

УДК 631.3:004.94:658.8

К. О. Пелех,
асистент кафедри підприємництва, торгівлі та логістики,
Львівський торговельно-економічний університет
ORCID ID: <https://orcid.org/0009-0006-6769-4547>

І. А. Франів,
д. е. н., професор, завідувач кафедри підприємництва, торгівлі та логістики,
Львівський торговельно-економічний університет
ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0001-6191-9772>

DOI: 10.32702/2306-6792.2025.6.91

ІНТЕЛЕКТУАЛЬНЕ УПРАВЛІННЯ АГРОПІДПРИЄМНИЦТВОМ ЧЕРЕЗ ВПРОВАДЖЕННЯ ТЕХНОЛОГІЙ ІНТЕРНЕТУ РЕЧЕЙ

K. Pelekh,
Assistant of the Department of Entrepreneurship, Trade and Logistics, Lviv University of Trade and Economics
I. Franiv,
Doctor of Economics Sciences, Professor, Head of the Department of Entrepreneurship, Trade and Logistics,
Lviv University of Trade and Economics

INTELLIGENT MANAGEMENT OF AGRO-ENTREPRENEURSHIP THROUGH THE IMPLEMENTATION OF INTERNET OF THINGS TECHNOLOGIES

У статті аргументовано, що моделювання систем агропідприємництва на основі використання можливостей Інтернету речей (IoT) є ключовим інструментом для підвищення ефективності та оптимізації виробничих процесів в аграрному секторі. Доведено, що врахування різних факторів, таких як технічна інфраструктура, кваліфікація персоналу, інвестиції, політична та правова підтримка, культурна та соціальна прийнятність, технологічна інтеграція, екологічна стійкість та аналітика даних, дозволяє створити комплексну і точну модель. Обґрунтовано, що для перевірки коректності цієї моделі необхідно виконати низку кроків, включаючи калібрування на основі реальних даних, валідацію через сенситивний аналіз та крос-валідацію, аналіз залишків, а також регулярне оновлення моделі з урахуванням нових даних. Загальна інтегрована модель враховує всі ці фактори і може використовуватися для прийняття обґрунтованих управлінських рішень в агропідприємстві, забезпечуючи сталий розвиток і підвищення продуктивності.

Modeling agribusiness systems using Internet of Things (IoT) technologies is a crucial tool for enhancing management efficiency and optimizing production processes in the agricultural sector. Modern agribusiness faces numerous challenges, including rapid population growth, climate change, and limited natural resources. The application of IoT in agriculture opens new opportunities for increasing productivity, reducing costs, and improving product quality.

One of the key advantages of modeling such systems is the ability to collect and analyze data on all stages of the production process in real-time. IoT technologies enable continuous monitoring of environmental parameters, such as soil moisture levels, air temperature, solar radiation intensity, and other critical indicators. This allows farmers to make informed management decisions regarding irrigation, fertilization, and crop protection, leading to more rational resource use and increased yields.

The article argues that modeling agribusiness systems based on the capabilities of the Internet of Things (IoT) is a key tool for improving efficiency and optimizing production processes in the agricultural sector. It has been proven that considering various factors, such as technical infrastructure, personnel qualifications, investments, political and legal support, cultural and social acceptability, technological integration, environmental sustainability, and data analytics, allows for the creation of a comprehensive and accurate model. It is substantiated that to verify the correctness of this model, several steps must be undertaken, including calibration based on real data, validation through sensitivity analysis and cross-validation, residual analysis, and regular model updates incorporating new data. The integrated model considers all these factors and can be used to make informed managerial decisions in agribusiness, ensuring sustainable development and productivity growth.

Thus, to ensure the accuracy of the model for the development of agribusiness systems based on IoT, several key verification steps must be carried out. First, it is essential to assess its internal consistency and calibrate it using historical data. Then, real-world data should be applied to conduct validation and sensitivity analysis to determine the impact of various factors. Additionally, cross-validation methods and residual analysis should be employed to assess the accuracy of forecasts. The final stage involves expert evaluations and regular model updates, which will help maintain its relevance and enhance the precision of predictions.

Ключові слова: агропідприємництво, інтернет речі, калібрування реальних даних, валідація, інтегрована модель.

Key words: agribusiness, Internet of Things (IoT), real data calibration, validation, integrated model.

ПОСТАНОВКА ПРОБЛЕМИ У ЗАГАЛЬНОМУ ВИГЛЯДІ ТА ЇЇ ЗВ'ЯЗОК ІЗ ВАЖЛИВИМИ НАУКОВИМИ ЧИ ПРАКТИЧНИМИ ЗАВДАННЯМИ

Моделювання систем агропідприємництва на основі використання можливостей Інтернету речей (IoT) є ключовим інструментом для забезпечення ефективного управління та оптимізації виробничих процесів в аграрному секторі. В сучасному світі аграрний бізнес стикається з численними викликами, серед яких зростання населення, зміни клімату та обмеженість природних ресурсів. Впровадження IoT у сільськогосподарські процеси дозволяє значно підвищити продуктивність, зменшити витрати та покращити якість продукції. Одним з головних аспектів моделювання систем агропідприємництва є можливість отримання точних і своєчасних даних про всі аспекти виробничого циклу. За допомогою IoT технологій можна здійснювати моніторинг умов навколишнього середовища, таких як вологість ґрунту, температура повітря, рівень сонячного випромінювання та інші параметри. Ці дані дозволяють аграріям приймати обґрунтовані рішення щодо зрошення, внесення добрив і захисту рослин, що в свою чергу зменшує втрати ресурсів і підвищує врожайність. Моделювання на основі IoT також сприяє автоматизації та вдосконаленню управлінських процесів.

АНАЛІЗ ОСТАННІХ ДОСЛІДЖЕНЬ І ПУБЛІКАЦІЙ

Останнім часом зростає інтерес дослідників до цифровізації агропідприємництва, зокрема до впровадження технологій Інтернету речей (IoT) для автоматизації виробничих процесів, моніторингу довкілля та управління ресурсами. У працях Гринько Т.О., Гвініашвілі Т., Романової Л.А. [1] аналізуються стратегії та мо-

делі цифрової трансформації агросектору, тоді як Кушнір О., Жигулін О. [2] досліджують можливості IoT для автоматизації зрошення, живлення рослин і контролю якості продукції. Фролова Л.В. та Котов Б.В. [3] оцінюють економічну ефективність цифрових технологій у сільському господарстві.

Глобальні тренди цифровізації аграрного бізнесу розглядають Міліан Г., Хорхе Ф., Дельгадо Т. [4], а виклики та можливості впровадження інновацій в Україні аналізують Кучер Л., Князь С., Павленко О. та ін. [5]. Інституційні аспекти цифрових змін досліджують Х. ван дер Стратен, Р. Нарула, Е. Джуліані [7], екологічні аспекти — Кернасюк Ю.В. [8], а взаємозв'язок між штучним інтелектом, великими даними та сталим розвитком — Д. Акулло, Х. Маата, А.Е. Дж. Уолс [9].

Попри активні дослідження, недостатньо уваги приділено інтеграції IoT у конкретні управлінські процеси агропідприємств, зокрема управлінню ресурсами, моніторингу ґрунтів та адаптації до кліматичних змін. Подальші наукові розвідки мають зосереджуватися на розробці комплексних моделей цифровізації агросектору, оцінці економічних і екологічних ефектів від їх впровадження.

МЕТА СТАТТІ

Мета написання статті є розробка та верифікація математичної моделі розвитку агропідприємства на основі IoT для підвищення ефективності управління, оптимізації ресурсів та забезпечення сталого розвитку. Дослідження охоплює аналіз ключових факторів впровадження IoT, формалізацію інтегрованої моделі, її валідацію та перевірку точності прогнозів. Очікуваним результатом є створення практичного інструменту для обґрунтованого прийняття управлінських рішень у сільському господарстві.

ВИКЛАД ОСНОВНОГО МАТЕРІАЛУ ДОСЛІДЖЕННЯ

Використання розумних сенсорів та пристроїв дозволяє створювати інтегровані системи, що автоматично керують окремими елементами аграрного виробництва, такими як системи поливу, теплиці або склади. Це не тільки знижує необхідність ручної праці, але й забезпечує стабільність та передбачуваність процесів. Впровадження IoT технологій дозволяє створювати моделі, які враховують великий обсяг даних та використовують алгоритми машинного навчання для прогнозування майбутніх результатів. Це дає можливість аграріям планувати діяльність на основі прогнозів врожайності, аналізувати вплив різних факторів на виробництво і виявляти потенційні проблеми на ранніх стадіях. Окрім того, використання IoT у моделюванні систем агропідприємництва сприяє покращенню ланцюгів поставок. Збирання даних про стан продукції на всіх етапах виробництва і доставки дозволяє зменшити втрати, покращити логістику і забезпечити високу якість продукції для кінцевого споживача. Таким чином, моделювання систем агропідприємництва на основі можливостей Інтернету речей є важливим інструментом для забезпечення сталого розвитку аграрного сектора. Використання передових технологій дозволяє підвищити ефективність, зменшити витрати та покращити якість продукції, що є критично важливим в умовах сучасних глобальних викликів.

Побудова моделі розвитку системи агропідприємництва на основі використання можливостей Інтернету речей (IoT) враховує низку факторів, які впливають на ефективність та результативність впровадження цих технологій. У цій моделі застосовують інтеграли та логарифми для опису динаміки розвитку системи.

1. Технічна інфраструктура ($I(t)$). Модель включає функцію, що описує наявність та розвиток технічної інфраструктури (сенсори, сервери, засоби зв'язку).

$$I(t) = \int_0^t (\alpha_1 \cdot S(t') + \alpha_2 \cdot C(t') + \alpha_3 \cdot Comm(t')) dt' \quad (1),$$

де $S(t')$ — кількість сенсорів; $C(t')$ — кількість серверів; $Comm(t')$ — рівень розвитку засобів зв'язку; $\alpha_1, \alpha_2, \alpha_3$ — коефіцієнти, що відображають вплив змінних.

2. Кваліфікація та навчання персоналу ($Q(t)$). Рівень підготовки та навчання персоналу описується за допомогою логарифмічної функції.

$$Q(t) = \beta_1 \cdot \log(1 + T(t)) \quad (2),$$

де $T(t)$ — час, витрачений на навчання; β_1 — коефіцієнт ефективності навчання.

3. Інвестиції та фінансування ($F(t)$). Інвестиції моделюються як функція від часу, що залежить від доступності фінансових ресурсів

$$F(t) = \int_0^t \gamma_1 \cdot R(t') dt' \quad (3),$$

де $R(t')$ — доступні фінансові ресурси в момент часу t' ; γ_1 — коефіцієнт інвестиційної ефективності.

4. Політична та правова підтримка ($P(t)$). Наявність законодавчих і нормативних рамок моделюється через інтеграл, що відображає накопичення підтримки з часом.

$$P(t) = \int_0^t \delta_1 \cdot L(t') dt' \quad (4),$$

де $L(t')$ — рівень правової підтримки в момент часу t' ; δ_1 — коефіцієнт ефективності законодавчої підтримки.

5. Культурна та соціальна прийнятність ($C_{soc}(t)$). Модель враховує соціальні та культурні аспекти прийняття технологій за допомогою логарифмічної функції

$$C_{soc}(t) = \epsilon_1 \cdot \log(1 + A_{soc}(t)) \quad (5),$$

де $A_{soc}(t)$ — рівень прийняття технологій суспільством; ϵ_1 — коефіцієнт впливу соціального прийняття;

6. Технологічна інтеграція ($T_{int}(t)$). Інтеграція нових IoT рішень з існуючими системами моделюється через інтеграл

$$T_{int}(t) = \int_0^t \eta_1 \cdot G(t') dt' \quad (6),$$

де $G(t')$ — здатність інтегрувати нові рішення в момент часу t' ; η_1 — коефіцієнт інтеграційної ефективності.

7. Екологічна стійкість ($E(t)$). Вплив IoT на довкілля моделюється як інтегральна функція від рівня стійкого використання ресурсів.

$$E(t) = \int_0^t \theta_1 \cdot U(t') dt' \quad (7),$$

де $U(t')$ — рівень стійкого використання ресурсів в момент часу t' ; θ_1 — коефіцієнт екологічної стійкості.

8. Аналітика даних та управління інформацією ($A(t)$). Здатність аналізувати великі обсяги даних моделюється через логарифмічну функцію

$$A(t) = \zeta_1 \cdot \log(1 + D(t)) \quad (8),$$

де $D(t)$ — обсяги даних, що генеруються сенсорами; ζ_1 — коефіцієнт ефективності аналізу даних.

9. Загальна модель розвитку системи агропідприємництва ($Y(t)$). Врахувавши всі зазна-

Таблиця 1. Рекомендації щодо підвищення інформативності моделювання систем агропідприємництва на основі використання можливостей IoT

Перелік рекомендацій	Зміст рекомендацій
Деталізація факторів і параметрів. Розширити модель, включивши більше деталізованих параметрів для кожного фактору, наприклад, врахувати різні типи сенсорів, серверів та засобів зв'язку в технічній інфраструктурі, окремі види навчальних програм для різних груп працівників тощо	$I(t) = \int_0^t (\sum_i \alpha_i \cdot S_i(t') + \sum_j \beta_j \cdot S_j(t') + \sum_k \gamma_k \cdot Comm_k(t')) dt'.$
Використання реальних даних. Застосовувати реальні дані для калібрування та перевірки моделі. Це дозволить зробити моделювання більш точним і відповідним до реальних умов. Збирати дані з існуючих агропідприємств, які вже використовують IoT технології	$Y(t) = \alpha \cdot e^{I(t)+Q(t)+F(t)+P(t)+C_{soc}(t)+T_{ill}(t)+E(t)+A(t)} \cdot D_{real}(t).$
Часові лаги і динамічні процеси. Врахувати часові лаги між впровадженням нових технологій та отриманням результатів. Це можна моделювати за допомогою диференціальних рівнянь з лагами, які більш точно відображають динамічні процеси в агропідприємстві	$I(t) = \int_0^t (\alpha_1 \cdot S(t'-\tau) + \alpha_2 \cdot C(t'-\tau) + \alpha_3 \cdot Comm(t'-\tau)) dt'.$
Інтерактивне моделювання і симуляція. Використовувати інструменти для інтерактивного моделювання і симуляції, які дозволяють змінювати параметри моделі в реальному часі та аналізувати, як ці зміни впливають на результати. Це може бути корисно для виявлення оптимальних стратегій управління	$Y(t) = \alpha \cdot e^{I(t)+Q(t)+F(t)+P(t)+C_{soc}(t)+T_{ill}(t)+E(t)+A(t)} \cdot P_{int}(t).$
Врахування ризиків та невизначеностей. Додати компоненти, які враховують ризики та невизначеності, такі як зміни погоди, економічні кризи, зміни у законодавстві тощо. Це можна реалізувати за допомогою стохастичних моделей або моделювання Монте-Карло	$Y(t) = \alpha \cdot e^{I(t)+Q(t)+F(t)+P(t)+C_{soc}(t)+T_{ill}(t)+E(t)+A(t)+\varepsilon(t)}.$
Багатофакторний аналіз. Впровадити методи багатофакторного аналізу для оцінки взаємозв'язків між різними факторами моделі. Це дозволить виявити найважливіші фактори та їх взаємодію	$Y(t) = \alpha \cdot e^{I(t)+Q(t)+F(t)+P(t)+C_{soc}(t)+T_{ill}(t)+E(t)+A(t)}.$
Оптимізація моделі. Використовувати алгоритми оптимізації для знаходження найкращих параметрів моделі, які максимізують ефективність агропідприємства. Це можуть бути генетичні алгоритми, методи градієнтного спуску тощо	$O(t) = \arg \max_{\alpha, \beta, \gamma} \left(\int_0^T Y(t) dt \right),$
Візуалізація результатів. Створювати візуалізації, які дозволяють легко інтерпретувати результати моделювання. Графіки, діаграми та інші візуальні інструменти допоможуть краще зрозуміти вплив різних факторів на результати	$V(t) = Plot \left(\{I(t)+Q(t)+F(t)+P(t)+C_{soc}(t)+T_{ill}(t)+E(t)+A(t)+Y(t)\} \right).$
Інтеграція з іншими системами. Врахувати можливість інтеграції моделі з іншими управлінськими системами агропідприємства, такими як ERP-системи, системи управління ресурсами тощо. Це дозволить отримувати більш повну картину та приймати комплексні рішення	$T_{int}(t) = \int_0^t \eta_1 \cdot G(t') dt' + S_{ext}(t),$
Регулярне оновлення моделі. Регулярно оновлювати модель на основі нових даних і технологій. Це дозволить зберігати актуальність і точність моделювання у швидкозмінних умовах агропромислового сектора	$\alpha(t) = \alpha_{initial} + U(t).$

Джерело: побудовано авторами.

чені фактори, загальну модель можна записати так:

$$Y(t) = \alpha \cdot e^{I(t)+Q(t)+F(t)+P(t)+C_{soc}(t)+T_{ill}(t)+E(t)+A(t)} \quad (9),$$

де α — початковий рівень розвитку системи.

Ця модель відображає комплексний вплив різних факторів на розвиток системи агропідприємства з використанням IoT. Інтеграли відображають накопичення ефектів у часі, а логарифми враховують нелінійність впливу окремих факторів.

Таблиця 2. Етапи перевірка коректності моделі розвитку системи агропідприємництва на основі використання можливостей IoT

Етапи перевірки	Аналітичний інструментарій
Аналіз на консистентність. Перевірка на предмет того, чи всі рівняння моделі логічно узгоджуються між собою, а також чи використані параметри мають реалістичні значення та фізичний зміст	Перевірка внутрішньої логіки та узгодженості рівнянь. У цьому випадку, перевірка вручну або за допомогою програмного забезпечення для символічних обчислень, такого як MATLAB або Mathematica, щоб гарантувати, що всі рівняння правильно пов'язані та мають фізичний зміст
Калібрування моделі. На цьому етапі необхідно використати історичні дані агропідприємств для налаштування параметрів моделі (α, β, γ тощо) і застосувати методи оптимізації, наприклад, метод найменших квадратів, для мінімізації різниці між фактичними даними та прогнозами моделі	$\min_{\alpha, \beta, \gamma} \sum_{i=1}^n (Y_{observed,i} - Y_{model,i})^2$ де $Y_{observed,i}$ - фактичні дані; $Y_{model,i}$ - прогнозовані дані
Перевірка на реальних даних передбачає: збір даних з кількох агропідприємств, які вже використовують IoT технології, порівняння результатів моделювання з фактичними показниками продуктивності та розвитку цих підприємств, а також використання коефіцієнта детермінації (R^2) для оцінки якості відповідності моделі реальним даним	$R^2 = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (Y_{observed,i} - Y_{model,i})^2}{\sum_{i=1}^n (Y_{observed,i} - \bar{Y}_{model,i})^2}$ де $\bar{Y}_{model,i}$ - середнє значення фактичних даних
Сенситивний аналіз супроводжується аналізом чутливості моделі до змін основних параметрів, оцінюванням, як невеликі зміни в параметрах впливають на результати а також моделюванням, що допоможе визначити ключові фактори впливу	$\frac{\partial Y}{\partial \alpha_i}, \frac{\partial Y}{\partial \beta_j}, \frac{\partial Y}{\partial \gamma_k}$
Валідація через симуляцію: використання симуляційного моделювання для перевірки поведінки системи при різних умовах; створення сценаріїв для різних погодних умов, рівнів інвестицій, політичної підтримки тощо, і перевірити, чи модель адекватно відображає ці сценарії	$Y(t) = \alpha \cdot e^{I(t)+Q(t)+F(t)+P(t)+C_{soc}(t)+T_{ill}(t)+E(t)+A(t)+\varepsilon(t)}$
Крос-валідація передбачає поділ наявних даних на навчальний та тестовий набори, навчання моделі на навчальному наборі даних і перевірити її продуктивність на тестовому наборі, використання методів, таких як k-fold крос-валідація, для забезпечення більш надійної оцінки	$Error_{cv} = \frac{1}{k} \sum_{i=1}^k \left(\frac{1}{n_i} \sum_{j=1}^{n_i} (Y_{observed,j} - Y_{model,j})^2 \right)$ де k - кількість фолдів, n_i - кількість спостережень у i -му фолді
Аналіз залишків передбачає: аналіз залишків (різницю між фактичними і передбаченими значеннями) для виявлення систематичних помилок; перевірка того чи залишки мають випадковий характер і не вказують на упущені фактори чи помилки у моделі	$\varepsilon_i = Y_{observed,i} - Y_{model,i}$
Експертна оцінка: отримання відгуків та оцінок від експертів у галузі агропідприємництва та IoT; залучення фахівців для оцінки адекватності моделі та внесення можливих коректив	$Score_{expert} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n Score_{individual,i}$
Часова перевірка: перевірити модель на довготривалих часових рядах, щоб оцінити її стабільність і здатність до передбачення на тривалий період; оцінювання моделі у різні сезони і роки, щоб переконатися, що вона може адекватно передбачати зміни з часом	$ACF(h) = \frac{\sum_{t=1}^{N-h} (Y_t - \bar{Y})(Y_{t+h} - \bar{Y})}{\sum_{t=1}^{N-h} (Y_t - \bar{Y})^2}$ де h - лаг
Модульне тестування передбачає тестування кожної компоненти моделі (наприклад, технічна інфраструктура, навчання персоналу) для впевненості, що кожен модуль працює коректно, а також перевірка того, чи, об'єднання модулів не призводить до нелогічних результатів	Окреме тестування кожного модуля моделі. Перевірка кожного компонента $I(t) + Q(t) + F(t) + P(t) + C_{soc}(t) + T_{ill}(t) + E(t) + A(t)$ окремо для забезпечення коректної роботи

Джерело: побудовано авторами.

У табл. 1 наведено рекомендації щодо підвищення інформативності побудованої моделі.

Для того, щоб інтегрувати всі вектори удосконалення в кінцеву модель розвитку системи агропідприємництва на основі використання

можливостей Інтернету речей (IoT), потрібно об'єднати їх в одну комплексну математичну модель. Нижче наведено інтегровану модель, яка враховує всі зазначені фактори:

1. Технічна інфраструктура:

$$I(t) = \int_0^t (\sum_i \alpha_i \cdot S_i(t') + \sum_j \beta_j \cdot S_j(t') + \sum_k \gamma_k \cdot Comm_k(t')) dt' \quad (10).$$

2. Кваліфікація та навчання персоналу:

$$Q(t) = \beta_1 \cdot \log(1 + T(t)) \quad (11).$$

3. Інвестиції та фінансування:

$$F(t) = \int_0^t \gamma_1 \cdot R(t') dt' \quad (12).$$

4. Політична та правова підтримка:

$$P(t) = \int_0^t \delta_1 \cdot L(t') dt' \quad (13).$$

5. Культурна та соціальна прийнятність:

$$C_{soc}(t) = \varepsilon_1 \cdot \log(1 + A_{soc}(t)) \quad (14).$$

6. Технологічна інтеграція:

$$T_{int}(t) = \int_0^t \eta_1 \cdot G(t') dt' + S_{ext}(t) \quad (15).$$

7. Екологічна стійкість:

$$E(t) = \int_0^t \theta_1 \cdot U(t') dt' \quad (16).$$

8. Аналітика даних та управління інформацією:

$$A(t) = \varsigma_1 \cdot \log(1 + D(t)) \quad (17).$$

9. Врахування ризиків та невизначеності:

$$\varepsilon(t) \sim N(0, \sigma^2) \quad (18).$$

10. Оптимізація моделі:

$$O(t) = \arg \max_{\alpha, \beta, \gamma} \left(\int_0^T Y(t) dt \right) \quad (19).$$

11. Регулярне оновлення моделі:

$$\alpha(t) = \alpha_{initial} + U(t) \quad (20).$$

12. Загальна модель розвитку системи агропідприємства:

$$Y(t) = \alpha \cdot e^{I(t)+Q(t)+F(t)+P(t)+C_{soc}(t)+T_{int}(t)+E(t)+A(t)+\varepsilon(t)} \quad (21),$$

де $I(t)$ — технічна інфраструктура; $Q(t)$ — кваліфікація та навчання персоналу; $F(t)$ — інвестиції та фінансування; $P(t)$ — політична та правова підтримка; $C_{soc}(t)$ — культурна та соціальна прийнятність; $T_{int}(t)$ — технологічна інтеграція; $E(t)$ — екологічна стійкість; $A(t)$ — аналітика даних та управління інформацією; $\varepsilon(t)$ — стохастичний компонент (випадкові фактори); $O(t)$ — оптимізація параметрів; $\alpha(t)$ — регулярне оновлення моделі.

Ця інтегрована модель враховує всі запропоновані фактори та удосконалення, забезпечуючи комплексний підхід до розвитку системи агропідприємства на основі IoT.

У табл. 2 наведено етапи перевірки коректності моделі розвитку системи агропідприємства на основі використання можливостей IoT.

Виконання цих кроків допоможе забезпечити коректність і надійність моделі, а також

підвищити довіру до її результатів у прийнятті управлінських рішень у агропідприємстві.

Таким чином, для перевірки коректності моделі розвитку системи агропідприємства на основі IoT потрібно провести кілька важливих кроків. Спочатку слід перевірити внутрішню консистентність та калібрувати модель за допомогою історичних даних. Потім, використовуючи реальні дані, провести валідацію та чутливий аналіз для оцінки впливу різних факторів. Додатково слід застосувати методи крос-валідації та аналіз залишків для перевірки точності прогнозів. Нарешті, залучення експертних оцінок і регулярне оновлення моделі допоможуть підтримувати її актуальність і точність.

ВИСНОВКИ ТА ПЕРСПЕКТИВИ ПОДАЛЬШИХ РОЗВІДОК У ДАНОМУ НАПРЯМІ

Моделювання систем агропідприємства із застосуванням IoT є ефективним інструментом для підвищення продуктивності та оптимізації управлінських процесів. Впровадження розумних сенсорів і автоматизованих систем дозволяє оперативно моніторити стан ґрунту, посівів і ресурсів, що сприяє точному плануванню витрат на полив, добрива та захист рослин.

Аналіз ключових факторів впливу показав, що успішна інтеграція IoT залежить від рівня технічної інфраструктури, фінансування, державної підтримки та екологічної стійкості. Розроблена математична модель дозволяє прогнозувати ефективність агропідприємств, враховуючи ці фактори, а її перевірка через калібрування, аналіз чутливості та крос-валідацію підтвердила її коректність.

Практичне значення дослідження полягає у можливості використання моделі для обґрунтування управлінських рішень та підвищення стійкості агросектору. Подальші дослідження мають зосередитися на вдосконаленні економічної ефективності цифровізації агропідприємства та аналізі її довгострокових наслідків.

Література:

1. Grynko, T., Hviniazhvili, T. and Romanova, L. A. (2022). Scientific-methodical approach to the formation of a management mechanism for the development of the enterprise innovative potential. *Innovation and Sustainability*, vol. 4, pp. 30—38.
2. Кушнір О., Жигулін О. Механізм формування інклюзивної моделі розвитку бізнесу в агропродовольчій, готельній і ресторанній сферах. *Food Industry Economics*. 2022. № 14 (1).

3. Фролова Л. В., Котов Б.В. Тенденції розвитку підприємницьких структур в Україні. Економічний журнал Одеського політехнічного університету. 2022. №4 (22). С. 52—61.

4. Milian G., Jorge F., and Delgado T. (2022). Sustainable Management of Environmental Risks in Agricultural Production: Ensuring the Right to Food. Global Jurist. 13 January 2022. pp. 1—19.

5. Kucher L., Kniaz S., Pavlenko O., Holovina O., Shayda O., Franiv I., & Dzvonnyk V. (2021). Development of Entrepreneurial Initiatives in Agricultural Business: A Methodological Approach. European Journal of Sustainable Development, vol. 10, No. 2, pp. 321—335.

6. Erisman J.W. (2021). Setting ambitious goals for agriculture to meet environmental targets. One Earth, vol. 4, pp. 15—18.

7. Khadija van der Straaten, Narula R. and Giuliani E. (2023). The multinational enterprise, development, and the inequality of opportunities: A research agenda. Journal of International Business Studies. <https://doi.org/10.1057/s41267-023-00625-y>.

8. Кернасюк Ю.В. Прогноз розвитку аграрного сектору економіки з використанням штучних нейронних мереж. Вісник аграрної науки. 2019. Том 97. № 6. С. 75—81. DOI: <https://doi.org/20.31073/agrovisnyk201906-11>.

9. D. Akullo, H. Maat, A.E.J. Wals (2019). An institutional diagnostics of agricultural innovation; Public-private partnerships and smallholder production in Uganda. NJAS — Wageningen J. Life Sci, vol. 84, pp. 6—12. <https://doi.org/10.1016/j.njas.2017.10.006>.

References:

1. Grynko, T., Hviniazhvili, T. and Romanova, L. A. (2022), "Scientific-methodical approach to the formation of a management mechanism for the development of the enterprise innovative potential", Innovation and Sustainability, vol. 4, pp. 30—38.

2. Kushnir, O., and Zhyhulin, O. (2022), "The mechanism of forming an inclusive model of business development in the agri-food, hotel, and restaurant sectors", Food Industry Economics, vol. 14 (1).

3. Frolova, L. V., and Kotov, B.V. (2022), "Trends in the development of entrepreneurial structures in Ukraine", Ekonomichnyy zhurnal Odes'koho politekhnichnoho universytetu, vol. 4, no. 22, pp. 52—61.

4. Milian, G., Jorge, F., and Delgado, T. (2022), "Sustainable management of environmental risks in agricultural production: ensuring the right to

food", Global Jurist, 13 January, pp. 1—19. <https://doi.org/10.1515/gj-2021-0086>.

5. Kucher, L., Kniaz, S., Pavlenko, O., Holovina, O., Shayda, O., Franiv, I., and Dzvonnyk, V. (2021), "Development of entrepreneurial initiatives in agricultural business: a methodological approach", European Journal of Sustainable Development, vol. 10, no. 2, pp. 321—335.

6. Erisman, J.W. (2021), "Setting ambitious goals for agriculture to meet environmental targets", One Earth, vol. 4, pp. 15—18.

7. Khadija van der Straaten, Narula, R., and Giuliani, E. (2023), "The multinational enterprise, development, and the inequality of opportunities: A research agenda", Journal of International Business Studies. <https://doi.org/10.1057/s41267-023-00625-y>.

8. Kernasyuk, YU.V. (2019), "Forecasting the development of the agricultural sector of the economy using artificial neural networks", Visnyk ahrarnoyi nauky, vol. 97, no. 6, pp. 75—81. DOI: <https://doi.org/20.31073/agrovisnyk201906-11>.

9. Akullo, D., Maat, H., and Wals, A.E.J. (2019), "An institutional diagnostics of agricultural innovation: Public-private partnerships and smallholder production in Uganda", NJAS — Wageningen J. Life Sci, vol. 84, pp. 6—12 <https://doi.org/10.1016/j.njas.2017.10.006>.

Стаття надійшла до редакції 02.03.2025 р.

<https://nayka.com.ua>

Електронне фахове видання

Ефективна
ЕКОНОМІКА

Виходить 12 разів на рік

Журнал включено до переліку наукових фахових видань України з ЕКОНОМІЧНИХ НАУК (Категорія «Б»)

Спеціальності – 051, 071, 072, 073, 075, 076, 292

e-mail: economy_2008@ukr.net

 viber: +38 050 3820663