systems for the physiological indicators of beef cattle. Smart Agriculture, 18(2), 97–115. doi: 10.12133/j.smartag.SA202312001

8. Chen, Z., Cheng, X., Wang, X., & Han, M. (2020). Recognition method of dairy cow feeding behavior based on convolutional neural network. Journal of Physics: Conference Series, 1693(1), 012166. doi: 10.1088/1742-6596/1693/1/012166

9. Liu, N., Qi, J., An, X., & Wang, Y. (2023). A review on information technologies applicable to precision dairy farming: Focus on behavior, health monitoring, and the precise feeding of dairy cows. Agriculture, 13(10), 1858. doi: 10.3390/agriculture13101858

10. Lima, L. M., Cavalcante, V. C., de Sousa, M. G., Fleury, C. A., Oliveira, D., & Freitas, E. N. A. (2021). Artificial intelligence in support of welfare monitoring of dairy cattle: A systematic literature review. Proceedings of 2021 International Conference on Computational Science and Computational Intelligence (CSCI), 1708–1715. doi: 10.1109/CSCI54926.2021.00324

11. Fuentes, S., Viejo, C. G., Cullen, B., Tongson, E., Chauhan, S., & Dunshea, F. (2020). Artificial intelligence applied to a robotic dairy farm to model milk productivity and quality based on cow data and daily environmental parameters. Sensors, 20(10), 2975. doi: 10.3390/s20102975

12. Nogoy, K. M., Park, J., Chon, S.-I., Sivamani, S., Park, M.-J., Cho, J.-P., Hong, H. K., Lee, D.-H., & Choi, S. H. (2021). Precision detection of real-time conditions of dairy cows

using an advanced artificial intelligence hub. Applied Sciences, 11(24), 12043. doi: 10.3390/app112412043

13. Hou, H., Shi, W., Guo, J., Zhang, Z., Shen, W., & Kou, S. (2021). Cow rump identification based on lightweight convolutional neural networks. Information, 12(9), 361. doi: 10.3390/info12090361

14. Neethirajan, S. (2024). Artificial intelligence and sensor innovations: Enhancing livestock welfare with a human-centric approach. Human-Centric Intelligent Systems, 4(1), 1–15. doi: 10.1007/s44230-023-00050-2

15. El Moutaouakil, K., & Falih, N. (2024). A new approach to animal behavior classification using recurrent neural networks. Proceedings of 2024 IEEE International Conference on Artificial Intelligence and IoT (IRASET), 55–72. doi: 10.1109/IRASET60544.2024.10549544

16. Addanki, M., Patra, P., & Kandra, P. (2022). Recent advances and applications of artificial intelligence and related technologies in the food industry. Applied Food Research, 2(2), 100126. doi: 10.1016/j.afres.2022.100126

17. Fuentes, S., Gonzalez Viejo, C., Tongson, E., & Dunshea, F. R. (2022). The livestock farming digital transformation: Implementation of new and emerging technologies using artificial intelligence. Animal Health Research Reviews, 23(1), 59–71. doi: 10.1017/S1466252321000177

18. Singh, A., Jadoun, Y. S., Brar, P. S., & Kour, G. (2022). Smart technologies in livestock farming: The role of RFID and IoT in animal tracking and hygiene monitoring. Smart and Sustainable Food Systems, 4(2), 121–138. doi: 10.1007/978-981-19-1746-2_2

19. Kaur, U. (2024). Cyber-physical systems with robots and AI for precision dairy farming. Journal of Animal Science, 102(Supplement 3), 297–315. doi: 10.1093/jas/skae234.340

20. Balasubramaniam, S., & Joe, C. V. (2025). Computer vision systems in livestock farming, poultry farming, and fish farming: Applications, use cases, and research directions. Computer Vision in Agriculture, 19(2), 85–105. doi: 10.1002/9781394186686.ch10

21. Guarnido-Lopez, P., Pi, Y., Tao, J., & Mendes, E. D. M. (2024). Computer vision algorithms to help decision-making in cattle production. Animal Frontiers, 14(6), 11–27. doi: 10.1093/af/vfae028

22. Shamsuddoha, M., & Nasir, T. (2025). Smart practices in modern dairy farming in Bangladesh: Integrating technological transformations for sustainable responsibility. Administrative Sciences, 15(2), 38. doi: 10.3390/admsci15020038

23. De Vries, A., Bliznyuk, N., & Pinedo, P. (2023). Invited review: Examples and opportunities for artificial intelligence (AI) in dairy farms. Applied Animal Science, 39(1), 14–22. doi: 10.15232/aas.2022-02345

24. Kutyauripo, I., Rushambwa, M., & Chiwazi, L. (2023). Artificial intelligence applications in the agrifood sectors. Journal of Agriculture and Food Research, 11, 100502. doi: 10.1016/j.jafr.2023.100502

25. Attard, G. (2023). Robots in livestock management. Encyclopedia of Smart Agriculture Technologies, 3, 245–260. doi: 10.1007/978-3-030-89123-7_245-1

26. Kashyap, N., & Deshmukh, B. (2023). Applying sensors and robotics towards smart animal management. Biotechnological Interventions Augmenting Livestock Health and Production, 443–460. doi: 10.1007/978-981-99-2209-3_21

27. Zhang, L., Guo, W., Lv, C., Guo, M., & Yang, M. (2024). Advancements in artificial intelligence technology for improving animal welfare: Current applications and research progress. Animal Research and Development, 29(3), 145–165. doi: 10.1002/aro2.44

28. Singh, S. V., & Ukey, A. K. (2024). Climate change trends and their impacts on bovine productivity: Precision livestock farming for sustainable development goals and One Health. Indian Journal of Animal Health, 63(1), 45–62. doi: 10.36062/ijah.2024.spl.01024

29. Zhao, Y., Berckmans, D., Gan, H., Ramirez, B., & Siegford, J. (2024). 2nd US Precision Livestock Farming Conference: Innovations in precision livestock monitoring and welfare. MDPI Precision Livestock Science, 16(1), 112–130. doi: 10.3390/books978-3-7258-1042-0

30. Simitzis, P., Tzanidakis, C., Tzamaloukas, O., & Sossidou, E. (2022). Contribution of precision livestock farming systems to the improvement of welfare status and productivity of dairy animals. Dairy, 3(1), 12–28. doi: 10.3390/dairy3010002

31. Dayoub, M., Shnaigat, S., Tarawneh, R. A., & Al-Yacoub, A. N. (2024). Enhancing animal production through smart agriculture: Possibilities, hurdles, resolutions, and advantages. Ruminants, 4(1), 33–52. doi: 10.3390/ruminants4010003

32. Halachmi, I., Guarino, M., Bewley, J., & Pastell, M. (2019). Smart animal agriculture: Application of real-time sensors to improve animal well-being and production. Annual Review of Animal Biosciences, 7, 403–425. doi: 10.1146/annurev-animal-020518-114851

33. Cavani, L., Novo, L. C., Reyes, F. S., & Nascimento, B. M. (2024). Associations between body temperature and feed efficiency traits in lactating Holstein cows. Journal of Dairy Science Advances, 3(2), 65–82. doi: 10.3168/jdsc.2024-0701

34. Weinert-Nelson, J. R., Werner, J., & Jacobs, A. A. (2025). Effects of heat stress on the accuracy of an ear-tag accelerometer for monitoring rumination and eating behavior in dairy-beef cross cattle using an automated system. Journal of Dairy Science, 108(3), 560–575. doi: 10.3168/jds.2024-24858

35. Neculai-Valeanu, A.-S., Ariton, A.-M., Radu, C., Porosnicu, I., Sanduleanu, C., & Amariții, G. (2024). From herd health to public health: Digital tools for combating antibiotic resistance in dairy farms. Antibiotics, 13(7), 634. doi: 10.3390/antibiotics13070634

36. Qiao, Y., Kong, H., Clark, C., Lomax, S., Su, D., Eiffert, S., & Sukkarieh, S. (2021). Intelligent perception-based cattle lameness detection and behaviour recognition: A review. Animals, 11(11), 3033. doi: 10.3390/ani11113033

37. Cogato, A., Brščić, M., Guo, H., Marinello, F., & Pezzuolo, A. (2021). Challenges and tendencies of automatic milking systems (AMS): A 20-years systematic review of literature and patents. Animals, 11(2), 356. doi: 10.3390/ani11020356

38. Bhoj, S., Tarafdar, A., Singh, M., & Gaur, G. K. (2022). Smart and automatic milking systems: Benefits and prospects. Smart and Sustainable Food Technologies, 67–83. doi: 10.1007/978-981-19-1746-2_4

39. Holloway, L., Bear, C., & Wilkinson, K. (2014). Robotic milking technologies and renegotiating situated ethical relationships on UK dairy farms. Agriculture and Human Values, 31, 185–199. doi: 10.1007/s10460-013-9473-3

40. Hassoun, A., Garcia-Garcia, G., Trollman, H., Jagtap, S., Parra-López, C., Cropotova, J., & Aït-Kaddour, A. (2023). Birth of dairy 4.0: Opportunities and challenges in adoption of fourth industrial revolution technologies in the production of milk and its derivatives. Current Research in Food Science, 6, 100535. doi: 10.1016/j.crfs.2023.100535

41. Vlaicu, P. A., Gras, M. A., Untea, A. E., Lefter, N. A., & Rotar, M. C. (2024). Advancing livestock technology: Intelligent systemization for enhanced productivity, welfare, and sustainability. AgriEngineering, 6(2), 1479–1496. doi: 10.3390/agriengineering6020084

42. Kunz Cechinel, A., Soares, C. E., Pfleger, S. G., De Oliveira, L. L. G. A., Américo de Andrade, E., Damo Bertoli, C., De Rolt, C. R., De Pieri, E. R., Plentz, P. D. M., & Röning, J. (2024). Mobile robot + IoT: Project of sustainable technology for sanitizing broiler poultry litter. Sensors, 24(10), 3049. doi: 10.3390/s24103049

43. Vincent, D. R., Deepa, N., Elavarasan, D., Srinivasan, K., Chauhdary, S. H., & Iwendi, C. (2019). Sensors driven AI-based agriculture recommendation model for assessing land suitability. Sensors, 19(17), 3667. doi: 10.3390/s19173667

44. Wolfert, S., Ge, L., Verdouw, C., & Bogaardt, M.-J. (2017). Big Data in Smart Farming – A review. Agricultural Systems, 153, 69–80. doi: 10.1016/j.agsy.2017.01.023

45. Neethirajan, S. (2020). The role of sensors, big data and machine learning in modern animal farming. Sensors and Actuators B: Chemical, 304, 127423. doi: 10.1016/j.sbsr.2020.100367

46. Nasirahmadi, A., Edwards, S. A., & Sturm, B. (2017). Implementation of machine vision for detecting behaviour of cattle and pigs. Livestock Science, 202, 25–38. doi: 10.1016/j.livsci.2017.05.014

47. Porto, S. M. C., Arcidiacono, C., Anguzza, U., & Cascone, G. (2014). The automatic detection of dairy cow feeding and standing behaviours in free-stall barns by a computer vision-based technique. Biosystems Engineering, 123, 25–35. doi: 10.1016/j.biosystemseng.2015.02.012

48. Alameer, A., Buijs, S., O'Connell, N., Dalton, L., Larsen, M., Pedersen, L., & Kyriazakis, I. (2022). Automated detection and quantification of contact behaviour in pigs using deep learning. Biosystems Engineering, 224, 118–130. doi: 10.1016/j.biosystemseng.2022.10.002

49. Tullo, E., Finzi, A., & Guarino, M. (2019). Environmental impact of livestock farming and Precision Livestock Farming as a mitigation strategy. Science of The Total Environment, 650(2), 2751–2760. doi: 10.1016/j.scitotenv.2018.10.018

50. Lim, D. Y., Ryu, H.-D., Chung, E. G., Shin, D., & Lee, J. K. (2019). Sensitivity analysis of a regional nutrient budget model for two regions with intensive livestock farming in Korea. Sustainability, 11(13), 3676. doi: 10.3390/su11133676

51. Akhmedova, Z., Shodiev, Z., et al. (2024). Smart farm development for sustainable dairy farming in the Republic of Uzbekistan. E3S Web of Conferences, 78, 02023. doi: 10.1051/e3sconf/202454802023

52. Hayden, M. A., Barim, M. S., Weaver, D. L., Elliott, K. C., Flynn, M. A., & Lincoln, J. M. (2022). Occupational safety and health with technological developments in livestock farms: A literature review. International Journal of Environmental Research and Public Health, 19(24), 16440. doi: 10.3390/ijerph192416440

53. Ruban, S., & Danshyn, V. (2024). Feed efficiency of dairy cattle as genetic trait. The Animal Biology, 26(1), 3–17. doi: 10.15407/animbiol26.01.003

54. Delaby, L., Faverdin, P., Michel, G., Disenhaus, C., & Peyraud, J. (2009). Effect of different feeding strategies on lactation performance of Holstein and Normande dairy cows. Animal, 3(6), 891–905. doi: 10.1017/S1751731109004212

55. Wang, T., Xu, X., Wang, C., Li, Z., & Li, D. (2021). From smart farming towards unmanned farms: A new mode of agricultural production. Agriculture, 11(2), 145. doi: 10.3390/agriculture11020145

56. Sharma, S., Gahlawat, V. K., Rahul, K., Mor, R. S., & Malik, M. (2021). Sustainable innovations in the food industry through artificial intelligence and big data analytics. Logistics, 5(4), 66. doi: 10.3390/logistics5040066

57. Kaler, J., & Ruston, A. (2019). Technology adoption on farms: Using Normalization Process Theory to understand sheep farmers' attitudes and behaviours in relation to using precision technology in flock management. Preventive Veterinary Medicine, 170, 104715. doi: 10.1016/j.prevetmed.2019.104715

58. Van Hertem, T., Rooijakkers, L., Berckmans, D., Fernández, A. P., Norton, T., & Guarino, M. (2018). Appropriate data visualisation is key to Precision Livestock Farming

acceptance. Computers and Electronics in Agriculture, 153, 13–22. doi: 10.1016/j.compag.2017.04.003

59. Monteiro, A., Santos, S., & Gonçalves, P. (2021). Precision Agriculture for Crop and Livestock Farming—Brief Review. Animals, 11(8), 2345. doi: 10.3390/ani11082345

60. Vasdal, G., Marchewka, J., Newberry, R. C., Estevez, I., & Kittelsen, K. (2022). Developing a novel welfare assessment tool for loose-housed laying hens–the Aviary Transect method. Poultry Science, 101(1), 101533. doi: 10.1016/j.psj.2021.101533

61. Michel, V., Berk, J., Bozakova, N., van der Eijk, J., Estevez, I., Mircheva, T., Relic, R., Rodenburg, T. B., Sossidou, E. N., & Guinebretière, M. (2022). The relationships between damaging behaviours and health in laying hens. Animals, 12(8), 986. doi: 10.3390/ani12080986

62. Rutten, C. J., Velthuis, A. G. J., Steeneveld, W., & Hogeveen, H. (2013). Invited review: Sensors to support health management on dairy farms. Journal of Dairy Science, 96(4), 1928–1952. doi: 10.3168/jds.2012-6107

63. McManus, C., Bianchini, E., Paim, T. D. P., De Lima, F. G., Neto, J. B., Castanheira, M., Esteves, G. I. F., Cardoso, C. C., & Dalcin, V. C. (2015). Infrared thermography to evaluate heat tolerance in different genetic groups of lambs. Sensors, 15(7), 17258–17273. doi: 10.3390/s150717258

64. Shablia, V. P., & Tkachova, I. V. (2020). Machine and manual working actions for different manure removing technologies. Boletim de Indústria Animal, 77, e1482. doi: 10.17523/bia.2020.v77.e1482

65. Ibrahim, S., Al-Sharif, M., Younis, F., Ateya, A., Abdo, M., & Fericean, L. (2023). Analysis of potential genes and economic parameters associated with growth and heat t

66. Chung, Y., Oh, S., Lee, J., Park, D., Chang, H.-H., & Kim, S. (2013). Automatic detection and recognition of pig wasting diseases using sound data in audio surveillance systems. Sensors, 13(10), 12929–12942. doi: 10.3390/s131012929olerance in sheep (Ovis aries). Animals, 13(3), 353. doi: 10.3390/ani13030353

Отримано: 07.04.2026. Прийнято: 21.04.2026. Опубліковано: 15.05.2026.