

НАВЧАЛЬНІ ВИДАННЯ

Пасічник Н. А., Опришко О. О., Бикін А. В.,
Літвінов Д. В., Руденський А.А.

ДІДЖИТАЛІЗАЦІЯ АГРОХІМСЕРВІСУ

НАВЧАЛЬНИЙ ПОСІБНИК

КИЇВ
2026

УДК 631.8 : 004.9

Рекомендовано до видання рішенням Вченої ради
Національного університету біоресурсів і природокористування України
(протокол № 1 від 26 серпня 2026 року)

Рецензенти:

Тонха О. Л., доктор сільськогосподарських наук, професор, проректор з наукової роботи та інноваційної діяльності Національного університету біоресурсів і природокористування України;

Дем'янюк О. С., член-кореспондент НААН, доктор сільськогосподарських наук, професор, заступник директора з наукової роботи Інституту агроекології і природокористування НААН;

Дегодюк С. Е., член-кореспондент НААН, доктор сільськогосподарських наук, завідувач відділу агрохімії ННЦ «Інститут землеробства НААН»

П 38 Діджиталізація агрохімсервісу : навчальний посібник / Н. А. Пасічник, О. О. Опришко, А. В. Бикін, Д. В. Літвінов, А.А.Руденський – Київ : Компринт, 2026. 312 с.

ISBN

Зміст навчального посібника відповідає навчальній програмі дисципліни діджиталізація агрохімсервісу, яка передбачена як вибіркова в ОПП «Агрохімсервіс у прецизійному агровиробництві».

Під час підготовки навчального видання штучний інтелект (ChatGPT) використовувався: 1) перевірка частин тексту на пропуски букв, які допускаються за швидкого набору; 2) оформлення списку літературних джерел відповідно до вимог ДСТУ 8302:2015. Для написання змісту й тексту навчального посібника ШІ не використовувався.

.

УДК 631.8 : 004.9

© Пасічник Н.А., Опришко О.О., Бикін А. В., Літвінов Д. В. , Руденський А.А., 2026
© НУБіП України

ISBN



До 90-річчя від дня народження

Вчителя,

Вченого,

Наставника

Миколи Михайловича ГОРОДНЬОГО

Цей навчальний посібник присвячується пам'яті Вчителя і Наставника, який учив не боятися складних шляхів і дивитися вперед.

Він навчив нас чесно працювати, відповідати за результати своєї праці, бачити перспективу на роки й десятиліття, не зупинятися перед труднощами та постійно шукати нові рішення. Він учив приймати нові технології не як виклик традиціям, а як можливість розвивати науку, удосконалювати працю і відкривати нові горизонти знань.

Микола Михайлович ніколи не стояв осторонь, коли комусь потрібна була допомога. Підтримував молодь, спонукав до розвитку й досягнень. Його уроки відкрили двері у професійний шлях його учнів.

Пам'ятаємо Вчителя.
Продовжуємо його справу.
Служимо науці.

ПРО АВТОРІВ



Пасічник Наталія Анатоліївна

кандидат сільськогосподарських наук, доцент кафедри агрохімії та якості продукції рослинництва Національного університету біоресурсів і природокористування України. Викладає дисципліни живлення рослин, дистанційний моніторинг агрофітоценозів, програмні рішення в рослинництві, діджиталізація агрохімсервісу, інформаційні технології управління полем. Наукові інтереси пов’язані з живленням рослин та удобренням сільськогосподарських культур, системами дистанційного зондування агрофітоценозів, цифровими технологіями в рослинництві й агрохімії зокрема. Автор більше 100 наукових праць, з яких 7 монографій у співавторстві, 4 навчальні посібники, 5 патентів.

Електронна адреса: n.pasichnyk@nubip.edu.ua



Опришко Олексій Олександрович

кандидат технічних наук, завідувач кафедри автоматики та робототехнічних систем Національного університету біоресурсів і природокористування України. Викладає дисципліни комп’ютерне забезпечення, серверні системи та мережі, комп'ютерно-інтегровані технології, web-технології в системах автоматизації, інтелектуальна робототехніка для складних біотехнічних об’єктіві. Наукові інтереси пов’язані з використанням безпілотних літальних апаратів для дистанційного зондування рослинних насаджень з метою управління врожаєм. Оптична та мультиспектральна зйомка посівів із високою роздільною здатністю є однією з найважливіших складових переходу на новий технологічний рівень в рослинництві «цифрове землеробство». Автор більше 100 наукових праць, з яких 7 монографій у співавторстві, 4 навчальні посібники, 5 патентів.
Електронна адреса: ozon.kiev@nubip.edu.ua



Бикін Анатолій Вікторович

академік НААН, доктор сільськогосподарських наук, професор кафедри агрохімії та якості продукції рослинництва Національного університету біоресурсів і природокористування України. Заслужений діяч науки і техніки України. Викладає дисципліни агрохімсервіс у рослинництві, внутрішньоґрунтове внесення добрив, фоліарне внесення добрив. Наукові інтереси: комплексне управління полем, агрохімічні послуги у сфері рослинництва, інноваційні методи агрохімічного управління для різних технологій вирощування сільськогосподарських культур, методи меліорації ґрунту. Автор більше 130 наукових праць, з яких 2 монографії у співавторстві, 4 навчальні посібники, 5 патентів.

Електронна адреса: bukin_a@nubip.edu.ua



Літвінов Дмитро Вікторович

доктор сільськогосподарських наук, професор, завідувач кафедри агрохімії та якості продукції рослинництва Національного університету біоресурсів і природокористування України. Викладає дисципліни, пов'язані з технологіями агрохімічного управління продуктивністю поля, інноваційними рішеннями в удобренні сільськогосподарських культур, використанням добрив у системах точного землеробства та оцінюванням технологічних ризиків застосування агрохімікатів. Наукові інтереси пов'язані з управлінням родючістю ґрунту, біологічною активністю ґрунту; теоретичне обґрунтування і розроблення агробіологічних основ підвищення ефективності засобів інтенсифікації на формування родючості ґрунту (водного режиму, фізико-хімічних і агрохімічних властивостей, біологічної активності), оптимізації біологічного колообігу елементів живлення та органічної речовини у агроценозах. Автор більше 100 наукових праць, з яких 3 монографії у співавторстві, 2 навчальні посібники, 3 авторських свідоцтва на твір.

Електронна адреса: litvinovdv@nubip.edu.ua



Руденський Анатолій Андрійович

Старший викладач кафедри автоматики та робототехнічних систем Національного університету біоресурсів і природокористування України. Викладає дисципліни мікропроцесорна техніка, електроніка та мікропроцесорна техніка, технічні засоби автоматики, мікропроцесорні пристрої керування. Наукові інтереси пов'язані з дослідженням автоматичних систем управління та контролю в аграрному виробництві. Автор більше 20 наукових праць, з яких 1 монографія у співавторстві, 2 навчальні посібники.

Електронна адреса: ruden@nubip.edu.ua

Зміст

РОЛЬ ДІДЖИТАЛІЗАЦІЇ У ПІДТРИМЦІ ФЕРМЕРІВ ТА СТРАТЕГІЧНІЙ ПОЛІТИЦІ У СФЕРІ ПРОДОВОЛЬЧОЇ БЕЗПЕКИ (передмова) 11

РОЗДІЛ 1. СУЧАСНИЙ СТАН ЦИФРОВІЗАЦІЇ СІЛЬСЬКОГО ГОСПОДАРСТВА ЄС

1.1. Цифрові інструменти та платформи 15
1.2. Системні бар'єри цифровізації та зменшення використання агрохімікатів 25
1.3. Шляхи впровадження цифрових технологій 31
1.4. Структурний аналіз цифровізації аграрних систем 36
Висновки 39

РОЗДІЛ 2. ВПЛИВ ВЕЛИКИХ ДАНИХ ТА СИСТЕМ ПІДТРИМКИ ПРИЙНЯТТЯ РІШЕНЬ НА ТРАНСФОРМАЦІЮ СІЛЬСЬКОГОСПОДАРСЬКИХ ПРАКТИК

2.1. Передумови та значення аналітики великих даних у сільському господарстві 42
2.2. Основні характеристики Big Data 44
2.3. Аналітика великих даних у сільськогосподарській практиці 46
2.4. Етичні та правові аспекти 51
2.5. Системи підтримки прийняття рішення 54
2.6. Майбутнє Big Data та СППР 61
Висновки 63

РОЗДІЛ 3. ТЕХНОЛОГІЯ ЦИФРОВИХ ДВІЙНИКІВ ДЛЯ ІНТЕЛЕКТУАЛЬНОГО ЗЕМЛЕРОБСТВА

3.1. Розвиток технологій цифрових двійників 65
3.2. Огляд пов'язаних досліджень 68
3.3. Технологія цифрових двійників 70
3.4. Взаємодія технологій у цифровому двійнику 83
3.5. Цифровий двійник у сільськогосподарських застосуваннях 86

3.6. Перспективи розвитку цифрових двійників 97
Висновки 103

РОЗДІЛ 4. ВИКОРИСТАННЯ IoT-РІШЕНЬ ДЛЯ ІНТЕЛЕКТУАЛЬНОГО ТА ЕФЕКТИВНОГО УПРАВЛІННЯ АГРОФІТОЦЕНОЗАМИ

4.1. Інтеграція IoT у сільське господарство 105
4.2. Пов'язані технології 110
4.3. IoT-технології та фреймворки в інтелектуальному управлінні полем 113
4.4. Безпека та управління даними в інтелектуальному управлінні посівами 115
4.5. Автоматизація та інтелектуальні рішення управління посівами 117
4.6. Моніторинг довкілля та оптимізація аграрних систем 119
4.7. Таксономія 124
4.8. Сенсори 126
4.9. Комунікаційні технології 135
4.10. Мережеве зберігання даних (Network storage) 141
4.11. Штучний інтелект та машинне навчання 143
4.12. Основні проблеми та виклики 146
Висновки 148

РОЗДІЛ 5. КІБЕР-АГРАРНІ СИСТЕМИ ДЛЯ СЕЛЕКЦІЇ СІЛЬСЬКОГОСПОДАРСЬКИХ КУЛЬТУР ТА СТАЛОГО ВИРОБНИЦТВА

5.1. Визначення кібер-фізичних систем 150
5.2. Складові системи 156
5.3. Кіберінфраструктура 136
Висновки 169

РОЗДІЛ 6. ІНТЕГРАЦІЯ СЕРВІСУ ТОЧНОГО ЗЕМЛЕРОБСТВА В ІНФОРМАЦІЙНУ СИСТЕМУ УПРАВЛІННЯ ФЕРМЕРСЬКИМ ГОСПОДАРСТВОМ – ПРЕДИКТОВЕ ЗЕМЛЕРОБСТВО

6.1. Проблематика технологій ТЗ 173
6.2. Сучасний стан розвитку 174
6.3. Досвід упровадження 188
6.4. Ключові інструменти для управління живленням 194
Висновки 195

РОЗДІЛ 7. ПОРІВНЯННЯ КОНЦЕПЦІЙ РОБОТІВ ДЛЯ НОВИХ СТАЛИХ СИСТЕМ РОСЛИННИЦТВА

7.1. Нові системи рослинництва 197
7.2. Вимоги до систем робототехніки для рослинницької галузі 199
7.3. Роботизовані концепції 200
7.4. Порівняння якості виконання робіт роботами різних типів у процесі сівби 204
Висновки 207

РОЗДІЛ 8. СІЛЬСЬКОГОСПОДАРСЬКІ ДРОНИ ДЛЯ ОБПРИСКУВАННЯ

8.1. Сучасне місце агродронів 209
8.2. Типи та конструкції сільськогосподарських дронів для обприскування 212
8.3. Технології керування процесом обприскування 227
8.4. Ройові обприскувальні безпілотні літальні апарати 233
8.5. Вплив експлуатаційних параметрів на якість обприскування 235
8.6. Процес вибору обприскувального безпілотного апарата 236
Висновки 240

РОЗДІЛ 9. РОЛЬ ГЕНЕРАТИВНОГО ШТУЧНОГО ІНТЕЛЕКТУ В ЦИФРОВІЙ АГРОПРОДОВОЛЬЧІЙ СФЕРІ

9.1. Суть і значення генеративного штучного інтелекту 242
9.2. Підходи генеративного штучного інтелекту 244
9.3. Можливості генеративного ШІ в контексті агропродовольчого сектору 251
9.4. Існуючі дослідження трансформації агропродовольчого сектору за допомогою генеративного ШІ 255
9.5. Потенційні сценарії використання генеративного ШІ в агропродовольчому секторі 263
9.6. Обмеження генеративного ШІ 274
Висновки 280

РОЗДІЛ 10. ТРЕНДИ КІБЕРБЕЗПЕКИ ДЛЯ АГРАРНОЇ ГАЛУЗІ (ІНДУСТРІЯ 4.0 ТА 5.0)

10.1. Передумови створення систем кібербезпеки 282
10.2. Кіберзагрози в системах Agriculture 4.0 та 5.0 283
10.3. Кібератаки в сільському господарстві та їх наслідки 293
10.4. Заходи кібербезпеки 298
Висновки 305

Список використаних джерел 307
Предметний покажчик 310
Додатки 311

РОЛЬ ДІДЖИТАЛІЗАЦІЇ У ПІДТРИМЦІ ФЕРМЕРІВ ТА СТРАТЕГІЧНІЙ ПОЛІТИЦІ У СФЕРІ ПРОДОВОЛЬЧОЇ БЕЗПЕКИ (передмова)

Європейські фермери, землекористувачі, політики, практики та економіки стикаються з дедалі більшим тиском трансформації аграрних систем у відповідь на сукупність кризових викликів, серед яких зміна клімату, геополітична нестабільність, втрата біорізноманіття, а також збереження залежності від агрохімічних ресурсів та імпорту. Додатково системні потрясіння, зокрема пандемія COVID-19, війна в Україні та зростання вартості ресурсів, посилили дискусії щодо продовольчого суверенітету та самозабезпечення аграрного сектору в Європі. Водночас протести фермерів у 2023–2024 роках виявили глибокі суперечності між прагненням до сталого розвитку та економічною життєздатністю аграрного виробництва. У цих умовах Європейська комісія орієнтується на підвищення конкурентоспроможності як ключового чинника забезпечення соціально та економічно збалансованого переходу до «зелених» і цифрових трансформацій у сільському господарстві. Це, своєю чергою, посилює курс на сталий розвиток, що формується під впливом зростаючого суспільного та інституційного запиту на екологічно безпечні аграрні моделі та узгоджується зі стратегічними орієнтирами розвитку сільського господарства Європейського Союзу, енергетичною стратегією REPowerEU, баченням розвитку агропродовольчого сектору до 2025 року та Цілями сталого розвитку.

Сучасні аграрні системи перебувають у центрі численних суперечностей сталого розвитку. З одного боку, вони є значним джерелом деградації довкілля, зокрема деградації ґрунтів, а також чинником впливу на громадське здоров'я. З іншого боку, ці системи стають дедалі більш уразливими до змін клімату та природних катастроф, що безпосередньо загрожує продовольчій безпеці та стабільності продовольчих систем. У зв'язку з цим поняття продовольчої безпеки в Європейському Союзі виходить за межі лише доступності та наявності продовольства, набуваючи багатовимірного характеру, що охоплює аспекти сталості, стійкості, суверенітету та екологічної цілісності. Така трансформація вимагає від аграрних систем забезпечення комплексної підтримки суміжних сфер, включаючи екологічну безпеку через збереження здоров'я ґрунтів, біорізноманіття та ефективне управління водними ресурсами, економічну стабільність через оптимізацію витрат і підвищення стійкості ринків, соціальну справедливість через інтеграцію малих

виробників і розвиток цифровізації сільських територій, а також стратегічну автономію шляхом зменшення залежності від імпортних агрохімікатів і викопних енергоресурсів.

У відповідь на зазначені виклики цифровізація дедалі більше розглядається як ключовий інструмент забезпечення сталого та стійкого розвитку сільського господарства в рамках стратегій і політик Європейського Союзу, зокрема оновленої Спільної аграрної політики після 2023 року. У наукових дослідженнях цифрові підходи аналізуються крізь призму технологій точного землеробства, сенсорних систем і супутникового моніторингу, які забезпечують збір даних для прийняття рішень щодо сівби, внесення добрив і збирання врожаю, сприяючи підвищенню продуктивності та ефективності функціонування продовольчих систем. Точне землеробство посідає одне з провідних місць у дослідженнях на рівні господарств і визначається як сукупність інформаційно насичених процесів, спрямованих на мінімізацію використання ресурсів і зменшення впливу на довкілля за одночасної оптимізації врожайності. Результати досліджень впровадження цифрових технологій в аграрному секторі на локальному рівні свідчать про їх значний потенціал у підвищенні продовольчої безпеки та забезпеченні сталого розвитку сільського господарства.

Водночас у науковій літературі недостатньо уваги приділяється проблемі асиметрій, пов’язаних із цифровізацією, зокрема питанням цифрової грамотності, інтерпретації даних, конфіденційності, кібербезпеки та інтеграції технологічних рішень. Встановлено, що зі стрімким розвитком технологій зростає і розрив у рівні цифрових навичок, що зумовлює необхідність розроблення більш комплексних і гнучких стратегій формування цифрової спроможності в сільських територіях. Паралельно в розділі розглядаються питання реалізації Спільної аграрної політики, яка в період 2023–2027 років залишається одним із найпотужніших фінансових інструментів підтримки аграрного сектору. Водночас, її ефективність у забезпеченні переходу до сталого розвитку викликає дискусії. Зокрема, підкреслюється незмінність механізмів прямої підтримки доходів, що обмежує вплив на скорочення залежності від ресурсів, а також недостатня результативність у стимулюванні раціонального використання агрохімічних засобів. Додатково відзначається недостатня узгодженість політики у вирішенні питань продовольчої безпеки та наявність структурних бар’єрів, які стримують впровадження сталих аграрних практик.

Поза межами фінансових інструментів дедалі більшої уваги набуває необхідність формування узгоджених, підкріплених механізмами контролю та заснованих на даних політик, спрямованих на підтримку сталих трансформацій. Незважаючи на важливість дорадчих служб і демонстраційних господарств у поширенні інноваційних практик, більшість існуючих підходів характеризується фрагментарністю та недостатньою ефективністю систем моніторингу й контролю. У наукових працях також детально аналізуються окремі інструменти політики, насамперед Спільна аграрна політика, з точки зору досягнення конкретних цілей сталого розвитку, при цьому наголошується на її обмеженій здатності зменшувати залежність від агрохімікатів, недостатній узгодженості у питаннях продовольчої безпеки та наявності стійких інституційних і структурних перешкод для переходу до сталого сільського господарства.

Паралельно в наукових дослідженнях, присвячених цифровізації, акцентується увага на ширших аспектах її впливу, зокрема на необхідності формування коротких цифрових ланцюгів постачання, які передбачають вбудовані механізми простежуваності, оцінювання сталості, управління ресурсами та зворотного зв’язку зі споживачами. Окремі дослідження підкреслюють ключову роль цифровізації у досягненні соціально-економічних ефектів, що розглядається в межах усталеної наукової дискусії щодо передумов реалізації трансформаційного потенціалу сталих практик, технологічних інновацій та ефективного використання ресурсів для забезпечення економічного розвитку, соціального добробуту та глобальної екологічної стійкості. Додатково у науковому середовищі наголошується на значущості цифрових інструментів для забезпечення циркулярності ресурсів, зокрема у процесах відновлення поживних речовин, інтелектуального компостування та зменшення відходів із використанням технологій штучного інтелекту. Такі підходи спрямовані на вирішення завдань ефективного розподілу ресурсів для екологічно чистого виробництва не лише на рівні окремих господарств, але й у межах усього продовольчого ланцюга створення вартості. У цьому контексті важливим завданням є системна оцінка рівня зрілості наявних доказів, що варіюються від добре обґрунтованих до таких, що лише формуються, а також виявлення сфер, де зберігаються суттєві прогалини.

Незважаючи на зростаючий обсяг досліджень, у науковій літературі зберігається істотний дефіцит знань. Зокрема, роботи, присвячені сучасному стану цифровізації в контексті аграрних систем та управління ресурсами, рідко зосереджуються на європейському

вимірі, що зумовлює необхідність проведення комплексного аналізу саме для країн Європейського Союзу. Водночас недостатньо дослідженими залишаються системні бар'єри впровадження цифрових технологій у сільському господарстві. Крім того, оцінювання Спільної аграрної політики, як правило, не охоплює питання того, якою мірою політичні інструменти сприяють цифровізації, а також наскільки ефективність цільових і адаптованих політик залежить від рівня впровадження цифрових технологій. Саме подолання цих наукових прогалин становить основну мету даного розділу та визначає його внесок у розвиток відповідної галузі знань.

Матеріали цього посібника допоможуто здобувачеві освіти сформувати наступні компетентності: **ІК:** здатність розв'язувати складні задачі і проблеми у сфері агрономії під час здійснення професійної діяльності або у процесі навчання, що передбачає проведення досліджень та/або здійснення інновацій та характеризується комплексністю та невизначеністю умов; **ЗК1.** Здатність до абстрактного мислення, аналізу, синтезу. **ЗК 3.** Здатність виявляти, ставити та вирішувати проблеми. **ЗК4.** Здатність працювати в міжнародному контексті; **СК3.** Здатність створювати нові технології та застосовувати сучасні технології в агрономії, враховуючи їх особливості та користуючись передовим досвідом їх впровадження, розробляти наукові основи технологій вирощування сільськогосподарських культур. **СК10**. Здатність інтегрувати агрохімічні, геопросторові, дистанційні та виробничі дані, застосовувати цифрові платформи, аналітичні дашборди та інструменти штучного інтелекту для розроблення верифікації та супроводу рішень у прецезійному агровиробництві

Окремі розділи навчального посібника підготовлені авторами: Пасічник Н. А. – передмова, розділи від 1 до 10; Опришко О. О. – розділи 1- 4, Бикін А. В. – розділ 5, Літвінов Д. В. – розділ 6, Руденський А.А. – розділ 10.

РОЗДІЛ 1. СУЧАСНИЙ СТАН ЦИФРОВІЗАЦІЇ СІЛЬСЬКОГО ГОСПОДАРСТВА ЄС

1.1. Цифрові інструменти та платформи
1.2. Системні бар'єри цифровізації та зменшення використання агрохімікатів
1.3. Упровадження цифрових технологій у європейському сільському господарстві
1.4. Структурний аналіз цифровізації аграрних систем

1.1. Цифрові інструменти та платформи

1.1.1. Інтеграція цифрових інструментів у виробництво

Цифрові інструменти відіграють ключову роль у забезпеченні переходу до сталих і стійких агропродовольчих систем у Європейському Союзі. Сформовано широкий спектр рішень, до яких належать системи точного землеробства, інтелектуальні платформи обробки даних, інструменти на основі Інтернету речей та системи підтримки прийняття рішень. Їх застосування спрямоване на підвищення продуктивності аграрного виробництва при одночасному зменшенні використання агрохімічних ресурсів і зниженні антропогенного навантаження на довкілля. Зазначені технології інтегруються з існуючими політичними механізмами, зокрема Спільною аграрною політикою, забезпечуючи функції моніторингу, підвищення прозорості та реалізації цільових управлінських впливів. Незважаючи на наявність певних викликів, у Європейському Союзі сформовано комплекс ініціатив і нормативних підходів, спрямованих на розвиток цифровізації аграрного сектору. Подальший виклад присвячено характеристиці окремих цифрових інструментів і платформ, оцінці рівня їх інтеграції з політичними механізмами, а також виявленню існуючих невідповідностей, прогалин ефективності та компромісів.

Точне землеробство та управління на основі даних розглядаються як один із ключових напрямів цифрової трансформації аграрного виробництва. Воно базується на використанні сенсорних систем, геопросторового картографування та алгоритмічного аналізу даних і дозволяє здійснювати диференційоване внесення ресурсів залежно від просторової неоднорідності поля. Такий підхід забезпечує зниження використання агрохімікатів за одночасного збереження або підвищення врожайності. До основних технологічних компонентів належать супутникова навігація сільськогосподарської техніки,

безпілотні літальні апарати для аерозйомки, сенсори для моніторингу стану тварин і рослин, телеметричні системи, технології змінних норм внесення та польова робототехніка.

Накопичені наукові результати свідчать про високий рівень зрілості доказової бази щодо екологічної та економічної ефективності більшості інструментів точного землеробства. Зокрема, використання технологій змінних норм внесення дозволяє підвищити врожайність пшениці в межах від одного до десяти відсотків при одночасному зниженні витрат на азотні добрива до третини від початкового рівня. У вирощуванні кукурудзи також зафіксовано значне скорочення споживання азоту, що безпосередньо впливає на зменшення викидів оксиду азоту, особливо в зонах із низькою продуктивністю. Застосування диференційованого зрошення забезпечує суттєве зниження споживання водних ресурсів у сільському господарстві. Використання систем супутникової навігації сприяє оптимізації роботи техніки, що проявляється у скороченні витрат часу та палива. Додатково оптимізація маршрутів руху та впровадження контрольованого трафіку техніки зменшують ущільнення ґрунту, що позитивно впливає на його фізичні властивості та сприяє подальшому зниженню викидів парникових газів. Сукупний ефект від зменшення використання палива та добрив також забезпечує скорочення загального рівня викидів, пов’язаних із аграрним виробництвом.

Водночас, одним із визначальних чинників впровадження цифрових технологій у сільському господарстві є їх економічна доцільність. Фермери, як правило, приймають рішення про використання цифрових інструментів за умови очікування чітких фінансових переваг, зниження витрат або підвищення ефективності використання ресурсів. Проте технології, спрямовані на економію ресурсів, залишаються відносно дорогими, а їх економічний ефект у багатьох випадках не завжди компенсує додаткові інвестиційні витрати. Важливим фактором успішності впровадження є розмір господарства: малі господарства часто стикаються з труднощами інтеграції таких рішень, що зумовлює необхідність державної підтримки, зокрема у формі грантового фінансування. Для багатьох інновацій, особливо тих, що спрямовані на зниження змінних витрат або витрат праці, зокрема систем автоматичного керування та навігації, ефект від впровадження є більш передбачуваним, що підвищує ймовірність їх поширення.

Установлено, що окремі інструменти точного землеробства, такі як системи супутникової навігації, впроваджуються значно швидше порівняно з більш складними технологіями, наприклад системами змінних норм внесення, що пов’язано з невизначеністю термінів

окупності інвестицій. Це зумовлює необхідність подальших досліджень, спрямованих на оцінювання економічної ефективності цифрових рішень. Додатковим критично важливим чинником є рівень довіри до технологій: ранні користувачі, як правило, характеризуються вищим рівнем загальної довіри, тоді як пізні користувачі значною мірою покладаються на практичний досвід і очікувані результати. У зв'язку з цим особливої актуальності набуває залучення зацікавлених сторін на етапах розроблення та тестування технологій, а також використання демонстраційних господарств для підтвердження їх ефективності.

Окрім технологій точного землеробства, значного розвитку набули інші цифрові інструменти, зокрема системи управління фермерським господарством, які являють собою комплексні платформи для збору, обробки та використання даних з метою оптимізації виробничих процесів. Розроблено також численні мобільні застосунки, що забезпечують ідентифікацію хвороб рослин, надання рекомендацій щодо їх лікування, доступ до детальної метеорологічної інформації та консультаційну підтримку з боку аграрних експертів. Важливим напрямом є розвиток відкритих цифрових платформ у сільському господарстві, що базуються на принципах відкритого програмного забезпечення та колективної розробки, забезпечуючи більш доступні можливості впровадження цифрових рішень для широкого кола користувачів, включаючи малі господарства.

Спільна аграрна політика стимулює впровадження технологій через екологічні програми та цифрові дорадчі системи, однак практична реалізація цих інструментів суттєво відрізняється між країнами-членами. Відмінності у рівні розвитку цифрової інфраструктури, доступності навчальних програм і потенціалі дорадчих служб призводять до нерівномірного впровадження цифровізації на рівні Європейського Союзу. Додатково фрагментація даних і відсутність сумісності між різними цифровими системами залишаються суттєвими бар'єрами на шляху формування цілісних, зручних для користувача цифрових екосистем у сільському господарстві.

Платформи на основі **кубів даних** (**Data cubes**) та **інтероперабельні платформи** (**interoperable platforms**) розглядаються як важлива передумова ефективного впровадження цифрових технологій у сільському господарстві, особливо в умовах, коли необхідна узгоджена взаємодія різноманітних інструментів, учасників і джерел даних. У цьому контексті цифрові рішення повинні інтегруватися з існуючими аграрними практиками, дорадчими службами та інституційною інфраструктурою, а не функціонувати

ізольовано. Забезпечення належної інфраструктурної підтримки є критично важливим, оскільки фрагментованість або несумісність систем призводить до зростання витрат і стримує практичне впровадження технологій. Підвищення рівня інтероперабельності та взаємодоповнюваності систем сприяє зростанню економічної ефективності, тоді як розроблення таких рішень потребує координації та співпраці між учасниками агротехнологічного сектору, а в окремих випадках – і державного регулювання. Прикладом є формування стандартів, що забезпечують сумісність «розумних» пристроїв, зокрема сенсорів, та їх здатність працювати незалежно від конкретної платформи. Важливим чинником поширення технологій також є зручність їх використання: прості інтерфейси та мінімальні вимоги до навчання істотно впливають на темпи впровадження.

Для систематизації, гармонізації та інтеграції різнорідних джерел аграрних даних і даних дистанційного зондування Землі застосовуються підходи, засновані на використанні кубів даних. Такі рішення забезпечують формування єдиного аналітичного середовища, у межах якого різні типи даних узгоджуються за просторовими та часовими параметрами. Куби даних не є окремими програмними платформами у класичному розумінні, а виступають інфраструктурною основою, що забезпечує інтеграцію, повторне використання та сумісність даних у межах існуючих цифрових систем. Наявні дослідження свідчать про потенціал цих підходів для реалізації просторово деталізованого аналізу та аналітики, наближеної до режиму реального часу, хоча їх практичне впровадження наразі залишається обмеженим.

На сучасному етапі використання кубів даних не виходить за межі локальних пілотних проєктів і стратегічних намірів. У європейському контексті ця концепція розглядається як інструмент подолання проблем фрагментації та нестабільності даних, однак її широкомасштабне впровадження ще не досягнуто. Передбачається, що такі платформи можуть об’єднувати дані супутникових систем спостереження, зокрема Sentinel-1 і Sentinel-2 у межах програми Copernicus, із використанням відповідних обчислювальних середовищ, таких як Open Data Cube, Euro Data Cube та EarthServer. Завдяки цьому забезпечується можливість виконання задач класифікації сільськогосподарських культур, оцінювання вологості ґрунту та моніторингу вуглецевих потоків, що формує передумови для прийняття обґрунтованих управлінських рішень і розроблення політик, орієнтованих на досягнення цілей сталого розвитку в аграрному секторі.

Незважаючи на значний технологічний потенціал, практичне впровадження кубів даних у сільському господарстві Європейського Союзу залишається нерівномірним і визначається сукупністю структурних, інституційних та управлінських обмежень. У регіонах із високим рівнем цифрового розвитку, зокрема у Швейцарії та Німеччині, продемонстровано ефективність інтеграції сенсорних мереж, включаючи метеостанції та IoT-системи, з підготовленими до аналізу даними дистанційного зондування Землі. Така інтеграція забезпечує можливості для проведення діагностики, моніторингу відповідності вимогам і створення систем раннього попередження. Подібні приклади підкреслюють важливість використання інтероперабельних геопросторових стандартів і відкритих програмних інтерфейсів, які забезпечують обмін даними між державними реєстрами та системами управління фермерськими господарствами, а також формують необхідні передумови для ефективного впровадження цифрових рішень. Водночас навіть у цих країнах можуть виникати побічні ефекти, пов'язані з питаннями володіння та контролю над даними, асиметрією знань і цифровим розривом між міськими та сільськими територіями.

У країнах із нижчим рівнем цифровізації, таких як Кіпр і Сербія, спостерігаються більш стійкі бар'єри, які мають технічний, соціальний та інституційний характер. До них належать проблеми стандартизації метаданих, недостатній рівень цифрової грамотності користувачів, а також обмежена координація між інституціями. Це свідчить про те, що впровадження інфраструктур на основі кубів даних саме по собі не гарантує підвищення якості прийняття рішень, а залежить від комплексної дії технічних, соціальних, економічних і політичних чинників. Серед них ключове значення мають ефективні механізми управління, узгоджені стандарти та системна підтримка розвитку людського й інституційного потенціалу.

Інтеграція технологій штучного інтелекту здатна підвищити прогностичні можливості таких платформ, однак водночас породжує нові виклики, пов'язані з прозорістю алгоритмів, ризиками для вразливих груп користувачів і збереженням автономії фермерів у процесі прийняття рішень. У цьому контексті цифрові платформи доцільно розглядати як елементи складних соціотехнічних систем, у яких поєднуються питання нерівності доступу до ресурсів, асиметрії впливу, можливі ефекти зворотного впливу та рівень інституційної готовності до впровадження інновацій.

Цифрові ланцюги постачання та циркулярні потоки ресурсів формують нові можливості для підвищення ефективності

агропродовольчих систем. Цифрові технології забезпечують простежуваність продукції, оптимізацію логістичних процесів і сприяють впровадженню принципів циркулярної економіки в межах ланцюгів створення вартості. Застосування технологій штучного інтелекту посилює ці процеси завдяки здатності прогнозувати дисбаланси між попитом і пропозицією, виявляти критичні точки втрат і оптимізувати логістичні операції, що створює передумови для переходу від лінійних до більш замкнених виробничих систем. У межах циркулярної економіки штучний інтелект використовується для аналізу закономірностей утворення надлишків продукції та її псування, що відкриває можливості для повторного використання ресурсів, зокрема шляхом компостування або виробництва біоенергії. Такі підходи також сприяють замиканню циклів поживних речовин через інтеграцію даних про стан ґрунтів, внесення ресурсів і потоки органічних відходів, забезпечуючи більш точне застосування перероблених добрив і зменшення залежності від синтетичних засобів.

Наявні дослідження свідчать про формування підходів до цифрової циркулярності, які спрямовані на інтеграцію наявних інструментів у практично орієнтовані стратегії. Зокрема, використання цифрових двійників і хмарних аналітичних панелей дозволяє моделювати та оптимізувати потоки ресурсів, узгоджуючи виробничі процеси з екологічними вимогами. У цьому контексті цифрові платформи виходять за межі підвищення операційної ефективності та створюють умови для впровадження відновлювальних практик у агропродовольчих системах, сприяючи зменшенню втрат, підвищенню стійкості та замиканню матеріальних циклів.

Водночас практична реалізація цифрових ланцюгів постачання та циркулярних моделей залишається складною, оскільки залежить від ширших соціотехнічних та інституційних передумов. Ефективне впровадження таких рішень потребує наявності надійної інфраструктури даних, забезпечення інтероперабельності між учасниками ланцюга та узгодженості економічних стимулів, що на сьогодні не є характерним для всіх країн Європейського Союзу. Крім того, у науковій літературі недостатньо уваги приділяється потенційним побічним ефектам цифровізації, зокрема формуванню залежності від закритих платформ, загостренню питань власності на дані, нерівному доступу до сучасних аналітичних інструментів та ризику маргіналізації малих і середніх господарств, які не мають можливості інтегруватися у такі системи. Вказані ризики, а також можливість виникнення ефектів зворотного впливу, свідчать про те, що цифрова циркулярність не є автоматично сталим рішенням. Її

ефективність визначається здатністю управлінських механізмів забезпечувати баланс інтересів, рівний доступ до ресурсів і мінімізацію непередбачуваних екологічних та соціальних наслідків.

1.1.2. Цифрова інклюзія та спроможність

Ефективне використання цифрових технологій у сільських та аграрних спільнотах визначається не лише доступністю технічних рішень, але й рівнем здатності користувачів застосовувати їх на практиці. Для забезпечення інклюзивності цифровізації необхідним є поєднання розвитку цифрової грамотності, доступності технологій за прийнятною вартістю та інвестицій у розбудову цифрової інфраструктури, зокрема у сільській місцевості. У цьому контексті цифрова грамотність виступає ключовим елементом формування спроможності аграрного сектору до впровадження інновацій. Оновлені стратегічні плани Спільної аграрної політики передбачають підтримку систем знань та інновацій у сільському господарстві, а також інтеграцію навчання цифровим навичкам у діяльність дорадчих служб. Такі системи спрямовані на забезпечення здатності фермерів ефективно використовувати сучасні технології, зокрема інструменти точного землеробства, моделі кліматичного прогнозування та електронні платформи збуту продукції.

Водночас результати досліджень свідчать, що формування спроможності не може обмежуватися лише технічним навчанням. Воно повинно охоплювати ширший спектр аспектів, включаючи розвиток громад, підвищення рівня управлінської обізнаності та впровадження партисипативних підходів, що передбачають активне залучення фермерів, кооперативів і місцевих органів влади до процесів прийняття рішень. У цьому контексті важливого значення набуває концепція «розумних сіл», яка активно впроваджується в рамках сільської політики Європейського Союзу та підтримується інструментами Спільної аграрної політики. Такі спільноти орієнтовані на використання інноваційних рішень для підвищення стійкості, покращення якості життя та розвитку послуг через поєднання цифрових технологій і участі громад у процесах управління. Концепція «розумних сіл» поєднує цифровізацію з підходами до розвитку територій «знизу вгору» та спільного проєктування інновацій, демонструючи потенціал цифрових інструментів у зміцненні локальної спроможності та самодостатності.

Незважаючи на реалізацію відповідних політичних ініціатив, значна кількість досліджень фіксує наявність стійкого цифрового розриву між міськими та сільськими територіями. Особливо гостро ця

проблема проявляється в аграрному секторі, де обмежена інфраструктура, низький рівень доступу до мережі Інтернет і недостатній рівень цифрових навичок стримують впровадження інноваційних технологій. Додатковим фактором є висока вартість сучасних цифрових рішень, включаючи інтелектуальну техніку та програмне забезпечення, а також витрати на підготовку користувачів. Це обмежує доступ до таких технологій для малих і середніх господарств і водночас посилює конкурентні переваги великих аграрних підприємств із значними інвестиційними ресурсами. Так цифрова інклюзія формується під впливом ширшого комплексу соціально-економічних та інституційних чинників, і без подолання бар'єрів, пов'язаних із доступністю, інфраструктурою та управлінням, цифровізація може не зменшити, а навпаки - поглибити структурні диспропорції в аграрному секторі Європи.

1.1.3. Упровадження цифрових технологій у європейському сільському господарстві

У різних країнах Європи спостерігаються суттєві відмінності у рівні впровадження цифрових технологій в аграрному секторі, що дозволяє виокремити успішні практики та визначити інституційні, інфраструктурні й соціально-економічні умови, які впливають на ефективність їх поширення.

Одним із лідерів цифрової трансформації є Нідерланди, де активно впроваджуються технології точного землеробства, включаючи GPS-навігацію сільськогосподарської техніки, безпілотні літальні апарати та ґрунтові сенсорні системи. Їх використання дозволяє оптимізувати внесення ресурсів і підвищувати продуктивність за рахунок більш точного управління польовими процесами. Застосування аналітики даних у режимі реального часу, що охоплює показники стану ґрунту та метеорологічні умови, сприяє прийняттю обґрунтованих і екологічно збалансованих управлінських рішень. Досвід цієї країни підкреслює значення інвестицій у передові технології та цільову підготовку фермерів як ключових факторів успішної цифрової трансформації аграрного сектору.

Подібні позитивні результати спостерігаються у Данії, де цифрові інструменти широко інтегровані у молочне та рослинницьке виробництво. Використання технологій Інтернету речей дозволило значній частині фермерів знизити споживання пестицидів, пального та трудових ресурсів. Застосування датчиків вологості ґрунту сприяє скороченню використання води для зрошення, тоді як системи моніторингу тварин у реальному часі покращують показники здоров'я

та продуктивності худоби. Досягнуті результати стали можливими завдяки активній участі держави та приватного сектору, механізмам спільного фінансування та ефективним системам поширення цифрових практик у сільських регіонах. Це підкреслює важливість інституційної координації та стабільного інвестиційного середовища для масштабного впровадження інновацій.

В Італії цифровізація активно розвивається у виноградарстві, де застосовуються технології машинного навчання та штучного інтелекту для аналізу кліматичних умов і поширення шкідників. Це дозволило суттєво знизити використання хімічних засобів захисту рослин і підвищити стабільність урожайності та якість продукції. Початковий опір впровадженню штучного інтелекту був подоланий завдяки державним програмам субсидованого навчання, спрямованим на інтеграцію цифрових інструментів у традиційні системи господарювання. Даний приклад демонструє важливість цільової підтримки та розвитку цифрових компетентностей, особливо у секторах із сильними традиціями ручної або досвідної праці.

У Іспанії значного розвитку набули технології блокчейн у сільському господарстві, зокрема у ланцюгах постачання оливкової олії. Їх використання сприяє підвищенню прозорості, уніфікації стандартів простежуваності та зміцненню довіри споживачів через відкриті системи маркування продукції, а також оптимізації адміністративних процесів. Досвід Іспанії демонструє, що цифрові технології впливають не лише на виробничі процеси, але й на управління ланцюгами створення вартості та загальні механізми ринкової координації.

У цілому наведені приклади свідчать, що ефективність цифровізації в аграрному секторі не визначається виключно рівнем технологічного розвитку. Вона залежить від ширшого комплексу умов, включаючи наявність розвинених дорадчих систем, співпрацю між державним і приватним секторами, інвестиції у цифрові навички та сприятливе регуляторне середовище. Водночас ці кейси підкреслюють контекстно залежний характер цифрової трансформації, оскільки результати, досягнуті у країнах із високим рівнем цифрового розвитку, не завжди можуть бути безпосередньо перенесені на регіони з менш розвиненою інфраструктурою, нижчим рівнем цифрової грамотності або іншою структурою аграрного виробництва.

1.2. Системні бар'єри цифровізації та зменшення використання агрохімікатів

1.2.1. Технічні бар'єри

Незважаючи на стрімкий розвиток цифрових технологій, їх впровадження та ефективне використання в аграрному секторі Європейського Союзу продовжує стримуватися низкою технічних обмежень. До ключових проблем належать несумісність і низький рівень інтероперабельності цифрових рішень, недостатній рівень впровадження технологій у господарствах, а також слабко розвинена цифрова інфраструктура на рівні ферм. Додатковим суттєвим бар'єром є залежність від окремих постачальників технологій, що проявляється у «замиканні» користувачів у рамках пропрієтарних екосистем, а також недостатнє дотримання єдиних стандартів програмного забезпечення та обміну даними. Особливо гострою залишається проблема обмеженого доступу до стабільного широкосмугового інтернету в сільських регіонах, що є критично важливим для ефективного використання цифрових аграрних рішень.

Окрім базових інфраструктурних обмежень, стримуючим фактором є технологічна фрагментація, яка ускладнює цифрову трансформацію аграрного сектору та зменшення залежності від агрохімікатів. Екосистема аграрних технологій Європейського Союзу характеризується недостатнім рівнем узгодженості між цифровими платформами та інструментами, що поєднується зі складністю технологій точного землеробства. У цьому контексті впровадження таких технологій часто потребує вузькоспеціалізованого дорадчого супроводу у співпраці з окремими постачальниками рішень, що може посилювати сегментацію ринку та зменшувати рівень незалежності консультаційної підтримки порівняно з традиційними дорадчими системами.

Додаткову складність створює велика кількість зацікавлених сторін у аграрному секторі, включаючи фінансові установи, інженерні та хімічні компанії, ритейл, галузеві асоціації та вузькоспеціалізовані експертні структури. Така багаторівнева структура посилює потребу у стандартизації протоколів обміну даними, без якої ефективна взаємодія між учасниками цифрових екосистем залишається обмеженою. У результаті фермери стикаються з проблемами сумісності при інтеграції програмного забезпечення для управління господарством, сенсорних мереж і обладнання точного землеробства, що походить від різних виробників. Багато з цих систем функціонують на основі закритих пропрієтарних платформ, що ускладнює обмін даними, синхронізацію систем і підвищує часові та фінансові витрати на їх інтеграцію. Така

фрагментація перешкоджає формуванню цілісних цифрових моделей управління господарством, які могли б забезпечити оптимізацію використання ресурсів і покращення екологічних показників виробництва.

Окремо слід відзначити ризик ефектів зворотного впливу, пов'язаних із застосуванням технологій точного землеробства. Підвищення ефективності виробництва може призводити до розширення площ обробітку або інтенсифікації використання земельних ресурсів, що потенційно нівелює початковий екологічний ефект від скорочення використання ресурсів. Таким чином, технічні бар'єри цифровізації мають не лише інфраструктурний характер, але й системні наслідки для екологічної ефективності аграрного виробництва.

Додатково, відсутність загальноєвропейських стандартів щодо форматів даних і архітектури цифрових систем істотно ускладнює розвиток інтероперабельних рішень, таких як інтегровані «єдині вікна» та об'єднані екосистеми аграрних даних. У результаті впровадження передових технологій, зокрема штучного інтелекту для оптимізації внесення ресурсів, дистанційної діагностики та прогнозної аналітики, відбувається повільно і залишається обмеженим за масштабами. Хоча окремі відкриті та колаборативні цифрові платформи в аграрному секторі поступово розробляються, їх поширення стримується нестабільністю політичної підтримки та недостатніми стимулами для участі приватного сектору. Подолання цих бар'єрів інтероперабельності потребує не лише технічної стандартизації, але й формування цілісних політичних рамок, які сприятимуть інтеграції систем, стимулюватимуть використання відкритих архітектур та закріплюватимуть вимоги до сумісності у фінансових інструментах цифровізації в межах Спільної аграрної політики. Лише за умови скоординованих дій цифрові технології можуть бути повною мірою використані для зменшення залежності від агрохімікатів і зміцнення довгострокової продовольчої безпеки Європейського Союзу. Водночас зростаюча складність агропродовольчих даних - від супутникових зображень і сенсорних вимірювань до адміністративної інформації та даних на рівні господарств - підкреслює критичну необхідність створення інтероперабельної цифрової інфраструктури. Аналіз свідчить, що попри швидкий розвиток даних дистанційного зондування Землі та сенсорних технологій, їх фрагментарне впровадження і недостатній рівень управління даними залишаються ключовими перешкодами для масштабування цифрового сільського господарства.

Крім того, цифровізація супроводжується низкою ризиків, пов'язаних із посиленням асиметрії влади, коли фермери можуть опинятися у залежності від закритих корпоративних екосистем. Зокрема, виробники сільськогосподарської техніки нерідко впроваджують технічні та правові обмеження на доступ до обладнання і програмного забезпечення, що обмежує можливості самостійного обслуговування техніки та використання сторонніх цифрових сервісів. Це посилює залежність від пропрієтарних продуктів і сервісних контрактів. Водночас аграрні дані дедалі частіше набувають ознак товару: великі компанії комерціалізують агреговані масиви даних, використовуючи їх для розробки нових продуктів, удосконалення рекомендацій щодо внесення ресурсів і навіть для фінансових операцій. При цьому виробники первинних даних - фермери - часто не отримують справедливої частки доданої вартості, створеної на основі їхньої господарської діяльності.

1.2.2. Економічні бар'єри

Ключовим бар'єром на шляху зменшення залежності від агрохімікатів у Європейському Союзі є структурна та економічна вразливість аграрних систем. Історична залежність від імпорту синтетичних добрив і засобів захисту рослин зробила агропродовольчий сектор чутливим до коливань глобальних ланцюгів постачання та нестабільності цін на ресурси, особливо в умовах останніх геополітичних криз, зокрема війни в Україні. Такі залежності знижують стійкість фермерських господарств і підсилюють необхідність переходу до більш сталих альтернатив використання ресурсів. Хоча стратегічні ініціативи Європейського Союзу, зокрема концепція «Від ферми до виделки», передбачають амбітні цілі щодо скорочення використання пестицидів, прогрес у їх досягненні залишається нерівномірним.

Водночас значна частина фермерів демонструє обережність щодо впровадження цифрових рішень, спрямованих на зменшення використання агрохімікатів, таких як системи діагностики живлення рослин на основі штучного інтелекту або інтелектуальні технології внесення препаратів. Основними стримуючими чинниками є високі початкові інвестиційні витрати та невизначеність щодо окупності таких рішень. Особливо це стосується малих і середніх господарств, які становлять більшість аграрних підприємств у ЄС. Попри наявність заходів підтримки в межах стратегічних планів Спільної аграрної політики, доступ до цільових фінансових інструментів залишається обмеженим, а високі початкові витрати на спеціалізовану техніку

точного землеробства у поєднанні з ризиками недостатньої рентабельності ускладнюють широке впровадження цифрових технологій. У результаті перехід до цифровізованих моделей низьковитратного виробництва залишається економічно недоступним для значної частини фермерського сектору.

Додатковим аспектом економічного тиску є формування нових фінансових і страхових механізмів, що базуються на використанні цифрових даних. Доступ корпоративних структур до детальної інформації про діяльність господарств створює передумови для нових форм оцінювання ризиків і фінансалізації аграрного виробництва. Страхові компанії та кредитні установи можуть використовувати такі дані для визначення умов доступу до фінансування, формування тарифів або навіть вимагати використання певних цифрових технологій як умови співпраці, що фактично створює додатковий нефінансовий тиск на прийняття рішень фермером.

У контексті переходу Європи до зменшення залежності від зовнішніх ресурсів цифрові технології, зокрема блокчейн, Інтернет речей та штучний інтелект, розглядаються як базові інструменти трансформації агропродовольчих систем. Блокчейн-технології забезпечують незмінність і прозорість записів про транзакції та матеріальні потоки, що підвищує рівень довіри між учасниками ланцюга постачання. У поєднанні з сенсорними системами та «розумним» маркуванням це дозволяє забезпечити простежуваність продукції від виробника до кінцевого споживача, виявляти втрати ресурсів і створювати можливості для їх повторного використання, зокрема через відновлення поживних речовин. Водночас залишаються відкритими питання масштабованості таких рішень, їх вартості впровадження та залежності від рівня цифрової інфраструктури і зв'язності, що обмежує їх масове застосування в аграрному секторі.

1.2.3. Соціальні бар'єри

Нерівномірність розвитку цифрової інфраструктури та рівня цифрової грамотності у сільських територіях Європейського Союзу становить суттєвий виклик для впровадження цифрових рішень, спрямованих на зменшення використання агрохімікатів і підвищення рівня продовольчої безпеки. Цифровий розрив між міськими та сільськими регіонами залишається значним: попри майже повне покриття широкосмуговим інтернетом і мережами 5G у містах, у багатьох сільських районах рівень доступу до високошвидкісного інтернету є суттєво нижчим, особливо в країнах Південної та Східної Європи. Такий дефіцит інфраструктури обмежує доступ до хмарних

сервісів, цифрових платформ і технологій обробки даних у режимі реального часу, що ускладнює використання ресурсомістких цифрових рішень, зокрема систем точного внесення добрив або дистанційної діагностики стану посівів. Попри реалізацію європейських ініціатив із розвитку цифрової інфраструктури, таких як відповідні механізми фінансування ЄС, їх ефективність залишається нерівномірною через фрагментованість національних стратегій та недостатню координацію між європейським і місцевим рівнями управління.

Додатковим суттєвим бар'єром є низький рівень цифрової грамотності серед фермерів, особливо у старших вікових групах або серед працівників із традиційною аграрною освітою. Значна частина сільськогосподарських виробників не володіє достатніми навичками не лише для роботи з цифровими пристроями, але й для орієнтації у складних питаннях, пов'язаних із захистом даних, кібербезпекою та регуляторними вимогами. Хоча у всіх країнах-членах ЄС у межах стратегічних планів Спільної аграрної політики реалізуються програми навчання та дорадчі заходи, їх якість і орієнтація на цифрові технології часто залишаються недостатніми або не повністю адаптованими до реальних потреб аграрної спільноти. У міру розвитку технологій ці прогалини можуть лише посилюватися, що обмежує здатність фермерів ефективно використовувати цифрові інструменти для зменшення хімічного навантаження та підвищення екологічної стійкості виробництва.

Крім того, цифровізація формує нові типи залежності, які можуть послаблювати автономію фермерів та їхню здатність до самостійного прийняття рішень. За умов алгоритмічного управління дедалі більша частина рішень, які традиційно ґрунтувалися на досвіді, спостереженнях і локальних знаннях фермерів, заміщується автоматизованими рекомендаціями, сформованими на основі корпоративних алгоритмів обробки даних. У результаті центр прийняття рішень поступово зміщується з рівня господарства до цифрових платформ і серверних інфраструктур, що зменшує роль фермера як самостійного суб'єкта управління і перетворює його радше на виконавця алгоритмічно сформованих інструкцій.

1.2.4. Політичні та управлінські бар'єри

Попри задекларовану роль, екосхеми у межах Спільної аграрної політики нерідко відтворюють існуючі сільськогосподарські практики, які раніше піддавалися критиці через нечіткі критерії відповідності та недостатньо розвинені механізми моніторингу. Складнощі у визначенні вимірюваних та контрольованих показників для

зобов'язань, пов'язаних із технологіями точного землеробства, обмежують їх інтеграцію в екосхеми на рівні країн-членів Європейського Союзу. Як приклад, у початковій редакції стратегічного плану Спільної аграрної політики Чеської Республіки передбачалося впровадження екосхеми, спрямованої на диференційоване внесення добрив, однак вона не була реалізована через складність встановлення перевірюваних критеріїв та необхідність збереження гнучкості для фермерів.

Подібні труднощі спостерігаються і в інших державах, що свідчить про загальну недостатність цільової політичної підтримки технологій точного землеробства. Додатково регуляторні обмеження стримують впровадження інноваційних рішень: жорсткі правила використання автономних польових роботів фактично обмежують їх застосування переважно експериментальними умовами, а заборони на авіаційне внесення засобів захисту рослин обмежують практичне використання безпілотних літальних апаратів для оптимізації обробки посівів. Такі управлінські та нормативні обмеження знижують ефективність потенційних синергій політик і уповільнюють широке впровадження передових цифрових технологій у сільському господарстві.

Хоча цифрові технології позиціонуються як інструмент підвищення операційної гнучкості, їх впровадження на практиці нерідко призводить до посилення контрольних механізмів і, як наслідок, збільшення адміністративного навантаження на фермерів. Недоліки у системах моніторингу аграрної політики знижують здатність до об'єктивного оцінювання ефективності сільськогосподарських практик, що ускладнює аналіз досягнутого прогресу та загальної результативності політичних заходів. Це, своєю чергою, обмежує потенціал європейського аграрного сектору щодо досягнення більш суттєвого внеску у реалізацію цілей сталого розвитку.

Важливо відзначити, що лише нещодавно Європейський Союз офіційно затвердив використання супутникових даних і інформаційних систем для функціонування системи аерокосмічного моніторингу як інструменту верифікації та авторизації виплат фермерам, що підкреслює поступовий характер інституційного впровадження цифрових рішень у сфері аграрного управління.

1.2.5. Міжкраїновий синтез: цифрова готовність та системні бар'єри

У даному підрозділі узагальнено результати порівняльного аналізу окремих європейських країн, що дозволяє розкрити взаємозв'язок між викликами продовольчої безпеки, рівнем цифровізації, системними

бар'єрами та політичними інтервенціями. Такий підхід дає змогу оцінити, якою мірою інституційна спроможність, стан цифрової інфраструктури та соціально-економічні умови визначають реальні можливості впровадження цифрових технологій у сільському господарстві.

Незважаючи на те, що більшість країн декларують стратегічні наміри щодо цифрової трансформації аграрного сектору, включаючи розвиток точного землеробства, водоефективних технологій та інтелектуальних систем управління – фактичний рівень впровадження суттєво відрізняється. Причиною цього є сукупність взаємопов'язаних обмежень технічного, соціального, економічного та політико-управлінського характеру. До технічних бар'єрів належать недостатній рівень цифрової грамотності та обмежений доступ до якісного інтернет-зв'язку, до соціальних – дефіцит компетентностей у малих фермерських господарствах, демографічне старіння сільського населення та залежність від зовнішніх ресурсів. Економічні обмеження пов'язані з високими витратами на впровадження цифрових рішень і невизначеністю їх окупності, тоді як політико-управлінські фактори проявляються у фрагментарності підтримки та недостатній узгодженості інструментів державної політики.

Порівняльний аналіз демонструє, що цифровізація аграрного сектору не забезпечує автоматичного підвищення рівня продовольчої безпеки. Її результативність визначається ступенем узгодженості між технологічною готовністю, ефективністю політичних механізмів та специфікою локальних структурних умов. Таким чином, отримані результати підкреслюють необхідність розроблення узгоджених, але водночас адаптивних до національного контексту підходів до впровадження цифрових технологій у сільському господарстві як у межах Європейського Союзу, так і поза ним.

Міжкраїнове порівняння демонструє, що Німеччина та Швейцарія значно випереджають, насамперед завдяки вищому рівню структурної та інституційної готовності. У цих країнах сформовано розвинені дорадчі мережі, ефективні механізми державно-приватного партнерства в інноваційній сфері, високий рівень цифрової грамотності та добре розвинена інфраструктура даних. Сукупність цих факторів забезпечує фермерським господарствам можливість не лише впроваджувати цифрові інструменти, але й ефективно інтегрувати їх у виробничі процеси, перетворюючи технології на відчутні показники підвищення продуктивності та екологічної ефективності.

Часто країни стикаються з більш фундаментальними обмеженнями, серед яких недостатній рівень доступу до

широкосмугового інтернету, нерівномірний розвиток аграрних систем та значна залежність від імпортних ресурсів. Ці фактори суттєво стримують як цифрову трансформацію, так і можливості модернізації аграрного виробництва. У випадку Словенії додатковим стримуючим чинником є демографічне старіння сільського населення та дефіцит інфраструктурного забезпечення у сільських регіонах, що ускладнює впровадження цифрових технологій навіть за наявності відповідних політичних ініціатив.

У сукупності ці відмінності підкреслюють, що рівень цифрової трансформації аграрного сектору визначається не лише доступністю технологій, а, насамперед, глибиною інституційної інтеграції, якістю інфраструктури та соціально-демографічними умовами розвитку сільських територій.

1.3. Шляхи впровадження цифрових технологій

Для подолання системних викликів цифровізації, залежності від агрохімікатів та проблем продовольчої безпеки в аграрному секторі Європейського Союзу у цьому підрозділі запропоновано три політичні сценарії. Вони спрямовані на операціоналізацію ключових положень дослідження шляхом інтеграції цифрових інструментів і платформ, скорочення залежності від агрохімічних ресурсів та підвищення стійкості продовольчих систем. Кожен зі сценаріїв узгоджується з цілями Стратегії «Від ферми до виделки» та стратегічними планами Спільної аграрної політики.

Запропоновані сценарії формують послідовну та взаємодоповнювальну рамку розвитку, що включає: формування загальноєвропейського інструментарію для зменшення залежності від агрохімікатів і цифровізації аграрних даних; розвиток екосхем у межах САР, орієнтованих на низьковитратні та сталі цифрові практики; а також підтримку кооперативних моделей цифрової інклюзії для малих і середніх фермерських господарств. У сукупності ці підходи утворюють узгоджену систему заходів, яка спрямована на подолання виявлених ризиків корпоративної залежності, ефектів зворотного впливу та нерівного доступу до цифрових компетентностей.

Запропоновані шляхи впровадження дозволяють перейти від фрагментарного використання цифрових технологій до системного рівня трансформації аграрного сектору. Вони забезпечують практичні орієнтири щодо того, яким чином цифровізація може сприяти структурним змінам у продовольчих системах, підвищенню координації між учасниками агропродовольчого ланцюга та реалізації

стратегічного бачення Європейського Союзу щодо сталого та стійкого розвитку сільського господарства.

1.3.1. Рамкова політика ЄС щодо агрохімічної незалежності та цифровізації аграрних даних

Ефективне нормативне регулювання є ключовою передумовою забезпечення агрохімічної незалежності та зменшення цифрової залежності фермерів від корпоративних екосистем. У сучасній аграрній системі цифрові платформи часто концентрують критично важливі дані у межах закритих комерційних середовищ, що фактично надає виробникам агрохімікатів та великим агробізнес-структурам привілейований доступ до інформації про господарську діяльність фермерів. Така ситуація знижує рівень автономії фермерських господарств у прийнятті рішень щодо використання ресурсів і обмежує можливості впровадження сталих практик управління агровиробництвом.

Додатково комерціалізація аграрних даних без забезпечення справедливого розподілу вигод між усіма учасниками виробничого процесу посилює структурну залежність фермерів від пропрієтарних цифрових платформ, аналітичних сервісів і, опосередковано, від використання агрохімічних продуктів, що рекомендуються цими системами. У результаті формується замкнений контур залежності, який поєднує доступ до даних, технологічні рекомендації та постачання ресурсів.

Політичний сценарій: формування умов агрохімічної незалежності через закріплення прав фермерів на дані, забезпечення інтероперабельності цифрових систем та розширення доступу до аграрної інформації для підтримки сталих моделей сільськогосподарського виробництва.

Зацікавлені сторони: Європейська комісія (регуляторна функція), національні органи реалізації Спільної аграрної політики, сільськогосподарські кооперативи, виробники техніки та цифрових платформ, а також учасники фінансового та страхового секторів.

Механізми реалізації:

- запровадження обов’язкових відкритих програмних інтерфейсів (API) та єдиних стандартів інтероперабельності для сільськогосподарської техніки, програмного забезпечення для агрохімічного управління та цифрових сервісів;

- підтримка створення незалежних кооперативних структур управління даними, що належать самим фермерам, з метою зменшення асиметрії влади та ефектів зворотного впливу;
- впровадження систем сертифікації, які забезпечують прозорість у використанні агрохімікатів та пов'язаних цифрових даних;
- обмеження використання детальних фермерських даних у процесах страхування та фінансового оцінювання для запобігання непрямому регуляторному тиску на виробників.

Ресурсні потреби: високі, оскільки реалізація сценарію потребує розгортання систем сертифікації, розвитку цифрової інфраструктури даних, посилення регуляторного контролю та інвестицій у створення фермеро-орієнтованих цифрових інструментів. Додатково необхідне фінансування для формування інтероперабельних рішень, які можуть виступати альтернативою закритим пропрієтарним платформам.

Реалістичність впровадження: за умов обмеженості публічних фінансових ресурсів розвиток інтероперабельних систем може значною мірою залежати від приватних інвестицій, а також від ініціатив відкритого програмного забезпечення та колаборативних моделей розробки. Це, у свою чергу, вимагає чітких регуляторних гарантій і стимулів для забезпечення балансу між публічними та приватними інтересами.

Часовий горизонт: середньо- та довгостроковий (5–10 років), з огляду на необхідність поетапного розвитку інфраструктури, гармонізації політик між державами-членами ЄС та поступового впровадження як цифрових інструментів, так і регуляторних механізмів.

Стратегічна роль: фундаментальна. Забезпечення агрохімічної незалежності та інтероперабельності даних є критично важливим для запобігання подальшій концентрації влади в агрохімічному та агродіджитал-секторах. За відсутності таких заходів існує ризик, що цифровізація та політики сталого розвитку можуть не зменшити, а навпаки - закріпити наявні асиметрії впливу, що обмежить реальні екологічні та соціальні результати трансформації аграрної системи.

1.3.2. Еко-схеми САР для низьковитратної цифровізації та сталого розвитку

Цифрові інструменти можуть сприяти сталому розвитку лише за умови їх цілеспрямованого використання для вимірюваного зменшення споживання ресурсів і скорочення відходів. У

протилежному випадку технології точного землеробства можуть призводити до інтенсифікації виробництва або непрямого розширення ефективно оброблюваних площ, що створює ефекти зворотного впливу та нівелює досягнення кліматичних і біорізноманіттєвих цілей. Поточні інструменти Спільної аграрної політики переважно стимулюють впровадження практик, а не досягнення вимірюваних екологічних результатів. У цьому контексті перехід до підходів, орієнтованих на результативність, відкриває можливість інтегрувати принципи сталості безпосередньо у процес цифрової трансформації аграрного сектору.

Політичний сценарій: прив'язка публічного фінансування до перевірюваного скорочення використання добрив і пестицидів, споживання води та утворення відходів із використанням цифрових систем моніторингу.

Зацікавлені сторони: Генеральний директорат Європейської комісії з питань сільського господарства та розвитку сільських територій (DG AGRI), національні органи управління CAP, дорадчі служби, малі та середні підприємства - постачальники цифрових рішень, групи точного та регенеративного землеробства, органічні виробники, а також екологічні моніторингові агенції.

Механізми реалізації:

- перегляд екосхем першого стовпа CAP із орієнтацією на винагородження кількісно підтвердженого зменшення використання ресурсів і впровадження циркулярних практик через створення міждержавної робочої групи для розробки контрольованих і аудиторських критеріїв;
- обмеження участі лише для інтероперабельних цифрових систем з метою запобігання технологічній залежності від окремих постачальників;
- посилення та оновлення Європейської мережі даних сталого розвитку фермерських господарств із включенням нових індикаторів, що відображають довгострокові зміни у стані ґрунтів і біорізноманітті, а не лише короткострокову оптимізацію;
- підтримка технологій, орієнтованих на відновлення поживних речовин, «розумне» компостування та цифрові системи скорочення втрат ресурсів.

Ресурсні потреби: помірні, переважно пов'язані з регуляторною адаптацією, розвитком систем моніторингу та оновленням індикаторів оцінювання.

Реалістичність впровадження: середня; однак обмеженість публічних бюджетів та скорочення фінансування в межах після 2027 року САР можуть ускладнити масштабування.

Часовий горизонт: коротко- та середньостроковий (2–5 років), з можливістю реалізації в межах циклів реформування САР.

Стратегічна роль: умовно залежна від реалізації першого сценарію, оскільки без доступу до якісних даних ефективне таргетування політик є обмеженим. Водночас існує ризик, що посилення цифрового екологічного моніторингу може непрямо зміцнити позиції корпоративних платформ, які контролюють інструменти збору та обробки даних, що потребує додаткових запобіжних механізмів управління.

1.3.3. Кооперативна цифрова інклюзія для малих і середніх фермерських господарств

Нерівний доступ до цифрових технологій створює ризики для ефективного зменшення використання агрохімікатів, оскільки переваги цифровізації у сфері підвищення ефективності та управління ризиками концентруються переважно у великих, капіталомістких аграрних структурах. Висока вартість цифрової техніки, модель підписки на програмне забезпечення та потреба у спеціалізованих знаннях суттєво обмежують можливості малих господарств і фермерів старшого віку щодо впровадження цифрових рішень. Додатково, корпоративні «замикання» у цифрових екосистемах посилюють структурну нерівність, обмежуючи можливості ремонту техніки, доступу до альтернативних сервісів обробки даних або переходу між платформами.

У цьому контексті цільова політична підтримка є критично необхідною для недопущення того, щоб цифровізація посилювала соціально-економічну фрагментацію аграрного сектору.

Політичний сценарій: зменшення структурних бар'єрів для впровадження цифрових технологій через розвиток кооперативної інфраструктури, підтримку відкритих технологій та розширення спільних дорадчих систем у сільських регіонах.

Зацікавлені сторони: органи влади держав-членів ЄС, агенції реалізації другого стовпа САР, сільськогосподарські кооперативи, системи освіти та дорадництва, малі та середні підприємства та розробники відкритого програмного забезпечення, а також науково-дослідні установи.

Механізми реалізації:

- підтримка колективних моделей закупівлі та спільного використання цифрової техніки, сенсорних систем і обладнання для моніторингу в межах фінансування другого стовпа CAP;
- спрямування публічних коштів на розвиток відкритого програмного забезпечення та кооперативних цифрових платформ як альтернативи пропрієтарним екосистемам;
- створення центрів цифрових компетенцій, інтегрованих у дорадчі мережі, для зменшення нерівності у доступі до знань та навичок;
- запровадження інноваційних ваучерів для підтримки малих і середніх підприємств та кооперативів у впровадженні технологій, спрямованих на зменшення використання агрохімікатів.

Ресурсні потреби: помірні до високих, залежно від масштабів впровадження моделей колективної власності та необхідності розвитку інфраструктури спільного використання технологій.

Реалістичність впровадження: середня або низька, залежно від рівня фінансування; у разі обмеженості публічних ресурсів можливе часткове залучення приватного капіталу.

Часовий горизонт: короткостроковий для навчальних ініціатив (1–3 роки) та середньостроковий для розгортання інфраструктури (3–6 років).

Стратегічна роль: підсилює ефективність перших двох сценаріїв, забезпечуючи інклюзивність цифрової трансформації та запобігаючи виключенню малих і середніх господарств із процесів цифрового моніторингу та управління даними.

У сукупності три запропоновані сценарії формують послідовну політичну архітектуру впровадження. Інтероперабельність даних створює інституційні передумови для цифровізації, екосхеми, орієнтовані на результати, забезпечують зв'язок між інноваціями та екологічними цілями, а кооперативна інклюзія гарантує широке охоплення та недопущення виключення окремих груп фермерів. Таким чином, подальший розвиток цифровізації в аграрному секторі потребує одночасного врахування інноваційних, управлінських і перерозподільчих механізмів для забезпечення стійкості та збалансованості європейських продовольчих систем.

1.4. Структурний аналіз цифровізації аграрних систем

Зростаюче впровадження цифрових технологій в аграрному секторі одночасно відкриває як значні можливості, так і системні ризики. Результати тематичного аналізу демонструють, що цифровізація може підтримувати скорочення використання

агрохімікатів і підвищення продовольчої безпеки завдяки більш ефективному управлінню ресурсами, удосконаленню моніторингу та покращенню процесів прийняття рішень. Водночас ці ефекти є суттєво контекстно залежними та не проявляються автоматично.

Функціональні можливості цифрових технологій у сільському господарстві вже виходять за межі інструментів оптимізації й дедалі більше набувають ознак інфраструктур, що формують логіку прийняття рішень, структуру ринку та підходи до управління ресурсами. Зокрема, системи точного внесення ресурсів, IoT-рішення, сенсорні мережі, технології дистанційного зондування та інтелектуальні цифрові платформи стають елементами ширшої аграрної цифрової екосистеми, яка впливає на поведінку учасників ринку та організацію виробничих процесів.

Огляд сучасних технологій показує, що в окремих напрямах, зокрема у сфері точного землеробства та сенсорних систем, цифрові рішення досягли високого рівня технологічної зрілості. Водночас нерівномірність їх впровадження та початковий етап розвитку інфраструктур обробки даних - таких як інтероперабельні платформи та системи циркулярної цифрової економіки - свідчать про наявний розрив між технологічним потенціалом і фактичним рівнем застосування. Ці диспропорції посилюються системними бар'єрами, зокрема технічними обмеженнями (відсутність інтероперабельності та залежність від окремих постачальників), економічними факторами, низьким рівнем цифрової грамотності, демографічними викликами та недоліками у сфері управління.

Аналіз політичних інструментів показує, що хоча Спільна аграрна політика створює загальні передумови для цифровізації аграрного сектору, значна частина заходів залишається фрагментованою, нерівномірно впровадженою та недостатньо орієнтованою на конкретні результати. Це призводить до розриву між політичними цілями та фактичними результатами цифрової трансформації.

Цифрові інновації мають потенціал для зменшення використання ресурсів, підтримки циркулярних моделей та підвищення кліматичної стійкості аграрних систем. Однак виключно технологічно орієнтований підхід може створювати додаткові ризики, особливо для малих і середніх господарств, через посилення асиметрій влади, зростання залежності від даних та зниження автономії фермерів унаслідок алгоритмічного управління та поширення пропрієтарних цифрових інфраструктур.

Отже, ефективне використання цифрових технологій потребує стратегічних інтервенцій, які виходять за межі простого впровадження

інновацій і безпосередньо враховують політико-економічні структури, що визначають умови доступу до цифровізації, її управління та розподіл вигод. До таких інтервенцій належать: рамкова політика ЄС щодо агрохімічної незалежності та цифровізації даних, результат-орієнтовані екосхеми в межах САР, а також механізми цифрової інклюзії малих і середніх фермерських господарств, запропоновані у розділі про шляхи впровадження.

Межі наявних знань та напрями їх розширення

Незважаючи на широту охоплення тематики, це дослідження має низку обмежень, які необхідно враховувати при інтерпретації результатів.

- Наявна база даних щодо цифровізації сільського господарства в Європейському Союзі є суттєво неоднорідною. Країни-члени по-різному підходять до оцінювання рівня впровадження технологій, розвитку інфраструктури та результативності політик, що ускладнює проведення повністю порівняльного міжкраїнового аналізу. Значна частина перспективних рішень, таких як системи data cubes, інтероперабельні платформи та інфраструктури циркулярної цифрової економіки, перебуває на ранніх рівнях технологічної готовності в багатьох регіонах, а наявні оцінки їх ефективності базуються переважно на пілотних проєктах або моделюванні. У результаті частина висновків відображає радше формування нових тенденцій, ніж усталені та узагальнювані результати.
- Запропоновані сценарії впровадження, хоча й мають прикладний характер і можуть слугувати орієнтирами для політики, залишаються концептуальними. Їх практична реалізація значною мірою залежить від політичної волі, бюджетних можливостей, інституційної спроможності та узгодження інтересів широкого кола зацікавлених сторін.

Подальші дослідження мають бути спрямовані на подолання зазначених обмежень. Необхідні порівняльні емпіричні дослідження в різних державах-членах ЄС для оцінки ефективності цифрових технологій за різних агрономічних, соціально-економічних та управлінських умов. Довгострокові дослідження дозволять встановити, чи сприяє цифровізація реальному зменшенню залежності від агрохімікатів та підвищенню продовольчої безпеки, або ж у часі проявляються ефекти зворотного впливу.

Крім того, особливо перспективними є міждисциплінарні дослідження на стику агрономії, науки про дані, політичної економії та сільської соціології, які дозволять глибше зрозуміти, як асиметрії влади,

залежність від цифрових платформ і концентрація ринку впливають на трансформацію аграрних систем.

Нарешті, необхідні прикладні дослідження впровадження політик, спрямовані на оцінку того, яким чином інструменти Спільної аграрної політики, екосхеми та інші механізми ЄС можуть більш ефективно підтримувати інклюзивну та сталу цифровізацію, особливо для малих і середніх фермерських господарств. Такі дослідження забезпечать емпіричну основу для уточнення та операціоналізації стратегічних підходів.

Висновки

Європейські фермери та політики перебувають під зростаючим тиском щодо впровадження цифрових інструментів у сільське господарство у відповідь на комплекс взаємопов'язаних криз, зокрема зміну клімату, геополітичну нестабільність, втрату біорізноманіття та залежність від агрохімікатів. У цій главі було проаналізовано сучасний стан цифровізації аграрного сектору Європи, системні бар'єри, що визначають її впровадження, а також політичні інтервенції, спрямовані на забезпечення внеску цифрових технологій у продовольчу безпеку, скорочення використання агрохімікатів і підвищення сталості.

Отримані результати свідчать, що, незважаючи на значний потенціал таких технологій, як системи точного внесення ресурсів, сенсорні мережі, інтероперабельні платформи та системи підтримки прийняття рішень, їх впровадження суттєво обмежується глибокими технічними, економічними, соціальними та політико-управлінськими бар'єрами. Ці обмеження сприяють нерівномірності цифровізації та ризику закріплення існуючих асиметрій у аграрному секторі.

Аналіз показує, що залежність від агрохімікатів, фрагментація політик і нерівність інфраструктурного розвитку продовжують становити загрозу для досягнення цілей продовольчої безпеки та сталого розвитку ЄС. Водночас стратегічна цифровізація, підтримана належною політичною рамкою, створює значні можливості для зниження цих ризиків і підвищення стійкості аграрних систем. Технології точного землеробства, цифрове управління господарствами та інтероперабельні платформи не лише підвищують ефективність і простежуваність, але й сприяють зменшенню ресурсної залежності, екологічного навантаження та соціально-економічних диспропорцій.

Реалізація цього потенціалу потребує комплексних дій. Політика має виходити за межі простого регулювання та субсидування і включати інвестиції в цифрову інфраструктуру, гармонізацію стандартів управління даними та інклюзивний розвиток цифрових

компетентностей фермерів. Існуючі політичні рамки, включаючи Спільну аграрну політику, Закон про дані та ініціативу **RePowerEU**, формують важливу основу для цифрової трансформації аграрного сектору, однак залишаються лише частково узгодженими з реальними умовами господарювання та інституційною спроможністю.

Без посилення координації, впровадження стандартів інтероперабельності та цільової підтримки малих і середніх господарств цифровізація може не зменшити, а навпаки посилити існуючі асиметрії влади та залежність від закритих пропрієтарних платформ.

Отже, зміцнення синергії між політикою та технологіями є критично важливим для ефективного впровадження цифрових інструментів в аграрному секторі. Цифрові технології можуть підвищити ефективність моніторингу та верифікації політик завдяки використанню даних у режимі реального часу, що дозволяє підвищити результативність оцінювання Спільної аграрної політики. Одним із пріоритетів є вдосконалення заходів другого стовпа CAP та їх узгодження з результат-орієнтованими підходами, що враховують цифровий моніторинг та перевірку показників сталості. Це може забезпечити більш прозоре та узгоджене впровадження екологічних цілей у межах ЄС.

Запропоновано три шляхи впровадження, які підкреслюють необхідність розвитку надійного управління даними, узгодження цифровізації з цілями зменшення ресурсного навантаження та екологічної сталості, а також формування інклюзивної цифрової інфраструктури для малих і середніх фермерських господарств. Ці підходи демонструють, що ефективність цифрових технологій залежить не лише від їх впровадження, але й від реформ у сфері управління, стимулювання та інституційного дизайну.

Слід роозуміти, що **цифровізація не є автоматично позитивним процесом.** Її результати залежать від того, як саме управляються технології, хто має до них доступ і яким чином розподіляються їхні вигоди. Забезпечення того, щоб цифрове сільське господарство сприяло формуванню більш стійкої, резилієнтної та справедливої продовольчої системи, вимагатиме подальших досліджень, скоординованих політичних дій і довгострокових інвестицій у сприятливі умови розвитку в межах Європейського Союзу та України.

Питання для обговореннчя та самоперевірки:

1. Як упровадження цифрових технологій у точному землеробстві може вплинути на зменшення втрат азоту в умовах інтенсивного вирощування зернових культур в Україні?
2. Які агрохімічні переваги та обмеження має застосування технологій змінних норм внесення добрив (VRT) на чорноземах України?
3. Як використання GPS-навігації, дронів і супутникового моніторингу може покращити ефективність застосування мінеральних добрив у різних ґрунтово-кліматичних зонах України?
4. Які проблеми інтероперабельності цифрових систем можуть виникати на українських агропідприємствах при поєднанні техніки різних виробників?
5. Як цифрові технології можуть сприяти зменшенню залежності України від імпортних мінеральних добрив у контексті агрохімічної безпеки?
6. Як цифровий моніторинг стану ґрунтів може допомогти агрохімікам в Україні точніше визначати потребу культур у фосфорі, калії та мікроелементах?
7. Які агрохімічні ризики можуть виникати через нерівномірне впровадження цифрових технологій між великими агрохолдингами та малими фермерськими господарствами в Україні?
8. Як упровадження цифрових рішень у сільському господарстві України може вплинути на ефективність використання добрив у контексті змін клімату (посухи, деградація ґрунтів)?
9. Які обмеження цифрових платформ і сервісів в Україні можуть впливати на якість агрохімічних рекомендацій (зокрема через закриті системи або залежність від іноземного програмного забезпечення)?

РОЗДІЛ 2. ВПЛИВ ВЕЛИКИХ ДАНИХ ТА СИСТЕМ ПІДТРИМКИ ПРИЙНЯТТЯ РІШЕНЬ НА ТРАНСФОРМАЦІЮ СІЛЬСЬКОГОСПОДАРСЬКИХ ПРАКТИК

2.1. Передумови та значення аналітики великих даних у сільському господарстві
2.2. Основні характеристики Big Data
2.3. Аналітика великих даних у сільськогосподарській практиці
2.4. Етичні та правові аспекти
2.5. Системи підтримки прийняття рішення
2.6. Майбутнє Big Data та СППР

2.1. Передумови та значення аналітики великих даних у сільському господарстві

Поняття Big Data (великих даних) охоплює значні обсяги структурованої та неструктурованої інформації, що безперервно генерується з різноманітних джерел. У свою чергу, аналітика великих даних являє собою процес обробки, аналізу та інтерпретації цих масивів із застосуванням сучасних методів, зокрема машинного навчання, штучного інтелекту та статистичних підходів, з метою виявлення закономірностей, формування прогнозів і підтримки обґрунтованих управлінських рішень. Використання аналітики великих даних у сільському господарстві відкриває нові можливості для підвищення стійкості продовольчих систем, інформування управлінських структур та вирішення соціально-екологічних проблем. Аналіз аграрних даних дозволяє глибше зрозуміти взаємозв'язки між виробництвом продуктів харчування та забезпеченням добробуту людини і довкілля.

Великі дані відіграють важливу роль у різних напрямах аграрної діяльності, включаючи селекцію рослин, управління відходами, формування аграрної політики, дотримання нормативних вимог і оптимізацію ланцюгів постачання. Їх впровадження сприяє підвищенню простежуваності продукції, рівня безпеки харчових продуктів та ефективності використання ресурсів, а також зменшенню втрат продукції та негативного впливу на навколишнє середовище. Основним чинником такого розвитку є активне використання даних, отриманих із сенсорних систем, супутникових зображень і метеорологічних прогнозів. Застосування сучасних технологій збору та аналізу даних дозволяє агровиробникам оцінювати стан посівів,

властивості ґрунту та погодні умови, що забезпечує прийняття більш обґрунтованих рішень і зниження виробничих ризиків.

Збір аграрних даних охоплює широкий спектр джерел, серед яких сенсори, технології дистанційного зондування, геоінформаційні системи, глобальні навігаційні системи, радіочастотна ідентифікація, системи картографування врожайності, а також соціально-економічні показники. Значна частина цих даних має неструктурований характер, що і визначає їх належність до категорії великих даних. Аналітика великих даних виступає ключовим інструментом перетворення таких різнорідних масивів у придатну для використання інформацію, забезпечуючи формування нових знань та підтримку прийняття рішень.

Завдяки здатності працювати з різними форматами інформації, забезпечувати швидку обробку та охоплювати значні обсяги даних, технології великих даних формують передумови для трансформації цифрових сервісів і обчислювальних систем. Їх застосування вже призвело до суттєвого розвитку точного землеробства, дозволяючи агровиробникам приймати рішення на основі даних у режимі реального часу. Це, у свою чергу, сприяє оптимізації використання ресурсів, підвищенню врожайності сільськогосподарських культур та загальному зростанню ефективності аграрного виробництва.

Використання великих даних стало одним із ключових чинників розвитку точного землеробства, що дозволяє здійснювати диференційований підхід до вирощування культур відповідно до їх фактичних потреб, раціонально використовувати ресурси та застосовувати моделювання для прогнозування розвитку рослин і поширення шкідників. Застосування цифрових технологій також дозволяє контролювати умови зберігання та транспортування продукції, що є особливо важливим для швидкопсувних товарів, забезпечуючи подовження терміну їх зберігання та зменшення втрат.

Серед основних проблем, які обмежують широке впровадження аналітики великих даних, слід відзначити недостатній рівень сумісності даних, обмеженість інфраструктури, а також опір впровадженню нових технологій з боку користувачів. Крім того, бракує комплексних досліджень, які б об’єктивно порівнювали переваги та недоліки різних інструментів аналітики великих даних і штучного інтелекту, а також враховували специфіку їх застосування в умовах різного рівня економічного розвитку.

2.2. Основні характеристики Big Data



Великі дані традиційно характеризуються трьома основними вимірами: обсягом, швидкістю та різноманітністю. У контексті аграрних і продовольчих систем обсяг відображає значні масиви інформації, що генеруються з різних джерел, зокрема сенсорних систем, супутникових зображень, метеорологічних спостережень, геномних досліджень, а також даних про поведінку споживачів. Швидкість визначає темпи формування, передачі та обробки даних, що є критично важливим для прийняття рішень у режимі реального часу. Різноманітність характеризує різні типи даних, включаючи структуровані, напівструктуровані та неструктуровані, які необхідно інтегрувати в єдине аналітичне середовище. У сільському господарстві це може означати об'єднання інформації про властивості ґрунту, даних дистанційного зондування, польових записів фермерів та ринкових тенденцій у межах єдиної системи аналізу.

Водночас сучасне розуміння великих даних виходить за межі лише цих трьох характеристик і передбачає не тільки накопичення інформації, але й її ефективне опрацювання з метою отримання практично значущих результатів. У зв'язку з цим до базових характеристик додаються такі параметри, як достовірність і цінність даних. Достовірність відображає рівень точності, надійності та узгодженості інформації, тоді як цінність визначає можливість використання отриманих результатів для прийняття ефективних управлінських рішень.

Таким чином формується модель «п'яти V», яка охоплює обсяг, швидкість, різноманітність, достовірність і цінність даних. Ця модель відображає комплексний підхід до роботи з великими даними, який передбачає не лише їх збирання та зберігання, але й перетворення складних і масштабних інформаційних масивів у знання, придатні для практичного застосування. Такий підхід створює основу для розвитку інтелектуальних аграрних систем, здатних ефективно обробляти

великі обсяги різнорідної інформації та підтримувати прийняття рішень у сучасному сільському господарстві.

Розглянемо цю модель на прикладі раціонального використання азотних добрив:

Обсяг (VOLUME) – Звідки беруться масиви даних?

Для розрахунку норми добрив агроному потрібно опрацювати гігабайти інформації:

- Історія врожайності за останні 5–10 років.
- Результати тисяч точкових аналізів ґрунту.
- Супутникові знімки високої роздільної здатності (NDVI).

Результат: Замість однієї цифри «скільки сипати на гектар», система має мільярди значень для кожної точки поля.

Швидкість (VELOCITY) – Рішення «на льоту»

Дані повинні оброблятися миттєво, особливо під час роботи в полі:

- Оптичні датчики на тракторі: Сканують колір листя в реальному часі й за мілісекунди дають команду форсункам збільшити або зменшити дозу азоту.
- Миттєве передавання даних через 4G/5G від дрона до розкидача добрив.

Результат: Добриво вноситься саме в той момент, коли техніка проходить над конкретною ділянкою.

Різноманітність (VARIETY) – Різні джерела даних

Система аналізує не лише кількість добрив, а й купу факторів, що на них впливають:

- Структуровані дані: Карти полів, рельєф, вміст фосфору/калію.
- Неструктуровані дані: Метеодані (вологість повітря, прогноз дощів), фотографії стану рослин з дронів.

Результат: Комплексна оцінка – якщо обіцяють засуху, система може знизити норму добрив, щоб не «спалити» рослину.

Достовірність (VERACITY) – Точність вимірювань

Помилка в даних веде до збитків. Важливо відсіяти «шум»:

- Калібрування датчиків, щоб вони не плутали тінь від хмари з дефіцитом азоту.
- Перевірка даних із датчиків вологості на цілісність (чи не вийшов датчик з ладу).

Результат: Агроном впевнений, що карта завдань для техніки побудована на правдивих показниках, а не на помилках системи.

Цінність (VALUE) - Головна мета

Це те, заради чого все робиться:

- Економічна вигода: Зменшення витрат добрив на 15–20% завдяки тому, що їх не сиплють там, де ґрунт і так багатий.
- Екологія: Менше зайвих добрив потрапляє в підземні води.
- Ефективність: Кожна гривня, вкладена в добрива, дає максимальну віддачу в центнерах зерна.

Аналітика великих даних охоплює широкий спектр інструментів та інноваційних методів обробки інформації, що включають етапи збору, зберігання, обробки та аналізу даних. У сучасних аграрних системах застосовуються різноманітні технології, зокрема інтелектуальний аналіз даних, методи машинного навчання, обробка природної мови, текстовий аналіз, розпізнавання сутностей, когнітивні обчислення, хмарні технології, оптимізаційні методи, а також кіберфізичні системи, які забезпечують інтеграцію фізичних процесів із цифровими інструментами управління.

Використання аналітики великих даних надає агровиробникам і агробізнесу можливість отримувати цінну інформацію на основі аналізу різнорідних даних. Це сприяє прийняттю більш обґрунтованих рішень щодо вибору культур, визначення строків і способів сівби, управління ризиками, оптимізації виробничих процесів, логістики, розподілу продукції, а також ефективного використання природних ресурсів, зокрема води та ґрунтів.

Незважаючи на значний потенціал, великі дані залишаються недостатньо використаним ресурсом для підвищення стійкості, продуктивності та екологічної збалансованості агропродовольчих систем. Їх ширше впровадження здатне забезпечити економічну ефективність аграрного виробництва та сприяти сталому розвитку галузі на глобальному рівні.

2.3. Аналітика великих даних у сільськогосподарській практиці

Аналітика великих даних здійснює суттєвий вплив на трансформацію сучасного сільського господарства, забезпечуючи оптимізацію використання ресурсів, удосконалення управління посівами та реалізацію диференційованих підходів до зрошення, внесення добрив і захисту рослин. Це досягається завдяки інтеграції даних, отриманих із сенсорних систем, супутникових зображень та метеорологічних прогнозів. Використання моделей машинного навчання дозволяє підвищити точність прогнозування врожайності та забезпечити раннє виявлення хвороб рослин, що перевищує ефективність традиційних методів аналізу.

Важливим аспектом є також розвиток колективних підходів до прийняття рішень, коли обмін даними між агровиробниками сприяє підвищенню якості управлінських рішень і покращенню виробничих результатів. Разом із тим залишаються невирішеними проблеми, пов'язані з якістю даних, питаннями конфіденційності, а також необхідністю підвищення рівня підготовки користувачів. Незважаючи на ці обмеження, аналітика великих даних формує ефективний інструментарій для підвищення продовольчої безпеки, ефективності виробництва та екологічної сталості аграрного сектору.

У таких напрямах, як точне землеробство, моніторинг стану посівів, оцінювання якості ґрунтів та оптимізація ланцюгів постачання, дані збираються з різних джерел, зокрема сенсорів, метеостанцій і супутникових систем, після чого використовуються для аналітичної обробки.

Застосування таких підходів забезпечує більш ефективне використання ресурсів, підвищення врожайності, зниження витрат і підтримку прийняття обґрунтованих управлінських рішень. Використання технологій Інтернету речей, різноманітних сенсорних систем і моделей прогнозування дозволяє учасникам аграрного виробництва обирати рішення, спрямовані на збереження навколишнього середовища, забезпечення продовольчої безпеки та сталий розвиток галузі.

2.3.1. Точне землеробство

Останніми роками спостерігається зростання інтересу до застосування аналітики великих даних у сільському господарстві, зокрема в межах концепції точного землеробства. Основна ідея цього підходу полягає у використанні сучасних технологій та інноваційних рішень для підтримки обґрунтованого прийняття управлінських рішень з метою оптимізації агровиробництва. Значна частина сучасних ефективних і сталих агротехнологій прямо або опосередковано базується на використанні великих даних. Аналітика великих даних дозволяє отримувати практично значущі результати, що сприяють підвищенню ефективності управління, економії ресурсів та зменшенню негативного впливу на довкілля.

Точне землеробство, також відоме як диференційоване або локально-орієнтоване землеробство, передбачає застосування інформаційних технологій з урахуванням просторової неоднорідності полів для підвищення ефективності агротехнологічних операцій. Це досягається шляхом диференційованого внесення води, добрив, засобів захисту рослин, а також проведення діагностики стану посівів.

Реалізація такого підходу базується на використанні технологій змінних норм внесення, дистанційного зондування, геоінформаційних систем для аналізу просторової варіабельності, глобальних навігаційних систем для точного позиціонування, систем моніторингу врожайності, агрохімічного обстеження ґрунтів, а також даних, отриманих із різноманітних сенсорів.

Ключові складові точного землеробства охоплюють інформаційну, технологічну та управлінську компоненти, інтеграція яких забезпечує підвищення ефективності виробництва (рис. 9). Інформаційна складова передбачає збір даних про ґрунт, погодні умови, стан рослин та інші фактори, що впливають на врожайність. Збір даних здійснюється з використанням сенсорних систем, безпілотних літальних апаратів, супутникових платформ та наземних вимірювальних засобів. Отримані дані обробляються за допомогою спеціалізованого програмного забезпечення та алгоритмів, що дозволяє формувати аналітичні висновки.

На основі цих висновків агровиробники приймають рішення щодо строків сівби, норм внесення добрив, режимів зрошення та строків збирання врожаю. Технологічна складова включає широкий спектр технічних засобів – від сенсорних пристроїв і безпілотних систем до високопродуктивної сільськогосподарської техніки, здатної виконувати автоматизовані операції. Управлінська складова базується на інтеграції всієї наявної інформації для ефективного функціонування господарства. Використання сучасних, переважно GPS-орієнтованих систем дозволяє формувати просторові набори даних, які відображають варіабельність стану поля та ефективність його обробітку, що є основою для реалізації високоточного агровиробництва.

Ключовими складовими точного землеробства є сервіси визначення місцезнаходження та технології дистанційного зондування, які забезпечують ефективний моніторинг стану посівів і своєчасне виявлення проблем. До базових елементів цієї концепції належать розгортання сенсорних систем у межах господарства, аналітична обробка даних для підтримки прийняття рішень та автоматизація окремих технологічних операцій. Збір аграрних даних здійснюється з використанням різних підходів, включаючи наземні вимірювання, дані з мобільних або транспортних платформ, а також дистанційне зондування.

Перші практичні реалізації точного землеробства були пов’язані із застосуванням систем моніторингу врожайності, які дозволяли фіксувати просторову варіабельність урожаю в межах поля. Подальший розвиток цієї концепції сприяв накопиченню значних масивів даних,

що використовуються для вдосконалення агротехнологій у наступних виробничих циклах. Активне впровадження інтернет-технологій, мобільних рішень, бездротових сенсорних мереж, геоінформаційних систем та сучасних електронних компонентів створює передумови для подальшого розвитку і масштабування точного землеробства. У результаті аграрний сектор і харчова промисловість отримують доступ до широкого спектра інструментів, що дозволяють оптимізувати виробничі процеси.

Інтелектуальний аналіз великих даних забезпечує можливість визначення оптимальних строків сівби та вибору сортів культур з урахуванням кліматичних змін, рельєфу, типів ґрунтів, а також біотичних і абіотичних факторів стресу. Крім того, застосування цифрових технологій дозволяє організувати диференційоване забезпечення господарства насінням і добривами з урахуванням просторової неоднорідності поля. Це сприяє оптимізації використання ресурсів відповідно до потенціалу врожайності окремих ділянок та потреб рослин, а також більш ефективному розподілу енергетичних і матеріальних витрат, що в підсумку забезпечує отримання стабільно високих урожаїв належної якості.

2.3.2. Моніторинг і управління агрофітоценозами

Аналітика великих даних у відносно короткий період продемонструвала значний вплив на розвиток наукових досліджень і накопичення аграрних знань, спрямованих на підвищення ефективності виробництва продовольства. У контексті сільського господарства великі дані охоплюють інтегроване використання інформаційно-комунікаційних технологій на всіх етапах агропродовольчого ланцюга - від виробництва до споживання - із залученням фермерів, агробізнесу, підприємств харчової промисловості, водогосподарських організацій та інших учасників. Використання великих даних у процесах моніторингу та управління посівами можна представити у вигляді наступних складових:

Дистанційне зондування та супутникові знімки (Remote Sensing and Satellite Imagery). Поєднує супутникові дані високої роздільної здатності з машинним навчання для моніторингу стану посівів, виявлення стресових факторів у рослин та відстеження моделей їхнього росту.

Прогностична аналітика (Predictive Analytics). Аналізує історичні дані, прогнози погоди та стан ґрунту, щоб передбачити результативність врожаю та можливі ризики.

Інтеграція даних IoT та датчиків (IoT and Sensor Data Integration). Збирає в режимі реального часу дані про вологість ґрунту, температуру та рівень поживних речовин за допомогою датчиків, встановлених безпосередньо в полі.

Виявлення шкідників та хвороб (Pest and Disease Detection). Аналізує закономірності в даних, отриманих з дронів, датчиків та погодних моделей, для раннього виявлення спалахів шкідників або захворювань.

Оцінка та оптимізація врожайності (Yield Estimation and Optimisation). Використовує моделювання даних для прогнозування врожайності на основі тенденцій росту, екологічних факторів та обсягів внесених ресурсів (зокрема добрив).

Застосування аналітики великих даних забезпечує суттєві зміни у підходах до контролю стану посівів, зокрема через отримання даних у режимі реального часу, використання прогнозної аналітики та оптимізацію використання ресурсів. Інтеграція інформації з різних джерел дозволяє формувати цілісне уявлення про стан агроекосистеми та підвищує обґрунтованість управлінських рішень. Великі дані, як складова цифровізації аграрного виробництва, передбачають використання складних інформаційних масивів, що формуються внаслідок впровадження сучасних технологій і цифрових рішень у різних бізнес-процесах.

Подальший розвиток цифрового сільського господарства, зокрема впровадження біологічних, механічних і програмних інновацій, зумовлює зростання ролі великих даних у трансформації всього виробничого циклу - від сівби до збирання врожаю. Одним із ключових чинників інтелектуалізації аграрного виробництва є розвиток аналітики аграрних даних, яка забезпечує формування нових знань і підвищення ефективності управління. У цьому процесі дедалі активніше беруть участь різні суб'єкти ланцюга постачання, використовуючи сенсорні системи та інші засоби збору й передачі інформації, що відкриває нові можливості для аграрного сектору.

Загалом, упровадження аналітики великих даних формує нову модель розвитку сільського господарства, орієнтовану на підвищення точності, ефективності та екологічної сталості виробництва. Це сприяє вирішенню глобальних викликів, таких як забезпечення продовольчої безпеки та збереження довкілля. Інтеграція великих даних у процеси моніторингу та управління посівами дозволяє агровиробникам приймати рішення на основі об'єктивної інформації, що забезпечує покращення стану рослин і підвищення врожайності.

2.3.3. Можливості для інновацій та зростання

Поступове зниження вартості технологій аналітики даних відкриває широкі можливості для підвищення ефективності та продуктивності сільськогосподарського виробництва. Використання сучасних аналітичних інструментів дозволяє оптимізувати виробничі процеси, раціонально використовувати ресурси, підвищувати надійність технічних засобів і здійснювати прогнозування результатів діяльності. Крім того, аналітика даних сприяє формуванню нових бізнес-моделей, підвищенню ефективності ланцюгів постачання та відкриває додаткові можливості для економічної монетизації даних.

Отримані аналітичні результати можуть бути використані для вдосконалення функціонування як корпоративних систем управління, так і виробничих процесів у сільському господарстві, включаючи агроекологічні аспекти. У цьому контексті важливим є формування ефективної взаємодії між усіма учасниками агропродовольчої системи, що дозволить максимально реалізувати потенціал цифрових технологій. Сучасні тенденції розвитку галузі також вимагають переорієнтації на формування нових знань і впровадження інноваційних підходів, які виходять за межі традиційних економічних і етичних моделей.

Інтеграція штучного інтелекту та аналітики великих даних стає ключовим фактором розвитку аграрного сектору, формуючи основу для накопичення агрономічних знань і розвитку локалізованого виробництва. У сучасних умовах такі технології поступово стають стандартом для сільського господарства та продовольчих систем XXI століття. Їх застосування створює передумови для суттєвого підвищення ефективності виробництва, узгодження інтенсивних і відновлюваних підходів до ведення господарства, а також забезпечення сталого розвитку галузі.

Подальший технологічний прогрес сприятиме значному зростанню продуктивності аграрного сектору. Використання штучного інтелекту та аналітики великих даних має потенціал радикально трансформувати сільськогосподарські практики, підвищуючи рівень їх ефективності та екологічної збалансованості. Упровадження цих технологій дозволить аграрному сектору адаптуватися до викликів XXI століття та забезпечити довгострокову стійкість і конкурентоспроможність.

2.4. Етичні та правові аспекти

У міру розвитку можливостей аналітики великих даних у сільському господарстві та продовольчих системах виникає

необхідність врахування низки етичних і правових питань. Особливу увагу слід приділяти захисту конфіденційності даних, кібербезпеці та забезпеченню алгоритмічної справедливості. В останні роки спостерігається значне зростання обсягів чутливої інформації, що збирається в аграрному секторі, що зумовлює потребу у дотриманні відповідних правил, стандартів і етичних принципів використання великих даних. Йдеться насамперед про відповідальне та справедливе опрацювання даних у відповідності до принципів захисту прав людини. У цьому контексті важливими є також питання інформованої згоди на збір даних та прозорості процедур їх отримання, особливо в системах точного землеробства та аграрного data mining.

2.4.1. Конфіденційність і безпека даних

У процесі аналітики великих даних накопичується значний обсяг інформації, яка може включати персональні та інші чутливі дані. У разі порушення безпеки такі дані можуть потрапити до несанкціонованих користувачів, що створює ризики як для власників інформації, так і для інших зацікавлених сторін. Наприклад, розкриття персональних даних, таких як вік, економічний стан або стан здоров'я, може призводити до дискримінаційних наслідків. У зв'язку з цим питання захисту конфіденційності та безпеки даних є критично важливими для всіх систем, що використовують великі дані.

Законодавство у сфері захисту даних і конфіденційності встановлює обмеження щодо збору, аналізу, візуалізації та обміну персональною та іншою чутливою інформацією. Для організацій агропродовольчого сектору це означає необхідність впровадження відповідних механізмів захисту даних, починаючи з етапу проєктування цифрових рішень. Сучасні сенсорні системи та технології точного землеробства мають інтегрувати елементи кібербезпеки та захисту даних уже на етапі розробки.

У сучасних цифрових продовольчих системах збирається також значний обсяг комерційної та споживчої інформації, що підвищує вимоги до її обробки та зберігання. У цьому контексті особливу роль відіграють відповідальні особи, які здійснюють управління даними, оскільки вони несуть етичну відповідальність за їх захист, безпеку та конфіденційність. Для забезпечення належного рівня захисту рекомендується використання сучасних технологій кібербезпеки, таких як шифрування даних, захищене зберігання, анонімізація інформації та впровадження вдосконалених практик управління даними.

Окремо підкреслюється необхідність комплексного управління даними протягом усього їх життєвого циклу – від збору до

використання в дослідженнях і подальшого поширення результатів. Це включає також контроль доступу до інформації з чітким визначенням дозволених сценаріїв її використання. З метою захисту комерційних і споживчих даних у певних зонах може бути обмежено використання пристроїв, здатних до збору інформації, таких як смартфони, сенсори та інші цифрові засоби реєстрації даних.

2.4.2. Дотримання нормативних вимог

Нормативно-правова відповідність має міждисциплінарне значення в умовах сучасної цифровізації та автоматизації продовольчих систем, де процеси прийняття рішень дедалі більше базуються на даних. Достовірність прогнозів у харчовому секторі безпосередньо пов'язана з цінністю бізнес-даних, їх цілісністю та суверенітетом. Водночас забезпечення конфіденційності шляхом належної анонімізації даних із одночасним їх безпечним використанням у цифрових обчислювальних середовищах є складним, але необхідним завданням сучасного етапу розвитку галузі.

Багато нормативних актів вимагають забезпечення захисту та контрольованого використання операційних даних протягом визначеного періоду їх актуальності, після чого дані можуть втрачати практичну значущість, зберігаючи при цьому історичну цінність і можливість простежуваності. У деяких випадках дані та результати їх обробки можуть бути об'єктами інтелектуальної власності третіх сторін, що потребує дотримання відповідних процедур правового захисту. У таких умовах ключову роль відіграє дотримання регуляторних вимог і наявність відповідних сертифікацій.

Сфера регулювання захисту даних охоплює низку міжнародних нормативних актів. Серед основних можна виділити Загальний регламент захисту даних Європейського Союзу (GDPR), Закон про перенесення та підзвітність медичного страхування США (HIPAA), а також законодавство Японії щодо захисту персональної інформації в приватному секторі та нормативні акти, що регулюють використання ідентифікаційних номерів у адміністративних процедурах. Ці регуляторні рамки спрямовані на забезпечення конфіденційності та безпеки персональних даних і визначають правила їх збору, обробки та використання. Дотримання цих вимог є обов'язковим для організацій у цифрових ланцюгах постачання харчової продукції, оскільки воно дозволяє уникнути правових наслідків і підтримувати довіру споживачів.

У сучасних умовах споживачі дедалі частіше вимагають прозорості щодо того, як саме використовуються технології та дані, особливо в

середовищі Інтернету речей. У зв'язку з цим регуляторні органи здійснюють контроль за даними, робочими процесами та загальною системою управління в агропродовольчих ланцюгах. Особлива роль у цьому процесі належить інформаційному управлінню, яке забезпечує захист і належне використання даних. Водночас стандарти, політики та регуляторні вимоги формуються та впроваджуються на рівні окремих підсекторів харчової системи, але потребують постійного оновлення та адаптації відповідно до технологічного розвитку.

2.5. Системи підтримки прийняття рішення

Фахівці з оцінювання ризиків у сфері агропромислового сектору загалом демонструють зростаючий інтерес до веборієнтованих технологій, зокрема до великих даних і СППР. СППР є комп'ютеризованими інформаційними системами, які використовують дані, моделі та знання для виявлення, аналізу та розв'язання проблем у складних управлінських і технологічних середовищах аграрного виробництва.

Процес прийняття рішень в агрохімічних системах є багатокритеріальним, оскільки передбачає одночасне врахування агрономічних, екологічних, економічних та технологічних факторів, які часто є взаємно суперечливими. Для таких задач застосовується багатокритеріальний аналіз рішень (МКАР), що дозволяє формалізувати складні процеси вибору оптимальних рішень у ситуаціях з багатьма альтернативами та критеріями, наприклад при виборі систем удобрення або технологій захисту рослин.

Протягом останнього десятиліття методи багатокритеріального аналізу рішень активно використовуються в медицині, екологічному менеджменті та дослідженнях кліматичних змін, однак у сфері агрохімії та безпеки харчових продуктів їх застосування залишається відносно обмеженим. Для практичної реалізації багатокритеріального аналізу рішень були розроблені комп'ютерні СППР, які поєднують дані, моделі та аналітичні інструменти для підтримки прийняття рішень у напівструктурованих і неструктурованих задачах аграрного виробництва.

Перші комп'ютерні системи підтримки прийняття рішень почали розвиватися ще у 1970-х роках і базувалися на обмежених можливостях моделювання та обробки даних. З розвитком вебтехнологій і хмарних обчислень СППР стали значно доступнішими та масштабованішими. Сьогодні вони широко застосовуються в сільському господарстві, зокрема для управління агротехнологічними процесами, оцінювання

ґрунтово-водних ресурсів та аналізу впливу кліматичних змін на агроекосистеми, включаючи ризики для безпеки харчових продуктів.

Сучасні веборієнтовані СППР є особливо ефективними завдяки можливості інтеграції даних із різних джерел (сенсори, супутникові системи, метеодані, агрохімічні аналізи) та доступу до них з різних пристроїв у режимі реального часу. У поєднанні з великими даними вони забезпечують новий рівень аналітичної підтримки агрохімічних рішень, сприяючи точнішому плануванню агротехнологічних заходів.

Окремим класом СППР є експертні системи, або системи, засновані на знаннях. Вони реалізують набір правил, що моделюють досвід експертів у конкретній предметній області. Такі системи почали застосовуватися в аграрному секторі ще з кінця 1980-х років, зокрема для діагностики хвороб рослин. Подальші дослідження продемонстрували високу ефективність експертних систем у точності діагностики та підтримці агрономічних рішень.

У сучасній агрохімії експертні системи використовуються для інтерпретації результатів аналізу ґрунтів, рекомендацій щодо дозування добрив, вибору засобів захисту рослин та управління агроекосистемами. Вони дозволяють інтегрувати кліматичні, агрохімічні та технологічні дані, формуючи рекомендації щодо оптимальних стратегій управління виробництвом. Таким чином, СППР та експертні системи є важливим інструментом цифрової трансформації агрохімії, забезпечуючи більш точне, обґрунтоване та стале прийняття рішень у сільському господарстві.

2.5.1. Веборієнтовані системи підтримки прийняття рішень (Web-based DSS) в агрохімії та агропродовольчих системах

Веборієнтовані системи підтримки прийняття рішень (Web-based DSS) передбачають використання Всесвітньої мережі Інтернет (WWW) як інфраструктурної основи для реалізації функцій підтримки рішень. У таких системах ключову роль відіграють бази даних, які забезпечують зберігання, інтеграцію та обробку інформації з різних джерел. Типова архітектура Web-DSS передбачає централізований сервер, на якому розміщено аналітичні моделі та бази даних, тоді як користувач взаємодіє із системою через «тонкий клієнт» - веббраузер (наприклад, Chrome або інший браузер) із використанням стандартних інтернет-протоколів TCP/IP.

Основною метою Web-DSS у сучасних агрохімічних системах є інтеграція метаданих із хмарних Big Data джерел із прогнозними моделями та аналітичними алгоритмами для формування обґрунтованих управлінських рішень. Такі системи забезпечують не

лише підвищення ефективності аграрних процесів, але й суттєве покращення якості рішень, що приймаються, особливо у складних багатофакторних умовах агровиробництва.

Сучасні Web-DSS, інтегровані з технологіями великих даних, дозволяють оперативно виявляти ризики, зокрема забруднення харчової продукції, та проводити оцінювання ризиків уздовж усього агропродовольчого ланцюга. У контексті агрохімії це може включати швидке виявлення перевищень залишкових кількостей агрохімікатів у продукції, оцінку екологічного навантаження та підтримку рішень щодо коригування технологій удобрення та захисту рослин.

Водночас однією з ключових проблем використання DSS у продовольчих системах залишається фрагментованість і неструктурованість даних. Дані часто надходять із різних джерел у різних форматах, що ускладнює їх інтеграцію та аналіз. Саме тому сучасні підходи поєднують Web-DSS із технологіями великих даних, що дозволяє ефективніше обробляти великі, різнорідні масиви інформації та підвищувати якість прийняття рішень у сфері безпеки харчових продуктів та агрохімічного контролю.

Web-орієнтовані системи підтримки рішень відіграють важливу роль у всьому харчовому ланцюзі, включаючи агровиробництво, переробку, логістику та реалізацію продукції. Вони сприяють підвищенню інноваційності виробництва, ефективності управління, рентабельності та якості обслуговування споживачів. У поєднанні з великими даними такі системи забезпечують можливість оперативного прийняття критичних рішень в умовах змін клімату, що впливають на виробництво, переробку, транспортування та зберігання агропродукції.

У підсумку, інтеграція Web-DSS і Big Data формує основу сучасних інтелектуальних систем агрохімічного управління, які забезпечують більш точне, швидке та науково обґрунтоване прийняття рішень у сільському господарстві.

2.5.2. Візуалізація даних у агрохімії та агропродовольчих системах

Візуалізація даних є процесом перетворення «сирих» числових і текстових даних у зрозумілу аналітичну форму, яка дозволяє інтерпретувати інформацію як цілісну картину процесів. У прикладному сенсі це графічне представлення даних, що полегшує їх сприйняття, виявлення закономірностей і прийняття рішень. В агрохімії та аграрних науках візуалізація використовується як інструмент аналізу складних багатовимірних даних, які надходять із

польових вимірювань, лабораторних аналізів ґрунтів, супутникових знімків і сенсорних систем. Вона дозволяє узагальнювати великі масиви таблиць у вигляді карт, графіків і діаграм, що значно підвищує ефективність інтерпретації результатів.

Інтеграція візуальної аналітики у системи агрохімічного моніторингу та безпеки харчових продуктів дає можливість об'єднувати різнорідні джерела даних та формувати цілісну основу для прийняття рішень. Це особливо важливо для оперативного реагування на зміни зовнішніх умов, включаючи соціальні, економічні та екологічні фактори, які впливають на агровиробництво та якість продукції.

Сьогодні існує широкий спектр інструментів для візуалізації даних - як відкритих, так і комерційних. До найбільш поширених інструментів у сфері аналізу великих даних належать мови програмування R та Python, які активно використовуються в наукових дослідженнях для побудови графіків, карт і мережевих моделей. Серед спеціалізованих середовищ слід відзначити RStudio як один із найпопулярніших інструментів для статистичного аналізу та візуалізації у науковій спільноті.

Окрім програмних мов, широко застосовуються інструменти бізнес-аналітики та дашборд-системи, такі як Tableau, Infogram, Google Charts, Grafana та D3.js. Вони дозволяють створювати інтерактивні панелі моніторингу без необхідності глибоких програмістських знань, що робить їх доступними для агрономів, агрохіміків та фахівців із управління якістю. Комерційні рішення, зокрема IBM Many Eyes і Tableau, активно використовуються для створення інтерфейсів аналізу великих масивів даних у зручному для користувача форматі.

У сфері агропродовольчих систем прикладом впровадження таких технологій є використання платформ FAOSTAT та FOSCOLLAB, які застосовують інструменти візуалізації для представлення статистичних даних про продовольчу безпеку, якість харчових продуктів і глобальні аграрні тенденції. Подібні системи демонструють, як візуалізація даних може підвищувати доступність аналітичної інформації для фахівців агрохімічного та продовольчого секторів, сприяючи більш обґрунтованим управлінським рішенням.

2.5.3 Структура ефективного аналізу великих даних і систем підтримки прийняття рішень

Аналіз великих масивів даних в агрохімічних та аграрних інформаційних системах може призводити до великої кількості різнорідних результатів, частина з яких є надлишковою або навіть може

вводити в оману та негативно впливати на якість прийняття рішень. У практичній діяльності агрохіміка це особливо актуально при роботі з багатофакторними даними ґрунтового аналізу, супутникового моніторингу, метеорологічних спостережень і даних застосування добрив.

Хоча досвід і професійна інтуїція фахівця можуть допомагати відфільтровувати нерелевантні результати, такий підхід не є масштабованим і не забезпечує стабільної ефективності в умовах великих агропідприємств або цифрових платформ управління агровиробництвом. Тому ключове значення має попередня обробка даних, яка дозволяє структурувати інформацію, усунути шум, заповнити пропуски та підготувати дані для подальшого аналізу. У цьому процесі використовуються як накопичені дані попередніх періодів, так і знання, отримані з попередніх управлінських рішень і рекомендаційних систем.

Ефективність систем підтримки прийняття рішень значно підвищується за рахунок інтеграції трьох ключових компонентів: методів інтелектуального аналізу даних (data mining), експертних знань у предметній області агрохімії та управлінської інформації. Така інтеграція дозволяє формувати більш точні та обґрунтовані рекомендації для прийняття рішень як на рівні окремого поля, так і на рівні агропідприємства в цілому.

Класична структура систем підтримки прийняття рішень (СППР) включає чотири основні взаємопов’язані компоненти:

- попередню обробку даних;
- аналіз даних;
- модуль прийняття рішень;
- компонент представлення та отримання інформації для користувача.

Блок попередньої обробки даних

Блок попередньої обробки даних у системах підтримки прийняття рішень в агрохімії виконує функцію керування та первинної підготовки даних перед їх аналітичним опрацюванням. У цьому модулі здійснюється доступ до інформації як із внутрішніх баз даних агропідприємства (результати агрохімічного аналізу ґрунтів, історія внесення добрив, агротехнічні операції), так і з зовнішніх джерел, включаючи системи моніторингу довкілля, супутникові сервіси, метеорологічні платформи та системи аграрного раннього попередження.

У сучасних агрохімічних системах важливим джерелом даних є потокові (streaming) сервіси, що забезпечують безперервне надходження інформації з сенсорів ґрунту, станцій кліматичного моніторингу та IoT-пристроїв. Отримані дані проходять етапи очищення, нормалізації, синхронізації та інтеграції, після чого передаються до аналітичного блоку для подальшої обробки.

Ключова роль цього компонента полягає у забезпеченні якості даних, їх актуальності та контекстуальної узгодженості. Саме на цьому етапі відбувається об'єднання різнорідних джерел інформації, що дозволяє сформувати цілісну базу для агрохімічного аналізу та підвищити достовірність подальших рішень.

Блок аналізу даних

Блок аналізу даних є центральним аналітичним компонентом систем підтримки прийняття рішень в агрохімії. Він включає набір математичних, статистичних та інтелектуальних моделей, що застосовуються для інтерпретації складних багатовимірних аграрних даних. До таких моделей належать статистичний аналіз, моделі прогнозування врожайності, оптимізаційні алгоритми, аналіз чутливості, а також методи зворотного моделювання для оцінки впливу агрохімічних факторів на стан рослин.

Оброблені дані, отримані з попереднього блоку, використовуються для побудови моделей, що дозволяють оцінювати потреби культур у поживних елементах, прогнозувати ефективність внесення добрив, а також моделювати сценарії розвитку агроекосистем залежно від змін кліматичних і ґрунтових умов.

Вибір конкретного аналітичного алгоритму здійснюється з урахуванням особливостей предметної області, типу даних та поставленої агрономічної задачі. Наприклад, для оцінки просторової варіабельності ґрунтових властивостей можуть застосовуватися геостатистичні методи, тоді як для прогнозування врожайності - методи машинного навчання.

Основна функція цього модуля полягає у формуванні обґрунтованих аналітичних результатів, які відображають реальний стан агросистеми та слугують основою для подальшого прийняття рішень у сфері агрохімічного менеджменту.

Блок прийняття рішень (Decision-making unit)

Блок прийняття рішень у системах підтримки прийняття рішень для агрохімії виконує функцію інтерпретації аналітичних результатів і формування практичних управлінських рекомендацій. На цьому етапі

система об’єднує результати модулів аналізу даних, експертні знання та організаційні вимоги агропідприємства для формування альтернативних варіантів рішень.

У контексті агрохімії це можуть бути рекомендації щодо норм і строків внесення мінеральних добрив, вибору форм азоту, фосфору або калію, коригування технологій живлення рослин залежно від фаз розвитку культури, а також оцінка ризиків надлишкового або недостатнього внесення агрохімікатів.

Цей компонент потребує активної взаємодії користувача з системою через інтерфейс у вигляді інтерактивної панелі (dashboard), що дозволяє агрохіміку переглядати аналітичні результати, порівнювати сценарії та обирати оптимальні рішення відповідно до виробничих цілей господарства. Користувач також може задавати параметри моделей і впливати на вибір алгоритмів аналізу залежно від конкретної агротехнологічної ситуації.



Відтак, остаточне рішення формується в межах множини альтернатив, визначених системою, і вибирається з урахуванням агрономічної доцільності, економічної ефективності та екологічної безпеки.

Блок інсайтів (Insights component)

Блок інсайтів виконує функцію накопичення та управління знаннями, що формуються в процесі функціонування системи підтримки прийняття рішень. Його основне завдання полягає у перетворенні результатів прийнятих рішень у структуровані знання,

які можуть бути використані для подальшого вдосконалення процесів аналізу та планування.

У агрохімічному контексті цей компонент забезпечує зворотний зв'язок щодо ефективності прийнятих рішень, наприклад оцінку результатів внесення добрив, відповідність прогнозованої та фактичної врожайності, а також аналіз впливу агрохімічних заходів на стан ґрунту та рослин.

Блок інсайтів тісно пов'язаний із процесами управління знаннями, включаючи їх структурування, фільтрацію, збереження та повторне використання. Це дозволяє формувати базу досвіду, яка з часом підвищує точність моделей і якість прогнозів.

Крім того, цей компонент забезпечує можливість коригування критеріїв якості та пріоритетів прийняття рішень у разі зміни агроекологічних умов або виробничих вимог. Отримані інсайти можуть бути використані аналітичними модулями для оцінки ефективності попередніх прогнозів і підвищення точності майбутніх моделей, що робить систему більш адаптивною та самонавчальною в довгостроковій перспективі.

2.6. Майбутнє та СППР

Інновації у сфері геномних досліджень, Big Data, аналітики даних та інформаційних технологій суттєво змінюють підходи до прийняття рішень у сільському господарстві, агрохімії та харчових системах. Сьогодні дані самі по собі не мають практичної цінності - ключову роль відіграє саме аналітика великих даних, яка дозволяє перетворити їх на знання для прийняття рішень. У цьому контексті Big Data Analytics стає окремим стратегічним напрямом, який активно розвивається як у науковій, так і в прикладній сфері агробізнесу.

Інтеграція Big Data з системами підтримки прийняття рішень (СППР) відкриває нові можливості для агрохімії, зокрема у прогнозуванні потреб рослин у поживних елементах, оцінці ризиків деградації ґрунтів, оптимізації внесення добрив та підвищенні ефективності логістики агрохімічних ресурсів. Такі підходи дозволяють мінімізувати час обробки різнорідних потоків даних і забезпечують більш точні та своєчасні рекомендації для агровиробництва.

Важливим напрямом розвитку є використання історичних та потокових даних для виявлення закономірностей у розвитку агроекосистем. У агрохімії це включає аналіз даних ґрунтових обстежень, супутникового моніторингу, метеорологічних спостережень, сенсорних мереж, а також даних про врожайність і внесення добрив. Такий підхід дозволяє будувати системи раннього

попередження щодо дефіциту елементів живлення або ризиків зниження продуктивності культур.



Big Data разом із СППР також стикаються з низкою викликів, зокрема нестачею кваліфікованих фахівців у сфері агроданих, високою вартістю впровадження технологій, а також складністю інтеграції різнорідних джерел даних у єдину систему. Додатковою проблемою є необхідність забезпечення об'єктивності аналізу та уникнення викривлень у великих масивах аграрних даних. Попри складності майбутнє Big Data та СППР в агрохімії виглядає перспективним, особливо у зв'язку з впливом кліматичних змін, які безпосередньо впливають на потреби рослин у добривах, динаміку ґрунтових процесів і ефективність агротехнологій. Інтегровані СППР на основі Big Data вже розробляються в межах міжнародних дослідницьких програм і ініціатив, що спрямовані на створення інтелектуальних систем управління агровиробництвом.

Автоматизований текстовий аналіз наукових думок

Сучасна література демонструє зростаючу цінність застосування лінгвістичних та статистичних методів аналізу цифрової текстової інформації в аграрних науках, зокрема в агрохімії та системах моніторингу сільськогосподарських ризиків. Поряд із розвитком IoT-сенсорів та супутникового моніторингу, значний обсяг критично важливої інформації про стан агроекосистем міститься у текстових джерелах: наукових публікаціях, звітах регуляторних органів, агрономічних рекомендаціях та галузевих повідомленнях.

У цьому контексті особливу роль відіграють наукові бази даних і відкриті ресурси аграрних організацій, які містять експертні висновки щодо ґрунтових процесів, агрохімічних ризиків, застосування добрив і засобів захисту рослин. Потенціал автоматизованого текстового аналізу таких джерел у агрохімії поки що використовується недостатньо. Методи text mining можуть бути застосовані для виявлення нових агрохімічних ризиків, аналізу тенденцій використання добрив і пестицидів, а також для систематизації наукових рекомендацій щодо управління родючістю ґрунтів.

Наприклад, аналіз частоти згадування певних агрохімічних сполук у наукових публікаціях або експертних висновках дозволяє виявляти тенденції їх використання та потенційні екологічні ризики. Також

можливе автоматичне виділення типових аргументативних структур у наукових текстах для покращення інтерпретації складних агрохімічних концепцій і підвищення доступності знань для практикуючих агрономів та агрохіміків.

Останні дослідження у сфері аграрних наук і Big Data активно використовують текстову аналітику для моніторингу та оперативного реагування на екологічні та агротехнічні загрози, зокрема в умовах кліматичних змін. Джерелами інформації виступають наукові бази даних, онлайн-платформи, регуляторні документи, а також соціальні та професійні аграрні мережі.

Серед прикладів практичного застосування можна відзначити системи автоматизованого моніторингу аграрних ризиків, які використовують алгоритми машинного навчання для класифікації та ранжування інформації про інциденти у сфері агровиробництва. Такі підходи дозволяють підвищити швидкість виявлення проблем, пов'язаних із агрохімічними процесами, та покращити ефективність прийняття рішень у системах аграрного управління та безпеки.

Висновки

Такі системи поєднують дані з різних джерел – дистанційного (частіше супутникового) моніторингу агрофітоценозів, агрометеорологічних станцій, лабораторних аналізів ґрунту, баз даних агрохімічних препаратів та моделей кліматичних змін. Це створює основу для формування нових поколінь СППР, здатних підтримувати агрохіміків у прийнятті більш точних, економічно обґрунтованих і екологічно безпечних рішень у контексті сталого розвитку агросистем.

Питання для обговорення та самоперевірки

1. Як аналітика великих даних трансформує парадигму від точного землеробства до прескриптивного землеробства?
2. Які ключові технологічні компоненти забезпечують функціонування систем точного землеробства на основі Big Data?
3. У чому полягає роль геоінформаційних систем (GIS) у зборі, аналізі та інтерпретації аграрних даних?
4. Як інтеграція FMIS і сервісів точного землеробства (на прикладі ifarma/PreFer) вирішує проблему інтероперабельності даних?

5. Які переваги дає використання регулярної просторової сітки (grid) у порівнянні з полігональними або векторними моделями даних?

6. Які основні джерела аграрних Big Data і як вони інтегруються в єдину аналітичну систему?

7. Яким чином машинне навчання підвищує точність прогнозування врожайності та діагностики хвороб рослин?

8. Які основні етичні ризики виникають при використанні Big Data в аграрному секторі, і як вони можуть бути мінімізовані?

9. Як нормативно-правове регулювання (GDPR, HIPAA тощо) впливає на обробку аграрних і продовольчих даних?

10. Які ключові бар'єри (технологічні, організаційні, соціальні) обмежують широке впровадження Big Data у сільському господарстві та харчових системах?

11. Як інтеграція Big Data змінює архітектуру сучасних СППР в агрохімічних системах?

12. Поясніть, як взаємодіють блоки попередньої обробки, аналізу даних та прийняття рішень у складних аграрних СППР.

13. Які переваги та ризики використання моделей машинного навчання в аналітичному блоці СППР?

14. Як забезпечити якість, актуальність і сумісність даних у багатоджерельних агрохімічних СППР?

15. У чому полягає роль експертних знань у сучасних СППР, заснованих на Big Data?

16. Як СППР можуть підтримувати прийняття рішень щодо оптимізації систем удобрення в умовах просторової мінливості ґрунтів?

17. Які фактори обмежують масштабованість СППР у сільському господарстві та як їх можна подолати?

18. Як інтерпретованість моделей впливає на довіру користувачів до результатів СППР?

19. Яким чином блок інсайтів може підвищити ефективність довгострокового агрохімічного менеджменту?

20. Чи можливий перехід від підтримки рішень до повністю автономного прийняття рішень у агрохімії? Обґрунтуйте позицію.

РОЗДІЛ 3. ТЕХНОЛОГІЯ ЦИФРОВИХ ДВІЙНИКІВ ДЛЯ ІНТЕЛЕКТУАЛЬНОГО ЗЕМЛЕРОБСТВА

3.1. Розвиток технологій цифрових двійників
3.2. Огляд пов'язаних досліджень
3.3. Технологія цифрових двійників
3.4. Взаємодія технологій у цифровому двійнику
3.5. Цифровий двійник у сільськогосподарських застосуваннях
3.6. Перспективи розвитку цифрових двійників

3.1. Розвиток технологій цифрових двійників

Прийняття рішень на основі даних стає дедалі більш доступним завдяки розвитку обчислювальних технологій, які сьогодні здатні виконувати завдання, що раніше були притаманні виключно людині, зокрема складні комунікації та розпізнавання закономірностей. Сучасні розумні фермерські господарства використовують передові технології, такі як Інтернет речей, великі дані, штучний інтелект і автоматизація, на всіх етапах виробництва аграрної продукції - від вирощування і збору врожаю до пакування, транспортування та споживання. Поєднання цих технологій значно підвищує ефективність управління аграрними системами, забезпечуючи широкий спектр переваг. Зокрема, пристрої Інтернету речей, включаючи сенсори, забезпечують збір значних обсягів даних щодо властивостей ґрунту, параметрів рослин, погодних умов і роботи обладнання, що створює основу для ефективного управління господарством.

Розвиток зазначених технологій дозволяє вийти за межі суто фізичних систем, формуючи розширене інформаційне середовище та поглиблене розуміння функціонування об'єктів. Центральне місце в цьому процесі займає концепція цифрових двійників, яка забезпечує детальне й високоточне представлення фізичних систем, значно перевершуючи можливості традиційних підходів до моделювання та симуляції. Використовуючи дані, що надходять у реальному часі, цифрові двійники здійснюють їх збирання, структурування, обробку та аналіз, формуючи цифрову репрезентацію фізичних об'єктів. Це дозволяє здійснювати точний моніторинг і прогнозування як поточних, так і майбутніх станів систем, а також реконструкцію і вдосконалення існуючих моделей, технологічних процесів і управлінських рішень.

Інтернет речей і цифрові двійники об'єднує спільна орієнтація на використання ресурсів. У контексті Інтернету речей під ресурсами розуміють пристрої, підключені до мережі, які забезпечують взаємодію між користувачами та технічними системами як безпосередньо, так і

через програмні платформи. У межах концепції цифрових двійників поняття ресурсів є ширшим і охоплює не лише фізичні пристрої, але й активи, об'єкти та їхні віртуальні представлення. Обидва підходи базуються на принципі переважання взаємодії типу «машина-машина», що дозволяє мінімізувати участь людини у процесах управління.

Формування інтелектуальних систем цифрових двійників передбачає використання складних алгоритмів штучного інтелекту для обробки накопичених даних. Інтелектуальність таких систем досягається завдяки здатності цифрового двійника ідентифікувати стан об'єкта, оптимізувати його функціонування та приймати динамічні рішення на основі інформації, отриманої як із фізичних сенсорів, так і з віртуальних моделей. Це відкриває нові можливості для побудови адаптивних, ефективних і стійких аграрних систем майбутнього.

Використання цифрових двійників у сільському господарстві має потенціал кардинально трансформувати аграрні практики шляхом створення віртуальних моделей реальних об'єктів і процесів. Такий підхід забезпечує можливість безперервного моніторингу, моделювання та оптимізації в режимі реального часу. Подібні системи здатні відтворювати функціонування цілих господарств, включаючи рослинницькі та тваринницькі компоненти, точно прогнозувати результати та відпрацьовувати різні сценарії розвитку подій на основі актуальних даних.

У контексті аграрного виробництва цифрові двійники формують безперервний інформаційний обмін між матеріальними ресурсами господарства, біологічними процесами та обчислювальними моделями, забезпечуючи користувачів аналітикою на основі даних, інструментами прогнозування та засобами оперативного управління. Це означає перехід від традиційного реактивного ведення господарства до проактивного, адаптивного та оптимізованого прийняття рішень. На відміну від статичних цифрових моделей, цифрові двійники забезпечують постійний моніторинг, навчання на основі зворотного зв'язку та моделювання майбутніх сценаріїв, що робить їх особливо цінними для систем розумного землеробства.

З урахуванням активного впровадження в аграрну сферу сенсорів Інтернету речей, безпілотних літальних апаратів, периферійних обчислень і алгоритмів штучного інтелекту, формується необхідна цифрова інфраструктура для широкого застосування цифрових двійників. З науково-практичної точки зору інтеграція цієї технології є важливою, оскільки вона відкриває можливості для оптимізації використання ресурсів, підвищення стійкості аграрних систем, забезпечення простежуваності процесів і зменшення негативного

впливу на довкілля. Цифрові двійники дозволяють подолати обмеження традиційних підходів до моніторингу та прогнозування, створюючи віртуальні середовища для тестування управлінських рішень до їх впровадження в реальних умовах.

На рисунку 3.1 наведено загальний огляд технології цифрових двійників. Водночас, незважаючи на значний потенціал, їх впровадження в аграрній сфері наразі перебуває на початковій стадії. Це зумовлено складністю аграрних систем, які характеризуються впливом великої кількості випадкових чинників, зокрема погодних умов, властивостей ґрунту та особливостей росту рослин. Багато з цих факторів мають стохастичний характер і не піддаються повному контролю, що значно ускладнює моделювання порівняно з промисловими системами.

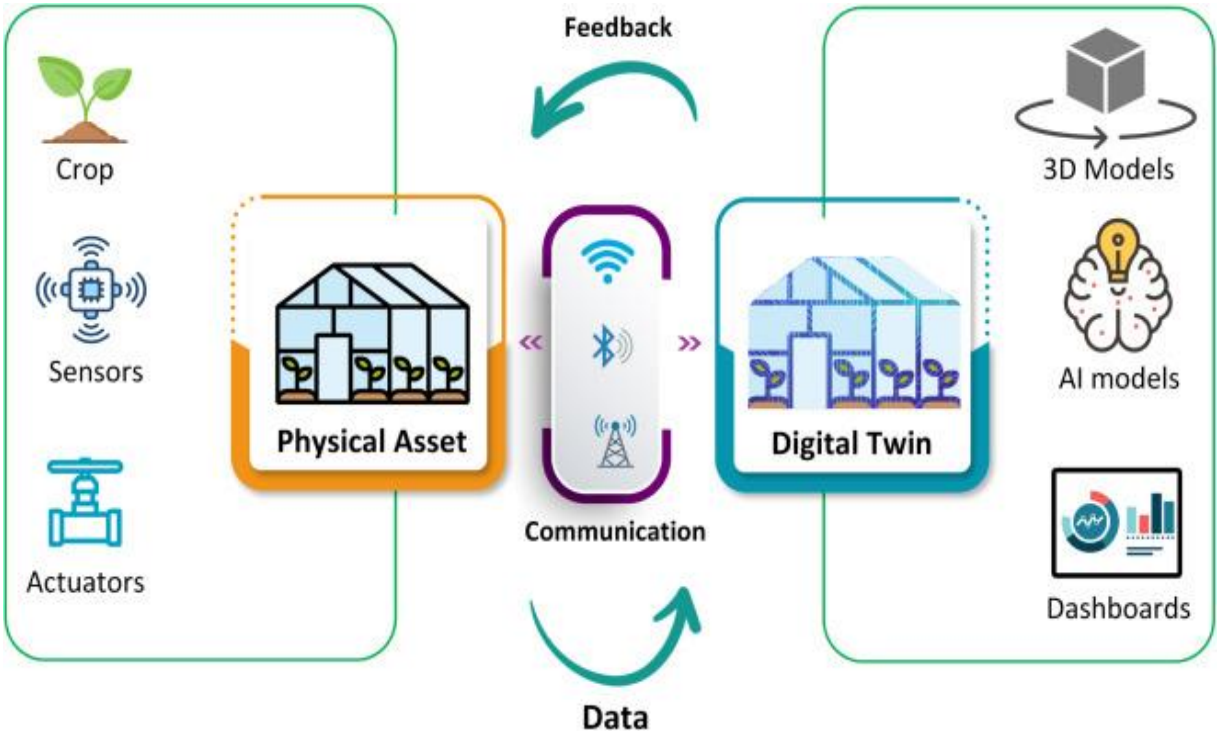


Рис. 3.1. Огляд технології цифрових двійників

Додатковим викликом є великі площі та неоднорідність сільськогосподарських угідь, що вимагає отримання детальних просторових і часових даних. Це робить процес збору інформації технічно складним і економічно витратним. Водночас стрімкий розвиток аналітики даних, технологій Інтернету речей і штучного інтелекту поступово знижує ці бар'єри, відкриваючи перспективи для широкого впровадження цифрових двійників у системах точного землеробства.

3.2. Огляд пов’язаних досліджень

Концепція цифрових двійників останніми роками привертає значну увагу в аграрній сфері, що підтверджується численними дослідженнями, присвяченими оцінці її потенціалу для підтримки прийняття рішень, оптимізації ресурсів і моніторингу систем. У наукових роботах розглядаються різні аспекти застосування цифрових двійників, зокрема управління ґрунтом і зрошенням, рослинництво, а також післязбиральна обробка продукції. При цьому окремі дослідження зосереджуються на визначенні ключових викликів і перспектив подальших наукових розвідок, проте не завжди охоплюють повною мірою ширший технологічний контекст, який забезпечує розвиток цифрових двійників.

Систематичні огляди літератури дозволяють структурувати сучасний стан досліджень у цій галузі та виділити основні напрями застосування. Зокрема, встановлено, що цифрові двійники використовуються у таких сферах, як міське та контрольоване землеробство, тваринництво, проєктування продукції, ланцюги постачання та створення доданої вартості, а також політика, екологія та інфраструктура. Важливим аспектом є класифікація систем за рівнем інтеграції цифрових двійників, серед яких виділяють модельний рівень, частково інтегровані та повністю інтегровані рішення. Найбільш поширеними на сьогодні є частково інтегровані системи, які, попри свою незавершеність, відіграють важливу роль у формуванні практичних підходів до розроблення та впровадження цифрових двійників. Повністю інтегровані системи, що включають збір даних у реальному часі, динамічне моделювання поведінки об’єктів і механізми зворотного зв’язку, наразі представлені обмеженою кількістю прикладів.

Дослідження також демонструють зростаючий інтерес до використання цифрових двійників у контексті сталого розвитку сільського господарства. Запропоновані концептуальні підходи передбачають створення відкритих, масштабованих і стійких систем, здатних сприяти зменшенню викидів парникових газів, підвищенню ефективності використання ресурсів і оптимізації виробничих процесів. У цьому контексті розробляються концептуальні моделі інтеграції цифрових двійників у системи розумного землеробства, зокрема для задач управління азотним живленням рослин.

Поряд із загальними підходами, окремі дослідження зосереджуються на вузькоспеціалізованих напрямах аграрного виробництва, таких як тепличне господарство, гідропоніка та тваринництво. У сфері тепличного виробництва цифрові двійники

розглядаються як перспективний інструмент для побудови інтелектуальних систем керування на основі даних. Наявні розробки здебільшого орієнтовані на моніторинг і регулювання мікроклімату, енергоспоживання та освітлення, тоді як більш складні функції, пов'язані з прогнозуванням і рекомендаційною підтримкою, перебувають на стадії становлення. У гідропонних системах цифрові двійники можуть забезпечувати підтримку всіх етапів життєвого циклу - від проєктування до експлуатації, моніторингу, оптимізації та технічного обслуговування. У тваринництві застосування цифрових двійників пов'язане з розвитком концепції Agriculture 5.0 і спрямоване на підвищення добробуту тварин, ефективності управління та продуктивності виробництва. Водночас впровадження таких рішень супроводжується низкою обмежень, серед яких високі початкові витрати, проблеми безпеки даних, недостатня сумісність систем і потреба у підвищенні кваліфікації користувачів.

Окремі дослідження аналізують сучасний стан і відкриті проблеми розвитку цифрових двійників на основі широкого масиву наукових публікацій, що дозволяє виявити основні тенденції, архітектурні підходи та виклики. Встановлено, що попри розширення функціональних можливостей цифрових двійників, залишається низка суттєвих проблем, зокрема точне відтворення характеристик і поведінки фізичних об'єктів у віртуальному середовищі.

У цілому результати численних оглядів підтверджують, що цифрові двійники є важливим інструментом підвищення ефективності аграрного виробництва, забезпечуючи покращення процесів прийняття рішень, оптимізацію операцій та моніторинг у реальному часі в різних типах господарств. Водночас більшість наявних досліджень зосереджені переважно на прикладних аспектах використання цифрових двійників і недостатньо розкривають глибинні технологічні основи їх функціонування.

Особливої уваги потребує аналіз сучасних технологій, що забезпечують реалізацію цифрових двійників, зокрема федеративного навчання, моделей TinyML і периферійних обчислень, які відіграють ключову роль у побудові ефективних і масштабованих систем. Попри наявність досліджень, присвячених викликам і перспективам розвитку, існує потреба у комплексному підході, що поєднує технологічні аспекти, практичні виклики та новітні тенденції. У цьому контексті представлений підхід відрізняється акцентом на глибокому аналізі технологічного підґрунтя, визначенні ключових інструментів реалізації, а також узагальненні сучасних тенденцій, що сприяють

ефективному впровадженню цифрових двійників у системах розумного сільського господарства.

3.3. Технологія цифрових двійників

Із самого початку розвитку обчислювальної техніки цифрові моделі реальних систем відігравали важливу роль у програмному забезпеченні та різноманітних комп'ютерних застосуваннях. В аграрних системах такі моделі можуть бути представлені у вигляді простих CAD-креслень сільськогосподарської техніки, віртуальних моделей і схем розміщення зерносховищ або інших інфраструктурних об'єктів. Розвиток подібних цифрових представлень сприяв створенню високорозвинених систем автоматизованого проєктування, підтримки виробничих процесів і управління різними видами діяльності.

Водночас концепція цифрового двійника виходить за межі звичайного віртуального відображення об'єкта і передбачає електронне відтворення сутнісних характеристик динамічної фізичної системи в режимі реального часу. На ранніх етапах цифрові двійники використовувалися переважно як інструмент технічного обслуговування, зокрема для безперервного контролю стану конструкцій літальних апаратів. Згодом підхід було розширено до створення повноцінних цифрових копій об'єктів, здатних відтворювати їх життєвий цикл і оцінювати експлуатаційні характеристики.

Подальший розвиток цієї концепції забезпечив її поширення в різних галузях, де основною метою стало підвищення ефективності процесів за рахунок їх динамізації та оптимізації. Таким чином, цифрові двійники трансформуються з інструмента спостереження у комплексну технологію підтримки прийняття рішень, яка інтегрує моделювання, аналіз і управління в єдиному інформаційному середовищі.

3.3.1. Цифрова модель, цифрова тінь і цифровий двійник

Поняття цифрової моделі, цифрової тіні та цифрового двійника відображають еволюцію підходів до цифрового відтворення об'єктів фізичного світу. Вони є ключовими елементами процесу цифрової трансформації та відрізняються передусім рівнем інтеграції між фізичною та цифровою системами.

Цифрова модель - це статичне цифрове представлення фізичного об'єкта, який може існувати або лише проєктуватися. Така модель не передбачає автоматичного обміну даними між фізичною та цифровою складовими. Вона може бути реалізована у вигляді комп'ютерних моделей ресурсів, математичних моделей виробів або інших форм

опису. Оновлення даних можливе лише вручну, тому зміни у фізичному об'єкті не відображаються автоматично в цифровій моделі, так само як і зміни в моделі не впливають безпосередньо на реальний об'єкт.

Цифрова тінь є проміжним етапом розвитку, для якого характерна наявність автоматизованого, але одностороннього обміну даними - від фізичного об'єкта до цифрового. У цьому випадку будь-які зміни у фізичній системі автоматично відображаються в її цифровому представленні. Водночас зворотний вплив відсутній: зміни в цифровій моделі не передаються до фізичного об'єкта. Такий підхід забезпечує можливість моніторингу та аналізу в режимі реального часу, проте не передбачає активного керування системою.

Цифровий двійник є найбільш розвиненою формою інтеграції, яка передбачає двосторонній обмін даними між фізичним об'єктом і його цифровим представленням. У такій системі зміни в одній складовій миттєво відображаються в іншій, що забезпечує не лише моніторинг, але й можливість впливу цифрової моделі на фізичний об'єкт. Це створює умови для проведення складних симуляцій, прогнозування та оптимізації процесів із подальшою реалізацією рішень у реальному середовищі.

3.3.2. Технології, що забезпечують функціонування цифрових двійників

Цифровий двійник доцільно розглядати не як окрему технологію, а як складну інтегровану систему, що поєднує широкий спектр взаємопов'язаних технологічних рішень. Він виступає інтелектуальним віртуальним представленням фізичного об'єкта, забезпечуючи безперервний і двосторонній обмін інформацією між фізичним і цифровим середовищами. Конкретний набір технологій, що формують цифровий двійник, може суттєво відрізнятися залежно від сфери застосування та поставлених завдань.

Ключову роль у формуванні цифрового двійника відіграють технології Інтернету речей, які забезпечують генерацію даних. До них належать сенсори, що здійснюють збір інформації в режимі реального часу, а також виконавчі механізми, які реалізують керуючі впливи. Важливим компонентом є також технології зв'язку, що гарантують надійну та безперебійну передачу даних між елементами системи.

Для підвищення рівня безпеки та довіри до даних застосовуються технології розподілених реєстрів, зокрема ***блокчейн***, які забезпечують цілісність і незмінність інформації в децентралізованих середовищах. Інфраструктурну основу цифрових двійників формують

обчислювальні парадигми, такі як крайові, хмарні та туманні обчислення, що забезпечують масштабованість, низькі затримки та ефективний обмін даними між компонентами системи.

Важливим елементом є інструменти моделювання та взаємодії з віртуальними об'єктами, включаючи тривимірне моделювання, середовища імітаційного моделювання, а також технології віртуальної та доповненої реальності. Вони дозволяють детально відтворювати фізичні об'єкти та забезпечують інтерактивну взаємодію з ними.

Центральне місце у функціонуванні цифрових двійників займає інтелектуальна обробка даних на основі технологій штучного інтелекту. Вона забезпечує проведення складного аналізу, виявлення закономірностей і підтримку автономного прийняття рішень. До таких технологій належать машинне та глибинне навчання, обробка природної мови, нечітка логіка та комп'ютерний зір.

Додатково важливу роль відіграють сучасні підходи до розподіленого навчання моделей, зокрема федеративне навчання, яке дозволяє здійснювати спільне навчання моделей на децентралізованих пристроях із збереженням конфіденційності даних. У свою чергу, технологія TinyML забезпечує можливість виконання алгоритмів штучного інтелекту безпосередньо на пристроях із обмеженими обчислювальними ресурсами, що сприяє реалізації аналітики в реальному часі на периферійному рівні.

3.3.3. Інтернет речей



Інтернет речей відіграє фундаментальну роль у реалізації та забезпеченні ефективного функціонування систем цифрових двійників, особливо в умовах розумного сільського господарства. Він являє собою розгалужену мережу взаємопов'язаних фізичних пристроїв, до яких належать сенсори, виконавчі механізми, вбудовані системи та комунікаційні інтерфейси, що спільно забезпечують збір, передачу й, у певних випадках, обробку даних із фізичного середовища. В аграрному секторі така інфраструктура виступає ключовою ланкою, яка поєднує

реальні умови функціонування господарства з їх цифровими відображеннями.

Дані, отримані за допомогою пристроїв Інтернету речей, формують основу для створення цифрових представлень сільськогосподарської техніки, тепличних комплексів, полів, систем тваринництва та інших елементів аграрного виробництва. Ці представлення не є статичними, а функціонують як динамічні моделі, що безперервно оновлюються в режимі реального часу відповідно до змін у фізичній системі.

Безперервний збір даних у реальному часі, який забезпечується технологіями Інтернету речей, дозволяє цифровим двійникам формувати цілісне та високоточне уявлення про стан аграрної екосистеми. Сенсори, розміщені на різних об’єктах, забезпечують надходження екологічної, біологічної та технологічної інформації, яка використовується для побудови та актуалізації цифрового двійника. Водночас важливу роль відіграють виконавчі механізми, що забезпечують реалізацію керуючих впливів і виступають інтерфейсом між цифровими рішеннями та фізичними діями.

Інтеграція сенсорів і виконавчих пристроїв у єдиний контур цифрового двійника створює передумови для автоматизації, дозволяючи інтелектуальним системам оперативно реагувати на зміну умов без постійного втручання людини. Для забезпечення стабільної роботи такої системи необхідні надійні комунікаційні технології. Вибір протоколів зв’язку в аграрних застосуваннях визначається вимогами до пропускної здатності, територіальним покриттям, енергоспоживанням і доступністю мережевої інфраструктури.



З метою підвищення швидкодії та ефективності обробки даних у системах цифрових двійників дедалі ширше застосовуються периферійні обчислення, що дозволяють виконувати попередню обробку даних безпосередньо поблизу джерела їх виникнення. Це сприяє зменшенню затримок, оптимізації використання мережевих ресурсів і забезпеченню швидкого реагування системи.

Ефективність функціонування цифрових двійників на основі Інтернету речей значною мірою залежить від достовірності, безпеки та надійності даних. У цьому контексті дедалі більшого значення набувають технології розподілених реєстрів, зокрема блокчейн, які забезпечують прозорість, захищеність і відстежуваність інформаційних потоків у розподілених аграрних системах, що є важливим чинником підвищення довіри до цифрових рішень.

3.3.4. Блокчейн

Технологія блокчейн дедалі більше розглядається як одна з ключових основ для побудови безпечних, прозорих і надійних систем цифрових двійників. У міру того як цифрові двійники еволюціонують у складні, взаємопов'язані екосистеми, що включають генерацію даних, синхронізацію моделей і автономне прийняття рішень, зростає потреба в надійних децентралізованих механізмах перевірки та управління інформаційними потоками.

У багатьох застосуваннях цифрових двійників, особливо тих, що базуються на Інтернеті речей, формується значний обсяг даних, який безперервно генерується розподіленими сенсорами та виконавчими пристроями. Забезпечення автентичності, простежуваності та незмінності цих даних є критично важливим для достовірності та надійності функціонування цифрового двійника. Блокчейн пропонує ефективне рішення завдяки використанню розподіленого реєстру, в якому кожна транзакція захищена криптографічно, має часову мітку та зберігається у незмінному вигляді. Це формує перевірюваний ланцюг довіри та знижує ризики фальсифікації даних, несанкціонованого доступу й порушення узгодженості системи.

Окрім забезпечення безпеки даних, блокчейн відіграє важливу роль в організації взаємодії та управлінні складними середовищами цифрових двійників. У сучасних реалізаціях таких систем задіяна велика кількість учасників, серед яких виробники обладнання, постачальники послуг, регуляторні органи та кінцеві користувачі. Блокчейн дозволяє реалізувати децентралізоване управління доступом, у межах якого права та ролі учасників визначаються за допомогою програмованих механізмів, зокрема смарт-контрактів.

Важливим аспектом застосування блокчейн-технології є також забезпечення контролю версій і простежуваності життєвого циклу цифрового двійника. Оскільки такі системи постійно оновлюються за рахунок нових даних, результатів моделювання та змін у стратегіях управління, виникає потреба у фіксації цих змін у прозорий і незаперечний спосіб. Блокчейн може виступати як захищений реєстр подій цифрового двійника, у якому зберігаються записи про оновлення моделей, результати симуляцій та обґрунтування прийнятих рішень.

Завдяки цьому забезпечується не лише підвищення рівня довіри до системи, але й покращується інтерпретованість рішень, сформованих із використанням алгоритмів штучного інтелекту або автономних механізмів управління, інтегрованих у цифровий двійник.

3.3.5. Штучний інтелект та новітні парадигми

Штучний інтелект відіграє ключову роль у розвитку технології цифрових двійників, суттєво розширюючи їх функціональні можливості, адаптивність і сферу застосування. Він охоплює широкий спектр підходів, зокрема машинне навчання, глибинне навчання, обробку природної мови, комп'ютерний зір, нечітку логіку, а також новітні парадигми, такі як TinyML і федеративне навчання. Сукупність цих методів забезпечує обчислювальну інтелектуальність, аналітичну глибину та контекстну обізнаність, необхідні для створення динамічних і самонавчальних цифрових двійників.

Функціонування цифрових двійників значною мірою базується на використанні моделей, орієнтованих на дані, які дозволяють відображати, контролювати та оптимізувати фізичні системи. Алгоритми машинного навчання забезпечують автоматизований аналіз великих обсягів даних, виявлення аномалій і формування прогнозів на основі інформації, отриманої в реальному часі від фізичних об'єктів. Завдяки цьому стає можливим формування моделей, здатних виявляти закономірності функціонування систем і підтримувати прийняття рішень у режимі реального часу.

Глибинне навчання, як спеціалізований напрям машинного навчання, розширює ці можливості шляхом використання багатошарових нейронних мереж для обробки складних і неструктурованих даних, таких як зображення, відео, потоки сенсорних даних і часові ряди. Важливою складовою є комп'ютерний зір, який забезпечує обробку та інтерпретацію візуальної інформації з фізичного середовища. У сільському господарстві це дозволяє цифровим двійникам контролювати стан рослин, виявляти ураження шкідниками, оцінювати ступінь стиглості культур на основі даних із

безпілотних літальних апаратів або супутникових систем. У контексті сільськогосподарської техніки такі підходи забезпечують виявлення несправностей, оцінювання ефективності роботи та реалізацію превентивного технічного обслуговування.

Обробка природної мови розширює можливості взаємодії людини з цифровими двійниками, дозволяючи формувати запити, отримувати пояснення та керувати системою у зрозумілій для користувача формі. Це підвищує доступність технології та полегшує інтерпретацію результатів її роботи. Нечітка логіка, у свою чергу, дозволяє враховувати невизначеність і нечіткість даних, що є характерними для біологічних і агроекологічних систем. Вона дає змогу працювати з якісними оцінками, такими як «помірна вологість» або «незначна посуха», трансформуючи їх у конкретні керуючі дії, що підвищує надійність прийняття рішень в умовах невизначеності.

Сучасний розвиток машинного навчання сприяв появі нових підходів до організації інтелектуальних систем, орієнтованих на розподілену, ефективну та вбудовану обробку даних. Зі зростанням масштабів і складності фізичних систем зростає потреба в обробці даних безпосередньо на периферії мережі, а також у колективному навчанні моделей із дотриманням принципів конфіденційності та децентралізації.

Однією з таких парадигм є TinyML, яка передбачає розгортання моделей машинного навчання на пристроях із обмеженими ресурсами (рис. 3.2). Інтеграція TinyML у системи цифрових двійників дозволяє виконувати аналітику в реальному часі безпосередньо на вбудованих пристроях, що зменшує затримки, оптимізує використання каналів зв’язку та підвищує надійність системи за рахунок зменшення залежності від централізованих обчислювальних ресурсів. У аграрних застосуваннях для цього використовуються методи стиснення моделей, зокрема квантування, проріджування та дистиляція знань, які дозволяють зменшити обчислювальні витрати без суттєвої втрати точності. Це забезпечує можливість реалізації, наприклад, систем виявлення захворювань рослин або алгоритмів об’єднання сенсорних даних безпосередньо на польових пристроях.

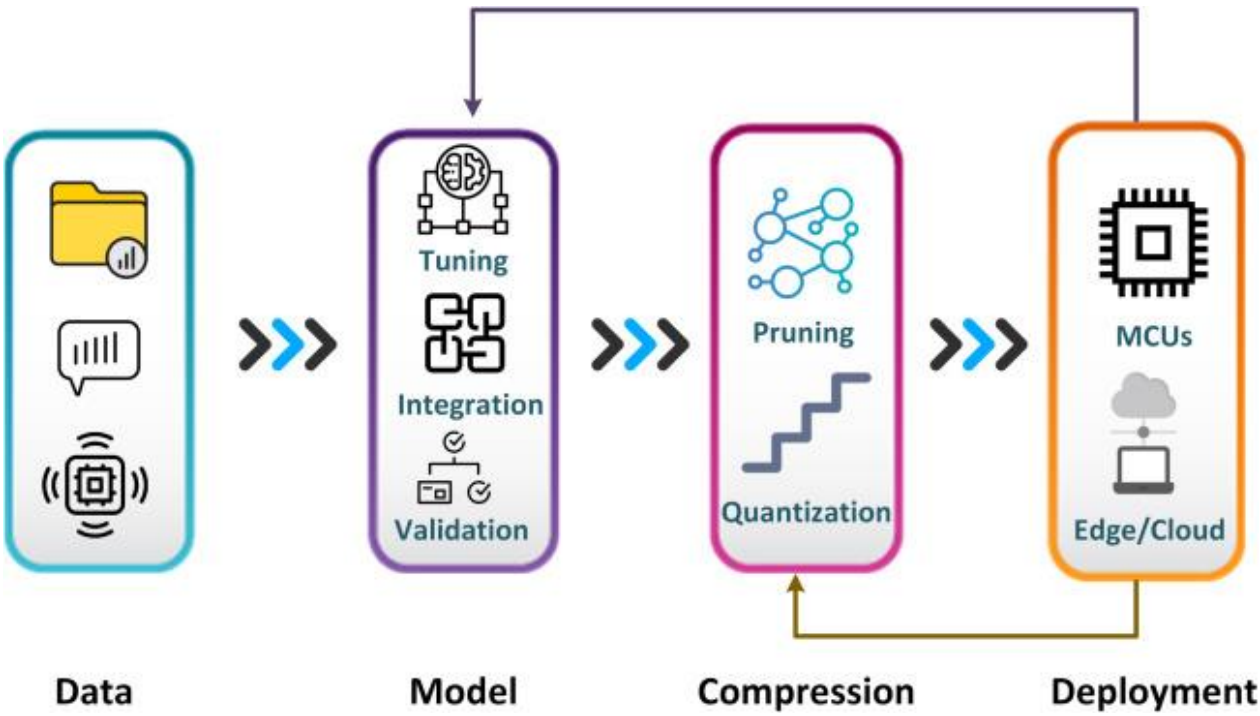


Рис. 3.2. Схема розгортання моделі tinyML на мікроконтролерах та периферійних пристроях

Іншою важливою технологією є федеративне навчання, яке забезпечує спільне навчання моделей на розподілених пристроях без передачі сирих даних до централізованих серверів. Такий підхід є особливо важливим для систем, де критичною є конфіденційність інформації. У аграрних цифрових двійниках це дозволяє пристроям, розміщеним у різних господарствах, спільно формувати узагальнені моделі, наприклад для прогнозування захворювань культур, без розкриття локальних даних.

Процес федеративного навчання передбачає ініціалізацію глобальної моделі, її передачу на клієнтські пристрої для локального навчання та подальшу агрегацію оновлень на центральному рівні. Отримана узагальнена модель знову розповсюджується серед учасників для наступних ітерацій. Такий підхід забезпечує масштабованість, стійкість і підвищення інтелектуального рівня систем цифрових двійників без порушення конфіденційності даних.

3.3.3. Штучний інтелект та новітні парадигми

Штучний інтелект відіграє ключову роль у забезпеченні функціонування технології цифрових двійників, суттєво підвищуючи їхні можливості, адаптивність і сферу застосування. Він охоплює широкий спектр підгалузей, зокрема машинне навчання, глибинне навчання, обробку природної мови, комп'ютерний зір, нечітку логіку, а також новітні підходи, такі як TinyML і федеративне навчання. У

сукупності ці компоненти забезпечують обчислювальну інтелектуальність, аналітичну глибину та контекстну обізнаність, необхідні для створення динамічних і саморозвиткових цифрових двійників.

Цифрові двійники значною мірою базуються на використанні моделей, орієнтованих на дані, для відображення, моніторингу та оптимізації фізичних систем. Алгоритми машинного навчання формують основу цих можливостей, забезпечуючи автоматизований аналіз даних, виявлення аномалій і формування прогнозів на основі великих масивів інформації, що надходить у режимі реального часу від фізичних об'єктів. Такі моделі здатні навчатися на основі виявлених закономірностей і динаміки процесів, що підтримує прийняття рішень у реальному часі та адаптивне керування.

Глибинне навчання, як підгалузь машинного навчання, доповнює ці можливості завдяки використанню багатошарових нейронних мереж, які дозволяють видобувати складні ознаки з високорозмірних і неструктурованих даних, таких як зображення, відео, багатосенсорні потоки та часові ряди. Це забезпечує більш точне моделювання складних фізичних процесів у межах цифрових двійників.

Комп'ютерний зір є важливою складовою штучного інтелекту, що дозволяє цифровим двійникам аналізувати та інтерпретувати візуальну інформацію з фізичного середовища. Він забезпечує такі функції, як виявлення об'єктів, розпізнавання дій і оцінювання стану поверхонь. У сільському господарстві це дозволяє цифровим двійникам здійснювати моніторинг стану рослин, виявляти ураження шкідниками та оцінювати стиглість культур на основі аналізу зображень, отриманих із дронів або супутників. Це сприяє підвищенню точності агротехнологій, зменшенню втрат і підвищенню врожайності. Аналогічно, у сільськогосподарській техніці комп'ютерний зір дозволяє виявляти несправності обладнання, оцінювати ефективність його роботи та підтримувати превентивне технічне обслуговування шляхом безперервного візуального контролю.

Обробка природної мови посилює функціональність цифрових двійників, надаючи їм можливість розуміти, генерувати та використовувати людську мову для взаємодії. Це дозволяє користувачам формулювати запити, отримувати пояснення або керувати системою у природній мовній формі, що значно підвищує доступність і зрозумілість технології.

Нечітка логіка додає цифровим двійникам елементи наближеного до людського мислення, що особливо важливо в умовах невизначеності або неповноти даних. Це характерно для аграрних, кліматичних і

біологічних систем, де параметри часто є варіативними та нечітко визначеними. Нечіткі моделі дозволяють обробляти суб'єктивні або лінгвістичні оцінки, такі як «помірна вологість» або «незначно сухий ґрунт», і перетворювати їх на конкретні керуючі дії, підвищуючи стійкість і інтерпретованість рішень в умовах невизначеності.

Останні досягнення у сфері машинного навчання зумовили появу розподілених, ефективних та вбудованих парадигм інтелекту, які тісно узгоджуються з еволюційними вимогами систем цифрових двійників. У міру зростання масштабу та складності фізичних об'єктів дедалі більшої актуальності набуває потреба в інтелектуальній обробці даних безпосередньо на периферії мережі, а також у реалізації колективного інтелекту, що враховує вимоги конфіденційності та децентралізації.

Ці потреби стимулювали розвиток двох важливих сучасних парадигм штучного інтелекту – TinyML і федеративного навчання. TinyML орієнтований на впровадження моделей машинного навчання на малопотужних пристроях із обмеженими обчислювальними ресурсами, що робить його особливо актуальним для архітектур цифрових двійників. Його застосування є доцільним у таких сферах, як сільське господарство, точне виробництво та інтелектуальна інфраструктура.

Інтеграція TinyML у цифрові двійники забезпечує можливість виконання аналітики в реальному часі безпосередньо на вбудованих пристроях, що дозволяє зменшити затримки, знизити навантаження на канали зв'язку та підвищити загальну надійність системи за рахунок зменшення залежності від централізованих хмарних обчислень. У контексті аграрних цифрових двійників для цього застосовуються методи стиснення моделей, зокрема квантування, проріджування параметрів і дистиляція знань, які дозволяють зменшити обчислювальну та пам'яттєву складність моделей машинного навчання без суттєвої втрати точності. Це забезпечує можливість ефективного розгортання моделей виявлення хвороб рослин на основі комп'ютерного зору або алгоритмів об'єднання сенсорних даних на мікроконтролерах, інтегрованих у польове обладнання. Така функціональність є особливо критичною в умовах нестабільного зв'язку або необхідності миттєвого реагування, наприклад у автономній сільськогосподарській техніці.

Федеративне навчання є ще однією сучасною парадигмою, що забезпечує спільне навчання моделей на розподілених вузлах без передачі вихідних даних до централізованих серверів. Такий децентралізований підхід є особливо важливим для застосувань цифрових двійників у сферах із підвищеними вимогами до

конфіденційності. В аграрних цифрових двійниках, наприклад, пристрої, розміщені на географічно розподілених фермах, можуть спільно формувати узагальнену модель прогнозування захворювань культур без необхідності передачі чутливих або комерційно важливих даних.

Процес федеративного навчання зазвичай починається з ініціалізації глобальної моделі на центральному сервері, яка надалі передається клієнтським пристроям. Кожен пристрій виконує локальне навчання на власних даних і передає оновлення параметрів моделі (наприклад, ваги або градієнти) назад на сервер. Після цього сервер виконує агрегацію отриманих оновлень, найчастіше за допомогою алгоритмів на кшталт Federated Averaging, формуючи оновлену глобальну модель, яка знову розповсюджується серед учасників для наступного циклу навчання.

Таким чином, федеративне навчання підвищує масштабованість, стійкість і інтелектуальну спроможність екосистем цифрових двійників, водночас забезпечуючи збереження конфіденційності даних і мінімізуючи ризики їх централізованого зберігання.

3.2.4. Хмарні, туманні та периферійні обчислення

У системах аграрних цифрових двійників, де дані безперервно генеруються на великих і часто віддалених територіях, ключового значення набуває ефективна та адаптивна комунікаційно-обчислювальна інфраструктура. Основу такої інфраструктури становить багаторівнева архітектура, що поєднує хмарні, периферійні (edge) та туманні (fog) обчислення.

Хмарні обчислення відіграють центральну роль у забезпеченні функціонування цифрових двійників, надаючи необхідні обчислювальні ресурси, сховища даних і масштабованість для обробки великих обсягів інформації, що надходить із сільськогосподарських об’єктів. Оскільки цифрові двійники аграрних систем базуються на безперервному аналізі даних і складній аналітиці, вони потребують гнучкої та потужної інфраструктури. Хмарні платформи забезпечують інтеграцію пристроїв Інтернету речей, польових сенсорів, супутникових даних і систем дистанційного зондування, створюючи єдиний інформаційний простір для аналізу.

Завдяки хмарним технологіям реалізується ефективний розподіл ресурсів і динамічне масштабування обчислювальних потужностей залежно від поточних потреб системи. Крім того, хмарні середовища підтримують впровадження складних алгоритмів штучного інтелекту та машинного навчання, що підвищує точність прогнозування та якість

рекомендацій цифрових двійників. Вони також забезпечують централізовану обробку та аналіз просторово розподілених даних, а також високий рівень безпеки, включаючи захист інформації, контроль доступу та простежуваність даних.

Водночас хмарні обчислення не завжди є достатніми для задач, що вимагають наднизьких затримок, високочастотного керування або функціонування в умовах нестабільного зв'язку. У таких випадках важливу роль відіграють периферійні та туманні обчислення, які доповнюють хмарну інфраструктуру.

Периферійні обчислення передбачають розміщення обчислювальних ресурсів безпосередньо поблизу джерел даних, що дозволяє виконувати їхню обробку та прийняття рішень локально. Це особливо важливо в сценаріях, де критичною є оперативність реагування. Локальна обробка даних дозволяє зменшити обсяг переданих у хмару даних, оптимізувати використання мережевих ресурсів і скоротити затримки. Крім того, такий підхід забезпечує безперервність роботи систем у разі обмеженого або нестабільного зв'язку, що характерно для сільських і великомасштабних аграрних територій.

Туманні обчислення розширюють концепцію периферійних систем, вводячи проміжний рівень між крайовими пристроями та хмарною інфраструктурою. Вони забезпечують локальну агрегацію даних, короткострокове зберігання та виконання проміжної аналітики. У цифрових двійниках сільського господарства туманні вузли можуть бути реалізовані на рівні тепличних комплексів, локальних шлюзів або регіональних серверів, координуючи дані від множинних сенсорів і виконавчих пристроїв у межах окремих ділянок.

Інтеграція хмарних, туманних і периферійних обчислень формує гібридну, багаторівневу інфраструктуру цифрових двійників, яка є контекстно адаптивною та здатною ефективно підтримувати різні режими роботи аграрних систем у реальному часі.

3.3.5. Технології віртуальних об'єктів для моделювання, симуляції та взаємодії

Технології віртуальних об'єктів, що включають тривимірне моделювання, засоби симуляції та інструменти занурювальної взаємодії, такі як доповнена реальність (AR), віртуальна реальність (VR) і змішана реальність (MR), є невід'ємною складовою функціонування та ефективності систем цифрових двійників у сільському господарстві. Сукупно ці технології, відомі як розширена реальність (XR),

забезпечують візуальну та інтерактивну основу для представлення, аналізу й взаємодії з фізичними системами в цифровому середовищі.

Розширена реальність усе ширше визнається важливим компонентом реалізації цифрових двійників у розумному землеробстві та точному сільському господарстві. Вона підвищує інтерпретованість складних багатоджерельних даних, дозволяючи користувачам взаємодіяти з цифровими копіями об'єктів у просторово зрозумілій та інтуїтивній формі. Завдяки створенню занурювальних інтерфейсів, узгоджених із просторовим контекстом, XR дає змогу працювати з великими та багатовимірними масивами даних у людиноцентричний спосіб, що підвищує ефективність прийняття рішень.

Доповнена реальність зменшує когнітивне навантаження, пов'язане з інтерпретацією абстрактних графіків або віддалених інформаційних панелей, тим самим підвищуючи ефективність оперативного прийняття рішень безпосередньо на місці. AR-пристрої дозволяють користувачам взаємодіяти з цифровим двійником, одночасно зберігаючи повне сприйняття фізичного середовища, що робить цю технологію особливо ефективною для польових робіт, оперативних інспекцій та систем керування з участю оператора.

На відміну від AR, віртуальна реальність забезпечує повністю занурювальні комп'ютерно згенеровані середовища, у яких користувачі можуть взаємодіяти з цифровими двійниками в контрольованих і відтворюваних умовах. Це особливо корисно для задач моделювання, навчання та віддаленої співпраці. VR дозволяє створювати сценарно орієнтовані віртуальні середовища, де користувачі можуть досліджувати різні умови функціонування систем, стани об'єктів або варіанти управлінських рішень без ризику для реальної системи. Такі можливості особливо важливі для планування, підготовки персоналу та розробки стратегій, а також можуть бути розширені шляхом інтеграції з телеметричними даними для імітації реальних операційних умов у режимі реального часу.

Змішана реальність розширює можливості XR шляхом поєднання фізичного та цифрового середовищ у спосіб, що забезпечує їхню одночасну взаємодію в реальному часі. MR-системи підтримують просторове картування, яке дозволяє прив'язувати елементи цифрового двійника до реального середовища та динамічно взаємодіяти з ними. Це створює умови для складних робочих процесів, таких як спільне цифрове проєктування, колективна діагностика та синхронізований моніторинг систем у реальному часі. На відміну від традиційних двовимірних візуалізацій, MR забезпечує кращу просторову глибину сприйняття та контекстне розуміння, що є

критично важливим для роботи у складних багатовимірних фізичних середовищах.

Окрім занурювальної візуалізації, основою будь-якої системи цифрових двійників є точність і адаптивність засобів тривимірного моделювання та симуляції. Високодеталізовані 3D-моделі виступають цифровими структурними аналогами фізичних аграрних об'єктів. Вони створюються на основі даних лазерного сканування (LiDAR), фотограмметрії, сенсорів структурованого світла або інструментів автоматизованого проєктування (CAD). Використання CAD є особливо важливим для моделювання механічних компонентів, конструкційних систем і електромеханічних вузлів із високою геометричною точністю.

Такі параметричні моделі забезпечують сумісність між етапами проєктування, симуляції та керування, а також дозволяють автоматично оновлюватися на основі даних із сенсорів. Динамічна синхронізація 3D-моделей із даними в реальному часі перетворює цифровий двійник на живу, еволюційну систему, а не статичну цифрову копію.

Симуляційні інструменти, інтегровані в цифрові двійники, дозволяють віртуально тестувати та оптимізувати аграрні процеси ще до їх реалізації в реальному середовищі. Це підвищує точність планування та зменшує залежність від експериментальних підходів, які є ресурсо- та часозатратними. Крім того, симуляційні середовища підтримують ітеративну оптимізацію систем, аналіз чутливості параметрів і моделювання рішень на основі підкріплення.

Вони також дозволяють досліджувати сценарії типу «що буде, якщо», що є важливим для оцінювання ризиків, планування надзвичайних ситуацій і безперервного вдосконалення процесів. У міру інтеграції симуляційних механізмів із потоками даних у реальному часі цифрові двійники поступово трансформуються у замкнені системи керування, здатні до автономної адаптації, оптимізації та самонавчання.

3.4. Взаємодія технологій у цифровому двійнику

У контексті впровадження цифрових двійників у сільському господарстві взаємодія між різними забезпечувальними технологіями проявляється особливо чітко та комплексно. Інфраструктура Інтернету речей забезпечує збір ключових параметрів, таких як дані про стан довкілля, характеристики ґрунту та фізіологічні показники рослин. Отримані сенсорні дані використовуються для керування виконавчими системами, зокрема зрошувальними насосами, системами охолодження в теплицях або роботизованими маніпуляторами для збирання

врожаю. Такі дії виконуються практично в режимі реального часу завдяки надійним комунікаційним технологіям і використанню периферійних або туманних обчислень, що дозволяє зменшити затримки та розвантажити централізовані хмарні ресурси.

Технологія блокчейн виконує фундаментальну функцію забезпечення безпеки, прозорості та незмінності даних у цифрових двійниках. Це особливо важливо в аграрних системах із багатьма учасниками або в умовах суворих вимог до простежуваності. Наприклад, у «розумних» ланцюгах постачання харчової продукції блокчейн гарантує, що дані про умови зберігання та транспортування залишаються незмінними та можуть бути перевірені. Використання смарт-контрактів дозволяє автоматизувати перевірку умов, наприклад підтвердження того, що швидкопсувна продукція зберігалася в межах допустимих значень температури та вологості.

Інтелектуальна складова цифрового двійника базується на технологіях штучного інтелекту, які забезпечують прогнозні та адаптивні функції системи. Моделі машинного навчання дозволяють прогнозувати потреби у зрошенні, виявляти спалахи шкідників або оцінювати врожайність на основі погодних умов і параметрів росту культур. У системах фенотипування рослин комп'ютерний зір використовується для раннього виявлення ознак хвороб або дефіциту поживних речовин шляхом аналізу зображень високої роздільної здатності.

Нечітка логіка забезпечує гнучке прийняття рішень у ситуаціях, коли значення сенсорних даних є граничними або невизначеними, наприклад при визначенні оптимального часу зрошення в умовах змінного мікроклімату. Федеративне навчання дозволяє здійснювати спільне навчання моделей між різними господарствами або тепличними комплексами без передачі первинних даних, що забезпечує збереження конфіденційності. Наприклад, кілька теплиць можуть спільно вдосконалювати моделі прогнозування росту культур без обміну вихідними даними.

Технологія TinyML забезпечує перенесення інтелекту безпосередньо на пристрої з обмеженими ресурсами, що дозволяє виконувати локальні рішення в реальному часі, наприклад автоматичне вмикання систем зволоження або подачі поживних речовин у відповідь на ознаки стресу рослин.

Взаємодія людини з цифровими двійниками в аграрній сфері додатково посилюється за рахунок обробки природної мови, що дозволяє операторам взаємодіяти із системою у зрозумілій формі. Користувач може отримувати відповіді на запити на кшталт «чому

вночі знизилася температура в теплиці?» або «який прогнозований термін збору врожаю?», що суттєво підвищує зручність використання системи для нетехнічних користувачів.

Технології візуалізації та віртуальних об'єктів, включаючи тривимірне моделювання на основі CAD, симуляційні платформи та занурювальні середовища, забезпечують високоточне представлення польових процесів, тепличних систем або ланцюгів постачання. Симуляційні інструменти дозволяють аграріям тестувати різні сценарії, такі як густота посадки, стратегії зрошення або кліматичні умови, ще до їх практичного впровадження, що зменшує ризики та витрати.

Доповнена реальність (AR) накладає оперативні дані, такі як показники стану рослин, діагностика обладнання або підказки щодо виконання завдань, безпосередньо на реальне середовище, підвищуючи ситуаційну обізнаність у польових умовах. Віртуальна реальність (VR) використовується для віддаленого моніторингу, навчання персоналу та сценарного планування, тоді як змішана реальність (MR) забезпечує інтегровану взаємодію фізичних і цифрових об'єктів, дозволяючи користувачам маніпулювати голографічними даними або отримувати адаптивні рекомендації у природному інтерактивному форматі.

Взаємодія між компонентами цифрового двійника

Взаємодія між компонентами цифрового двійника являє собою безперервний потік даних і рішень, який забезпечує моніторинг, аналіз і керування фізичними об'єктами в режимі реального часу. У межах такої архітектури фізичний об'єкт (Physical Object, PO) розглядається як реальний елемент матеріального світу, наприклад машина, поле або інша спостережувана система. Цей об'єкт оснащується сенсорами, що базуються на технологіях Інтернету речей, які безперервно збирають дані про його стан і функціонування.

Зібрана сенсорна інформація передається до цифрового двійника, який виконує роль комплексного цифрового представлення фізичного об'єкта. У цій системі всі дані консолідуються, аналізуються та зберігаються, що забезпечує постійну синхронізацію між фізичною системою та її цифровим відображенням. Завдяки цьому віртуальна модель завжди відповідає актуальному стану фізичного об'єкта. Важливу роль у забезпеченні такої синхронізації відіграють хмарні обчислення, які надають масштабовані ресурси для зберігання та обробки даних.

Після збору та інтеграції інформації в системі цифрового двійника вона передається до аналітичного модуля (Analysis Engine) для

подальшої обробки. Цей модуль використовує складні алгоритми та обчислювальні інструменти на основі штучного інтелекту для аналізу даних і формування змістовних висновків. Такий аналіз може включати виявлення аномалій, прогнозування майбутніх станів або оптимізацію параметрів функціонування системи.

Результати, отримані аналітичним модулем, передаються назад до цифрового двійника, який оновлює свою модель відповідно до нової інформації. Таким чином забезпечується постійне уточнення цифрового представлення фізичного об'єкта на основі найактуальніших даних.

На основі оновленої інформації функціонує модуль прийняття рішень (Decision Module), який використовує аналітичні та прогнозні дані для формування обґрунтованих управлінських рішень. Ці рішення базуються на комплексному аналізі та даних у реальному часі, що забезпечує їхню точність, ефективність і оптимальність.

Для підвищення якості інтерпретації даних і підтримки прийняття рішень можуть застосовуватися технології розширеної реальності (XR), зокрема доповнена (AR) та віртуальна реальність (VR). Вони дозволяють представляти інформацію в інтерактивному та занурювальному форматі, що сприяє кращому розумінню контексту та наслідків прийнятих рішень.

Після формування рішення цифровий двійник передає необхідні інструкції до виконавчого модуля (Execution Module), який забезпечує їх реалізацію на фізичному об'єкті. Цей модуль відповідає за безпосереднє виконання керуючих впливів, таких як зміна параметрів роботи обладнання, запуск технічного обслуговування або інші операційні дії.

Замкнений цикл взаємодії між фізичним об'єктом, цифровим двійником, аналітичним модулем, модулем прийняття рішень і виконавчим модулем демонструє динамічний і взаємопов'язаний характер функціонування цифрових двійників, забезпечуючи безперервну адаптацію та оптимізацію систем у реальному часі.

3.5. Цифровий двійник у сільськогосподарських застосуваннях

Цифрові двійники та пов'язані з ними технології, такі як Інтернет речей, штучний інтелект і розширена реальність, знаходяться на передовому краї трансформації сільського господарства, забезпечуючи точне та даноорієнтоване прийняття рішень.

3.5.1. Цифровий двійник у сільському господарстві контрольованого середовища

Інтеграція технології цифрових двійників у системи сільського господарства контрольованого середовища (Controlled Environment Agriculture, CEA) суттєво підвищує ефективність і сталість аграрного виробництва. CEA охоплює вирощування культур у замкнених і технологічно керованих середовищах, таких як теплиці, вертикальні ферми та індор-ферми, де параметри довкілля - температура, вологість, інтенсивність освітлення та концентрація вуглекислого газу - суворо регулюються з метою оптимізації росту рослин і використання ресурсів.

Цифрові двійники в таких системах виступають як динамічні віртуальні аналоги фізичних об'єктів CEA, що функціонують у режимі реального часу та забезпечують безперервний моніторинг, моделювання і оптимізацію аграрних процесів. Вони дозволяють відстежувати зміну параметрів середовища та показників стану рослин, що сприяє глибшому розумінню реакції культур на зміну умов вирощування і підтримує прийняття обґрунтованих, даноорієнтованих рішень.

Ключовою перевагою цифрових двійників у CEA є можливість виконання прогнозного моделювання, що дозволяє оцінювати наслідки різних управлінських рішень - зміни режимів освітлення, зрошення або складу поживних розчинів - без впливу на фізичну систему. Це суттєво знижує ризики, мінімізує втрати врожаю та підвищує стабільність виробничих результатів.

Важливою характеристикою цифрових двійників у контрольованому середовищі є здатність інтегрувати різнорідні джерела даних, включаючи сенсори Інтернету речей, метеорологічні та кліматичні моделі, історичні дані росту рослин і інструменти фенотипування на основі штучного інтелекту. Така інтеграція дозволяє формувати цілісну, контекстно-залежну модель аграрної системи, що відображає її поточний стан із високим рівнем деталізації. Завдяки цьому стає можливим застосування розширених методів аналітики, таких як аналіз першопричин, виявлення аномалій і реалізація адаптивних стратегій керування, що підвищує стабільність і керованість системи. Крім того, цифрові двійники сприяють підвищенню ефективності використання ресурсів за рахунок точного контролю води, поживних речовин і енергії. Зокрема, зворотний зв'язок від віртуальної моделі може використовуватися для адаптивного управління зрошенням, що дозволяє зменшити витрати води та запобігти вимиванню поживних речовин. Таким чином, цифрові двійники підтримують екологічно орієнтовані підходи до вирощування культур, сприяють підвищенню прозорості аграрних

процесів і зменшенню екологічного навантаження у контрольованих виробничих системах.

Останні дослідження активно розглядають можливості застосування цифрових двійників у системах контрольованого середовища вирощування. Основна ідея таких підходів полягає у створенні віртуальної моделі теплиці або іншого аграрного об'єкта, яка відображає реальні процеси та дозволяє оцінювати їх розвиток у часі. Це дає змогу підвищувати продуктивність і водночас зменшувати витрати ресурсів за рахунок більш обґрунтованого управління умовами вирощування.

У практичних реалізаціях цифровий двійник поєднує фізичний об'єкт із системою збору та обробки даних. У спрощеному вигляді така система включає засоби вимірювання параметрів мікроклімату, виконавчі елементи для впливу на середовище, а також обчислювальну частину, яка забезпечує передавання, збереження та аналіз інформації. На основі отриманих даних формується віртуальна модель, здатна відтворювати стан теплиці та використовуватися для дослідження різних сценаріїв управління.

Особливу роль у таких системах відіграє моделювання. Використання спеціалізованих моделей дозволяє окремо аналізувати процеси формування мікроклімату та реакцію рослин на зміну умов вирощування. У поєднанні ці підходи забезпечують більш точне налаштування режимів температури, вологості та живлення, що безпосередньо впливає на врожайність і ефективність використання ресурсів.

Подальший розвиток цифрових двійників пов'язаний із переходом від простого моніторингу до глибшого аналізу даних. У деяких реалізаціях основна увага зосереджена на накопиченні інформації, її обробці та візуалізації. Такі системи дозволяють формувати бази даних умов вирощування та використовувати їх для прогнозування, однак ще не здійснюють автоматичного керування процесами. У цьому випадку цифровий двійник фактично виконує роль «цифрової тіні», тобто відображає стан об'єкта без активного втручання.

Водночас з'являються підходи, орієнтовані на прогнозування параметрів середовища. Використання математичних і статистичних методів дає змогу передбачати зміни температури чи інших показників усередині теплиці та завчасно коригувати роботу систем охолодження або зволоження. Це забезпечує перехід від реактивного до проактивного управління мікрокліматом.

Розширення функціональних можливостей цифрових двійників також охоплює оптимізацію керування. Сучасні підходи дозволяють

одночасно враховувати кілька цілей, наприклад зменшення енергоспоживання та підвищення врожайності, формуючи оптимальні режими роботи обладнання. У цьому контексті цифровий двійник виступає не лише як інструмент моделювання, а і як основа для систем підтримки прийняття рішень.

Крім керування мікрокліматом, цифрові двійники все частіше застосовуються для вирішення спеціалізованих завдань, зокрема у сфері захисту рослин. Поєднання даних спостережень із аналітичними моделями дає можливість своєчасно виявляти ризики поширення шкідників і приймати обґрунтовані рішення щодо обробок, що має як економічний, так і екологічний ефект.

Подальший розвиток технології пов'язаний із інтеграцією засобів візуалізації та взаємодії з користувачем. Поєднання цифрових двійників із сучасними інтерфейсами дозволяє більш наочно відображати стан об'єктів, спрощує навчання персоналу та підвищує зручність роботи зі складними аграрними системами. У результаті цифрові двійники поступово перетворюються на універсальний інструмент управління, аналізу та навчання в умовах сучасного агровиробництва.

У сучасних дослідженнях значна увага приділяється переходу цифрових двійників від експериментальних рішень до практичного використання у виробничих умовах. Зокрема, розглядаються підходи, які передбачають поетапне масштабування систем - від лабораторних моделей до повноцінних промислових реалізацій у вертикальних фермах. Такий підхід дозволяє поступово ускладнювати систему, перевіряючи її ефективність на кожному етапі.

На початкових стадіях цифровий двійник зазвичай охоплює базовий моніторинг параметрів середовища вирощування, зокрема температури, вологості, освітлення та газового складу повітря. Зі збільшенням масштабу системи суттєво зростає кількість джерел даних, що ускладнює організацію їх збору та обробки. Це, у свою чергу, потребує більш надійних підходів до побудови системи, зокрема забезпечення її стійкості до збоїв і безперервності роботи навіть у разі часткових відмов окремих елементів.

Важливим етапом розвитку є створення віртуального представлення об'єкта, яке дозволяє враховувати особливості його структури та масштабування. Такі моделі дають змогу не лише відображати поточний стан системи, а й оцінювати її поведінку при зміні конфігурації або умов експлуатації, що особливо актуально для великих аграрних комплексів.

Подібні підходи активно застосовуються і в системах, що поєднують рослинництво та аквакультуру. У таких умовах цифровий двійник забезпечує безперервний контроль ключових параметрів, пов'язаних як із ростом рослин, так і з водним середовищем. На основі накопичених даних формуються моделі, здатні прогнозувати розвиток культур, що відкриває можливості для більш точного планування технологічних операцій.

Подальший розвиток цих систем пов'язаний із використанням методів аналізу даних, які дозволяють обирати найбільш ефективні підходи до управління. Це дає змогу інтегрувати цифровий двійник у системи підтримки прийняття рішень, де він виступає як інструмент оцінювання різних сценаріїв і вибору оптимальних дій.

Цифрові двійники також знаходять застосування у сфері аквакультури, де вони забезпечують комплексний контроль виробничих процесів. У таких системах поєднується моніторинг стану середовища, оцінювання розвитку біологічних об'єктів та автоматизація окремих технологічних операцій. Це дозволяє підвищити ефективність виробництва та забезпечити більш раціональне використання ресурсів (рис. 3.3).

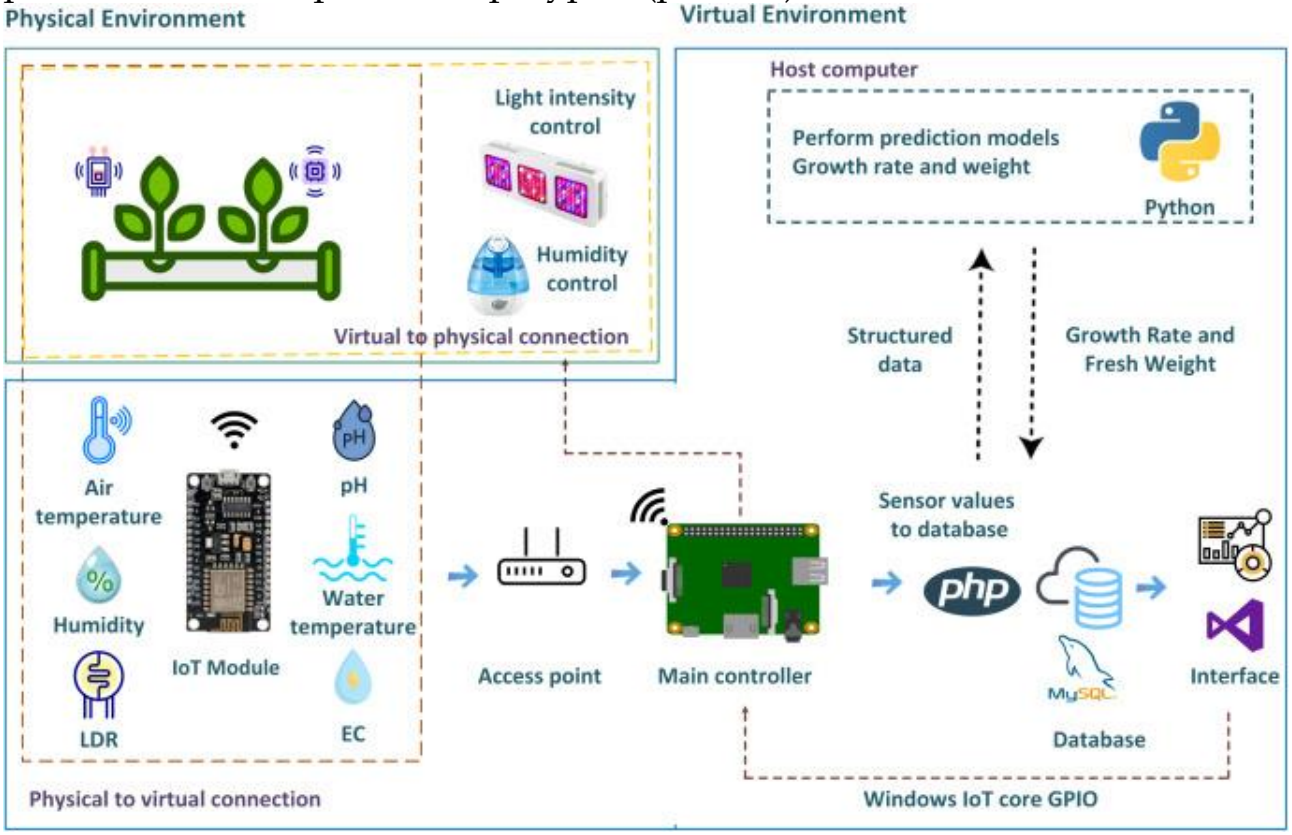


Рис. 3.3. Інтеграція цифрового двійника для гідропонних грядок у аквапонічній системі

Окремим напрямом є розвиток інтелектуальних платформ для керування процесами вирощування, зокрема в ресурсоощадних технологіях, таких як аеропоніка. У цих випадках цифровий двійник виступає як зв'язуюча ланка між даними, що надходять із виробничого середовища, та інструментами їх аналізу. Це дозволяє перетворювати інформацію у практичні рекомендації для користувача.

Загалом результати сучасних досліджень свідчать про значний потенціал цифрових двійників у системах контрольованого вирощування. Їх застосування сприяє підвищенню врожайності, покращенню якості продукції та більш ефективному використанню енергетичних і матеріальних ресурсів, що є особливо важливим для сучасної агрохімії та сталого агровиробництва.

3.5.2. Цифровий двійник у управлінні ґрунтом та зрошенням

Технологія цифрового двійника формує новий підхід до управління ґрунтом і зрошенням, поєднуючи можливості безперервного спостереження, аналізу та оптимізації процесів. Її сутність полягає у створенні віртуального представлення реальної агросистеми, яке формується на основі даних, що надходять із різних джерел, зокрема спостережень за станом ґрунту, погодних умов та характеристик посівів. Такий підхід дозволяє отримати цілісне уявлення про процеси, що відбуваються в полі, не лише в поточний момент, а й у динаміці.

У сфері управління ґрунтом цифровий двійник використовує інформацію про його основні властивості, зокрема структуру, вологість і забезпеченість елементами живлення. Постійне оновлення цих даних дає змогу переходити від узагальнених рішень до більш точних і локалізованих заходів. Це особливо важливо для агрохімії, де ефективність технологічних операцій значною мірою залежить від просторової неоднорідності ґрунтового покриву.

Важливим елементом такого підходу є використання аналітичних методів, які дозволяють оцінювати можливі наслідки різних варіантів управління. Завдяки цьому цифровий двійник виступає не лише як інструмент спостереження, а як засіб підтримки прийняття рішень, що допомагає обирати найбільш доцільні агротехнічні заходи з урахуванням конкретних умов.

Перехід до управління зрошенням на основі цифрових двійників відкриває можливості для більш точного регулювання водного режиму. Віртуальна модель відтворює взаємозв'язки між вологістю ґрунту, погодними факторами та потребами рослин, що дозволяє своєчасно коригувати режими поливу. У результаті забезпечується більш

раціональне використання водних ресурсів і підтримання оптимальних умов для росту культур.

Крім того, такі системи дозволяють завчасно виявляти небажані процеси, зокрема надлишкове зволоження, вимивання поживних речовин або розвиток водного стресу у рослин. Це створює передумови для оперативного реагування та запобігання втратам врожаю.

У ширшому контексті застосування цифрових двійників у цій сфері сприяє досягненню цілей сталого розвитку агровиробництва. Підвищення ефективності використання води, збереження родючості ґрунтів і зменшення негативного впливу на довкілля стають результатом більш точного та обґрунтованого управління. В умовах зростаючого навантаження на аграрний сектор такі підходи забезпечують необхідну гнучкість і надійність у прийнятті рішень.

У сфері управління зрошенням цифрові двійники формують детальне уявлення про всі складові водного режиму, включаючи джерела води, її розподіл, стан зволоження ґрунту та потреби рослин. Поєднання цих даних у єдиній системі дозволяє більш точно визначати строки та норми поливу, забезпечуючи рослини необхідною кількістю вологи без її перевитрат. Такий підхід сприяє одночасному підвищенню врожайності та ефективності використання водних ресурсів.

Особливістю цифрових двійників є можливість моделювання різних сценаріїв зрошення. Це означає, що ще до практичного застосування можна оцінити, як зміниться стан ґрунту і рослин при різних режимах поливу. У результаті обирається найбільш доцільний варіант, який враховує як потреби культури, так і наявні ресурси. Такий підхід є основою для впровадження сучасних технологій точного зрошення, де подача води регулюється з урахуванням просторових особливостей поля.

Важливим кроком у розвитку цих систем стало використання поточних даних для розрахунку добової потреби у воді. На основі інформації про стан ґрунту та погодні умови цифровий двійник формує рекомендації щодо поливу, що дозволяє оперативно реагувати на зміну умов вирощування. Це забезпечує перехід до більш гнучкого управління, коли рішення приймаються не за заздалегідь заданим графіком, а з урахуванням реальної ситуації.

Розширення функціональності цифрових двійників пов’язане з інтеграцією даних дистанційного зондування та моделей водного балансу. Завдяки цьому з’являється можливість оцінювати такі процеси, як накопичення вологи в ґрунті, випадання опадів або випаровування, що є важливим для прогнозування водного режиму. У практичному

аспекті це дозволяє не лише оптимізувати зрошення, а й попереджати ризики, наприклад перезволоження або дефіциту вологи.

Паралельно розвиваються підходи до управління водними ресурсами на рівні інфраструктури. Віртуальні моделі дають змогу аналізувати роботу систем подачі та відведення води, оцінювати їх ефективність і своєчасно виявляти проблемні ділянки. Це особливо актуально для складних аграрних об'єктів, де важливо забезпечити узгоджену роботу всіх елементів системи.

Інтеграція просторових даних і візуалізаційних інструментів відкриває додаткові можливості для аналізу. На основі актуальної інформації про стан посівів і ґрунту користувач може оперативно коригувати режими зрошення, орієнтуючись на фактичні потреби рослин. Таким чином, управління стає більш точним і адаптивним.

Окрему роль відіграє можливість автоматизації процесів. Цифровий двійник здатний не лише аналізувати ситуацію, а й формувати керуючі впливи, що забезпечує безперервність і оперативність управління. При цьому враховуються локальні особливості окремих ділянок, що дозволяє реалізувати диференційований підхід до поливу.

Разом із тим, не всі сучасні реалізації досягають повної інтеграції. У багатьох випадках системи обмежуються функціями збору та відображення даних, виконуючи роль так званої «цифрової тіні». Проте навіть такі рішення створюють основу для подальшого розвитку, оскільки накопичення даних і їх аналіз є першим кроком до впровадження повноцінних систем автоматизованого управління.

Загалом результати досліджень свідчать про те, що цифрові двійники стають ключовим інструментом у вдосконаленні систем зрошення. Вони забезпечують поєднання даних, моделей і управлінських рішень, що дозволяє підвищити ефективність використання води, зменшити ризики для рослин і забезпечити стабільність агровиробництва в умовах змінного клімату.

3.5.3. Цифровий двійник у моніторингу рослин та підтримці вирощування

У системах моніторингу стану рослин цифрові двійники відкривають можливість своєчасного виявлення факторів стресу, які можуть негативно впливати на розвиток культур. Йдеться про такі явища, як нестача елементів живлення, дефіцит вологи або ураження рослин хворобами. Завдяки безперервному аналізу даних формується цілісне уявлення про стан посівів, що дозволяє оперативно реагувати на відхилення та запобігати втратам урожаю.

Важливою перевагою такого підходу є можливість поєднання різних типів інформації. Дані про стан рослин, умови середовища та розвиток шкідливих організмів розглядаються у взаємозв'язку, що створює основу для більш обґрунтованого управління. У результаті з'являється можливість формувати цілеспрямовані заходи захисту рослин, підвищуючи їх ефективність і зменшуючи надлишкове застосування засобів.

Окреме значення цифрові двійники мають для прогнозування врожайності. Використовуючи моделі росту і розвитку культур, вони дозволяють оцінювати потенційний урожай за різних умов вирощування. Такий прогноз уточнюється в процесі вегетації завдяки постійному надходженню нових даних, що підвищує його точність і практичну цінність для прийняття рішень.

Разом із тим варто зазначити, що на сучасному етапі більшість застосувань цифрових двійників у моніторингу рослин обмежується функціями збору та аналізу інформації. У таких випадках вони виконують роль «цифрової тіні», тобто відображають стан агроценозу без безпосереднього автоматизованого впливу на нього. Незважаючи на це, навіть такі рішення є важливим кроком до створення повноцінних систем управління, у яких поєднуються спостереження, прогнозувння та активне регулювання процесів вирощування.

Подальший розвиток цифрових двійників у моніторингу рослин пов'язаний із поєднанням різних джерел даних та аналітичних підходів. У сучасних дослідженнях показано, що використання багатофакторної інформації дозволяє значно підвищити точність оцінювання стану посівів. Зокрема, поєднання даних спостережень за рослинами, умовами середовища та їх змін у часі створює основу для більш ефективного виявлення захворювань і визначення потреб у живленні.

Окремі підходи орієнтовані на використання розширених середовищ візуалізації, що дозволяють інтегрувати дані спостережень у зрозумілу для користувача форму. У таких системах аналіз інформації здійснюється з урахуванням як локальних вимірювань, так і даних дистанційного зондування. Це дає змогу формувати узагальнене уявлення про стан посівів і приймати обґрунтовані управлінські рішення. Важливо, що подібні рішення можуть бути адаптовані до потреб малих і середніх господарств, сприяючи підвищенню ефективності виробництва та зменшенню використання засобів захисту рослин.

Значний інтерес становлять підходи, що поєднують цифрові двійники з методами аналізу зображень. Використання візуальної

інформації разом із даними про стан ґрунту та середовища дозволяє більш точно визначати наявність хвороб і дефіциту елементів живлення. У цьому випадку цифровий двійник виконує роль інтеграційної платформи, яка об’єднує різні типи даних і забезпечує їх узгоджений аналіз.

Паралельно розвиваються системи, що базуються на розподіленому зборі інформації в польових умовах. Об’єднання таких даних із централізованою обробкою дозволяє виявляти просторові закономірності розвитку рослин, зокрема появу осередків хвороб або зон із недостатнім забезпеченням поживними речовинами. Це створює передумови для реалізації точних технологій вирощування, коли агротехнічні заходи виконуються диференційовано.

Ще одним напрямом є моделювання процесів росту та формування врожаю з урахуванням впливу погодних умов. У таких підходах цифровий двійник дозволяє оцінювати, як зміни температури, вологості чи інших факторів впливають на якість продукції. Це особливо важливо для культур, де кінцеві характеристики врожаю значною мірою залежать від умов вирощування.

Таким чином, сучасні дослідження демонструють, що цифрові двійники у моніторингу рослин поступово переходять від простого спостереження до комплексного аналізу та прогнозування. Вони забезпечують інтеграцію різнорідних даних, підвищують точність оцінювання стану посівів і створюють основу для більш ефективного та ресурсозберігаючого ведення агровиробництва.

Подальший розвиток цифрових двійників у рослинництві демонструє тенденцію до поєднання різнорідних джерел даних і більш глибокої інтеграції аналітичних підходів. Зокрема, у сучасних дослідженнях пропонуються архітектури, які об’єднують дані польових спостережень, дистанційного зондування та аналітичних моделей для оцінювання врожайності, погодних умов і стану ґрунту. Такий підхід дозволяє не лише отримувати актуальну інформацію, а й формувати прогнози розвитку агросистем, що підвищує обґрунтованість прийняття рішень.

Важливим напрямом є створення моделей, які поєднують різні аспекти розвитку рослин. Зокрема, встановлюється зв’язок між фазами розвитку культури та її морфологічними характеристиками. Це дозволяє формувати візуальні уявлення про стан рослин і використовувати їх для планування технологічних операцій. Подібні підходи особливо ефективні у системах контрольованого вирощування, де є можливість більш точно впливати на умови розвитку культур.

Паралельно розвиваються концепції, що базуються на використанні знань про біологічні та технологічні процеси. У таких системах цифровий двійник враховує фізіологічні особливості рослин, їх морфологію та умови вирощування, що дозволяє моделювати процес формування врожаю з урахуванням багатьох факторів. Це створює основу для адаптивного управління, коли зміни умов або вибір культури можуть враховуватися без суттєвої перебудови всієї системи.

Окрему увагу приділено підвищенню точності моделей шляхом урахування впливу навколишнього середовища та ресурсного забезпечення на різних етапах росту рослин. Це дозволяє більш детально описувати процеси розвитку і забезпечує кращу відповідність між віртуальною моделлю та реальними умовами вирощування.

Новим етапом розвитку є інтеграція сучасних інтелектуальних методів аналізу даних. Їх застосування дозволяє подолати обмеження традиційних підходів, які часто базуються на жорстко заданих правилах. Завдяки цьому підвищується точність прогнозування фаз розвитку рослин і їх реакції на зміну умов, що має безпосереднє значення для агрохімічного забезпечення та управління технологічними процесами.

3.5.5. Ключові показники ефективності цифрових двійників в аграрній сфері.

Ключові показники ефективності є важливим інструментом оцінювання результативності застосування цифрових двійників у сільському господарстві. Вони дозволяють комплексно визначити, наскільки такі системи впливають на виробничі процеси, якість продукції та використання ресурсів. Кожен із показників відображає окремий аспект ефективності, проте всі вони взаємопов'язані та формують цілісне уявлення про доцільність впровадження цифрових технологій.

Одним із ключових показників є ***продуктивність***, яка характеризує здатність агросистеми забезпечувати максимальний вихід продукції за наявних ресурсів. Використання цифрових двійників дозволяє більш точно оцінювати потенційну врожайність і визначати оптимальні технологічні рішення для її досягнення. Завдяки постійному моніторингу умов вирощування формується можливість своєчасно обирати найкращі строки виконання агротехнічних операцій, а також виявляти ризики, пов'язані з дефіцитом живлення чи розвитком шкідливих організмів.

Не менш важливим є показник ***якості продукції***, який відображає відповідність вирощеної продукції встановленим вимогам. Цифрові

двійники забезпечують детальний аналіз умов розвитку рослин, включаючи стан ґрунту, водного режиму та зовнішнього середовища. Це дає змогу підтримувати оптимальні умови росту і своєчасно коригувати технологічні заходи, зокрема режими зрошення та внесення добрив. У результаті формується продукція з більш стабільними та прогнозованими характеристиками.

Економічна ефективність проявляється через показник ***зниження витрат***. Незважаючи на те, що впровадження цифрових двійників потребує початкових інвестицій, у довгостроковій перспективі вони компенсуються за рахунок більш раціонального використання ресурсів і оптимізації виробничих процесів. Аналіз даних і прогнозування дозволяють завчасно виявляти можливі проблеми та уникати додаткових витрат, пов'язаних із їх усуненням. Крім того, підвищується ефективність використання техніки завдяки плануванню її роботи та обслуговування.

Окрему роль відіграє показник ***оптимізації ресурсів***, який відображає ефективність використання води, добрив, засобів захисту рослин та енергії. Цифрові двійники забезпечують актуальну інформацію про потреби культур і стан агросистеми, що дозволяє застосовувати ресурси більш точно та обґрунтовано. Такий підхід сприяє не лише зниженню витрат, а й зменшенню негативного впливу на довкілля.

Важливим аспектом є також ***задоволеність користувачів***, яка характеризує зручність і практичну цінність використання цифрових двійників. Система має бути зрозумілою, доступною та надавати рекомендації, які легко застосувати у виробничих умовах. Значну роль відіграє наявність навчання та підтримки користувачів, що дозволяє повною мірою реалізувати потенціал цифрових технологій.

Узагальнюючи, можна зазначити, що оцінювання ефективності цифрових двійників за допомогою ключових показників дозволяє не лише визначити їхню результативність, а й виявити напрями подальшого вдосконалення. Це створює основу для більш широкого та обґрунтованого впровадження цифрових технологій у сучасному агровиробництві.

3.6. Перспективи розвитку цифрових двійників

Інтеграція цифрових двійників у сільське господарство пов'язана з низкою суттєвих викликів, які необхідно враховувати для забезпечення їх ефективного впровадження. Насамперед йдеться про складність поєднання різнорідних технологічних рішень, значні обсяги даних та необхідність їх коректної обробки в умовах реального

агровиробництва. Такі системи потребують не лише технічної сумісності, а й організаційної готовності господарств до використання цифрових технологій. Нижче приведені основні проблеми, що заважають впровадженню в керування агарними практиками цифрових двійників.

Забезпечення сумісності між різними компонентами системи. Сучасне сільське господарство використовує широкий спектр обладнання, програмних рішень і технічних платформ, які часто розробляються різними виробниками та не завжди мають узгоджені підходи до обміну даними. У результаті інтеграція таких елементів в єдину цифрову систему стає складним завданням. Основна проблема полягає у відмінностях форматів даних, протоколів передавання та стандартів обміну інформацією. Це безпосередньо впливає на якість і швидкість збору та аналізу даних, а отже - і на ефективність роботи цифрового двійника. Тому використання уніфікованих підходів до структурування та передачі даних є критично важливим для забезпечення стабільної роботи системи. Додаткові труднощі виникають через наявність уже впроваджених систем управління господарством. Багато агропідприємств використовують спеціалізоване програмне забезпечення для окремих виробничих процесів, і їх інтеграція з новими цифровими платформами потребує значних зусиль. У таких умовах важливо забезпечити можливість взаємодії нових рішень із наявною інфраструктурою без втрати функціональності. Перспективним напрямом вирішення цієї проблеми є використання уніфікованих інтероперабельних підходів, які базуються на узгоджених галузевих стандартах. Це дозволяє забезпечити більш ефективну взаємодію між різними системами та спростити процес інтеграції цифрових двійників у вже існуючі аграрні технологічні середовища. Важливу роль також відіграє розвиток відкритих програмних рішень, які можуть виконувати функції проміжного шару між різними компонентами системи. Такі рішення дозволяють стандартизувати дані та забезпечити їх коректну передачу між різними платформами, знижуючи залежність від конкретних виробників обладнання або програмного забезпечення. Додатковим напрямом є створення модульних рішень, які можна легко адаптувати до різних умов господарювання. Це особливо важливо для малих і середніх агропідприємств, оскільки дозволяє поступово впроваджувати цифрові двійники без необхідності повної заміни наявних систем. Також перспективним є розвиток семантичних моделей предметної області, які дозволяють краще узгоджувати та інтерпретувати аграрні дані. Це сприяє більш точному розумінню параметрів виробничих

процесів і підвищує ефективність роботи цифрових платформ у різних регіональних умовах.

Узгодження життєвих циклів фізичних аграрних активів і цифрових технологій. У сільському господарстві техніка, споруди та інфраструктура зазвичай експлуатуються протягом тривалого часу, тоді як програмні засоби, моделі та цифрові платформи оновлюються значно швидше. Така розбіжність призводить до поступового розриву між фізичною системою та її цифровим представленням, що може знижувати стабільність і актуальність цифрового двійника. З часом програмні компоненти, які використовуються для моделювання та аналізу, можуть втрачати актуальність або переставати підтримуватися. У результаті виникає проблема сумісності між застарілими цифровими моделями та новими технологічними рішеннями. Це ускладнює підтримку системи в робочому стані та потребує додаткових ресурсів для її оновлення і адаптації. Окремою проблемою є залежність від конкретних постачальників програмного забезпечення. У таких випадках користувачі можуть опинятися в ситуації, коли подальший розвиток системи повністю визначається одним виробником. Зміна політики підтримки або припинення оновлень може призвести до зниження ефективності роботи цифрового двійника або навіть до його часткової втрати функціональності. Для зменшення цих ризиків перспективним є використання модульних архітектур, які дозволяють оновлювати окремі компоненти системи без необхідності повної її перебудови. Це забезпечує більшу гнучкість і довготривалу стійкість цифрових рішень. Додатково важливим є застосування сучасних універсальних форматів даних, що спрощують їх обмін і зберігання в довгостроковій перспективі. Важливу роль відіграє також формалізація довгострокової підтримки програмних рішень через відповідні угоди між користувачами та постачальниками технологій. Це дозволяє знизити ризики втрати функціональності системи та забезпечити її стабільну роботу протягом тривалого часу. Окремим напрямом розвитку є створення відкритих базових моделей цифрових двійників для типових аграрних об'єктів. Такі рішення можуть значно спростити впровадження технології, особливо для малих і середніх господарств, та забезпечити більш швидке масштабування цифрових рішень у сільському господарстві.

Недостатній рівень технологічної зрілості та розуміння потенціалу цифрових двійників серед кінцевих користувачів і аграрних підприємств. У багатьох випадках очікувані переваги цієї технології залишаються недостатньо усвідомленими, що уповільнює її практичне впровадження. Це значною мірою пов'язано з тим, що цифрові

двійники формуються на основі комплексу взаємопов'язаних технологій, які перебувають на різних етапах розвитку та ще не досягли повної стабільності у прикладному використанні. Додаткову складність створює вибір відповідної цифрової платформи серед великої кількості доступних рішень. Кожна з них має різний рівень функціональності та орієнтована на специфічні задачі, тому їх ефективне застосування потребує розуміння як технологічних можливостей, так і конкретних аграрних потреб. Відсутність такого розуміння може призводити до неефективного використання цифрових інструментів або їх неповної інтеграції у виробничі процеси. Для подолання цього розриву важливим є розвиток систем навчання та підвищення цифрової компетентності користувачів. Особливу роль можуть відігравати навчальні програми, адаптовані до різних груп учасників аграрного сектору, з урахуванням їх практичного досвіду та потреб. Це дозволяє поступово формувати необхідний рівень розуміння технології та сприяє її більш усвідомленому використанню. Ефективним інструментом також є демонстраційні пілотні проєкти, які реалізуються з урахуванням регіональної специфіки. Вони забезпечують можливість практичного ознайомлення з роботою цифрових двійників у реальних умовах, що значно підвищує рівень довіри до технології та полегшує її впровадження. Крім того, важливим напрямом є розвиток інтерфейсів, орієнтованих на кінцевого користувача. Використання наочних візуальних панелей, спрощених інструментів аналізу та локалізованих мовних рішень дозволяє зробити цифрові двійники більш доступними для широкого кола аграрних користувачів. У сукупності ці заходи сприяють подоланню бар'єру технологічної складності та прискорюють інтеграцію цифрових двійників у сільське господарство.

Висока вартість початкового розгортання та потреба у відповідній інфраструктурі. Створення таких систем зазвичай передбачає інвестиції у засоби збору даних, засоби їх зберігання та обробки, а також у цифрову інфраструктуру, яка забезпечує безперервну роботу системи. Для багатьох сільськогосподарських виробників, особливо малих і середніх господарств, такі витрати можуть бути суттєвим обмежувальним фактором. Додаткові труднощі пов'язані з необхідністю підтримки та оновлення інфраструктури. Оскільки цифрові технології швидко розвиваються, виникає потреба постійної адаптації систем до нових вимог, що також потребує фінансових і організаційних ресурсів. У результаті питання економічної доступності стає одним із ключових для широкого впровадження цифрових двійників. Одним із можливих напрямів вирішення цієї проблеми є розвиток моделей спільного використання

інфраструктури. У такому підході цифрові ресурси можуть надаватися як сервіс через співпрацю між державними структурами, приватним сектором та іншими учасниками аграрного ринку. Це дозволяє зменшити індивідуальне фінансове навантаження на виробників і зробити технологію більш доступною. Перспективним також є використання недорогих технічних рішень і відкритих технологій, які дозволяють знизити загальну вартість впровадження систем. Підвищенню ефективності сприяє застосування енергоощадних способів передавання даних, що є особливо важливим для віддалених сільських територій. У поєднанні з розвитком локальних інноваційних центрів це створює умови для поступового формування доступної технологічної екосистеми.

Затримка передачі та обробки даних (latency). Багато сценаріїв використання цифрових двійників, особливо в моніторингу стану посівів, зрошенні чи захисті рослин, потребують оперативного реагування на зміни умов. Від швидкості отримання та обробки інформації безпосередньо залежить точність рішень і загальна ефективність системи. Проблема затримок особливо проявляється у традиційних централізованих підходах, коли дані з поля передаються до віддалених серверів для обробки, а потім результати повертаються назад до користувача або виконавчих систем. Така схема неминуче створює часові затримки, які можуть бути критичними в умовах швидкоплинних змін агроекосистеми, наприклад при стресі рослин або необхідності оперативного коригування зрошення. Одним із ефективних напрямів вирішення цієї проблеми є використання розподіленої обробки даних безпосередньо поблизу джерела їх виникнення. Такий підхід дозволяє виконувати частину аналітичних і керуючих функцій на рівні поля або господарства, що суттєво скорочує час реагування системи. У результаті покращується узгодженість між фізичними процесами в агросистемі та їх цифровим відображенням. Децентралізована обробка також зменшує навантаження на центральні обчислювальні ресурси, оскільки до них передаються лише узагальнені або пріоритетні дані. Це підвищує загальну ефективність системи та дозволяє забезпечити її стабільну роботу навіть за умов нестабільного зв’язку або тимчасових перебоїв у передачі даних. У таких випадках базові функції моніторингу та прийняття рішень можуть продовжувати виконуватися локально. Важливо, що подібний підхід підвищує автономність цифрових двійників. Частина інтелектуальних функцій може реалізовуватися безпосередньо на локальних пристроях, що дозволяє оперативно формувати рішення без постійної залежності

від віддалених систем. Це особливо актуально для аграрних умов, де стабільність зв'язку не завжди гарантована.

Питання конфіденційності та кібербезпеки. Такі системи формують і обробляють великі обсяги даних, що надходять із різних джерел, і ці дані часто мають чутливий характер. Вони можуть включати інформацію про технології вирощування, структуру землекористування, врожайність, використання засобів захисту рослин, а також дані про діяльність самих фермерських господарств. У зв'язку з цим захист інформації стає критично важливою складовою цифрової аграрної інфраструктури. Оскільки цифрові двійники функціонують у мережевих середовищах і часто використовують хмарні сервіси, вони потенційно піддаються різним кіберзагрозам. Серед них можна виділити несанкціонований доступ до даних, їх перехоплення або навмисне спотворення, а також інші форми шкідливого втручання. Такі ризики можуть мати не лише технічні, а й економічні наслідки для агровиробників, тому питання безпеки повинні враховуватися вже на етапі проєктування систем. Для мінімізації цих ризиків застосовуються підходи, що базуються на захисті даних на різних рівнях. Це включає обмеження доступу до інформації, її захищене зберігання та контроль за використанням. Важливу роль відіграють також механізми розподіленої обробки даних, які дозволяють зменшити залежність від централізованих сховищ і тим самим знизити ризики несанкціонованого доступу. Перспективним напрямом є використання підходів, які дозволяють аналізувати дані без їх централізованого об'єднання. Це дає змогу зберігати контроль над інформацією на рівні її власників, одночасно забезпечуючи можливість її використання для аналітичних задач. Додатково можуть застосовуватися механізми прозорого фіксування обміну даними, що підвищує довіру між учасниками аграрного ринку. Важливим елементом захисту є також впровадження чітких правил доступу до інформації, які визначають, хто і в якій мірі може використовувати ті чи інші дані. Це особливо актуально для спільних цифрових платформ, де взаємодіє багато учасників із різними рівнями повноважень. Окрім технічних рішень, значну роль відіграє підвищення цифрової грамотності користувачів. Навчання основам кібербезпеки, формування розуміння ризиків і використання зручних інструментів контролю доступу сприяють більш відповідальному використанню цифрових технологій. У сукупності це створює передумови для безпечного та довіреного впровадження цифрових двійників у сучасному агровиробництві. Важливу роль відіграє також інтеграція цифрових двійників із вже існуючими каналами аграрного консультування та мобільними цифровими

сервісами. Це дозволяє розширити охоплення технології без необхідності створення повністю нової інфраструктури. Додатково, підтримка з боку державної політики, зокрема через стимулювання впровадження інновацій та покращення цифрової інфраструктури в сільській місцевості, може суттєво прискорити процес поширення цифрових двійників у сільському господарстві.

Висновки

Майбутній розвиток цифрових двійників у сільському господарстві має бути спрямований на перехід від окремих, вузькоспеціалізованих рішень до цілісних інтелектуальних систем, які охоплюють увесь аграрний цикл – від планування до завершення виробничих процесів. Такий підхід дозволяє розглядати господарство як єдину взаємопов'язану цифрову систему, де всі етапи підтримуються даними та аналітикою.

Важливим напрямом є створення більш формалізованих способів опису цифрових двійників. Вони мають не лише фіксувати стан об'єктів, а й відображати їх зміну в часі. Для аграрної сфери це означає можливість узгодженого представлення даних про ґрунти, культури, кліматичні умови та технічні засоби в єдиній структурі, що полегшує їх подальший аналіз і використання.

Подальший розвиток моделей є ще одним ключовим завданням. Сучасні підходи, що базуються лише на статистичних методах, не завжди забезпечують достатню точність і пояснюваність. Тому перспективним є поєднання даних із знаннями про фізичні та біологічні процеси, що дозволяє створювати більш надійні та наближені до реальності моделі.

Важливим аспектом є також прозорість прийняття рішень. У практичних аграрних задачах користувач повинен розуміти, чому система рекомендує ті чи інші дії. Це підвищує довіру до цифрових інструментів і полегшує їх впровадження у виробничу практику.

Подальший розвиток має також передбачати створення систем, здатних адаптуватися до змінних умов середовища. Для сільського господарства це особливо важливо, оскільки природні фактори постійно змінюються. Такі системи повинні бути гнучкими та здатними оновлювати свої моделі без складних налаштувань.

У цілому, подальший розвиток цифрових двійників в аграрній сфері потребує поєднання технологічних інновацій із чіткими принципами безпеки, прозорості та доступності. Лише за таких умов ця технологія зможе ефективно підтримувати сучасне та стале сільське господарство.

Питання для обговорення та самоперевірки

1. У чому полягає основна ідея цифрового двійника в аграрних системах і які процеси він відображає?
2. Які типи даних найчастіше використовуються для формування цифрового двійника ґрунтової системи?
3. Яким чином цифрові двійники можуть підвищувати ефективність управління зрошенням у меліоративних системах?
4. Які основні переваги використання цифрових двійників у моніторингу стану ґрунтів порівняно з традиційними методами?
5. Як цифрові двійники сприяють ранньому виявленню стресових станів рослин, пов'язаних із дефіцитом вологи або елементів живлення?
6. Чому важливо враховувати просторову неоднорідність ґрунтів при побудові цифрових двійників у рослинництві?
7. Яку роль відіграє прогнозування у цифрових двійниках для прийняття рішень у меліоративних системах?
8. У чому полягає різниця між повноцінним цифровим двійником і «цифровою тінню» у контексті аграрних систем?
9. Які основні виклики виникають при інтеграції цифрових двійників у системи управління зрошенням і ґрунтами?
10. Як використання цифрових двійників може сприяти сталому використанню водних і ґрунтових ресурсів у сільському господарстві?
11. Які переваги дає поєднання даних дистанційного зондування та польових вимірювань у цифрових двійниках для ґрунтознавства?
12. Як цифрові двійники можуть підтримувати прийняття рішень щодо диференційованого внесення добрив?
13. Які фактори необхідно враховувати при моделюванні водного балансу в системах цифрових двійників для меліорації?
14. Чому важливо забезпечувати актуальність (оновлюваність) даних у цифрових двійниках аграрних систем?
15. Яким чином цифрові двійники можуть впливати на зменшення екологічного навантаження в інтенсивному рослинництві?

РОЗДІЛ 4. ВИКОРИСТАННЯ IoT-РІШЕНЬ ДЛЯ ІНТЕЛЕКТУАЛЬНОГО ТА ЕФЕКТИВНОГО УПРАВЛІННЯ АГРОФІТОЦЕНОЗАМИ

4.1. Інтеграція Інтернету речей (IoT) у сільське господарство
4.2. Пов'язані технології
4.3. IoT-технології та фреймворки в інтелектуальному управлінні посівами
4.4. Безпека та управління даними в інтелектуальному управлінні посівами
4.5. Автоматизація та інтелектуальні рішення управління посівами
4.6. Моніторинг довкілля та оптимізація аграрних систем
4.7. Таксономія
4.8. Сенсори
4.9. Комунікаційні технології
4.10. Мережеве зберігання даних (Network storage)
4.11. Штучний інтелект та машинне навчанн
4.12. Основні проблеми та виклики

4.1. Інтеграція Інтернету речей (IoT) у сільське господарство

Інтернет речей (IoT) суттєво трансформує сучасне сільське господарство, забезпечуючи можливість прийняття рішень у режимі реального часу. Концепція IoT в агросфері базується на інтеграції апаратних засобів, сенсорних систем і програмних платформ для безперервного моніторингу ключових параметрів агровиробництва. До складу таких систем входять сенсори, що збирають дані про стан ґрунту, погодні умови та стан культур; комунікаційні протоколи, які забезпечують взаємодію між пристроями; обчислювальні платформи для обробки отриманих даних; а також виконавчі механізми, що реагують на зміну параметрів середовища (рис. 4.1).

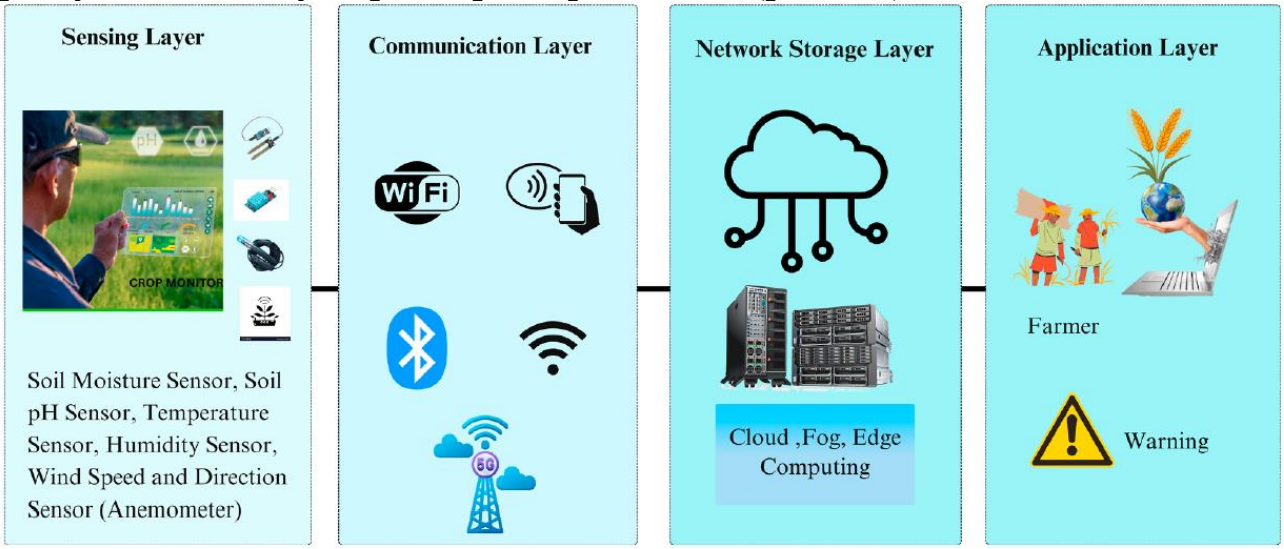


Рис. 4.1. Архітектура системи управління врожаєм на основі Інтернету речей

Загальна структура процесу формує основу системи збору та обробки даних у сільськогосподарських полях. Сенсорні пристрої здійснюють моніторинг температури, вологості повітря, вологості ґрунту, кількості опадів, швидкості вітру, інтенсивності освітлення та теплових характеристик середовища. Спеціалізовані датчики для рослинництва додатково контролюють рівень pH ґрунту, його родючість, наявність бур'янів, якість та солоність води для зрошення. Для оцінювання стану культур і моніторингу тваринництва застосовуються візуальні системи, зокрема камери та безпілотні літальні апарати, що виконують аерофотозйомку та дистанційне спостереження.

Обробка даних і керування виконавчими пристроями реалізуються за допомогою мікроконтролерів та обчислювальних платформ, таких як Arduino, Raspberry Pi, NodeMCU та подібні системи. Вони координують виконання різних польових операцій, включаючи зрошення, боротьбу зі шкідниками, регулювання мікроклімату, а також функціонування спеціалізованих аграрних роботизованих систем, які можуть виконувати операції прополювання, збирання врожаю та посіву.

Інтеграція зазначених технологій формує єдину взаємопов'язану екосистему, у якій керування агровиробничими процесами стає значно більш точним та ефективним. Це забезпечує впровадження принципів точного землеробства, зокрема прецизійного зрошення, оптимізованого внесення добрив та цільового захисту рослин. Використання IoT-технологій дозволяє оптимізувати витрати ресурсів, зменшити операційні витрати та підвищити врожайність при мінімальному впливі на довкілля. Такий комплексний підхід сприяє розвитку сталого сільського господарства та зміцненню продовольчої безпеки в умовах зростаючого глобального попиту на харчові продукти.

Інтернет речей (IoT) представляє собою безшовну інтеграцію різноманітних цифрових і фізичних об'єктів у межах єдиної інтернет-інфраструктури. Така взаємодія забезпечує функціонування сучасних сервісів, зокрема у сфері розумного сільського господарства, охорони здоров'я, розумних будинків і транспорту. Об'єкти, об'єднані в IoT-системи, здатні взаємодіяти між собою та з фізичним середовищем, автономно реагуючи на зміни у динамічних умовах навколишнього світу. Очікується, що до кінця 2025 року кількість підключених IoT-пристроїв у світі досягне близько 75 мільярдів, що відкриває значні можливості для їх застосування в аграрному секторі. Це особливо актуально з огляду на прогнозоване зростання світового попиту на

продовольство на 70 % у зв'язку зі збільшенням чисельності населення до 9,7 мільярда осіб до 2050 року. Така тенденція створює суттєвий тиск на агроекологічні системи, вимагаючи одночасного підвищення продуктивності та забезпечення сталого розвитку. Водночас традиційне землеробство, що базується на ручній праці, історичному досвіді та інтуїції, часто не забезпечує необхідного рівня ефективності, а нераціональне використання ресурсів призводить до втрат урожаю, дефіциту води та деградації довкілля.

Упровадження IoT у сільське господарство, відоме як розумне або інтелектуальне землеробство, формує нову парадигму управління агровиробництвом, орієнтовану на прийняття рішень на основі даних. У межах такого підходу IoT-система формується шляхом інтеграції взаємопов'язаних пристроїв, серед яких сенсори, мікроконтролери, безпілотні літальні апарати, носимі пристрої та інтелектуальне обладнання, що забезпечують безперервний збір і аналіз даних про стан навколишнього середовища. Концепція точного землеробства, що сформувалася на основі IoT-рішень, дозволяє оптимізувати процеси зрошення, контролю шкідників та дистанційного моніторингу, що, у свою чергу, мінімізує втрати ресурсів і підвищує врожайність. Використання прогнозної аналітики сприяє прийняттю обґрунтованих управлінських рішень, зокрема щодо прогнозування врожайності та оптимізації ланцюгів постачання. Автоматизація технологічних процесів зменшує витрати праці та підвищує загальну ефективність виробництва, тоді як прозорість, забезпечена IoT, покращує контроль якості та безпечності харчової продукції. Очікується, що глобальний ринок інтелектуального сільського господарства до 2026 року досягне значного обсягу, що свідчить про стрімке впровадження цифрових технологій у аграрну сферу.

Штучний інтелект відіграє ключову роль у розвитку розумного землеробства, забезпечуючи високий рівень ефективності за рахунок використання підходів, орієнтованих на аналіз даних. Завдяки алгоритмам машинного навчання та даним, отриманим із IoT-сенсорів, стає можливим прогнозування погодних умов, оптимізація зрошення та моніторинг стану рослин. Поєднання IoT із машинним навчанням і хмарними обчисленнями суттєво розширює функціональні можливості аграрних систем. Моделі машинного навчання здатні обробляти великі обсяги даних, ідентифікувати закономірності, прогнозувати результати та виявляти аномалії, такі як поширення шкідників або дефіцит поживних речовин, ще до їх критичного розвитку. Хмарні платформи забезпечують масштабовану

інфраструктуру для зберігання й обробки даних, а також віддалений доступ до актуальної аналітичної інформації.

Типова IoT-орієнтована система в аграрному виробництві функціонує як послідовний процес, що охоплює збір даних, їх передачу, оброблення та прийняття рішень. На початковому етапі здійснюється збір даних у реальному часі за допомогою сенсорів, безпілотних літальних апаратів та автоматизованого обладнання, що дозволяє фіксувати ключові параметри, зокрема вологість ґрунту, температуру, рівень вологості повітря, вміст поживних речовин і стан рослин. Наступним етапом є передача отриманої інформації до централізованих серверів із використанням бездротових технологій зв'язку, таких як Wi-Fi, стільникові мережі або LoRaWAN. Подальше оброблення та аналіз даних здійснюється на хмарних платформах із застосуванням алгоритмів машинного навчання, що дозволяє виконувати прогнозну аналітику для оцінювання росту культур і виявлення потенційних загроз (рис. 4.2). Завершальним етапом є прийняття управлінських рішень і реалізація відповідних дій, включаючи планування зрошення, внесення добрив, захист рослин та дистанційне керування станом полів. Такий інтегрований підхід трансформує традиційне сільське господарство у сучасну високоефективну систему, орієнтовану на дані.

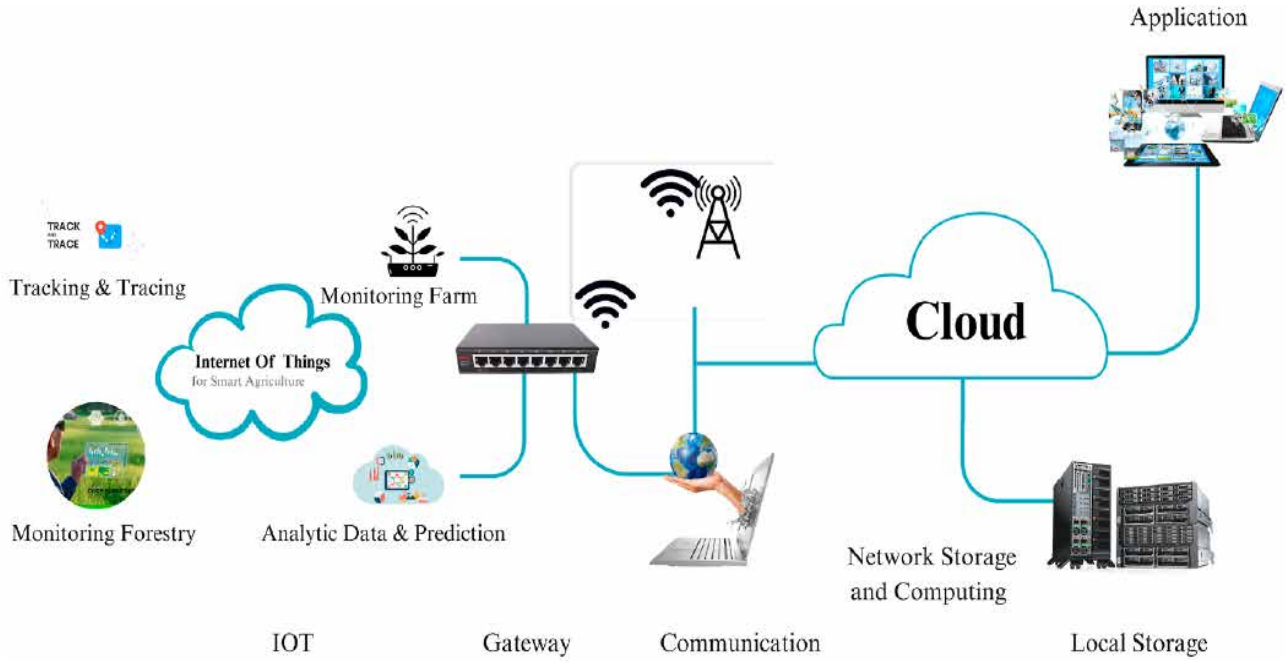


Рис. 4.2. Огляд розумного сільського господарства на базі Інтернету речей.

Управління посівами є ключовим елементом агрономії, що охоплює підвищення якості та кількості врожаю, а також процеси

вирощування, висіву та збирання культур. Традиційні методи управління посівами базуються на візуальних спостереженнях і стандартних практиках, що часто призводить до неефективного використання ресурсів. Натомість інтелектуальне управління посівами передбачає інтеграцію IoT-пристроїв, технологій дистанційного зондування та алгоритмів машинного навчання для формування точних і своєчасних управлінських рішень. Це забезпечує реалізацію принципів точного землеробства, підвищення ефективності використання ресурсів, зниження експлуатаційних витрат і мінімізацію негативного впливу на довкілля, зокрема надмірного використання води, ерозії ґрунтів, хімічного забруднення та викидів парникових газів. Використання даних у реальному часі дозволяє агровиробникам оптимізувати технологічні операції та суттєво підвищити продуктивність сільськогосподарських культур.

Попри значний потенціал, впровадження технологій Інтернету речей у сільське господарство супроводжується низкою викликів, серед яких вагоме місце займають початкові витрати на розгортання систем, технічна складність їх реалізації та питання забезпечення безпеки даних. Крім того, більшість наукових досліджень у цій сфері мають загальний характер і не зосереджуються безпосередньо на управлінні посівами, що зумовлює необхідність проведення комплексного аналізу саме цього напрямку розумного землеробства. З огляду на стрімкий розвиток IoT-технологій їх ефективне впровадження в аграрному секторі потребує ґрунтовного огляду сучасних тенденцій, наявних проблем та перспектив подальшого розвитку.

Цей розділ акцентує увагу саме на управлінні посівами з використанням IoT та розкриває ключові виклики, інноваційні підходи і практичні аспекти впровадження. Представлео таксономію застосувань IoT у цій сфері, а також детально розглянуто основні компоненти таких систем, зокрема сенсори, виконавчі механізми та обчислювальні платформи. Окрему увагу приділено аналізу потенційних напрямів використання та ролі алгоритмів машинного навчання у підвищенні ефективності агровиробництва.

Розділ орієнтований на формування цілісного підходу до розуміння IoT-орієнтованого управління посівами та може слугувати методичною основою для науковців, управлінців і практиків, які працюють у сфері цифрового сільського господарства. В ньому визначено ключові чинники, що впливають на ефективність впровадження IoT у розумному землеробстві з акцентом на управлінні посівами. Теоретичне підґрунтя структуровано у вигляді взаємопов’язаних аналітичних блоків, що забезпечує зручність

сприйняття та доступ до узагальнених результатів. Таксономія дозволяє отримати комплексне уявлення про застосування IoT у даній галузі, а проведений детальний аналіз компонентів систем розумного землеробства охоплює сенсорні технології, виконавчі пристрої та апаратно-програмні платформи. Значну увагу приділено також класифікації технологій зв'язку відповідно до їх радіусу дії та рівнів архітектури, що дає змогу визначити оптимальні рішення залежно від вимог IoT-пристроїв. Водночас ідентифіковано критичні проблеми, серед яких вартість впровадження, безпека та сумісність систем, що потребують подальшого вирішення для забезпечення широкомасштабного використання IoT у розумному сільському господарстві.

4.2. Пов'язані технології

У сучасній науковій практиці представлено значну кількість досліджень, спрямованих на вдосконалення систем управління посівами на основі технологій Інтернету речей. Незважаючи на активний розвиток цього напряму, що розпочався ще наприкінці 2000-х років, слід відзначити відсутність повністю сформованих і загальноприйнятих стандартів. У зв'язку з цим актуальним є узагальнення наявних підходів та формування цілісного бачення розвитку IoT-орієнтованого розумного землеробства з урахуванням різних умов застосування.

4.2.1. IoT-орієнтоване розумне землеробство: критичний аналіз переваг, обмежень і порівняльних характеристик.

IoT та бездротові технології зв'язку в розумному землеробстві

Інтеграція Інтернету речей із сучасними бездротовими технологіями зв'язку є ключовим фактором розвитку розумного землеробства. Поєднання IoT із технологіями штучного інтелекту та мережами нового покоління забезпечує можливість моніторингу стану посівів у реальному часі, реалізації точного зрошення та ефективного використання безпілотних літальних апаратів. Важливу роль відіграють технології передачі даних, зокрема ZigBee, LoRa та Wi-Fi, які забезпечують надійний зв'язок між пристроями, ефективний збір даних і оперативний моніторинг аграрних об'єктів.

Поєднання IoT із хмарними обчисленнями та бездротовими мережами створює передумови для формування інтегрованих систем управління фермерськими господарствами. Такі системи забезпечують безперервну передачу інформації, автоматизацію процесів і можливість

централізованого контролю, що підвищує ефективність управління агровиробництвом.

Машинне навчання та прийняття рішень на основі даних

Поєднання технологій Інтернету речей, машинного навчання та хмарних обчислень формує основу сучасних підходів до точного землеробства. Використання сенсорів, мобільних застосунків і технологій аналізу великих даних забезпечує можливість моніторингу стану посівів і виявлення захворювань у режимі реального часу. Застосування прогнозної аналітики дозволяє оптимізувати врожайність, оцінювати якість ґрунту та реалізовувати автоматизоване керування зрошенням.

Сучасні методи глибинного навчання демонструють високу ефективність у задачах ідентифікації хвороб рослин і управління агротехнологічними процесами. Зокрема, згорткові нейронні мережі забезпечують точне розпізнавання патологій рослин, що сприяє підвищенню врожайності та ефективності використання ресурсів. Машинне навчання також відіграє важливу роль у зменшенні втрат урожаю на різних етапах виробництва, включаючи до-, під час та післязбиральні процеси.

Важливим аспектом є формування стандартизованих підходів до побудови моделей машинного навчання та створення аграрних баз даних, що дозволяє підвищити якість прогнозування та адаптивність систем. Практичне застосування таких моделей охоплює задачі визначення ступеня стиглості плодів, сортування продукції та мінімізації втрат під час зберігання й переробки.

4.2.2. IoT-орієнтовані системи управління водними ресурсами та зрошенням

Раціональне використання водних ресурсів є одним із ключових напрямів застосування IoT у сільському господарстві. Інтелектуальні системи управління водними ресурсами забезпечують оптимізацію процесів зрошення та сприяють збереженню води. Використання хмарних платформ і бездротових технологій дозволяє здійснювати моніторинг параметрів у реальному часі та забезпечує дистанційний доступ до інформації.

Інтеграція сенсорних технологій із IoT-системами дає змогу оцінювати стан ґрунту, погодні умови та потреби рослин, що є основою для реалізації точного зрошення. Автоматизовані системи управління дозволяють адаптувати режими поливу відповідно до поточних умов,

підвищуючи ефективність використання води та забезпечуючи стабільність агровиробництва.

Сучасні підходи також передбачають використання технологій дистанційного зондування для моніторингу стану посівів і оптимізації водокористування. Це сприяє підвищенню ефективності управління агроекосистемами та мінімізації негативного впливу на довкілля.

4.2.3. IoT та автоматизація в точному землеробстві

Сучасний розвиток точного землеробства нерозривно пов'язаний із впровадженням технологій Інтернету речей та автоматизації, що забезпечують перехід від традиційних методів господарювання до високотехнологічних систем управління агровиробництвом. Інтеграція IoT із інноваційними підходами, такими як вертикальне землеробство, гідропоніка та аеропоніка, сприяє підвищенню ефективності використання ресурсів і забезпечує контроль параметрів вирощування в реальному часі. Розвиток бездротових сенсорних мереж, безпілотних літальних апаратів та алгоритмів машинного навчання дозволяє здійснювати комплексний моніторинг стану посівів і навколишнього середовища, що є основою для прийняття обґрунтованих управлінських рішень.

Важливу роль у цьому процесі відіграють технології збору та оброблення даних у реальному часі, прогнозна аналітика та масштабовані мережеві рішення, що забезпечують ефективну взаємодію між пристроями. Використання сучасних протоколів зв'язку, зокрема LoRaWAN і Wi-Fi, дозволяє створювати гнучкі та енергоефективні системи моніторингу й управління. У поєднанні з хмарними обчисленнями та технологіями штучного інтелекту це формує основу для створення адаптивних аграрних систем нового покоління, здатних оперативно реагувати на зміни умов вирощування.

Перспективні напрями розвитку розумного землеробства пов'язані з подальшою інтеграцією міждисциплінарних підходів, що об'єднують IoT, машинне навчання, хмарні сервіси та бездротові комунікації. Такі рішення сприяють оптимізації процесів зрошення, моніторингу стану ґрунту та оцінювання здоров'я рослин, а також дозволяють підвищити ефективність управління аграрними ресурсами. Особливе значення мають інтелектуальні моделі, що забезпечують класифікацію даних, прогнозування стану посівів і оптимізацію використання ресурсів, що є критично важливим для сталого розвитку сільського господарства.

Водночас аналіз сучасних досліджень свідчить про наявність низки невирішених проблем. Зокрема, недостатньо уваги приділяється

комплексному поєднанню бездротових комунікаційних протоколів і хмарних архітектур, що є необхідними для створення масштабованих IoT-систем. У ряді досліджень також відсутній глибокий аналіз методів зрошення, інтегрованих стратегій управління посівами та підтримуючої інфраструктури оброблення даних. Крім того, питання застосування прогнозної аналітики, інтелектуальних систем підтримки прийняття рішень і деталізованих моделей управління посівами залишаються недостатньо розкритими.

Зазначені обмеження обумовлюють необхідність подальших міждисциплінарних досліджень, спрямованих на інтеграцію IoT, машинного навчання, хмарних обчислень і бездротових технологій зв'язку. Такий підхід дозволить сформувати комплексні та масштабовані рішення для розумного землеробства, спрямовані на підвищення продуктивності та забезпечення екологічної стійкості аграрного виробництва.

4.3. IoT-технології та фреймворки в інтелектуальному управлінні полем

Сучасні IoT-орієнтовані системи управління посівами базуються на використанні бездротових сенсорних мереж, що забезпечують ефективний збір, передачу та оброблення даних. Такі системи орієнтовані на моніторинг параметрів ґрунту, контроль зрошення, виявлення шкідників і підтримання оптимальних умов вирощування культур. Використання методів аналізу якості сигналу та енергетичної ефективності мереж дозволяє підвищити надійність передачі даних і зменшити втрати інформації, що є важливим для стабільної роботи IoT-систем.

Розвиток цифрових технологій сприяє підвищенню доступності даних у сільському господарстві та зменшенню бар'єрів між агровиробниками і сучасними інформаційними системами. Це, у свою чергу, забезпечує більш ефективне використання водних ресурсів, оптимізацію агротехнологічних операцій і впровадження систем підтримки прийняття рішень. Застосування IoT дозволяє реалізувати дистанційний моніторинг, автоматизоване зрошення та аналітичну обробку даних, що значно спрощує управління аграрними процесами.

Важливим напрямом є розвиток масштабованих архітектур IoT-систем, здатних ефективно функціонувати як у статичних, так і в динамічних умовах. Використання сучасних мережевих протоколів і моделей мобільності забезпечує стабільність зв'язку, низьку затримку передачі даних і високу надійність функціонування систем

моніторингу. Це відкриває нові можливості для впровадження точного землеробства та оптимізації управління аграрними ресурсами.

Застосування IoT у сільському господарстві також обумовлене глобальними викликами, зокрема зростанням населення та необхідністю підвищення обсягів виробництва продовольства. Інтелектуальні аграрні системи дозволяють здійснювати безперервний моніторинг стану довкілля, контролювати здоров'я рослин і оптимізувати використання ресурсів, що сприяє підвищенню продуктивності та забезпеченню сталого розвитку.

Сучасні платформи розумного землеробства базуються на модульних архітектурах, що інтегрують сенсорні рівні збору даних і аналітичні інструменти для їх оброблення. Використання технологій LoRaWAN дозволяє створювати енергоефективні та економічно доступні рішення для довготривалого моніторингу параметрів навколишнього середовища. Візуалізація даних за допомогою веб-орієнтованих інструментів забезпечує зручний доступ до інформації та сприяє прийняттю обґрунтованих рішень.

Додатково, сучасні підходи до розумного землеробства передбачають інтеграцію різноманітних технологічних рішень, включаючи безпілотні системи, роботизовані платформи, сенсорні мережі та інтелектуальні аналітичні інструменти. Такі системи класифікуються за функціональними напрямами, зокрема управління водними ресурсами, вуглецевим балансом і погодними умовами, що дозволяє комплексно оцінювати їх ефективність з екологічної, економічної та соціальної точок зору.

Водночас впровадження IoT-технологій супроводжується низкою викликів, серед яких висока вартість реалізації, недостатній рівень розвитку інфраструктури та обмежена готовність користувачів до впровадження інновацій. Для подолання цих бар'єрів необхідним є поєднання технологічних рішень із управлінськими підходами, включаючи розвиток нормативно-правової бази, підвищення рівня цифрової грамотності та активне залучення користувачів до процесу впровадження технологій.

Окрему увагу приділено практичним аспектам реалізації IoT-систем, зокрема використанню сенсорів для моніторингу вологості, рівня поживних речовин і кислотності ґрунту, а також застосуванню аналітичних платформ для прийняття рішень щодо зрошення, внесення добрив і захисту рослин. Використання таких систем дозволяє досягти підвищення ефективності використання води, точності внесення ресурсів і загального рівня врожайності, а також зменшення негативного впливу на довкілля.

Сучасні дослідження також акцентують увагу на обробленні великих обсягів даних, що генеруються IoT-пристроями, та необхідності їх оперативного аналізу для прийняття своєчасних рішень. Розробка архітектур, орієнтованих на оброблення великих даних, дозволяє враховувати як технічні, так і соціально-економічні аспекти функціонування аграрних систем.

Таким чином, інтеграція IoT, штучного інтелекту, хмарних технологій і аналітики даних формує основу сучасного інтелектуального управління посівами, забезпечуючи підвищення ефективності агровиробництва та створення передумов для сталого розвитку сільського господарства.

4.4. Безпека та управління даними в інтелектуальному управлінні посівами

Сільське господарство залишається однією з ключових галузей світової економіки, водночас процеси зрошення споживають значну частину прісних водних ресурсів. В умовах зростаючого дефіциту води особливого значення набувають інноваційні підходи, зокрема інтелектуальне зрошення та точне землеробство, що реалізуються на основі технологій Інтернету речей і машинного навчання. Проте активне впровадження цифрових технологій супроводжується новими викликами, пов’язаними із забезпеченням безпеки даних, захистом інформації та надійністю функціонування систем.

Одним із важливих напрямів є розробка методів виявлення та класифікації вторгнень у мережі IoT, що використовуються в аграрному секторі. Для цього застосовуються підходи машинного навчання, які дозволяють аналізувати великі масиви даних, зменшувати їх розмірність і забезпечувати високу точність виявлення загроз. Використання алгоритмів, таких як методи регресії, опорних векторів і ансамблеві моделі, дає змогу оцінювати рівень безпеки систем за показниками точності, повноти та достовірності.

Перспективним напрямом підвищення безпеки є інтеграція технології блокчейн із системами розумного землеробства. Використання розподілених реєстрів дозволяє забезпечити надійне зберігання даних, їх цілісність і захист від несанкціонованого втручання. Такий підхід унеможливлює зміну інформації сторонніми особами та підвищує довіру до цифрових систем управління агровиробництвом. Водночас динаміка транзакцій у подібних системах свідчить про їх здатність адаптуватися до змін навантаження та ефективно реагувати на потенційні загрози.

Аналіз сучасних досліджень у сфері кібербезпеки аграрних IoT-систем демонструє зростання ризиків, пов'язаних із використанням цифрових платформ, обміном даними та інтеграцією різноманітних інформаційно-комунікаційних технологій. Основними загрозами є внутрішні порушення безпеки, недостатня ефективність систем виявлення атак та людський фактор. Для їх подолання необхідним є комплексний підхід, що поєднує технічні рішення, такі як захищені канали зв'язку, надійні IoT-пристрої та системи виявлення аномалій, із організаційними заходами, включаючи навчання персоналу та впровадження політик кібербезпеки.

Окрему увагу приділяють порівнянню сучасних технологій розподілених реєстрів, зокрема блокчейну та структур на основі орієнтованих ациклічних графів. Встановлено, що альтернативні підходи, які підтримують паралельну обробку транзакцій і використовують полегшені механізми консенсусу, можуть забезпечувати вищу продуктивність і меншу затримку, що є критично важливим для систем реального часу в аграрному секторі. Водночас традиційні блокчейн-рішення мають переваги у забезпеченні прозорості та безпеки, хоча й обмежені з точки зору масштабованості.

Сучасні IoT-системи також орієнтовані на підвищення точності прийняття рішень шляхом інтеграції даних про стан ґрунту та погодні умови. Використання моделей машинного навчання дозволяє досягати високої точності у виборі сільськогосподарських культур, оптимізації врожайності та підвищенні ефективності управління аграрними процесами. Хмарні технології забезпечують можливість оброблення великих обсягів даних, що надходять від сенсорів, та створюють основу для реалізації систем підтримки прийняття рішень.

Важливим аспектом є використання сенсорних технологій для моніторингу параметрів довкілля, зокрема вологості ґрунту, температури, стану рослин і погодних умов. Поєднання цих даних із методами геопросторового аналізу, гіперспектральної зйомки та бездротових сенсорних мереж дозволяє підвищити ефективність управління аграрними системами. Водночас виникають питання забезпечення конфіденційності даних і надійності сенсорних платформ, що потребує впровадження додаткових заходів захисту.

У сучасних умовах особливого значення набуває забезпечення цілісності та доступності даних, оскільки саме вони є основою для прийняття управлінських рішень. Адаптивні моделі безпеки дозволяють підвищити рівень захисту IoT-систем за рахунок їх гнучкої адаптації до різних умов функціонування. Впровадження таких

підходів сприяє підвищенню стійкості аграрних систем до кіберзагроз і забезпечує їх стабільну роботу.

Розвиток IoT у сільському господарстві також супроводжується зростанням обсягів даних, що генеруються сенсорами та іншими пристроями. Це зумовлює необхідність використання спеціалізованих архітектур оброблення великих даних, які враховують як технічні, так і соціально-економічні аспекти функціонування аграрних систем. Важливим напрямом є інтеграція IoT із веб-сервісами, хмарними API та платформами оброблення даних, що забезпечує масштабованість і гнучкість систем.

Загалом, цифрова трансформація аграрного сектору відкриває нові можливості для підвищення ефективності виробництва, проте водночас створює нові виклики у сфері кібербезпеки. Забезпечення надійного функціонування IoT-систем потребує комплексного підходу, що включає технологічні інновації, організаційні заходи та міждисциплінарні дослідження, спрямовані на формування безпечного та стійкого цифрового середовища в сільському господарстві.

4.5. Автоматизація та інтелектуальні рішення управління посівами

Сучасні підходи до управління посівами характеризуються активним впровадженням автоматизованих систем, що поєднують технології Інтернету речей, робототехніку та штучний інтелект. Одним із перспективних напрямів є використання автономних роботизованих платформ у тепличному господарстві, які здатні виконувати складні агротехнологічні операції, зокрема збирання врожаю. Такі системи поєднують методи комп'ютерного зору, оцінювання стану рослин і планування руху, що дозволяє забезпечити високу точність виконання операцій і мінімізувати пошкодження продукції. Використання моделей глибинного навчання для визначення ступеня стиглості плодів і ключових точок взаємодії з рослиною сприяє підвищенню ефективності автоматизованого збирання.

Інтеграція IoT і глибинного навчання також знаходить широке застосування у системах моніторингу тепличних культур. Використання сенсорних вузлів для вимірювання параметрів середовища, таких як вологість ґрунту, температура та вологість повітря, у поєднанні з алгоритмами комп'ютерного зору дозволяє автоматично визначати стадії дозрівання плодів і оптимізувати процеси вирощування. Застосування методів оптимізації моделей забезпечує

підвищення швидкодії систем при збереженні прийнятної точності класифікації.

Поєднання технологій штучного інтелекту та IoT створює нові можливості для формування інтелектуальних аграрних систем, здатних обробляти великі обсяги даних і забезпечувати підтримку прийняття рішень у режимі реального часу. Такі системи дозволяють оптимізувати використання ресурсів, зменшувати втрати та підвищувати продуктивність агровиробництва. Водночас актуальним залишається питання ефективного опрацювання даних, що потребує міждисциплінарного підходу та залучення фахівців із різних галузей.

Сучасні IoT-рішення спрямовані на автоматизацію процесів зрошення, раннє виявлення захворювань рослин і постійний моніторинг їхнього стану. Завдяки використанню аналітики в реальному часі та моделей машинного навчання агровиробники отримують можливість оперативно реагувати на зміни умов вирощування, що сприяє підвищенню ефективності виробництва та стійкості агросистем до кліматичних змін.

Важливим напрямом є розвиток роботизованих систем із використанням методів імітаційного навчання, що дозволяє формувати адаптивні алгоритми керування на основі демонстрацій експертів. Такі підходи забезпечують покращення видимості об'єктів у складних умовах, зокрема при частковому перекритті рослин, і підвищують ефективність автоматизованого збирання врожаю.

Інноваційні системи точного землеробства також включають автоматизоване внесення добрив і засобів захисту рослин, що базується на даних сенсорного моніторингу та аналітичних моделей. Це дозволяє значно зменшити використання агрохімікатів, підвищити точність їх застосування та знизити негативний вплив на довкілля.

Суттєву роль у розвитку інтелектуального землеробства відіграють безпілотні літальні апарати та дистанційне зондування, що забезпечують оперативний моніторинг стану посівів, виявлення шкідників і захворювань, а також аналіз впливу кліматичних факторів. Поєднання спектрального аналізу зображень і оброблення даних дозволяє підвищити точність оцінювання стану рослин і прийняття управлінських рішень.

Інтелектуальні системи зрошення, що використовують IoT-пристрої та мобільні застосунки, забезпечують ефективне управління водними ресурсами за рахунок автоматичного регулювання режимів поливу відповідно до поточних параметрів середовища. Це сприяє зменшенню витрат води, підвищенню врожайності та забезпеченню сталого розвитку аграрного виробництва.

Розвиток IoT-технологій також сприяє створенню платформ для централізованого управління аграрними процесами, які забезпечують віддалений доступ до даних, контроль техніки та координацію виробничих операцій. Використання мобільних технологій і хмарних сервісів дозволяє агровиробникам оперативно отримувати інформацію та приймати ефективні рішення.

Водночас впровадження інтелектуальних систем супроводжується низкою викликів, зокрема високою вартістю технологій, обмеженою доступністю інфраструктури та недостатнім рівнем цифрової підготовки користувачів. Подолання цих бар'єрів потребує розвитку освітніх програм, удосконалення технічних рішень і формування сприятливого нормативного середовища.

Загалом автоматизація та впровадження IoT у сфері управління посівами відкривають нові можливості для підвищення ефективності, стійкості та екологічності аграрного виробництва. Використання даних, отриманих у реальному часі, у поєднанні з інтелектуальними алгоритмами забезпечує перехід до нової моделі сільського господарства, орієнтованої на точність, адаптивність і сталий розвиток.

4.6. Моніторинг довкілля та оптимізація аграрних систем

Поєднання нечіткої логіки з гідропонними технологіями забезпечує подвійний ефект: покращення росту рослин та зниження енергоспоживання порівняно з традиційними системами планування та органічного землеробства. Інтеграція технологій Інтернету речей (IoT) з нечітко-логічними моделями дозволяє створювати оптимізовані гідропонні системи. Використання сучасних алгоритмічних підходів сприяє формуванню більш стійких і екологічно збалансованих агровиробничих середовищ. Поєднання можливостей IoT із принципами нечіткої логіки підвищує ефективність керування виробничими процесами та сприяє впровадженню сталих практик у сучасному землеробстві. Такі підходи відкривають нові можливості для точного землеробства та підвищення аграрної продуктивності.

Інший підхід передбачає розроблення IoT-систем, що здійснюють безперервний моніторинг умов навколишнього середовища та автоматичне реагування на їх зміни. У разі підвищення температури система може активувати охолоджувальні вентилятори для стабілізації мікроклімату. При зниженні рівня природного освітлення автоматично вмикається штучне LED-освітлення. Окремі модулі керування водними ресурсами дозволяють оптимізувати їх використання. Така автоматизація сприяє підвищенню продуктивності агровиробництва та

одночасному зменшенню витрат ресурсів, що робить подібні системи ефективною основою сталого сільського господарства.

Інтеграція інтелектуальних сенсорів, включаючи датчики вологості ґрунту, pH, стану рослин і параметрів довкілля, з IoT-платформами, технологіями великих даних та штучного інтелекту є ключовим напрямом розвитку точного землеробства. Сучасні сенсорні системи, бездротові мережі та засоби дистанційного збору геопросторових даних дозволяють забезпечити оперативний моніторинг агроекосистем. Аналітика в режимі реального часу використовується для оптимізації зрошення, внесення добрив, захисту рослин і прогнозування врожайності. Водночас залишаються суттєві обмеження, зокрема висока вартість сенсорів, складність інтеграції даних, недостатнє мережеве покриття у віддалених регіонах, кібербезпекові ризики та дефіцит фахівців. Подолання цих викликів є важливою умовою розвитку сталого, дано-орієнтованого землеробства.

У міському сільському господарстві перспективним є застосування моделей прогнозної аналітики, що поєднують глибоке навчання, адаптивну обробку даних та зважування параметрів середовища для оцінювання стану культур у стабільних умовах вирощування. Використання динамічного масштабування ознак та адаптивного балансування вибірки підвищує точність прогнозних моделей, зокрема за показниками precision, recall та F1-score. Швидка обробка даних забезпечує можливість прийняття рішень у режимі реального часу. Такі системи демонструють ефективність у задачах оптимізації використання води, поживних речовин та енергії, що особливо важливо для міських агросистем в умовах обмежених ресурсів і площ.

Використання мікроконтролерних платформ у поєднанні з IoT-сенсорами дозволяє здійснювати збір даних у режимі реального часу. Отримана інформація передається до хмарних сервісів для візуалізації та зберігання даних. Для аналітичної обробки часто застосовуються алгоритми машинного навчання, зокрема метод випадкового лісу (Random Forest), що забезпечує високу точність прогнозування. Такий підхід демонструє перспективність використання інтелектуальної аналітики в аграрних системах моніторингу.

Інтеграція штучного інтелекту та Інтернету речей розглядається як ключовий напрям розвитку точного землеробства. Перспективними є роботизовані агросистеми, здатні виконувати операції збору врожаю, сортування та прополювання. Для моніторингу сільськогосподарських угідь використовуються технології диференціального GPS та дистанційного зондування. Дані, отримані в режимі реального часу, застосовуються для прогнозної аналітики. Додатково розглядається

використання сучасних технологій освітлення як елемента керування умовами росту рослин.

Сучасні системи аквакультури також активно інтегрують IoT-рішення. Зокрема, у біофлокових системах вирощування риби здійснюється безперервний моніторинг ключових параметрів середовища, таких як температура та рівень pH. Автоматизовані системи годування адаптують подачу корму відповідно до змін потреб риби. Такий підхід дозволяє підтримувати оптимальні умови для росту гідробіонтів, підвищуючи продуктивність та екологічну стійкість аквакультури.

У тепличному господарстві IoT-системи використовуються для контролю мікроклімату, зокрема температури та вологості. Сенсорні мережі у поєднанні з автоматизованими виконавчими механізмами забезпечують постійний моніторинг умов та їх оперативне коригування. Це дозволяє підвищити врожайність культур і одночасно зменшити енергоспоживання. Подібні системи сприяють переходу до більш ефективного та ресурсозберігаючого сільського господарства.

Інший підхід до керування тепличними системами також базується на безперервному моніторингу параметрів середовища з використанням інтелектуальних сенсорів та автоматизованих систем управління. Такі рішення забезпечують підтримання оптимальних умов для росту рослин шляхом динамічного регулювання температури та інших критичних параметрів. Це сприяє підвищенню продуктивності та зменшенню витрат ресурсів, формуючи основу для сталого розвитку тепличного виробництва.

Комплексні аграрні платформи поєднують інтелектуальний моніторинг стану культур із системами відстеження технічних процесів. Використання IoT-сенсорів та технологій аналізу великих даних дозволяє аграріям отримувати та обробляти інформацію в реальному часі. Це сприяє зменшенню витрат пального, зниженню негативного впливу на довкілля та підвищенню ефективності управлінських рішень. Подібні системи забезпечують перехід до сталих моделей агровиробництва з одночасним збереженням високої продуктивності.

Запропоновано комплексні алгоритмічні підходи для підтримки прийняття рішень у рослинництві, які базуються на аналізі даних у режимі реального часу, отриманих із сучасних ґрунтових сенсорів. Додатково інтегруються технології блокчейн для перевірки та автентифікації всіх зібраних даних, що забезпечує їхню достовірність і захищеність. Поєднання аналітики даних із безпечними механізмами валідації суттєво змінює процес прийняття рішень у сільському

господарстві, сприяючи більш ефективному використанню ресурсів і зниженню ризиків. Такий підхід підтримує розвиток сталих та високопродуктивних агротехнологій.

Окремий напрям досліджень пов'язаний із використанням методів машинного навчання для прогнозування врожайності та посухи. Запропоновані моделі демонструють високу точність прогнозування, досягаючи значень понад 98 % при тестуванні на різних наборах даних. Вони перевершують існуючі методи за показниками точності, чутливості та F-міри. Подібні підходи є особливо важливими для регіонів, що піддаються ризику посухи, оскільки дозволяють своєчасно приймати управлінські рішення на рівні господарств і державних структур.

Розвиток концепції Agriculture 4.0 передбачає широке впровадження цифрових технологій у сільське господарство. Основна увага приділяється аналізу можливостей і викликів, пов'язаних із цифровою трансформацією агросектору, а також перспективам подальшого розвитку інтелектуального землеробства. Ключовою метою є стимулювання впровадження інноваційних рішень, що базуються на сучасних цифрових технологіях, для підвищення ефективності агровиробництва.

Сучасне сільське господарство зазнало значної трансформації під впливом Інтернету речей, що дозволило перейти від традиційних методів до дано-орієнтованих технологій. IoT-системи забезпечують безперервний моніторинг стану рослин у реальному часі, підтримку точного прийняття рішень та оптимізацію виробничих процесів за рахунок оперативних сповіщень. Хмарні IoT-рішення з низькою вартістю впровадження демонструють потенціал для підвищення ефективності та сталості агровиробництва, особливо в умовах контрольованого середовища, зокрема в тепличному вирощуванні. Такі технології сприяють підвищенню продуктивності та екологічної стійкості агросистем.

Поєднання штучного інтелекту та Інтернету речей забезпечує можливість точного моніторингу сільськогосподарських культур у реальному часі та формування прогнозних моделей на основі великих масивів даних. Це дозволяє значно підвищити точність управління агропроцесами. Водночас впровадження таких технологій супроводжується низкою бар'єрів, серед яких висока вартість реалізації, недостатній рівень цифрових компетентностей у фермерів та обмежена інфраструктурна підтримка. Подолання цих обмежень є ключовою умовою для широкого впровадження інтелектуальних агротехнологій.

З огляду на прогнозоване зростання світового населення до майже 10 мільярдів осіб у середині XXI століття, потреба у підвищенні ефективності виробництва та розподілу продовольства стає критично важливою для забезпечення глобальної продовольчої безпеки. Сільськогосподарський сектор стикається з серйозними викликами, пов'язаними зі змінами клімату, які вже проявляються у вигляді різноманітних негативних екологічних наслідків. У цьому контексті концепція кліматично розумного сільського господарства (Climate-Smart Agriculture, CSA) розглядається як комплексний підхід до вирішення взаємопов'язаних проблем продовольчої безпеки, адаптації до кліматичних змін та їх пом'якшення.

Ключовим елементом кліматично розумного сільського господарства є впровадження сучасних цифрових технологій, зокрема Інтернету речей (IoT), який має значний потенціал для трансформації традиційних агротехнологій. Інтелектуальні IoT-рішення дозволяють отримувати дані в режимі реального часу щодо вологості ґрунту, температури та інших критично важливих параметрів довкілля. Це забезпечує можливість прийняття більш обґрунтованих управлінських рішень, оптимізації використання ресурсів, підвищення продуктивності та стійкості агросистем в умовах кліматичної мінливості.

Впровадження IoT у сільське господарство реалізується у різних формах, включаючи розгортання бездротових сенсорних мереж для моніторингу стану полів, інтеграцію автоматизованих систем зрошення для оптимізації використання водних ресурсів, а також застосування безпілотних літальних апаратів і роботизованих платформ для точного внесення агрохімікатів і моніторингу стану культур.

Глобальні кліматичні зміни створюють значні виклики для аграрного виробництва, зокрема щодо скорочення викидів парникових газів та забезпечення продовольчої безпеки. Кліматично розумне сільське господарство пропонує концептуальну основу для вирішення цих багатофакторних проблем. Сталі аграрні практики можуть бути досягнуті шляхом впровадження стратегій, спрямованих на підвищення адаптивності агросистем, зменшення викидів парникових газів та зміцнення продовольчої безпеки на національному рівні.

Дослідження в цій сфері підкреслюють важливість кліматично розумних практик для підвищення продовольчої безпеки та стійкості до кліматичних змін, особливо в регіонах, де їх впровадження вже дало позитивні результати, зокрема у зменшенні втрат тваринництва порівняно з традиційними підходами. Також відзначається економічна ефективність таких практик, оскільки агролісівництво, консерваційне

землеробство та вдосконалені системи зрошення здатні суттєво підвищити врожайність і прибутковість господарств. Водночас виділяються бар'єри впровадження, серед яких фінансові обмеження, проблеми землеволодіння та недостатній рівень фахової підготовки виробників.

Окремий напрям досліджень присвячений необхідності інноваційних агротехнологій в умовах глобальних викликів, таких як зростання попиту на продовольство, кліматичні зміни та дефіцит ресурсів. Основна увага приділяється інтеграції технологій Інтернету речей, штучного інтелекту та аналітики даних для оптимізації використання ресурсів і підвищення продуктивності сільськогосподарських культур. У межах експериментальних досліджень, що тривали понад два роки, було розглянуто вирощування бананів із застосуванням IoT-системи, яка включала різні сенсори для моніторингу ґрунтових і мікрокліматичних умов у режимі реального часу. Отримані результати показали суттєве підвищення ефективності використання ресурсів: зменшення споживання води приблизно на 25 %, скорочення внесення добрив на близько 30 %, а також збільшення врожайності на близько 20 % порівняно з традиційними методами.

4.7. Таксономія

Інтернет речей доволі новітня технологія стосовно рослинницької галузі тому, на думку авторів, доцільно застосувати тут систему класифікації складних об'єктів. В загальному розумінні ***таксономія –*** це спосіб розкласти все «по поличках», щоб упорядкувати інформацію та краще розуміти зв'язки між різними елементами

Застосування сучасних агротехнологій, розроблених упродовж останніх років, дозволило сформувати комплексну таксономію систем керування рослинництвом у межах розумного сільського господарства, яка представлена на рисунку. Чітка багаторівнева таксономія для IoT-орієнтованого розумного землеробства не лише впорядковує термінологію та підкреслює новітні тенденції розвитку, але й формує відтворювану, машинозчитувану структуру, що може бути використана як для наукових досліджень, так і для практичного впровадження.

Існуючі оглядові дослідження переважно описують широкий спектр застосувань аграрного IoT, таких як автоматизоване зрошення або моніторинг вологості ґрунту, однак не пропонують структурованої таксономії. Інші підходи зосереджуються на архітектурах систем та їхніх компонентах без формального таксономічного представлення. Окремі огляди методів машинного навчання для прогнозування

врожайності містять узагальнення алгоритмів і характеристик даних, однак також не включають окремого таксономічного розділу чи діаграми. Деякі класифікаційні підходи обмежуються трирівневою ієрархією застосувань або загальним поділом за категоріями використання, середовищем чи пристроями, а інші просто перелічують компоненти систем без побудови суворої ієрархічної структури.

Запропонована таксономія охоплює всі рівні систем керування рослинництвом – від сенсорів навколишнього середовища, польових та візуальних датчиків до виконавчих пристроїв, таких як обприскувачі та системи внесення добрив. Додатково враховуються комунікаційні протоколи (коротко- та довгодіапазонні), апаратні платформи розробки, мережеві та безпекові рівні, а також підходи до зберігання даних (edge-, cloud- та гібридні архітектури). Окремий рівень становлять аналітичні модулі, що включають методи машинного навчання (кероване та некероване навчання, глибоке навчання, метод опорних векторів, випадкові ліси, градієнтний бустинг, кластеризацію тощо).

Таксономія завершується прикладними напрямами, такими як моніторинг у режимі реального часу, прогнозна підтримка прийняття рішень, управління логістикою та відстеження продукції, а також забезпечення довгострокової стабільності агросистем. Побудова чіткої ієрархії, що охоплює рівні від мережевого шару до конкретних компонентів – сенсорів, виконавчих механізмів, обробки даних та прикладних систем – дозволяє ефективно простежити повний ланцюг керування: від датчика вологості ґрунту до клапана крапельного зрошення і далі до системи прогнозної підтримки прийняття рішень у єдиному інтегрованому середовищі.

Порівняльний аналіз таксономій

Запропонована таксономія характеризується повнотою охоплення п’яти основних напрямів: апаратне забезпечення, мережеві комунікації, зберігання даних, машинне навчання та прикладні застосування. Вона має ієрархічну глибину до третього рівня та включає деталізацію понад сотню елементів, що забезпечує високий рівень структурованості та практичної придатності.

Деякі існуючі підходи зосереджуються переважно на окремих аспектах IoT-систем. Зокрема, окремі роботи фокусуються на управлінні водними ресурсами з використанням сенсорів, комунікаційних мереж та методів машинного навчання, однак при цьому повністю ігнорують питання організації зберігання даних і загальної інфраструктури системи.

Інші спрощені архітектурні моделі демонструють базовий потік даних від сенсорів до хмарних сервісів з подальшою обробкою та передачею результатів на крайові пристрої. Проте такі підходи є надто лінійними і не враховують складність сучасних IoT-систем, зокрема різноманіття апаратних компонентів, варіантів комунікацій та архітектур зберігання даних.

Окремі таксономії демонструють інтеграцію компонентів у межах мережевих рівнів та описують загальні принципи передачі даних. Водночас вони часто не деталізують комунікаційні протоколи та не розглядають структуру систем зберігання даних, що є критичним для реальних IoT-реалізацій.

Узагальнюючи результати порівняльного аналізу, можна стверджувати, що запропонована таксономія є найбільш комплексною моделлю для класифікації IoT-систем у розумному землеробстві. Вона поєднує апаратні компоненти, мережеву інфраструктуру, системи зберігання, алгоритми машинного навчання та практичні застосування в єдину структуровану архітектуру, що забезпечує її високу практичну цінність та придатність до впровадження.

4.8. Сенсори

Сенсорні пристрої здійснюють вимірювання параметрів навколишнього середовища в режимі реального часу, що забезпечує прийняття обґрунтованих рішень з урахуванням специфічних умов вирощування культур і стану поля. Отримані дані є основою для адаптивного управління агротехнологічними процесами та реалізації принципів точного землеробства.

Окрему групу складають GPS-базовані системи відстеження, які використовуються для моніторингу місцезнаходження та переміщення сільськогосподарської техніки, тварин і безпілотних літальних апаратів. Такі системи забезпечують точне керування активами в режимі реального часу та підвищують ефективність логістичних і виробничих процесів.

До основних параметрів, що контролюються сенсорними системами довкілля, належать температура повітря, вологість, вологість ґрунту, кількість опадів, швидкість вітру, інтенсивність освітлення та мутність води. Узагальнене представлення найбільш важливих типів сенсорів наведено на рисунку 4.3.



Рис. 4.3. Різні типи датчиків, що використовуються в розумному сільському господарстві

Ця інформація дозволяє агровиробникам оптимізувати режими зрошення та керувати температурними умовами з метою забезпечення максимально сприятливого росту сільськогосподарських культур. Польові та рослинні сенсорні системи надають детальні дані щодо специфічних агрономічних характеристик, зокрема рівня pH ґрунту та вмісту поживних речовин, що є критично важливим для оптимального розвитку рослин.

Сенсори картування бур'янів забезпечують виявлення та просторову локалізацію заражених ділянок, що дозволяє здійснювати точкове внесення гербіцидів і зменшувати хімічне навантаження на агроекосистему. Датчики рівня та якості води контролюють доступність водних ресурсів і їхню придатність для зрошення, забезпечуючи оптимальне водопостачання культур. Сенсори солоності ґрунту дозволяють визначати концентрацію солей, що є критично важливим для чутливих сільськогосподарських культур.

Датчики поживних речовин та газообміну рослин відстежують емісію ключових газів, що дозволяє отримувати додаткову інформацію про фізіологічний стан рослин і динаміку їхнього розвитку. Кисневі сенсори відіграють важливу роль у моніторингу рівня кисню в повітрі та ґрунті, що є фундаментальним для процесів кореневого дихання.

До систем сенсорного моніторингу також належать візуальні пристрої, зокрема високороздільні камери, безпілотні літальні апарати та датчики руху, які забезпечують детальне спостереження за станом посівів. Вони дозволяють виявляти шкідників і захворювання на ранніх стадіях розвитку, що суттєво підвищує ефективність захисних заходів.

Сенсори є невід'ємною складовою будь-якої IoT-орієнтованої системи, і керування рослинництвом не є винятком. Різні типи сенсорних пристроїв відіграють ключову роль у формуванні цієї інноваційної системи управління, що забезпечує перехід до точного та дано-орієнтованого землеробства. Основні категорії сенсорів, які використовуються в таких системах, розглядаються у наступних підрозділах.

Застосування таких технологій створює передумови для більш точного, ресурсоефективного та сталого управління сільськогосподарським виробництвом.

Датчик температури

Датчики температури визначають температуру навколишнього середовища, що є критично важливим параметром для моніторингу погодних умов, керування тепличними комплексами та забезпечення оптимального росту сільськогосподарських культур. Оскільки розвиток і продуктивність рослин значною мірою залежать від температурного режиму, його безперервний моніторинг у режимі реального часу є обов'язковою складовою сучасних агросистем.

Існують різні типи температурних сенсорів, зокрема термістори, термопари, інфрачервоні датчики та резистивні температурні детектори (RTD). Як приклад часто використовується сенсор ***DHT11***.

Датчик вологості повітря

Датчики вологості повітря широко застосовуються для вимірювання вмісту водяної пари в атмосфері. Найчастіше цей параметр подається у вигляді відносної вологості (RH), яка визначається як співвідношення фактичного вмісту вологи до максимально можливого при даній температурі.

Контроль вологості є важливим у багатьох сферах, зокрема в сільському господарстві та метеорологічному прогнозуванні, оскільки він безпосередньо впливає на розвиток рослин і формування мікроклімату агроекосистем. Як приклад використовується датчик ***HIH4000***.

Датчик вологості ґрунту

Датчики вологості ґрунту призначені для визначення вмісту води в ґрунтовому середовищі. Вони забезпечують отримання даних у

режимі реального часу щодо рівня зволоження, що є ключовим фактором для оптимізації процесів зрошення.

Інформація про доступну вологу в ґрунті дозволяє агровиробникам приймати обґрунтовані рішення щодо часу та обсягів поливу. Принцип дії таких сенсорів часто базується на вимірюванні зміни електричної ємності ґрунту, яка корелює з вмістом вологи. Як приклад використовується ємнісний датчик вологості ґрунту.

Датчик дощу

Датчики дощу призначені для виявлення та вимірювання інтенсивності опадів. Основною функцією таких пристроїв є реєстрація кількості опадів та надання відповідних даних для систем керування водними ресурсами.

Вони широко застосовуються у метеостанціях, системах автоматизованого зрошення та розумному землеробстві для адаптації режимів поливу відповідно до фактичних погодних умов. Використання даних про опади в режимі реального часу дозволяє суттєво підвищити ефективність планування зрошення. Як приклад може бути використаний датчик ***RG-11***.

Датчик швидкості вітру

Датчик швидкості вітру, також відомий як анемометр, призначений для вимірювання швидкості повітряного потоку. Його застосування охоплює такі сфери, як оцінювання вітроенергетичного потенціалу, метеорологічний моніторинг, сільське господарство та авіація. Дані про швидкість вітру є важливими для аналізу погодних умов і формування прогнозів.

У сільському господарстві такі сенсори використовуються для оцінювання ризиків пошкодження культур у разі сильних вітрових навантажень, що дозволяє своєчасно вживати захисних заходів. Як приклад може бути використаний анемометр типу Davis.

Датчик освітленості (інтенсивності світла)

Датчики освітленості застосовуються для вимірювання інтенсивності світлового потоку в навколишньому середовищі. Вони дозволяють оцінювати якість та кількість світла, що надходить до рослин, і підтримувати оптимальні умови освітлення.

Світло є ключовим фактором фотосинтезу, тому його контроль має критичне значення для нормального росту та розвитку сільськогосподарських культур. Використання таких сенсорів дозволяє забезпечувати ефективне регулювання освітлення у контрольованих агросистемах. Як приклад використовується сенсор TSL2561.

Тепловий сенсор

Теплові сенсори відіграють важливу роль у середовищах із високою чутливістю до температурних змін, забезпечуючи контроль теплових втрат і розподілу температури. Вони можуть застосовуватися як у відкритому ґрунті, так і в закритих агросистемах.

Такі пристрої використовуються для моніторингу температури ґрунту та виявлення стресового стану рослин. Завдяки аналізу теплових сигнатур вони також можуть застосовуватися для виявлення сторонніх об'єктів або руху в контрольованих зонах шляхом фіксації температурних аномалій. Як приклад використовується тепловізійна камера FLIR.

Датчик pH

Показник pH характеризує концентрацію іонів водню у розчині. У сільському господарстві pH-датчики використовуються для визначення кислотно-лужного стану ґрунту, який безпосередньо впливає на ріст і розвиток рослин. Як приклад застосовується pH-зонд Atlas Scientific.

Датчик родючості ґрунту

Датчики родючості ґрунту призначені для аналізу поживного складу ґрунтового середовища. Вони вимірюють концентрації основних макроелементів, зокрема азоту (N), фосфору (P) та калію (K), які є ключовими компонентами для забезпечення родючості ґрунту.

Такі сенсори надають дані в режимі реального часу, що дозволяє аграріям оцінювати стан ґрунту та приймати обґрунтовані рішення щодо внесення добрив. Для вимірювання можуть використовуватися технології електропровідності (EC) або інфрачервоної спектроскопії, що забезпечують точну оцінку доступності поживних речовин.



Рис. 4.4. Датчик ґрунту CDT-70B

Отримана інформація використовується для оптимізації врожайності та зменшення негативного впливу агровиробництва на довкілля. Як приклад застосовується сенсор NPK. Прикладом такого сенсору є CDT-70B (https://www.codasensor.com/ ; рис. 4.4). Багатофункціональний датчик для ґрунту дозволяє

одночасно вимірювати температуру ґрунту, вологість, електропровідність, значення pH, вміст азоту, фосфору, калію, інше

Датчик рівня води

Датчики рівня води призначені для вимірювання висоти водяного стовпа у резервуарах, водоймах, річках та підземних водоносних горизонтах. Вони відіграють ключову роль в ефективному управлінні водними ресурсами, запобіганні переповненню, забезпеченні стабільного водопостачання та контролі якості води.

Для вимірювання рівня води використовуються різні технології, зокрема ультразвукові, ємнісні, тискові та поплавкові сенсори. У сільськогосподарських системах такі пристрої забезпечують стабільність і керованість водного балансу. Як приклад використовується ультразвуковий датчик рівня води.

Датчик солоності

Датчики солоності призначені для вимірювання концентрації солей у воді або ґрунті. Вони широко застосовуються у сільському господарстві, аквакультурі та екологічному моніторингу, оскільки рівень солоності безпосередньо впливає на стан ґрунтів, розвиток рослин та стабільність водних екосистем.

Підвищена солоність може призводити до зниження врожайності сільськогосподарських культур та погіршення умов існування водних організмів. Тому контроль цього параметра є важливим елементом систем точного землеробства та сталого природокористування. Як приклад використовується EC-метр.

Датчик рівня кисню

Датчики рівня кисню призначені для визначення концентрації розчиненого кисню у воді. Вони є критично важливими для екологічного моніторингу, аквакультури та промислових процесів.

У водних екосистемах підтримання оптимального рівня розчиненого кисню є необхідною умовою для виживання риби та інших гідробіонтів. Крім того, рівень кисню впливає на ріст і розвиток сільськогосподарських культур, оскільки багато рослин є чутливими до його нестачі в ґрунтовому середовищі. Як приклад використовується вимірювач розчиненого кисню YSI Pro20.

Датчик газів стебла рослин

Датчики газів стебла рослин призначені для вимірювання концентрації газів у тканинах рослин, що дозволяє отримувати інформацію про фізіологічні процеси, зокрема дихання та фотосинтез, які безпосередньо впливають на ріст і виживання культур.

Такі сенсори можуть використовувати оптичні або електрохімічні методи вимірювання. Вони встановлюються як безпосередньо у

провідну систему рослини, так і зовнішньо для безперервного моніторингу газообміну. Отримані дані дозволяють глибше аналізувати фізіологічний стан рослин і прогнозувати їх розвиток. Як приклад може використовуватися газоаналізатор LI-COR LI-7500A.

Сенсори безпілотних літальних апаратів (UAV)

Сенсори, встановлені на безпілотних літальних апаратах (UAV), є спеціалізованими вимірювальними системами, що забезпечують збір різноманітних даних для широкого спектра застосувань. До їх складу можуть входити камери високої роздільної здатності, мульти- та гіперспектральні системи зйомки, LiDAR (Light Detection and Ranging), тепловізійні сенсори та GPS-модулі.

Такі системи є ключовим інструментом у точному землеробстві, екологічному моніторингу, картографуванні територій, інспекції інфраструктури та ліквідації наслідків надзвичайних ситуацій. Використання UAV-сенсорів дозволяє швидко отримувати просторово точні дані про стан агроекосистем. Як приклад використовується DJI Phantom 4 Multispectral.

Датчик руху

Датчики руху застосовуються в системах керування рослинництвом для моніторингу переміщень та активності в аграрних полях, забезпечуючи важливу інформацію про диких тварин і людську діяльність. Вони також виконують важливу функцію забезпечення безпеки агрооб'єктів.

Основним завданням таких сенсорів є виявлення потенційних загроз, включаючи проникнення людей або тварин на сільськогосподарські ділянки. Це особливо важливо, оскільки сільськогосподарські культури можуть зазнавати значних пошкоджень від худоби або диких тварин. Системи виявлення руху дозволяють своєчасно реагувати на такі ситуації та запобігати втратам. Як приклад використовується PIR-датчик руху.

Обмеження сенсорних систем

Попри критичну важливість сенсорів у IoT-орієнтованих системах керування рослинництвом, вони мають низку обмежень, які необхідно враховувати. Зокрема, точність і надійність вимірювань можуть знижуватися у разі використання низькоякісних або неправильно відкаліброваних пристроїв.

Багато сенсорів мають обмежену зону покриття, а у віддалених регіонах додатковими проблемами стають слабка мережна інфраструктура та труднощі з підключенням до комунікаційних каналів. Оскільки сенсори є малими електронними компонентами,

вони є вразливими до зовнішніх впливів і можуть бути пошкоджені, що призводить до втрати даних або збоїв у роботі системи.

Додатковою проблемою є вплив навколишнього середовища, що може спричиняти появу шумів у даних через пил, дощ або фізичні пошкодження. Важливим обмежувальним фактором також є вартість впровадження та обслуговування сенсорних систем, що може бути суттєвим бар'єром для малих і середніх агровиробників.

Більшість фермерів не має достатнього рівня технічної підготовки для обслуговування та ремонту таких пристроїв. Окрему загрозу становить безпека даних, оскільки великі обсяги інформації, що генеруються IoT-сенсорами, можуть бути вразливими до несанкціонованого доступу або кіберзагроз. Забезпечення захисту даних є обов'язковою умовою ефективного функціонування таких систем і водночас залишається серйозним викликом.

Виконавчі механізми

Виконавчі механізми відіграють ключову роль в автоматизації аграрних процесів, оскільки забезпечують безпосередню реакцію системи на сигнали від сенсорів. Вони дозволяють реалізовувати автоматизовані операції зрошення, регулювання мікроклімату та захисту рослин від шкідників, формуючи замкнений контур керування в IoT-орієнтованих агросистемах.

Одним із важливих прикладів є системи внесення добрив, які використовують роботизовані механізми для рівномірного та точного розподілу поживних речовин без надлишкових втрат. Такі системи можуть бути реалізовані у вигляді розкидачів для обробки великих площ або інжекційних механізмів для цільового внесення окремих елементів живлення, що сприяє підвищенню ефективності живлення рослин і врожайності.

Автоматизовані системи зрошення забезпечують оптимізацію використання водних ресурсів за рахунок різних технологічних підходів. Системи дощування дозволяють рівномірно зволожувати великі площі з різноманітним рельєфом, тоді як крапельне зрошення забезпечує подачу води безпосередньо до кореневої зони рослин, зменшуючи втрати води та підвищуючи ресурсну ефективність.

Системи керування мікрокліматом використовуються у контрольованих умовах вирощування, зокрема в теплицях, і забезпечують підтримання оптимальних параметрів середовища. Вони включають вентиляційні системи для регулювання циркуляції повітря, охолоджувальні та нагрівальні елементи для стабілізації температурного режиму, а також затінювальні конструкції для захисту рослин від надмірного сонячного випромінювання та перегріву.

Додатково застосовуються автоматизовані системи освітлення, зокрема LED-технології, які забезпечують контрольоване штучне освітлення для підтримання процесів фотосинтезу, особливо в умовах закритого ґрунту або недостатнього природного освітлення.

У сфері захисту рослин використовуються автоматизовані системи обприскування, включаючи ультразвукові розпилювачі, що дозволяють ефективно контролювати популяції шкідників із мінімальним залученням ручної праці та зменшенням використання хімічних засобів.

Окремий напрям розвитку становить впровадження роботизованих систем у сільському господарстві. Сучасні роботи для прополювання здатні автоматично ідентифікувати та видаляти бур'яни, зменшуючи трудові витрати та підвищуючи ефективність догляду за посівами. Роботизовані збиральні системи забезпечують своєчасний збір урожаю з мінімальними втратами, тоді як сівалкові роботи дозволяють точно розміщувати насіння у ґрунті, оптимізуючи використання площі та ресурсів.

Платформи розробки

Платформи розробки є ключовим апаратним компонентом IoT-застосувань, оскільки забезпечують інтеграцію сенсорів, комунікаційних модулів та виконавчих механізмів у єдину керовану систему для автоматизації процесів керування рослинництвом. Вони формують обчислювальне ядро IoT-рішень, що дозволяє реалізовувати гнучкі та адаптивні системи моніторингу й керування агрооб'єктами.

Серед найпоширеніших рішень платформа Arduino вирізняється своєю відкритою архітектурою, універсальністю та простотою використання. Вона широко застосовується у навчальних проєктах, малих системах та швидкому прототипуванні IoT-рішень. Завдяки своїй доступності та гнучкості Arduino є ефективним інструментом для швидкої реалізації функціональних систем керування в агросфері.

Платформа Raspberry Pi представляє собою більш потужний міні-комп'ютер, який забезпечує значно вищий рівень обчислювальної продуктивності. Вона придатна для складних і масштабних IoT-застосувань, де необхідна обробка великих обсягів даних. Завдяки розширеним можливостям обчислення Raspberry Pi використовується для задач аналітики, управління та комунікації, зокрема в системах агромоніторингу, що працюють із даними від великої кількості сенсорів.

Платформа NodeMCU є економічно ефективним рішенням з відкритим програмним забезпеченням, яке широко застосовується для швидкого прототипування IoT-систем. Вона поєднує простоту

використання з можливістю бездротового підключення через Wi-Fi, що робить її особливо придатною для застосувань у віддалених аграрних регіонах, де важливими є низька вартість і простота впровадження. Окреме місце займають системи зв'язку на основі LoRa, які призначені для забезпечення довготривалого бездротового зв'язку на великих відстанях. Такі рішення є особливо ефективними в аграрному середовищі, де традиційні мережеві технології можуть бути недоступними або нестабільними.

У сукупності ці платформи розробки формують технологічну основу сучасних IoT-систем для керування рослинництвом, поєднуючи обчислювальну потужність, енергоефективність та можливості довготривалої комунікації. Ілюстрація зазначених платформ наведена на рисунку 4.5.

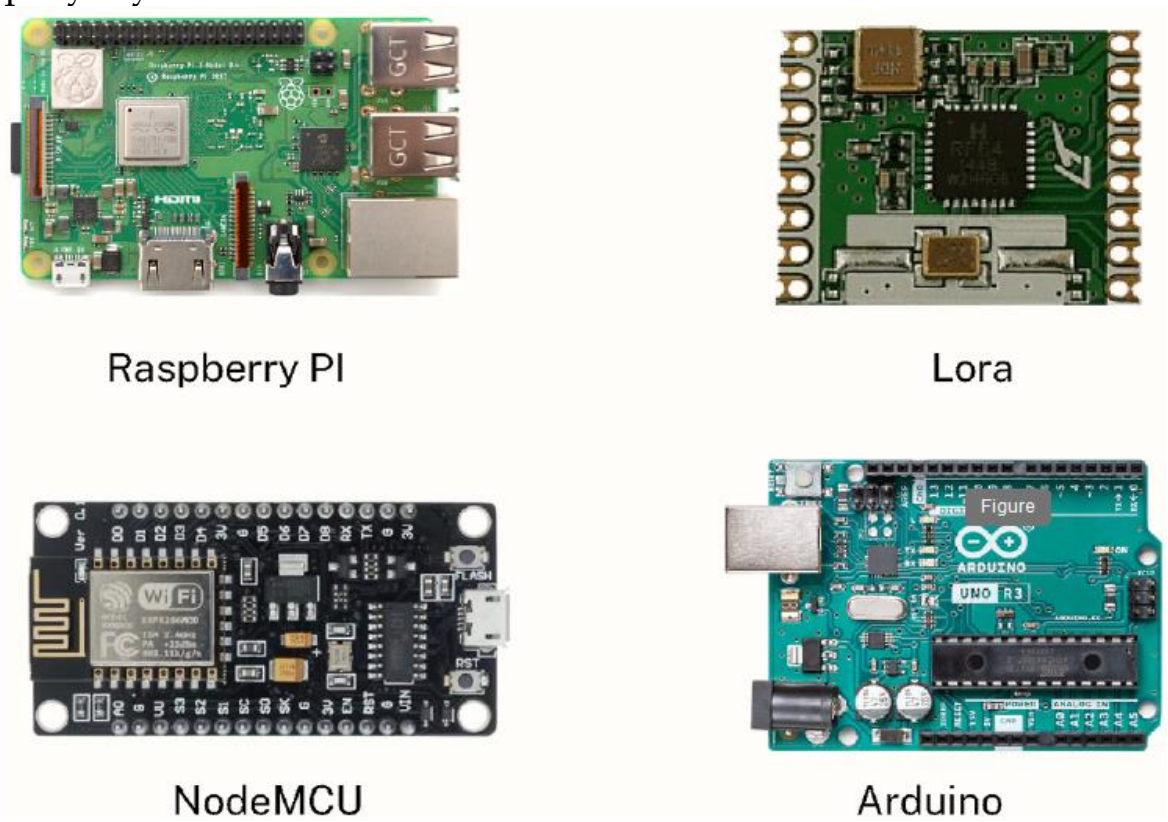


Рис. 4.5 Платформи IoT-систем, що часто використовуються в розумному управлінні сільськогосподарськими культурами

Їх інтеграція сприяє підвищенню ефективності, точності та масштабованості аграрних цифрових рішень.

4.9. Комунікаційні технології

Комунікаційні технології є ключовою складовою Інтернету речей (IoT) у сільському господарстві, оскільки забезпечують безперервний обмін даними між сенсорами, роботизованими системами та іншими

пристроями на фермі. Мережеві технології охоплюють як короткодіапазонні рішення (Bluetooth, Wi-Fi), так і довгодіапазонні системи зв'язку (4G/5G, LoRaWAN, NB-IoT, супутникові канали), які функціонують у багаторівневій архітектурі.

Довгодіапазонні системи зв'язку призначені для передачі даних на великі відстані, що робить їх особливо придатними для масштабного керування аграрними угіддями. До таких рішень належать, зокрема, LoRaWAN, який використовує технологію LoRa для забезпечення надійного зв'язку на великих територіях, а також протоколи маршрутизації для низькоенергетичних мереж. Подібні технології дозволяють здійснювати ефективний моніторинг і керування сільськогосподарськими полями навіть у віддалених регіонах.

Короткодіапазонні комунікаційні технології застосовуються у локальних середовищах, де не потрібна передача великих обсягів даних на значні відстані. У таких системах використовуються Bluetooth, Wi-Fi, Zigbee, NFC, RFID та інші бездротові технології для забезпечення зв'язку між окремими ділянками господарства. Вони дозволяють у режимі реального часу контролювати стан обладнання та посівів, а також оперативно реагувати на зміни умов вирощування.

Мережевий рівень IoT-архітектури відіграє фундаментальну роль у маршрутизації, передаванні та керуванні потоками даних, забезпечуючи узгоджену взаємодію всіх компонентів системи. У контексті керування рослинництвом IoT-системи генерують великі обсяги даних, тому ефективні підходи до їх зберігання є критично важливими. Дані можуть зберігатися як на локальних фермерських серверах, так і в хмарних сховищах, причому хмарні рішення забезпечують масштабованість, віддалений доступ і можливість обробки даних у режимі реального часу для підтримки прийняття рішень.

Зі збільшенням кількості підключених IoT-пристроїв зростає важливість забезпечення кібербезпеки аграрних мереж. Захист від несанкціонованого доступу та витоку даних є критичним для збереження цілісності аграрних систем управління. Впровадження комплексних заходів безпеки дозволяє мінімізувати ризики та забезпечити надійну роботу цифрової інфраструктури.

Комунікаційні протоколи визначають стандарти та правила обміну даними між пристроями, забезпечуючи їхню сумісність і взаємодію в межах гетерогенних систем. Мережеві протоколи та хмарна інфраструктура координують потоки даних, забезпечуючи їхню своєчасну агрегацію та обробку для подальшої аналітики.

4.9.1. Мережевий рівень (Network layer)

Мережевий рівень відіграє критично важливу роль в організації архітектури обміну даними, забезпечуючи безпечну, надійну та ефективну комунікацію в межах екосистеми Інтернету речей (IoT). Його функціональність охоплює передачу даних, інтеграцію з хмарними сервісами та забезпечення інформаційної безпеки. Завдяки багаторівневому поділу комунікаційних процесів IoT-системи набувають більшої гнучкості, масштабованості та стійкості, що спрощує керування великою кількістю взаємопов'язаних пристроїв.

Мережевий рівень формує основу для узгодженої взаємодії різних компонентів системи та включає низку ключових підсистем, які забезпечують функціонування IoT-архітектури в аграрних застосуваннях.

4.9.2. Прикладний рівень (Application)

Прикладний рівень виконує функцію інтерфейсу між користувачем і IoT-системою, забезпечуючи взаємодію з мережею та керування підключеними пристроями. Він дозволяє автоматизувати повсякденні аграрні операції та надає засоби моніторингу і керування технологічними процесами.

Цей рівень є ключовим для формування персоналізованого користувацького досвіду та адаптації IoT-рішень до конкретних завдань агросектору. У сфері розумного землеробства він оптимізує комунікацію в таких застосуваннях, як моніторинг стану культур, керування системами зрошення та аналіз агроданих для підвищення ефективності виробничих процесів.

4.9.3. Хмарний рівень (Cloud)

Хмарна інфраструктура виступає центральним вузлом для обробки великих обсягів даних, які генеруються IoT-сенсорами в аграрному середовищі. Замість локального зберігання даних хмарні сервіси забезпечують масштабовану архітектуру для їх зберігання, управління та аналітичної обробки в режимі реального часу.

У системах точного землеробства сенсори, розміщені в полі, безперервно збирають дані про вологість ґрунту, температуру та рівень поживних речовин і передають їх до хмарної платформи для подальшого аналізу. Хмарні рішення забезпечують доступ до потужних інструментів обробки даних, включаючи методи машинного навчання та штучного інтелекту.

Додатковою перевагою є можливість віддаленого доступу до систем керування через мобільні застосунки або вебплатформи, що

дозволяє аграріям приймати обґрунтовані рішення щодо зрошення, внесення добрив і захисту рослин. Такий підхід підвищує ефективність використання ресурсів, зменшує втрати та сприяє збільшенню врожайності.

Крім того, хмарні технології забезпечують гнучке управління мережевими ресурсами, підтримують масштабованість системи та оптимізують розподіл навантаження між пристроями й сервісами. Функції балансування навантаження та керування трафіком дозволяють рівномірно розподіляти запити між серверами або центрами обробки даних, що зменшує затримки та підвищує загальну продуктивність системи.

4.9.4. Інформаційна безпека

Інформаційна безпека є одним із ключових пріоритетів у сучасному дано-орієнтованому середовищі. На цьому рівні забезпечується захист даних і пристроїв від несанкціонованого доступу, а також запобігання їх модифікації, підробці або іншим формам втручання. Це особливо важливо для аграрних систем, оскільки вони обробляють чутливу інформацію, включаючи виробничі показники та операційні стратегії.

Окрему увагу приділяють безпеці маршрутизаційних протоколів, які є вразливими до атак типу підміни маршруту (Route Spoofing) або відмови в обслуговуванні (Denial of Service, DoS). Для підвищення рівня захисту застосовуються захищені маршрутизаційні протоколи, що гарантують цілісність маршрутизаційної інформації та запобігають її несанкціонованій зміні.

Важливим елементом мережевої безпеки є також використання міжмережевих екранів (firewalls), які аналізують вхідний і вихідний трафік, перевіряють пакети даних та реалізують політики безпеки для блокування потенційно небезпечних з’єднань. Це дозволяє значно знизити ризики вторгнень та забезпечити стабільність роботи аграрних IoT-систем.

4.9.5. Комунікаційні протоколи

Комунікаційні протоколи являють собою набір правил, що визначають порядок передавання та приймання даних у мережі. Вони забезпечують узгоджену взаємодію між пристроями та гарантують надійний, структурований обмін інформацією в IoT-середовищі.

У системах розумного землеробства протоколи керують обміном даними між сенсорами, виконавчими механізмами, роботизованими системами та центральною платформою управління. Вони також

відповідають за виявлення та корекцію помилок під час передачі даних, що підвищує загальну надійність системи.

Важливим аспектом є компроміс між пропускною здатністю та покриттям мережі. Висока пропускна здатність забезпечує швидку передачу великих обсягів даних, однак зазвичай обмежує радіус дії через підвищене енергоспоживання та вимоги до якості сигналу. У свою чергу, розширене покриття досягається за рахунок використання нижчих частот, які забезпечують кращу проникність і більшу дальність, але характеризуються нижчою швидкістю передачі даних.

Таким чином, вибір комунікаційного протоколу в аграрних IoT-системах є компромісом між швидкістю, енергоспоживанням та радіусом дії, що має критичне значення для ефективної роботи інфраструктури розумного землеробства.

4.9.6. Діапазон зв'язку (Communication range)

Діапазон зв'язку є важливим параметром у сільськогосподарських технологіях, оскільки він визначає відстань, на якій можливе передавання даних між пристроями. У сучасних аграрних IoT-системах він поділяється на два основні типи: довгодіапазонний та короткодіапазонний зв'язок, кожен із яких адаптований до різних масштабів і умов функціонування господарств.

Довгодіапазонні комунікації включають технології, здатні забезпечувати передачу даних на великі відстані при низькому енергоспоживанні. Однією з ключових технологій є LoRaWAN, що дозволяє формувати широкозонні мережі з низьким енергоспоживанням. У сфері розумного землеробства ця технологія є особливо ефективною для об'єднання пристроїв на великих сільськогосподарських територіях, забезпечуючи передачу даних на значні відстані з мінімальними енергетичними витратами, що робить її однією з найбільш придатних для аграрних застосувань.

Окремо застосовується протокол маршрутизації для низькоенергетичних та нестабільних мереж, який спеціально розроблений для середовищ з обмеженими ресурсами, зокрема з нестабільним зв'язком або низьким рівнем енергозабезпечення. Це робить його придатним для масштабних аграрних мереж, де важливо забезпечити стійкість і надійність передачі даних.

Короткодіапазонні комунікації охоплюють низку технологій, які забезпечують ефективну взаємодію пристроїв у межах обмеженої території. Bluetooth є широко поширеним стандартом для низькоенергетичного локального обміну даними між пристроями в межах фермерських господарств. Технологія NFC забезпечує

надкороткий радіус дії і використовується для швидкого обміну даними між пристроями, такими як смартфони та IoT-обладнання.

Wi-Fi забезпечує стабільне бездротове підключення на середніх відстанях і застосовується у фермах із розвиненою мережевою інфраструктурою. Zigbee використовується у сенсорних мережах завдяки низькому енергоспоживанню та можливості ефективної передачі невеликих обсягів даних. GPRS забезпечує мобільний зв'язок середньої швидкості та використовується для систем, які потребують постійного доступу до мережі в польових умовах.

Технологія RFID застосовує радіочастотні поля для автоматичної ідентифікації та відстеження об'єктів шляхом зчитування спеціальних міток. Вона широко використовується для управління худобою, технікою та іншими активами у сільському господарстві, забезпечуючи ефективний контроль і облік ресурсів. Загальний процес взаємодії цих технологій у межах аграрної IoT-інфраструктури представлено на рисунку 4.6.

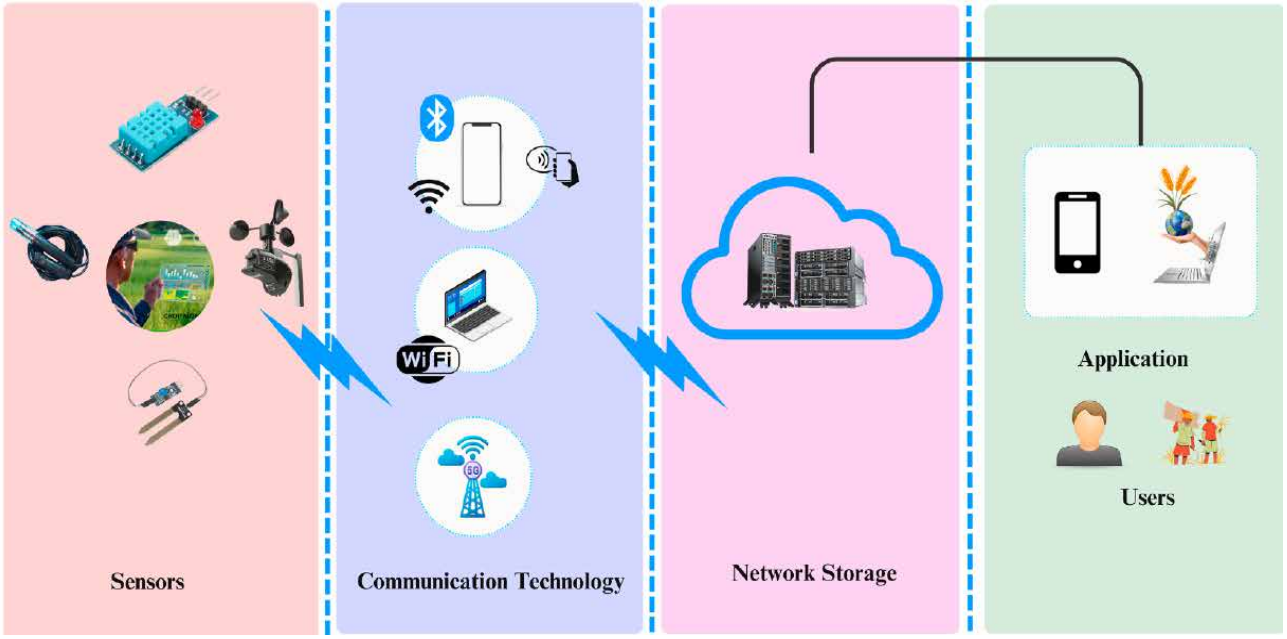


Рис. 4.6. Комунікаційні технології

Управління рослинництвом у межах IoT-систем генерує великі обсяги просторово-часових даних, включаючи вологість ґрунту, метеорологічні показники, зображення з камер і дронів, а також дані про врожайність. Такі дані потребують ефективного зберігання як на локальному рівні, так і в хмарних середовищах для подальшої аналітики та прийняття рішень. Пристрої крайового (edge) зберігання забезпечують обробку та зберігання даних безпосередньо поблизу джерел їхнього формування - сенсорів та польового обладнання. Це дозволяє зменшити затримки передачі, знизити навантаження на

мережу та підвищити швидкість реакції системи за рахунок локальної обробки інформації.

4.10. Мережеве зберігання даних (Network storage)

Мережеве зберігання є невід'ємною складовою IoT-архітектури у сільському господарстві, оскільки забезпечує безпечне збереження даних, отриманих від сенсорів і пристроїв. Воно може реалізовуватися у вигляді хмарних сервісів або локальних мережевих сховищ, при цьому обов'язковим є використання механізмів захисту даних для забезпечення їхньої цілісності, доступності та достовірності.

Мережеве сховище (Network-Attached Storage, NAS) є спеціалізованим пристроєм, який забезпечує зберігання та доступ до даних через мережу. Джерелом таких даних можуть бути як централізовані, так і розподілені системи. NAS функціонує як сервер для зберігання файлів і забезпечення спільного доступу до них, що робить його ефективним, відносно недорогим та масштабованим рішенням для аграрних IoT-систем.

Зберігання даних, отриманих від IoT-пристроїв і сенсорів, є критично важливим елементом загальної системної архітектури, оскільки такі системи працюють з великими потоками даних у режимі реального часу. У зв'язку з цим активно застосовуються як централізовані, так і децентралізовані моделі зберігання, що дозволяють підвищити масштабованість системи.

Додатково використовуються розподілені системи зберігання для управління сирими та прикладними даними IoT, що дозволяє зменшити ризики втрати або пошкодження інформації. Для динамічного керування ресурсами зберігання також застосовуються підходи програмно-визначених мереж (SDN), які забезпечують гнучке управління інфраструктурою.

Окрему роль відіграють технології кешування в мережі (In-Network Caching), які дозволяють зменшити затримки доступу до даних і знизити мережевий трафік за рахунок зберігання часто використовуваної інформації ближче до користувача.

Сучасні підходи до мережевого зберігання також передбачають інтеграцію технологій блокчейн для підвищення рівня захисту та конфіденційності даних, що є особливо важливим у випадку роботи з чутливою аграрною інформацією.

Узагальнено, системи зберігання в аграрних IoT-архітектурах поділяються на крайові (edge), хмарні та гібридні рішення, кожне з яких має власні переваги залежно від масштабу, вимог до швидкодії та рівня доступності даних.

4.10.1. Крайове зберігання (Edge storage)

Крайове зберігання передбачає розміщення даних максимально близько до джерела їхнього формування, зазвичай на пристроях типу мережевих сховищ (NAS) або IoT-шлюзах. Такий підхід забезпечує швидкий доступ до даних, зменшує затримки та скорочує навантаження на мережеву інфраструктуру за рахунок попередньої обробки інформації безпосередньо на місці її виникнення перед передачею в хмарні сервіси.

Рішення на основі NAS є відносно простими в управлінні та економічно ефективними, оскільки забезпечують локальну агрегацію даних і резервування інформації. IoT-шлюзи, у свою чергу, виконують функції тимчасового зберігання (кешування), локальної аналітики та проміжної обробки даних, що підвищує швидкість прийняття рішень безпосередньо на рівні поля.

4.10.2. Хмарне зберігання (Cloud storage)

Хмарне зберігання забезпечує високу масштабованість, гнучкість і доступність даних, що генеруються IoT-пристроями. Воно є ключовим компонентом сучасних аграрних інформаційних систем, оскільки дозволяє працювати з великими масивами даних та забезпечує доступ до них з будь-якої точки.

Серед поширених хмарних платформ можна виділити Azure Blob Storage, Amazon S3 та Google Cloud Storage. Azure Blob Storage забезпечує масштабоване зберігання даних і інтегровані аналітичні сервіси, що є корисним для обробки великих аграрних наборів даних. Amazon S3 характеризується високою доступністю, надійністю та довговічністю зберігання, що робить його придатним для систем безперервного моніторингу посівів і точного землеробства. Google Cloud Storage, у свою чергу, відзначається глибокою інтеграцією з інструментами великих даних і підтримує побудову складних аналітичних моделей для прогнозної агрономії.

4.10.3. Гібридне зберігання (Hybrid storage)

Гібридні підходи до зберігання поєднують переваги крайових і хмарних рішень, забезпечуючи оптимальний баланс між затримками передачі, використанням пропускної здатності мережі та витратами на зберігання даних. У таких системах первинна обробка даних виконується на периферії (edge-рівні), після чого відфільтровані або агреговані дані передаються до хмарного середовища для довгострокового зберігання та поглибленої аналітики.

Такий підхід дозволяє ефективно підтримувати як задачі моніторингу в реальному часі, так і масштабні аналітичні процеси. Гібридні системи підвищують гнучкість управління, забезпечуючи адаптацію до змінних умов агровиробництва та різних вимог до обробки даних.

Використання гібридного зберігання підвищує стійкість системи до відмов, сприяє більш складному аналізу даних і оптимізує використання мережевих ресурсів у розумному землеробстві. Саме тому гібридний підхід розглядається як один із найбільш перспективних для сучасних систем керування рослинництвом, оскільки поєднує оперативність реакції з глибинними аналітичними можливостями.

4.11. Штучний інтелект та машинне навчання

Інтеграція штучного інтелекту (ШІ) та Інтернету речей (IoT) суттєво трансформує сучасні аграрні практики, формуючи нову парадигму керування сільським господарством, що базується на даних, автоматизації та адаптивному прийнятті рішень. Такий підхід забезпечує перехід від традиційного землеробства до інтелектуальних агросистем, здатних автономно реагувати на зміни навколишнього середовища.

Машинне навчання є складовою штучного інтелекту, яка дозволяє комп'ютерним системам виявляти закономірності та залежності у даних без явного програмування правил. Алгоритми навчаються на великих масивах інформації, поступово коригуючи внутрішні параметри з метою мінімізації похибки. Після навчання модель здатна узагальнювати отримані закономірності та застосовувати їх до нових, раніше невідомих даних, що забезпечує прогнозування та прийняття рішень у різних прикладних задачах.

Загальний процес машинного навчання включає кілька послідовних етапів: постановку задачі та збір даних, їх попередню обробку для очищення та структурування, дослідницький аналіз даних для виявлення закономірностей, вибір і навчання моделі, налаштування гіперпараметрів, а також оцінювання якості моделі за допомогою відповідних метрик. Завершальним етапом є впровадження моделі у практичні системи для виконання прогнозування та прийняття рішень у реальному середовищі.

Моделі машинного навчання перетворюють первинні агродані на прогнозні інсайти, що підтримують технології точного землеробства. У задачах класифікації та регресії широко застосовуються алгоритми навчання з учителем, зокрема методи опорних векторів, дерева рішень,

наївний баєсівський класифікатор, випадковий ліс, логістична регресія та градієнтний бустинг.

Навчання з учителем базується на використанні розмічених даних для виявлення закономірностей і побудови моделей, здатних приймати рішення або здійснювати класифікацію нових спостережень. Такі методи є ефективними для задач виявлення хвороб рослин, керування системами зрошення, картування бур'янів та інших аграрних застосувань.

Для більш складних задач, таких як розпізнавання зображень і прогнозування часових рядів, використовуються методи глибокого навчання, зокрема згорткові нейронні мережі та штучні нейронні мережі. Ці підходи дозволяють здійснювати раннє виявлення хвороб рослин, аналіз стану ґрунтів та прогнозування фаз росту культур.

Комп'ютерний зір із використанням моделей типу YOLO у поєднанні з бібліотеками обробки зображень дозволяє оцінювати стан посівів на основі зображень, отриманих у польових умовах. Штучні нейронні мережі, у свою чергу, застосовуються для прогнозування врожайності на основі багатофакторних вхідних даних.

Для підвищення точності моделей використовуються методи відбору ознак, які дозволяють визначити найбільш значущі параметри для навчання. Серед таких підходів застосовуються методи на основі еволюційної оптимізації, інформаційних критеріїв та нечіткої класифікації.

Оцінювання ефективності моделей здійснюється за допомогою стандартних метрик, зокрема точності, повноти, F-міри та показника precision. У наступному підрозділі розглядається роль машинного навчання в IoT-системах розумного землеробства з точки зору його функціональної класифікації та практичного застосування.

4.11.1. Застосування (Applications)

Системи Інтернету речей (IoT) у розумному землеробстві забезпечують широкий спектр застосувань, які підвищують точність, ефективність і сталість аграрного виробництва. Значним кроком уперед є інтеграція штучного інтелекту та машинного навчання, що дозволяє автоматизувати процеси прийняття рішень на основі даних у режимі реального часу. Це дає змогу реалізовувати такі функції, як діагностика хвороб рослин, аналіз родючості ґрунтів та прогнозування розвитку культур.

Сучасні системи моніторингу забезпечують безперервний контроль стану посівів, що дозволяє оптимізувати процеси зрошення, захисту від шкідників та профілактики захворювань. Таким чином,

аграрні IoT-рішення переходять від реактивного до проактивного управління виробничими процесами.

Важливим етапом у рослинництві є збір урожаю, який включає також передзбиральні та післязбиральні операції. Використання методів машинного навчання та штучного інтелекту дозволяє суттєво підвищити ефективність цих процесів, зокрема у задачах сортування, калібрування, оцінки якості та логістичного управління, що сприяє зменшенню втрат після збору врожаю.

Використання стандартизованих процесів машинного навчання та відкритих аграрних наборів даних сприяє підвищенню точності моделей та зниженню витрат на виробництво. Це створює основу для побудови ефективних систем прогнозування та оптимізації аграрних процесів.



Для автоматизації процесів на всіх етапах - від передзбирального до післязбирального - застосовуються інтегровані IoT-рішення з використанням технології блокчейн і смарт-контрактів. Такий підхід забезпечує прозорість, безпеку та відстежуваність усіх операцій у ланцюгу постачання, а також дозволяє здійснювати автоматизований контроль якості та руху продукції.

Окремі дослідження демонструють ефективність комплексних систем на основі машинного навчання та статистичних методів для зменшення втрат після збору врожаю. Такі системи забезпечують оперативні сповіщення та прогнозну аналітику, що допомагає аграріям і складським операторам приймати своєчасні рішення.

Іншим напрямом є використання IoT у післязбиральному управлінні, зокрема у контрольованих умовах вирощування саджанців та щеплення рослин у тепличних комплексах. Моніторинг параметрів середовища в режимі реального часу дозволяє підвищити успішність технологічних процесів і покращити якість продукції. Візуалізація

даних через веб- та мобільні платформи сприяє зменшенню втрат і підвищенню ефективності виробництва.

Системи машинного навчання також активно застосовуються у практичних задачах збору врожаю, забезпечуючи автоматизацію процесів і підвищення точності операцій. Сучасні інструменти аналізу даних дозволяють фермерам приймати обґрунтовані рішення, що підвищує загальну ефективність агровиробництва.

Додатково IoT-рішення забезпечують віддалене керування аграрними процесами, зменшуючи потребу в ручній праці. Вони також покращують відстежуваність продукції та контроль якості шляхом моніторингу всього шляху продукції - від поля до кінцевого споживача.

Логістичні процеси трансформуються завдяки використанню аналітики в реальному часі та прогнозних моделей, що дозволяє оптимізувати ланцюги постачання. Інтеграція з хмарними сервісами забезпечує зберігання та обробку великих обсягів даних, формуючи основу для прийняття ефективних управлінських рішень.

Окремий напрям становлять застосування для оцінки параметрів навколишнього середовища, які дозволяють точно визначати рівень поживних речовин у ґрунті, кількість опадів та інші критичні фактори, що впливають на врожайність.

Загалом, запропонована система класифікації застосувань у розумному землеробстві формує комплексну структуру, яка охоплює ключові етапи агровиробництва. Оптимізація використання ресурсів і впровадження інтелектуальних технологій забезпечують суттєве підвищення продуктивності та сприяють переходу до більш сталих і ефективних аграрних практик у майбутньому.

4.12. Основні проблеми та виклики

Попри значний прогрес у застосуванні IoT у сільському господарстві, реальне впровадження цих технологій залишається обмеженим. Хоча в багатьох дослідженнях розглянуто потенціал IoT в аграрній сфері, лише частина запропонованих рішень була реалізована на практиці у масштабованих системах. Такий розрив підкреслює необхідність досліджень, які краще поєднують теоретичні розробки з реальними умовами та практичними викликами сільського господарства. У межах даної роботи наголошується на еволюційній ролі IoT у керуванні рослинництвом через запропоновану структуровану таксономію, що систематизує його різноманітні компоненти та застосування. Водночас існує низка ключових проблем, які необхідно вирішити для повноцінної інтеграції IoT у аграрний сектор.

По-перше, високі витрати та складність впровадження IoT залишаються суттєвим бар'єром, особливо для малих фермерських господарств. У багатьох випадках доступні рішення є економічно та технічно орієнтованими на великі агрохолдинги, що обмежує рівність доступу до технологій. Тому існує потреба у розробці недорогих, масштабованих та відкритих IoT-рішень, які можуть адаптуватися до різних агроекологічних умов.

По-друге, обмежена перенесуваність агроекологічних та прогнозних моделей між регіонами ускладнює їх широке застосування. Моделі, навчені в одному середовищі, часто потребують суттєвого перенавчання для використання в інших умовах. Цю проблему можна вирішити за допомогою методів адаптації домену, локального налаштування моделей або федеративного навчання, яке дозволяє спільне навчання без централізованого обміну даними.

По-третє, сучасні архітектури часто недостатньо враховують питання володіння даними, управління ними та конфіденційності. Збирання великих обсягів аграрних даних створює ризики несанкціонованого доступу, кіберзагроз і зловживання інформацією. Тому необхідним є посилення кібербезпеки через децентралізовані архітектури, сучасні методи шифрування та безпечні механізми обміну даними. У цьому контексті технології блокчейн можуть забезпечити прозорість, незмінність і відстежуваність даних у IoT-системах.

По-четверте, екологічний вплив IoT-пристроїв та хмарної аналітики часто залишається поза увагою. Споживання енергії, пов'язане з масштабним збором, передачею та обробкою даних, викликає занепокоєння щодо сталого розвитку. Перспективними є підходи до створення енергоефективних IoT-архітектур, включаючи біорозкладні сенсори та адаптивні режими енергозбереження пристроїв.

Подальші дослідження мають бути зосереджені на легких Edge-AI системах та методах федеративного навчання з урахуванням конфіденційності, що дозволяють приймати рішення в реальному часі без централізованого зберігання даних. Паралельно розвиток енергоефективної робототехніки, зокрема сонячних дронів та оптимізованих роботів для прополювання, сприятиме сталому розвитку аграрної автоматизації.

Крім того, ***технології цифрових двійників*** мають потенціал для моделювання поведінки агроекосистем за різних кліматичних і економічних сценаріїв, що підвищує якість прогнозування. Біогібридні та автономні сенсори відкривають перспективи створення систем із мінімальним обслуговуванням.

Важливим викликом залишається інтероперабельність. Відсутність стандартизованих протоколів між різнорідними IoT-системами ускладнює безперервний обмін даними. Вирішення цієї проблеми потребує розробки універсальних комунікаційних стандартів, проміжного програмного забезпечення та ефективних edge-обчислювальних платформ.

Окремо слід відзначити недостатній рівень цифрової грамотності серед фермерів. Багато користувачів стикаються з труднощами у використанні IoT через недостатню підготовку та відсутність навчання. Це підкреслює необхідність розвитку навчальних програм, інтуїтивних інтерфейсів та впровадження AI-асистентів для підтримки користувачів.

У деяких регіонах, де сільське господарство відіграє ключову роль в економіці, додатковими викликами є урбанізація, низька рентабельність та залежність від традиційних методів господарювання. Впровадження IoT-моніторингу, вертикального землеробства та технологій точного землеробства може допомогти вирішити ці проблеми шляхом підвищення врожайності, зниження витрат і оптимізації використання земельних ресурсів.

Нарешті, передові технології, такі як генеративний штучний інтелект та великі мовні моделі, поки що недостатньо досліджені в аграрному контексті. Вони можуть значно покращити процес прийняття рішень завдяки наданню рекомендацій у реальному часі, автоматичному виявленню аномалій та персоналізованим порадникам для фермерів. Багатомодальні системи, що поєднують комп'ютерний зір і обробку природної мови, здатні суттєво трансформувати моніторинг сільськогосподарських культур.

Узагальнюючи, подальший розвиток IoT у сільському господарстві потребує комплексного підходу, що охоплює технологічні, екологічні, економічні та освітні аспекти, з метою створення стійких, ефективних і інклюзивних систем розумного землеробства.

Висновки

Конвергенція Інтернету речей (IoT) із технологіями штучного інтелекту та машинного навчання має значний потенціал для трансформації точного землеробства. У системах точного зрошення сенсори IoT у поєднанні з моделями прогнозування погоди на основі ШІ дозволяють автоматично коригувати графіки поливу залежно від стану ґрунту, метеорологічних умов і фаз розвитку культур. Це сприяє зменшенню нераціонального використання води, запобігає перезволоженню та підтримує оптимальний рівень поживних речовин у ґрунті.

Системи управління шкідниками та хворобами рослин на основі штучного інтелекту використовують методи комп'ютерного зору для аналізу зображень, отриманих з камер IoT-пристроїв і безпілотних літальних апаратів. Це дозволяє прогнозувати ймовірність виникнення спалахів хвороб або нашестя шкідників, визначати сприятливі умови для їх розвитку та автоматично інформувати аграріїв про потенційні ризики. Такий проактивний підхід зменшує використання пестицидів і підвищує економічну ефективність виробництва.

Загалом, інтеграція IoT, штучного інтелекту та машинного навчання є ключовим фактором розвитку сучасного розумного землеробства

Питання для самоперевірки

1. Яким чином IoT-сенсори можуть підвищити точність агрохімічного моніторингу ґрунтів у реальному часі?
2. Які параметри ґрунту є найбільш критичними для агрохімічного аналізу в IoT-системах (з урахуванням NPK, pH, вологості, EC тощо)?
3. Як інтеграція IoT та моделей машинного навчання може покращити прогнозування потреб рослин у добривах?
4. Чому просторово-часові дані (spatiotemporal data) є важливими для агрохімічного аналізу в точному землеробстві?
5. Як системи IoT можуть допомогти зменшити надлишкове внесення азотних і фосфорних добрив у ґрунт?
6. Які переваги використання крайових (edge) обчислень для обробки агрохімічних даних у полі порівняно з хмарними рішеннями?
7. Як дані з дронів та мультиспектральних камер можуть бути використані для оцінки стану мінерального живлення рослин?
8. Які ризики для агрохімічних систем створює неточність або шум у даних IoT-сенсорів, і як їх можна мінімізувати?
9. Яку роль можуть відігравати IoT-системи у зменшенні екологічного навантаження від агрохімікатів (зокрема нітратного забруднення вод)?
10. Як інтеграція IoT, ШІ та хмарних технологій змінює підхід до управління родючістю ґрунтів у сучасному агровиробництві України?
11. Як IoT-системи можуть допомогти у точному регулюванні кислотності ґрунту (pH) в різних фазах росту культур?
12. Яким чином дані з IoT-пристроїв можуть бути використані для оптимізації схем внесення мікроелементів у ґрунт?
13. Як використання IoT у поєднанні з блокчейн-технологіями може підвищити прозорість агрохімічних операцій (добрива, обробка полів)?

РОЗДІЛ 5. КІБЕР-АГРАРНІ СИСТЕМИ ДЛЯ СЕЛЕКЦІЇ СІЛЬСЬКОГОСПОДАРСЬКИХ КУЛЬТУР ТА СТАЛОГО ВИРОБНИЦТВА

5.1. Визначення кібер-фізичних систем
5.2. Складові системи
5.3. Кіберінфраструктура

5.1. Визначення кібер-фізичних систем

Кіберфізичні системи є важливим етапом розвитку сучасних аграрних технологій, оскільки поєднують фізичні процеси з цифровими засобами їх аналізу та управління. У загальному розумінні такі системи інтегрують реальне середовище, де відбуваються біологічні та технологічні процеси, із цифровим середовищем, у якому ці процеси аналізуються та використовуються для прийняття рішень.

Існує певна невизначеність в поняттях між інтернетом речей та кіберфізичних системах, оскільки вони використовуються не тільки науковцями а і бізнесом, і відповідно є прагнення використовувати «актуальні» тренди.

На думку авторів, різниця між Інтернетом речей (IoT) та Кіберфізичними системами (CPS) в аграрному виробництві полягає насамперед у меті їх застосування та рівні інтеграції з фізичними процесами, хоча в сучасних агротехнологіях вони тісно переплітаються.

Інтернет речей в агросекторі виконує роль «сенсорної мережі» або «нервової системи» господарства. Основне завдання IoT - це збір, передача та візуалізація даних. Коли ми розміщуємо датчики вологості ґрунту, метеостанції або GPS-трекери на техніці, ми створюємо середовище IoT. Це інформаційні системи, де головним кінцевим споживачем даних є людина - агроном, який дивиться на монітор, бачить показники та на основі цієї інформації приймає рішення. IoT забезпечує прозорість процесів, накопичення великих даних (Big Data) та віддалений моніторинг, але сама по собі система IoT не керує фізичними об'єктами напряму; вона лише інформує про їхній стан.

Кіберфізичні системи, навпаки, є вищим етапом еволюції автоматизації, де обчислювальний алгоритм «кибер» нерозривно пов'язаний із фізичним механізмом «фізичний». CPS - це система з активним зворотним зв'язком, яка здатна приймати рішення та діяти без безпосереднього втручання людини. Якщо IoT лише передає дані про те, що на полі є бур'ян, то кіберфізична система у вигляді автономного робота-прополювача або «розумного» обприскувача

автоматично розпізнає цей бур'ян і миттєво активує форсунку для точкового внесення препарату. У CPS фізичний світ і цифрова логіка працюють як єдине ціле в режимі реального часу, де затримка в обробці даних стає критичним фактором, що впливає на якість виконання операції.

Ключова відмінність полягає у векторі впливу. IoT працює у напрямку «поле → дані → людина», забезпечуючи пасивну обізнаність. Кіберфізичні системи працюють у замкненому циклі «поле → сенсор → обчислення → виконавчий механізм → поле», забезпечуючи активне керування. В агрохімсервісі користувач може використовувати IoT для того, щоб просто бачити, скільки добрив залишилося в баку або яка вологість ґрунту на полі, проте для нього створюється кіберфізична систему, коли налаштовуєте обладнання на автоматичну зміну норми внесення добрив прямо під час руху трактора, спираючись на аналіз карт-завдань або дані датчиків реального часу.

Зрештою, ці концепції не є взаємовиключними, а скоріше ієрархічними. Будь-яка сучасна кіберфізична система в агрономії базується на технологіях IoT, оскільки їй потрібно постійно отримувати потоки даних ззовні. Проте IoT може існувати без CPS, обмежуючись лише моніторингом, тоді як повноцінна автономна агротехніка неможлива без архітектури кіберфізичної системи, здатної перетворювати цифрові дані на механічну дію.

Структурно кіберфізичні системи можна розглядати як поєднання трьох основних складових. Перша забезпечує отримання інформації про стан об’єкта, друга відповідає за її аналіз і формування моделей, а третя реалізує керуючі дії у фізичному середовищі. Разом вони утворюють єдину систему, яка базується на взаємодії процесів обміну даними, їх обробки та управління (рис. 5.1).

Передова автоматизація розширює можливості фермерів в управлінні господарством, знижуючи рівень стресу, підвищуючи точність операцій, зменшуючи фізичне навантаження та мінімізуючи ризики для безпеки.

У контексті аграрного виробництва такі системи створюють основу для більш точного та адаптивного управління технологічними процесами, зокрема у рослинництві, меліорації та ґрунтознавстві. Вони забезпечують перехід від спостереження до активного керування, що є ключовим елементом сучасних підходів до цифровізації сільського господарства.

У кіберфізичних системах процес взаємодії між фізичним і цифровим середовищами починається зі збору інформації.

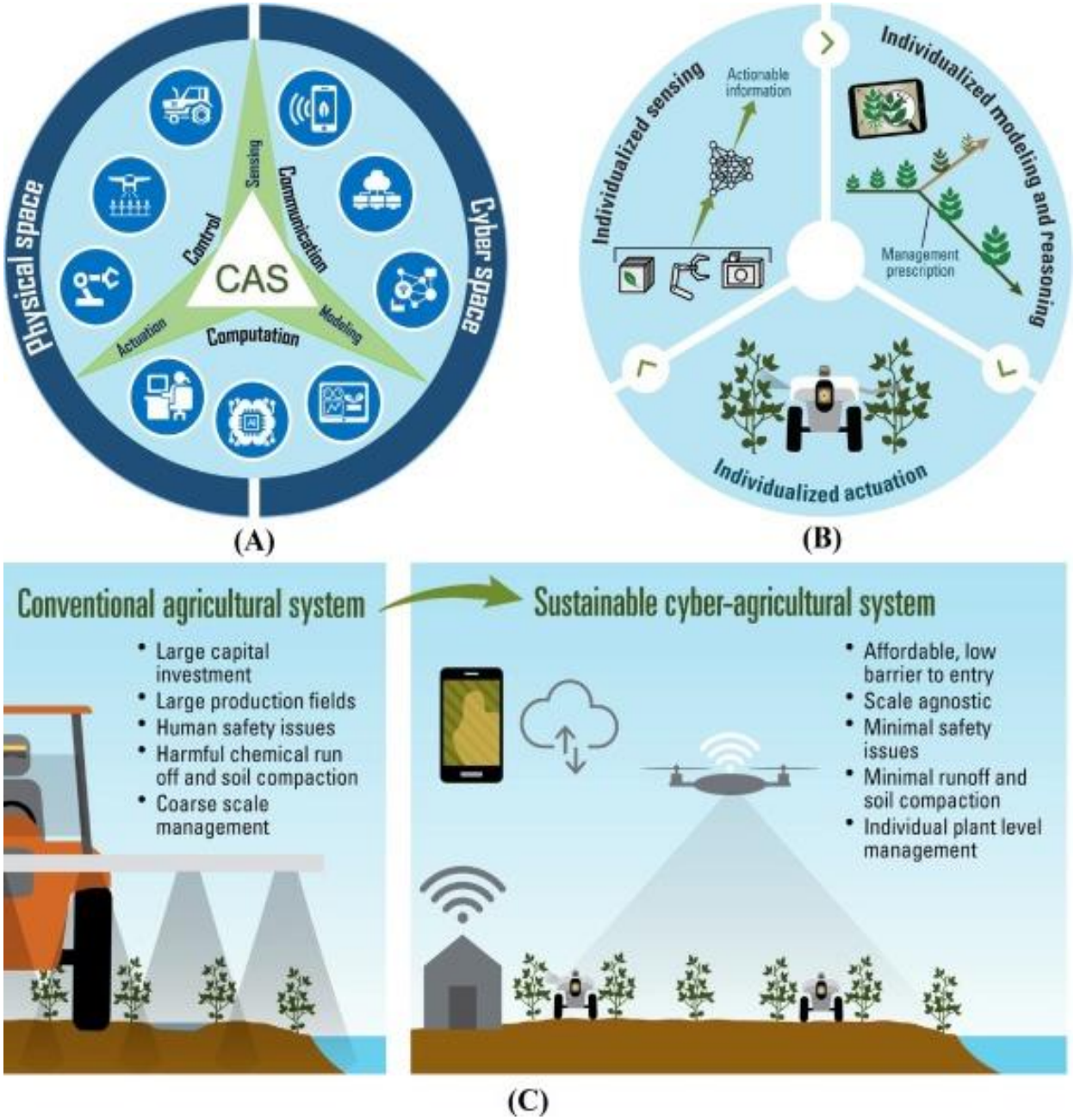


Рис. 5.1. Ключова схема. Огляд кіберагропромислових систем (CAS)

де: (A) ***Кіберфізичні системи*** *(CPS) - це інженерні системи з глибокою інтеграцією між фізичним та кіберпростором. Три технічні модулі CPS - сенсорика (збір даних), моделювання та актуація (виконання дій) - спираються на три функціональні «столпи»: комунікацію, обчислення та управління.*

(B) ***Майбутнє бачення CAS*** *- парадигма індивідуалізованого менеджменту рослин, яка передбачає моніторинг та моделювання стану аж до рівня окремих рослин та їхніх органів. Це дозволяє застосовувати обробку на рівні конкретної рослини, а не всього поля, шляхом заміни важкої техніки на велику кількість малих, легкових автономних одиниць.*

(C) ***Концепція CAS*** *спрямована на трансформацію традиційного сільського господарства у високотехнологічну та сталу систему. Це досягається шляхом мінімізації недоліків масового використання хімікатів та значних капітальних витрат, притаманних масштабному фермерству (що зазвичай призводить до вимивання хімікатів та ущільнення ґрунту).*

Спеціальні засоби спостереження фіксують параметри об’єкта або середовища, наприклад стан ґрунту, рослин чи мікроклімату. Отримані дані можуть оброблятися безпосередньо на місці або передаватися до віддалених обчислювальних ресурсів для подальшого збереження, аналізу та узагальнення.

Обробка інформації часто здійснюється із залученням віддалених обчислювальних середовищ, які дозволяють гнучко змінювати обсяг обчислювальних ресурсів залежно від потреб. Це особливо важливо для аграрних систем, де обсяг даних може суттєво змінюватися в залежності від площі господарства, кількості об’єктів спостереження та частоти вимірювань.

Після етапу збору даних відбувається їх аналіз і побудова моделей. На цьому рівні використовуються аналітичні підходи, які дозволяють виявляти закономірності, оцінювати стан системи та формувати прогнози. Завдяки цьому стає можливим не лише спостереження за процесами, а й їх інтерпретація та оцінювання можливих сценаріїв розвитку.

Отримані результати аналізу використовуються для формування керуючих рішень. На завершальному етапі ці рішення реалізуються у фізичному середовищі, забезпечуючи досягнення заданих параметрів функціонування системи. Так забезпечується замкнений цикл управління, у якому дані, моделі та керуючі дії взаємопов’язані.

Важливо зазначити, що кіберфізичні системи можуть мати різну структуру. У деяких випадках вони функціонують як єдине цілісне рішення, тоді як в інших - складаються з багатьох взаємопов’язаних підсистем, об’єднаних спільною інформаційною мережею. Така гнучкість дозволяє адаптувати їх до різних масштабів аграрного виробництва та різноманітних технологічних задач.

У сучасних умовах розвитку цифрових технологій кіберфізичні системи знаходять широке застосування в різних галузях - від міської інфраструктури та енергетики до транспорту, промисловості й робототехніки. Така універсальність пояснюється їх здатністю поєднувати фізичні процеси з інтелектуальним аналізом і автоматизованим управлінням.

Аграрна сфера не є винятком. Навпаки, впровадження кіберфізичних підходів має потенціал суттєво змінити рослинництво, підвищуючи його ефективність, економічну доцільність і екологічну стійкість. Перехід до таких систем дозволяє більш точно враховувати умови вирощування, оперативно реагувати на зміни середовища та оптимізувати використання ресурсів.

Концепція кіберфізичних систем у сільському господарстві, яку часто розглядають як кібер-аграрні системи, передбачає глибоку інтеграцію сучасних технологій у виробничі процеси. Йдеться про поєднання засобів спостереження, інтелектуального аналізу даних, моделювання, автоматизації та зв'язку в єдиному інформаційному середовищі. Саме така інтеграція створює основу для більш точного, адаптивного та науково обґрунтованого управління аграрними системами.

Завдяки цьому відкриваються нові можливості для розвитку рослинництва, зокрема у напрямі підвищення врожайності, зниження витрат ресурсів і мінімізації негативного впливу на довкілля. У підсумку кіберфізичні системи формують технологічну основу для переходу до більш сучасного та сталого агровиробництва.

Показовим прикладом потенціалу кібер-аграрних систем є їх можливе застосування у великотоварному сільському господарстві. Традиційна модель великих господарств, яка базується на використанні потужної техніки та інтенсивному застосуванні агрохімічних засобів, дозволила суттєво підвищити обсяги виробництва. Водночас вона супроводжується низкою побічних ефектів, що впливають як на економічну ефективність, так і на екологічний стан агросистем.

Зокрема, значні втрати врожаю спричиняються хворобами рослин, шкідниками та бур'янами. У відповідь на ці виклики традиційно застосовується масштабне та регулярне внесення добрив і засобів захисту рослин. Такий підхід дозволяє частково компенсувати втрати, однак призводить до зростання витрат і формує додаткове навантаження на довкілля.

Надмірне використання хімічних засобів має низку негативних наслідків. Частина речовин потрапляє у водні системи, погіршуючи якість води, інша - накопичується у ґрунті, змінюючи його властивості. Крім того, тривале інтенсивне застосування таких засобів може сприяти формуванню стійкості у шкідливих організмів, що ускладнює подальший захист рослин.

У цьому контексті кібер-аграрні системи відкривають можливості для переходу до більш точного та збалансованого землеробства. Їх застосування дозволяє диференційовано підходити до обробітку посівів, враховуючи реальний стан рослин і ґрунту, що зменшує потребу у надлишковому використанні ресурсів.

Важливо зазначити, що окремі елементи такого підходу вже використовувалися раніше, зокрема у селекції рослин та системах захисту. Вони включали спостереження за характеристиками рослин, їх

аналіз та прийняття відповідних управлінських рішень. Проте сучасний рівень розвитку технологій значно розширює ці можливості.

Сьогодні, завдяки вдосконаленню засобів спостереження, аналізу даних і автоматизації, такі процеси стають більш точними, швидкими та узгодженими. Особливе значення має детальне вивчення характеристик рослин, що дозволяє краще розуміти їх розвиток і реакцію на умови середовища. Це створює основу для більш обґрунтованих рішень у рослинництві та підвищує ефективність аграрного виробництва загалом.

Незважаючи на те, що концепція точного землеробства вже певною мірою впроваджується у сучасній практиці, підхід кібер-аграрних систем дозволяє суттєво розширити її можливості. Йдеться про перехід від управління на рівні поля до більш детального, індивідуалізованого підходу, коли рішення приймаються з урахуванням стану окремих рослин.

Такий підхід базується на поєднанні детального спостереження, аналізу та керування, орієнтованих на конкретні об’єкти. У результаті агротехнічні заходи можуть застосовуватися не рівномірно по всьому полю, а вибірково - там, де це дійсно необхідно. Це дозволяє підвищити ефективність використання ресурсів і зменшити надлишкове навантаження на агроекосистему.

Важливою особливістю є також зміна технічного підходу до виконання робіт. Замість використання великогабаритної техніки все частіше розглядається застосування компактних і легких засобів, які можуть працювати більш гнучко та точно. Це зменшує ущільнення ґрунту, покращує умови росту рослин і відкриває можливості для більш адаптивного управління.

Такий підхід часто визначають як надточне землеробство, підкреслюючи його здатність працювати ефективно як на малих, так і на великих площах. Він забезпечує кращу адаптацію до змін умов середовища, підвищує економічну ефективність за рахунок оптимізації витрат і створює передумови для більш автономного функціонування аграрних систем.

У цьому контексті важливу роль відіграє узгоджена робота різних рівнів обробки інформації - від локального збору даних до їх узагальнення та використання для прийняття рішень. Це дозволяє оперативно отримувати актуальну інформацію про стан агросистем і використовувати її у виробничій практиці.

Загалом, концепція кібер-аграрних систем поєднує в собі ідеї точного, цифрового та інтелектуального землеробства, створюючи

основу для підвищення ефективності, стійкості та екологічної безпечності аграрного виробництва.

У наступних підрозділах розглядаються основні складові таких систем, пов’язані зі збором інформації, її аналізом та реалізацією керуючих дій (рис. 1).

5.2. Складові системи

5.2.1. Багатомодальна інтеграція даних

Сенсорне обладнання представлено в розділі присвяченому інтернету речей. Проте у багатьох кібер-аграрних системах процес отримання інформації включає використання кількох ***модальностей***, коли вимірюються різні характеристики, які потім використовуються для оцінювання похідних показників. Залучення кількох модальностей ускладнює процес аналізу та потребує оновлення моделей, побудованих на основі одного типу даних, із використанням багатомодальних вимірювань для оцінки стану системи.

Крім того, такі вимірювання можуть виконуватися на різних рівнях - як умов навколишнього середовища, так і фізіології рослин, що часто пов’язано зі складними або погіршеними умовами спостереження. У зв’язку з цим процес об’єднання даних має бути орієнтований на конкретну задачу, оскільки різні комбінації даних можуть бути більш інформативними для різних цілей прийняття рішень. Тому для виділення ознак і поєднання багатомасштабних та багатомодальних даних необхідні надійні підходи машинного навчання.

Схематичне представлення такого підходу, у порівнянні з використанням однієї модальності, наведено на рисунку 2А. Одне з ранніх застосувань об’єднання даних у цій сфері пов’язане з виявленням хвороб рослин на основі поєднання гіперспектральних зображень. Інші дослідження також розглядають інтеграцію різних типів даних, зокрема теплових зображень, флуоресценції хлорофілу, гіперспектральної зйомки та лазерного сканування, для задач моніторингу рослин і виявлення захворювань.

Однією з ранніх масштабованих відкритих платформ для багатомодального аналізу є інтегрована аналітична платформа, яка дозволяє працювати з різними джерелами зображень і організовує фенотипічні дані із збереженням супровідної інформації. Для польових умов також розроблено спеціалізовані системи, що забезпечують високоточні вимірювання характеристик рослин із використанням переміщуваних конструкцій.

Крім того, багатомодальні підходи реалізуються із застосуванням безпілотних літальних апаратів, які дозволяють отримувати різнорідні дані для аналізу стану рослин у польових умовах. Інші системи поєднують різні типи зображень і методи обробки для оцінювання характеристик рослин, використовуючи алгоритми сегментації зображень і реконструкції просторових структур.

Подібні рішення також можуть включати інтеграцію різних сенсорних модулів, що дозволяє отримувати динамічні показники, такі як температурні характеристики рослинного покриву або спектральні параметри. У цілому, розвиток багатомодальних підходів є важливим кроком до реалізації масштабного та надточного землеробства, яке базується на поєднанні сучасних засобів спостереження та інтелектуальної обробки даних.

5.2.2. Моделювання та аналіз

Після збору різнорідної інформації з кількох джерел у кібер-аграрних системах виникає потреба у використанні обчислювальних моделей і підходів до аналізу для прийняття оптимальних рішень у рослинництві або селекції. У цьому розділі розглядаються ключові аспекти моделювання та аналітичних підходів у таких системах.



Обчислювальне моделювання аграрних систем

Моделювання аграрних систем є добре сформованим напрямом досліджень, у межах якого розроблено низку біофізичних моделей, орієнтованих на підтримку прийняття рішень. Серед широко відомих прикладів можна назвати APSIM, DSSAT та MLCan.

У контексті кібер-аграрних систем моделювання має поєднувати підходи, що базуються як на даних, так і на описі фізичних процесів. Це необхідно для більш надійного відтворення стану рослин, прогнозування їх характеристик (зокрема врожайності, фаз розвитку або реакції на стрес) та підтримки прийняття рішень як у короткостроковій перспективі (для виробничих задач), так і в довгостроковій (для селекції).

Попри свою важливість, моделі, що базуються на описі процесів, мають низку обмежень, які зумовлюють необхідність їх доповнення

підходами, заснованими на даних. Зокрема, не всі процеси, що впливають на стан рослин, є повністю вивченими, що ускладнює побудову точних моделей. Крім того, у таких моделях часто використовуються приховані змінні, які складно безпосередньо виміряти або які визначаються наближено, що обмежує їх універсальність і можливість адаптації до конкретних умов.

Ще однією проблемою є чутливість моделей до невідповідності між різними масштабами параметрів, а також до способів їх налаштування. Це може призводити до зниження точності результатів і, відповідно, до обмежень у використанні таких моделей для прийняття управлінських рішень, які часто залишаються узагальненими та недостатньо деталізованими.

З іншого боку, підходи, що базуються на даних, почали демонструвати значний потенціал у різних задачах моделювання сільськогосподарських культур. Ранні дослідження в цій сфері здебільшого використовували лише один тип даних для прогнозування врожайності, виявлення хвороб рослин або оптимізації зрошення. Також пропонувалися підходи з використанням методів обробки природної мови та мережевих моделей для опису фенотипічних характеристик і пошуку кандидатних генів.

Однак, із розвитком пристроїв Інтернету речей, які дозволяють збирати дані з різних джерел і різних типів, підходи до прийняття рішень почали виходити за межі однотипного аналізу. Наприклад, було показано, що загальнодоступні дані про погоду та стан ґрунтів можуть бути достатньо ефективними для прогнозування врожайності кукурудзи на регіональному рівні. Аналогічно, сучасні глибокі нейронні моделі дозволяють поєднувати генетичні та екологічні дані для підвищення точності прогнозів.

Водночас, класичні моделі глибокого навчання часто мають обмежену інтерпретованість, тобто їх внутрішні механізми прийняття рішень залишаються недостатньо зрозумілими. У відповідь на це з’являються пояснювані моделі, які дозволяють визначати ключові фактори, що впливають на результат прогнозування. Проте суто дані-орієнтовані підходи часто демонструють низьку стійкість при застосуванні поза межами навчальних даних.

Тому все більше досліджень спрямовано на поєднання даних із знаннями про біофізичні процеси. Такий підхід дозволяє створювати гібридні моделі, які поєднують переваги машинного навчання та процесно-орієнтованого моделювання. Вони використовуються для швидкого та точного оцінювання характеристик рослин на різних

етапах розвитку і інтегрують емпіричні дані з частково відомими механізмами росту.

Прикладами таких підходів є моделі, у яких машинне навчання поєднується з класичними агрономічними моделями для симуляції росту культур і прогнозування врожайності. Подібні гібридні системи дозволяють підвищити точність оцінок як на рівні окремого поля, так і на регіональному рівні.

Таким чином, гібридні моделі, що поєднують дані та біофізичні знання, мають потенціал поступово трансформувати підходи до моделювання аграрних систем у більш системні та науково обґрунтовані. Водночас ця сфера залишається на етапі активного розвитку, і єдиного підходу до оптимальної інтеграції знань і даних наразі не сформовано.

Фреймворки прийняття рішень для управління аграрними системами

За наявності обчислювальної моделі, здатної імітувати ріст і продуктивність культур за різних умов навколишнього середовища та варіантів управління, стає можливим використання інструментів логічного виведення і прийняття рішень для формування оптимізованих стратегій ведення рослинництва. У контексті кіберфізичних аграрних систем активно розробляються відповідні підходи до побудови таких систем підтримки прийняття рішень. Серед них особливого поширення набули підходи, засновані на методах підкріплювального навчання, які застосовуються для планування та ієрархічного керування процесами.

Основна ідея підкріплювального навчання полягає у формуванні агентом стратегії дій, яка визначає послідовність оптимальних керуючих впливів з метою максимізації сумарної винагороди на заданому часовому інтервалі. У задачах рослинництва такі підходи знаходять застосування, зокрема, для керування зрошенням, прогнозування врожайності та оптимізації агротехнологічних операцій. Особливо інтенсивно розвивається напрям глибокого підкріплювального навчання, який дозволяє працювати зі складними багатовимірними станами середовища.

Водночас ключовою проблемою практичного застосування підкріплювального навчання є висока складність навчання, що проявляється у необхідності великої кількості взаємодій агента з середовищем. У реальних умовах сільськогосподарського виробництва це є суттєвим обмеженням, оскільки під час навчання агент може генерувати неефективні або навіть неприйнятні рішення, здатні

призвести до втрат урожаю чи ресурсів. У зв'язку з цим безпосереднє навчання на фізичних об'єктах є обмеженим або небажаним.

Практичним рішенням є використання імітаційних середовищ, побудованих на основі обчислювальних моделей агросистем. У таких середовищах здійснюється попереднє навчання агентів, після чого відбувається адаптація отриманих стратегій до реальних умов функціонування системи. Цей підхід відомий як перенесення знань із моделювання в реальне середовище. Імітаційні платформи такого типу, які в літературі часто називають навчальними середовищами типу «gym», поступово впроваджуються і в аграрних застосуваннях. Одним із прикладів є спеціалізоване середовище для задач управління вирощуванням культур, що дозволяє відпрацьовувати алгоритми прийняття рішень у контрольованих умовах моделювання.

5.2.3. Виконавчі механізми та польовий інтелект

У контексті кіберфізичних аграрних систем, орієнтованих на виробництво рослинницької продукції, виконавчі механізми розглядаються як сукупність механічних та електричних засобів, що забезпечують керування і автоматизацію різноманітних технологічних процесів з метою досягнення оптимальних аграрних результатів. Йдеться про практичну реалізацію керуючих впливів, сформованих на основі даних моніторингу та результатів моделювання, що дозволяє безпосередньо впливати на стан агроценозу, параметри середовища та технологічні операції.

У системах селекції рослин і покращення сортів поняття виконавчих дій набуває дещо іншого змісту і пов'язується з прийняттям рішень за результатами аналізу експериментальних даних. У цьому випадку після етапів спостереження та моделювання формується управлінське рішення щодо подальшої долі досліджуваних генотипів, зокрема їх вибраковування, продовження випробувань або впровадження у виробництво. Таким чином, виконавчий рівень у подібних системах реалізує логіку переходу від отриманої інформації до конкретних дій, що визначають ефективність селекційного процесу та швидкість впровадження нових сортів у практику сільського господарства.

Розширені роботизовані виконавчі системи в CAS

Сучасні роботизовані системи в аграрному виробництві характеризуються значним різноманіттям, що зумовлено умовами їх застосування, функціональним призначенням та конструктивними особливостями. Залежно від середовища функціонування розрізняють внутрішні та зовнішні роботизовані системи. Внутрішні роботи

переважно використовуються в умовах закритого ґрунту, зокрема у теплицях, де вони виконують операції збирання врожаю, зрізання квітів, захоплення плодів і овочів, а також забезпечують автоматизоване керування мікрокліматом. Натомість зовнішні роботизовані системи орієнтовані на роботу у відкритому середовищі - на полях, пасовищах та інших агроландшафтах - і включають обприскувальні, прополювальні, посівні, розсадні машини, автономні трактори та системи збирання плодів.

З урахуванням операційного простору роботизовані платформи поділяються також на повітряні та наземні. До першої категорії належать безпілотні літальні апарати, які широко застосовуються для моніторингу, обприскування та аналізу стану посівів. Наземні роботизовані системи реалізуються у вигляді безпілотних мобільних платформ, здатних виконувати широкий спектр агротехнологічних операцій без безпосередньої участі людини. Окрім цього, існує класифікація за типами виконуваних завдань, яка охоплює роботи для посіву, висаджування, збирання врожаю, боротьби з бур'янами та внесення засобів захисту рослин.

З позицій управління агровиробництвом виконавчі системи можуть бути орієнтовані на різні аспекти технологічного процесу, зокрема обробіток ґрунту, картографування полів, керування зрошенням, організацію збирання врожаю, а також моніторинг і прогнозування погодних умов. Конструктивно ключовим елементом будь-якої роботизованої системи є привід, який може реалізовуватися на основі електричних, п'єзоелектричних, гідравлічних або пневматичних принципів, а також їх комбінацій залежно від вимог до точності, швидкодії та енергоефективності.

Концепція кіберфізичних аграрних систем передбачає формування кооперативних груп напівавтономних або повністю автономних мобільних роботів, здатних забезпечувати новий рівень реалізації виконавчих функцій у рослинництві. Такі системи можуть масштабуватися від невеликих груп до великих роїв роботів або безпілотних апаратів залежно від площі обробітку, технічних характеристик платформ та економічної доцільності. Важливим напрямом розвитку є інтеграція технологій автоматизованого прийняття рішень безпосередньо у польові операції, зокрема реалізація концепцій типу «бачити і діяти», що дозволяє здійснювати точковий вплив на рослини або бур'яни на основі даних комп'ютерного зору.

Для виконання різноманітних агротехнологічних операцій можуть використовуватися як однорідні, так і різнорідні групи роботів. У першому випадку платформи мають однакові функціональні

можливості і виконують подібні завдання, тоді як у другому - кожен робот спеціалізується на окремій функції, що дозволяє підвищити загальну ефективність системи. Водночас ключовою передумовою впровадження автономних роботизованих флотів є створення масштабованих електрифікованих агросистем та ефективне управління енергетичними ресурсами.

Особливої уваги потребують питання оптимізації енергоспоживання, управління зарядом акумуляторів, продовження їх ресурсу та балансування енергетичних потоків у роботизованих системах. Це є критично важливим для забезпечення тривалої автономної роботи в польових умовах. Незважаючи на значний прогрес у цій сфері, подальші дослідження залишаються необхідними для повноцінної реалізації потенціалу електрифікації аграрного виробництва, зокрема в контексті створення енергоефективних, масштабованих та взаємопов'язаних роботизованих систем.

Загалом застосування мобільних роботизованих платформ, оснащених системами маніпулювання рослинами, відкриває нові можливості для подолання дефіциту трудових ресурсів у сільському господарстві. Водночас ефективність таких систем значною мірою залежить від узгодженого управління енергетичними ресурсами всієї роботизованої мережі, що забезпечує її безперервне та автономне функціонування.

Польовий інтелект

Методи машинного навчання суттєво розширили функціональні можливості сучасних аграрних роботів, особливо тих, що поєднують функції сприйняття та виконавчого впливу. Інтелектуальні роботизовані системи охоплюють широкий спектр платформ - від компактних роботів для тепличного господарства до безпілотних літальних апаратів і автономних тракторів, які працюють у відкритому полі. Такі системи оснащуються алгоритмами машинного навчання, здатними обробляти великі обсяги даних, отриманих із сенсорів і камер, з метою виявлення закономірностей у стані агроекосистеми та формування управлінських рішень.

Зокрема, безпілотні літальні апарати з високороздільними камерами та мультиспектральними сенсорами забезпечують ефективний моніторинг стану посівів, дозволяючи своєчасно виявляти ознаки стресу рослин, пошкодження шкідниками, розвиток хвороб або проблеми з водозабезпеченням. Використання алгоритмів машинного навчання у поєднанні з кооперативними групами дронів сприяє підвищенню якості картографування полів і формуванню цілісного

уявлення про агроландшафт, що, у свою чергу, покращує практики управління земельними ресурсами.

Аналогічно, автоматична навігація наземної техніки, зокрема тракторів, на основі алгоритмів комп'ютерного зору, таких як виявлення об'єктів і сегментація зображень, забезпечує підвищення точності виконання технологічних операцій. Побудова маршрутів у реальному часі з урахуванням рядків культур дозволяє мінімізувати перекриття та пропуски, підвищуючи ефективність використання ресурсів.

Однією з ключових проблем у створенні масштабованих кіберфізичних систем для рослинництва є забезпечення тривалої та надійної автономності роботи в складних і змінних польових умовах за обмежених ресурсів. Одним із підходів до її вирішення є використання інтелектуального програмного забезпечення, здатного компенсувати обмеження недорогих сенсорів. Наприклад, поєднання доступних лідарів з інерціальними вимірювальними модулями та енкодерами дозволяє реалізувати стабільне слідування рядками, тоді як системи технічного зору можуть частково замінювати дорожчі сенсорні рішення. Водночас зниження вартості апаратного забезпечення супроводжується ускладненням завдань програмування та необхідністю забезпечення високої точності розпізнавання, щоб уникнути помилкових дій у польових умовах.

Важливим напрямом досліджень є автоматичне визначення прохідних зон і оптимізація місій роботів шляхом удосконалення алгоритмів планування. Інтелектуальна координація груп роботів дозволяє ефективно виконувати механічні операції, зокрема видалення бур'янів за допомогою алгоритмів планування, оптимізацію маршрутів у складних умовах, таких як виноградники або сади, а також забезпечує необхідну маніпуляційну гнучкість для збирання врожаю.

Реалізація таких задач потребує інтеграції виконавчих компонентів - приводних систем, контролерів, роботизованих маніпуляторів і захоплювачів - із системами сприйняття середовища, що включають радіолокаційні та оптичні сенсори, доповнені алгоритмами глибокого навчання для виявлення та ідентифікації об'єктів. При цьому роботизовані системи повинні поєднувати високу маневровість і точність, наближену до людського рівня, з можливістю масштабування для обробітку великих площ.

Особливу складність становить маніпулювання рослинами, що зумовлено наявністю перешкод, частковим перекриттям об'єктів і делікатною структурою плодів та інших органів рослин. Додатковим обмеженням є необхідність забезпечення економічної доцільності, що

унеможливлює широке використання дорогих промислових маніпуляторів і сенсорів. У цьому контексті перспективним напрямом є застосування м'якої робототехніки, яка потенційно здатна забезпечити безпечну взаємодію з біологічними об'єктами, однак питання керування та сенсорного забезпечення таких систем потребують подальших досліджень.

На основі інтеграції трьох ключових технічних модулів кіберфізичних аграрних систем формується концепція цифрових двійників, яка останніми роками набуває все більшого поширення в аграрній сфері. Цифровий двійник об'єднує в єдину концептуальну систему процеси збору даних, моделювання, керування та реалізації виконавчих дій, забезпечуючи цілісне представлення функціонування агросистеми.

Цифрові двійники вже довели свою ефективність у різних інженерних галузях, а також у логістичних системах і ланцюгах постачання. У сільському господарстві їх застосування відкриває широкі перспективи - від фундаментальних досліджень до селекції, точного землеробства та формування управлінських і політичних рішень. Основна ідея полягає у створенні програмно-інформаційного середовища, яке виступає цифровою копією фізичної аграрної системи.

Такий цифровий двійник відображає поведінку реального об'єкта протягом усього його життєвого циклу. У випадку рослин це передбачає відтворення фізіологічного стану, процесів росту та розвитку, а для польових систем - динаміку змін агроекосистеми в цілому, як це ілюструється на рисунку 3А. Важливою особливістю є здатність цифрового двійника не лише відображати поточний стан системи, але й прогнозувати її майбутні стани на основі моделей і накопичених даних.

Побудова цифрового двійника починається з визначення ключових змінних стану, які мають найбільше значення для аналізу та управління, а також відповідних вимірюваних параметрів і керуючих впливів. Формалізація цих елементів дозволяє створити математичну та програмну основу для відтворення поведінки системи в цифровому середовищі.

Водночас визначення структури та складу цифрового двійника є суттєво залежним від конкретної задачі та контексту застосування. Набір станів, параметрів і критеріїв оптимізації формується відповідно до цілей дослідження або управління, що можуть варіюватися від підвищення врожайності до оптимізації використання ресурсів чи мінімізації екологічного впливу. Таким чином, цифрові двійники

виступають універсальним інструментом інтеграції даних, моделей і алгоритмів прийняття рішень у сучасному сільському господарстві.

5.3. Кіберінфраструктура

Хоча сенсорика, моделювання та виконавчі механізми є технічними основами кіберфізичних систем, масштабована та надійна кіберінфраструктура є ключовим чинником, що забезпечує функціонування такої архітектури. У цьому розділі розглядаються деякі основні компоненти кіберінфраструктури кіберфізичних аграрних систем.

5.3.1. Управління даними

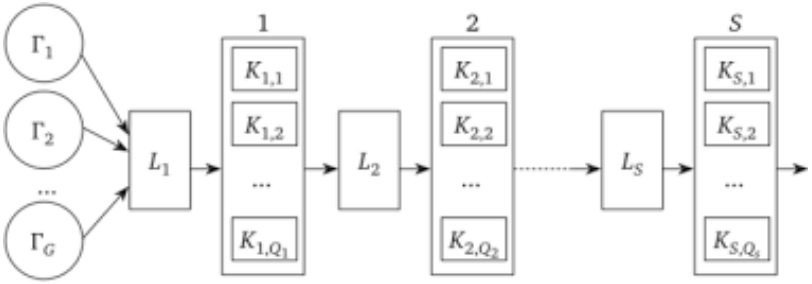
У рамках кіберінфраструктури управління даними суттєво відрізняється від традиційних підходів до їх представлення, які не придатні для великомасштабного аналізу в реальному часі, візуалізації та поширення інформації щодо складних динамічних процесів. Натомість платформи кіберфізичних аграрних систем повинні забезпечувати доступ до відповідного програмного та апаратного забезпечення, здатного обробляти різнорідні типи даних і масштабувати обчислення. Це передбачає наявність спільних систем зберігання даних, які забезпечують ефективне та безпечне передавання великих масивів інформації, доступ до обчислювальних ресурсів, таких як високопродуктивні системи з великим обсягом пам'яті та віртуальні машини для аналізу, можливість анотації та пошуку даних за допомогою описових метаданих, а також системи управління ідентифікацією для безпечного обміну даними між надійними користувачами. У зв'язку зі стрімким розвитком сенсорних мереж, систем Інтернету речей, апаратного прискорення обчислень за допомогою графічних процесорів та технологій комп'ютерного зору, дані кіберінфраструктури дедалі більше розподіляються у кіберпросторі. Дані, отримані із сенсорів, є багатовимірними, чутливими до просторово-часових характеристик і представлені у різних типах, форматах, розмірностях, джерелах і структурах. У розподілених аграрних системах різні вузли спостереження фіксують різні набори параметрів, часто з різною частотою, що призводить до формування потоків неоднорідних даних. Такі дані потребують складних структур зберігання, представлення та методів управління, які зазвичай реалізуються на основі хмарних обчислювальних інфраструктур.

У кіберфізичних аграрних системах Інтернет речей є ключовим компонентом, оскільки передбачає використання пристроїв, таких як

камери на базі Raspberry Pi, сенсори зрошення та геоінформаційні системи, для збору даних безпосередньо з полів. Зібрані дані передаються на сервери для подальшої обробки та аналізу. У розподіленій архітектурі такі сенсорні вузли функціонують ієрархічно на рівнях периферійних обчислень, туманних обчислень і хмарних сервісів. Потоки даних організовуються таким чином, щоб історичні дані використовувалися як вхідна інформація для ітеративного прийняття більш обґрунтованих і ефективних рішень. Додатково застосовуються підходи до інтелектуального зберігання продукції, що базуються на аналізі великих даних і спрямовані на підвищення ефективності післязбиральної обробки та зберігання. Це дозволяє агровиробникам приймати обґрунтовані рішення щодо обсягів зберігання та реалізації продукції. Прикладами систем управління даними та консорціумів, що підтримуються кіберінфраструктурою, є спеціалізовані платформи, орієнтовані на аналіз, зберігання та обмін даними в наукових і прикладних аграрних дослідженнях.

5.3.2. Обчислення

Обробка багатовимірних даних, що надходять з різнорідних сенсорних мереж у розподілених середовищах, є однією з ключових складностей кіберфізичних аграрних систем. Для подолання цих викликів та забезпечення ефективного інтерактивного візуального аналізу в реальному часі традиційні підходи до інтеграції даних потребують суттєвого переосмислення з метою підвищення їх масштабованості, ефективності та підтримки спільної роботи з даними. У цьому контексті важливу роль відіграє мультимодальне злиття даних, яке дозволяє підвищити точність і стійкість моделей шляхом одночасного використання інформації з різних типів сенсорів і джерел.



Для забезпечення обчислювальної ефективності доцільно використовувати стиснені та репрезентативні набори даних, які відображають основні властивості повного потоку сенсорної інформації та можуть бути перетворені на інтерпретовані, придатні для дій результати. Такі обчислення виконуються як у централізованих обчислювальних вузлах, так і в розподілених середовищах із інтеграцією хмарних сервісів.

У межах таких систем прийняття рішень базується на поєднанні локально-специфічних знань про агроекосистему та елементів аналітики даних. У результаті кіберфізичні аграрні системи можуть функціонувати як системи підтримки прийняття рішень для кінцевих користувачів, зокрема фермерів.

Отримані рішення передаються користувачам через інтерфейси, такі як смартфони або комп'ютери з бездротовим підключенням, що дозволяє здійснювати моніторинг і керування польовими процесами у віддаленому режимі. Таким чином формується сервісна платформа, яка забезпечує взаємодію користувача з усіма процесами, що відбуваються в аграрному середовищі.

5.3.3. Обчислення «на межі», у тумані та хмарі (Edge, Fog, Cloud)

Попри переваги Інтернету речей, передавання великих обсягів сенсорних даних з аграрних полів до серверних систем або хмарних дата-центрів залишається складною задачею. Такі комунікації потребують значних енергетичних витрат, спричиняють затримки передачі та створюють істотне навантаження на мережу. Наприклад, у координації груп роботів у інтелектуальних агросистемах надійний зв'язок є критично важливим, однак технології бездротового зв'язку з обмеженою пропускною здатністю та підвищеним енергоспоживанням ускладнюють реалізацію стабільної взаємодії.

У сільськогосподарських умовах можливі різні технології зв'язку, зокрема сучасні мобільні мережі та низькобюджетні протоколи передачі даних. Однак у багатьох сільських регіонах широкосмуговий зв'язок може бути недоступним, що обмежує використання хмарних рішень у режимі реального часу. У таких випадках застосовуються низькошвидкісні канали зв'язку, які вимагають перенесення значної частини обчислень ближче до джерела даних, щоб передавати лише найбільш критичну інформацію.

Edge computing передбачає локальну обробку та зберігання даних безпосередньо поблизу сенсорів або кінцевих пристроїв. Це дозволяє зменшити затримки передачі даних та знизити енергоспоживання, пов'язане з їх передачею до віддалених серверів. Додатково сучасні методи стиснення даних, засновані на алгоритмах машинного навчання, дозволяють зменшувати обсяг інформації ще на рівні крайових пристроїв.

Водночас edge-пристрої мають обмежені обчислювальні ресурси, що ускладнює виконання складних алгоритмів глибокого навчання. Для вирішення цієї проблеми застосовуються підходи динамічного перенесення обчислень на більш потужні вузли, зокрема з

використанням методів навчання з підкріпленням для прийняття рішень щодо розподілу обчислювального навантаження.

Для подолання обмежень крайових пристроїв застосовується багаторівнева архітектура, що включає edge-, fog- та cloud-рівні. Така структура дозволяє ефективно обробляти дані Інтернету речей, зменшуючи затримки, мережеве навантаження та енергоспоживання порівняно з виключно хмарними рішеннями. Fog-рівень, який розташований між edge та cloud, забезпечує додаткові обчислювальні ресурси і може виконувати спрощені моделі глибокого навчання з меншою складністю.

У той час як edge-пристрої виконують первинну обробку даних, fog-вузли забезпечують проміжну аналітику, а хмарна інфраструктура використовується для ресурсомістких задач, таких як великомасштабний аналіз даних і запуск складних моделей глибокого навчання для моніторингу стану культур у реальному часі. Таким чином, багаторівнева архітектура дозволяє збалансувати обчислювальне навантаження, енерговитрати та вимоги до затримок у кіберфізичних аграрних системах.

5.3.4. Передача даних і мережеві технології

Метою будь-якої кіберфізичної системи є інтеграція вбудованих пристроїв через глобальні мережі та забезпечення взаємодії, а також зворотного зв’язку між цифровим і фізичним світами. У ідеальному випадку така система складається з кількох взаємопов’язаних рівнів, які забезпечують безпечну передачу даних між кінцевими користувачами та хмарною інфраструктурою, починаючи від фізичного рівня і до рівня Інтернету речей.



Дані, що збираються на рівні IoT, передаються до кіберрівня, який підтримується цифровими двійниками та дозволяє досліджувати поведінку системи у віртуальному середовищі. На цьому рівні здійснюється ітеративне моделювання, прогнозування, аналіз і формування керуючих впливів. Кіберрівень забезпечує зв'язок між крайовим рівнем і платформами аналітики даних, далі - з рівнем підприємницької аналітики та прийняття рішень. Хмарний рівень виконує зберігання та обробку великих масивів даних і інтегрується з прикладним рівнем, який формує сервісну платформу для фермерів та інших зацікавлених сторін.

Передача даних у такій багаторівневій архітектурі потребує надійної системи кібербезпеки, яка гарантує доступ до чутливої інформації лише для авторизованих користувачів. Крім того, критично важливим є дотримання часових вимог до передавання даних між рівнями системи, що безпосередньо впливає на ефективність керування.

У цьому контексті ключову роль відіграють технології ідентифікації та відстеження, а також мережеві протоколи зв'язку. До найпоширеніших технологій ідентифікації належать RFID-пристрої та інтелектуальні сенсори. Для з'єднання сенсорів і виконавчих пристроїв у кіберфізичних системах застосовуються різні бездротові протоколи, зокрема Bluetooth, WirelessHART, ZigBee та WiFi.

Для забезпечення доступу до Інтернету в сільських районах використовуються як короткодистанційні технології, так і довгодистанційні рішення, такі як мобільні мережі різних поколінь, WiMAX або LTE. Окремо розглядаються гібридні підходи, що поєднують різні типи зв'язку. Однією з перспективних технологій є LoRaWAN, яка завдяки низькому енергоспоживанню та простій архітектурі дозволяє забезпечувати довготривалий зв'язок на великих відстанях.

Водночас обмежена пропускна здатність таких мереж накладає суттєві обмеження на передавання великих обсягів даних, зокрема високороздільних зображень або мультиспектральної інформації, що збирається безпілотними літальними апаратами. Це створює виклики для впровадження широкосмугових рішень у сільськогосподарському середовищі та потребує подальшої оптимізації мережевої інфраструктури.

Висновки

Впровадження концепцій кіберфізичних систем у сільське господарство, як для селекції культур, так і для їх виробництва, має

значний потенціал для підвищення продуктивності, прибутковості та стійкості агросистем при одночасному зменшенні їхнього екологічного впливу. У цій оглядовій роботі представлено сучасний стан розвитку кіберфізичних аграрних систем, а також основні тенденції інновацій, які визначатимуть їх найближче та віддалене майбутнє.

Інструменти кіберфізичних аграрних систем перебувають на різних рівнях технологічної готовності та впровадження у виробничу практику. Водночас через значну невизначеність, зумовлену впливом багатьох зовнішніх факторів, таких як проривні технології (зокрема генеративний штучний інтелект), проблеми виробничих і логістичних ланцюгів, особливості ринкової економіки, ситуація на ринку праці та екологічне регулювання, точне прогнозування майбутніх траєкторій розвитку є складним завданням.

У контексті сенсорних інструментів кіберфізичних аграрних систем сьогодні вже доступна велика кількість високопродуктивних платформ для фенотипування рослин. Хоча комерційні рішення переважно дозволяють отримувати відносно прості ознаки (такі як висота рослин, об'єм крони, виявлення та підрахунок плодів, оцінка врожайності), найближчим часом очікується поява інструментів, здатних визначати складніші характеристики, зокрема ідентифікацію, класифікацію та кількісну оцінку біотичних і абіотичних стресів, а також шкідників.

Подальший розвиток у цій сфері значною мірою залежить від обміну даними та відкритих інновацій. Хоча в межах спільноти кіберфізичних аграрних систем уже існує певна кількість відкритих наборів даних, що використовуються як бенчмарки, стимулювання ширшого обміну даними залишається важливим завданням для розвитку відкритих підходів. Значний потенціал у цьому напрямі має також використання даних громадянської науки, які збираються широким колом користувачів. Водночас однією з основних проблем залишається трудомісткість розмітки даних, особливо експертної, необхідної для навчання моделей машинного навчання. Частково цю проблему допомагає вирішувати розвиток фундаментальних моделей у машинному навчанні.

Інструменти підтримки прийняття рішень на основі штучного інтелекту для управління фермерськими господарствами є наступним етапом комерційного впровадження. Ймовірно у найближчі 5–10 років агровиробники та селекціонери отримають широкий вибір технологічних рішень, які дозволять перетворювати дані на управлінські рішення за допомогою моделей і алгоритмів кіберфізичних систем. Це включатиме вибір насіння, визначення

термінів сівби, управління зрошенням, внесення добрив і засобів захисту рослин, а також планування збирання врожаю. У багатьох випадках такі рішення будуть надаватися у форматі програмного забезпечення як послуги, що знижує бар'єри для впровадження серед фермерів. Водночас основними обмеженнями залишаються вартість сенсорної інфраструктури та питання захисту даних.

Щодо виконавчих систем, модифікація та дооснащення великогабаритної техніки, зокрема автономних тракторів, для підвищення рівня автоматизації вже частково комерціалізовані. Однак реалізація концепції повністю автономних ферм, де працюють рої роботів і безпілотних апаратів із мінімальним втручанням людини, залишається перспективою середньострокового майбутнього. Попри успішні демонстрації окремих автономних операцій, таких як посів, обприскування або збирання врожаю, задачі точного маніпулювання та індивідуального впливу на рівні окремих рослин залишаються складними.

Додатковими викликами є необхідність підвищення стійкості технологій до жорстких умов сільськогосподарського середовища, а також соціальні, правові та економічні аспекти, включно з невизначеністю щодо зайнятості, регуляторними вимогами, питаннями відповідальності та сертифікації, а також витратами на виробництво. При цьому характер і масштаб цих викликів суттєво відрізняються залежно від регіону, типу господарства, кліматичних умов, інфраструктури та вартості робочої сили.

Нарешті, масштабне впровадження кіберфізичних інструментів значною мірою залежить від розвитку комунікаційної та обчислювальної інфраструктури. У багатьох сільських регіонах досі відсутній стабільний широкосмуговий зв'язок, що ускладнює впровадження передових рішень. У зв'язку з цим зростає роль підходів edge computing, спрямованих на зменшення потреби у постійній передачі даних до хмарних сервісів. Завдяки сучасним досягненням у галузі апаратного та програмного забезпечення дедалі більшої практичної реалізації набувають гібридні edge–cloud архітектури, які роблять впровадження кіберфізичних аграрних систем більш доступним і економічно доцільним.

Питання для самоперевірки

1. У чому полягає основна ідея кіберфізичних аграрних систем і які їх ключові компоненти?
2. Яку роль відіграють сенсорні системи в CAS і які типи даних вони формують?
3. Чим відрізняються моделі керування в CAS від традиційних підходів до управління агровиробництвом?
4. Що таке виконавчі механізми (actuation) у контексті CAS і які приклади їх застосування в рослинництві?
5. Які основні класи аграрних роботів існують і за якими критеріями вони класифікуються?
6. У чому полягає концепція "in-field intelligence" і як машинне навчання підтримує прийняття рішень у полі?
7. Які переваги використання безпілотних літальних апаратів у моніторингу агроекосистем?
8. У чому полягають основні обмеження застосування роботів у польових умовах (технічні та екологічні)?
9. Що таке цифровий двійник у сільському господарстві і які процеси він моделює?
10. Які ключові етапи побудови цифрового двійника агросистеми?
11. Чому кіберінфраструктура є критично важливою для функціонування CAS?
12. Які основні функції систем управління даними в кіберфізичних аграрних системах?
13. У чому полягає різниця між edge, fog і cloud computing у контексті CAS?
14. Які переваги та обмеження використання LoRaWAN та інших мережевих технологій у сільському господарстві?
15. Які основні виклики (технічні, економічні, соціальні та правові) стоять перед масштабним впровадженням CAS у агровиробництво?

РОЗДІЛ 6. ІНТЕГРАЦІЯ СЕРВІСУ ТОЧНОГО ЗЕМЛЕРОБСТВА В ІНФОРМАЦІЙНУ СИСТЕМУ УПРАВЛІННЯ ФЕРМЕРСЬКИМ ГОСПОДАРСТВОМ – ПРЕДИКТОВЕ ЗЕМЛЕРОБСТВО

6.1. Проблематика технологій ТЗ
6.2. Сучасний стан розвитку
6.3. Досвід упровадження
6.4. Ключові інструменти для управління живленням

6.1. Проблематика технологій ТЗ

Впровадження сервісів точного землеробства у систему управління фермерським господарством (FMIS) є важливим етапом цифрової трансформації агровиробництва, що визначає ефективність використання даних та прийняття управлінських рішень.

Останнім часом технології точного землеробства набувають все ширшого застосування у практиці сільського господарства. Супутникові дані, польові сенсори та системи глобальної навігації інтегруються в сільськогосподарську техніку з метою зменшення витрат ресурсів, підвищення врожайності та оптимізації виробничих процесів. Точне землеробство розглядається як концепція управління агровиробництвом, що базується на спостереженні, вимірюванні та реагуванні на просторову і внутрішньопольову мінливість посівів. Такий підхід дозволяє отримувати просторово-часову інформацію, необхідну для прийняття більш обґрунтованих управлінських рішень.

Однією з ключових цілей розвитку точного землеробства є формування систем підтримки прийняття рішень для комплексного управління господарством, що забезпечують оптимізацію використання ресурсів за одночасного збереження природного потенціалу. Водночас існує низка проблем, серед яких особливої уваги потребують питання інженерії та аналізу даних. Важливим викликом є забезпечення ефективного обміну даними між різними інформаційними системами, що дозволило б отримувати нові знання шляхом інтеграції розрізнених джерел інформації.

На сьогодні рівень сумісності між системами залишається недостатнім, що обумовлено фрагментованістю ринку технологій точного землеробства. У результаті формується технологічне середовище, яке не дозволяє повною мірою реалізувати потенціал існуючих цифрових рішень і сервісів. Це, у свою чергу, обмежує ефективність використання даних у процесах управління агровиробництвом.

Сільське господарство характеризується високою складністю, оскільки включає значну кількість взаємопов'язаних факторів: вартість земельних ресурсів, трудові витрати, використання дороговартісної техніки, застосування добрив і засобів захисту рослин, організацію зрошення та інші виробничі процеси. При цьому на більшості господарств облік виробничої діяльності ведеться несистемно, а наявні дані є розрізненими, фрагментованими та складними для подальшого аналізу і використання.

У зв'язку з цим зростає потреба у впровадженні сучасних інформаційно-комунікаційних технологій, які дозволяють автоматизувати облік витрат, планувати виробничі операції та приймати обґрунтовані рішення з урахуванням як агротехнологічних, так і економічних чинників. Особливе значення мають системи управління фермерським господарством, що забезпечують накопичення, обробку та аналіз даних, а також підтримують процес прийняття рішень у щоденній діяльності аграрного підприємства.

Таким чином, інтеграція сервісів точного землеробства із системами управління господарством створює передумови для формування інтелектуальних аграрних систем, у яких поєднуються дані, аналітика та практичні інструменти управління. Це дозволяє підвищити ефективність агровиробництва, забезпечити раціональне використання ресурсів і сприяти сталому розвитку сільського господарства.

6.2. Сучасний стан розвитку

Системи управління фермерським господарством упродовж останніх років зазнали стрімкого розвитку, трансформувавшись із простих інструментів обробки даних у складні інтегровані платформи, що підтримують управління парком сільськогосподарської техніки в режимі реального часу та реалізують функції підтримки прийняття рішень. Такі системи поступово стають центральним елементом цифрової інфраструктури сучасного агровиробництва.

Водночас однією з ключових проблем залишається якість та повнота даних, що вводяться до систем. Інформація, пов'язана з виконанням агротехнологічних операцій, часто фіксується несистемно, має фрагментований характер або містить пропуски. Додатковим обмеженням є небажання або обмежені можливості користувачів витрачати час на структурування, узагальнення та введення даних у систему, що знижує ефективність використання FMIS у практичній діяльності.

Протягом останніх років сформувалося різноманіття підходів до реалізації систем управління господарством. Частина рішень, розроблених у науковому середовищі, орієнтована на моделювання окремих процесів, таких як тягові зусилля агрегатів або параметри врожайності культур, зібраних вручну. Паралельно активно розвиваються комерційні програмні продукти, що пропонують комплексні рішення для агровиробників, орієнтовані на практичне використання та інтеграцію різних виробничих процесів.

З метою забезпечення сумісності систем і вдосконалення обробки даних на рівні міжнародних ініціатив реалізовано низку проєктів, спрямованих на розвиток відкритих цифрових платформ і стандартів обміну даними. Поряд із цим у світі функціонує значна кількість інноваційних компаній і стартапів, які пропонують рішення для управління господарствами з можливістю розширення функціональності та інтеграції додаткових сервісів, у тому числі сторонніх розробників.

Разом із тим, точне землеробство є більш складним у технічному та обчислювальному аспектах, порівняно з традиційними підходами. Це обумовлено не лише необхідністю високоточного вимірювання параметрів і диференційованого внесення ресурсів, але й історично сформованими підходами до побудови систем управління, у яких введення даних здійснювалося переважно вручну, а результати представлялися у вигляді звітної документації.

Ключову роль у розвитку точного землеробства відіграє використання глобальних навігаційних супутникових систем, які забезпечують високу точність позиціонування в межах поля. Це створює можливість формування карт просторової мінливості для різних параметрів, зокрема властивостей ґрунту, вмісту поживних речовин, врожайності та рельєфу. У поєднанні з багатоспектральними зображеннями такі дані застосовуються для реалізації технологій диференційованого висіву, внесення засобів захисту рослин та інших агротехнологічних операцій. Додатково використання сенсорів, встановлених на сільськогосподарській техніці, забезпечує можливість реалізації систем реального часу.

Сучасні системи управління господарством суттєво відрізняються за своїм функціональним призначенням. Рішення, розроблені науковими колективами, як правило, орієнтовані на автоматизоване збирання даних та забезпечення взаємодії між різними програмними модулями. У той же час комерційні системи переважно зосереджені на підтримці повсякденних виробничих процесів, включаючи ведення обліку, управління технікою та формування звітності.

У зв’язку з цим постають дві ключові науково-практичні проблеми, що визначають подальший розвиток галузі. Перша полягає у здатності існуючих систем управління господарством інтегрувати та реалізовувати функціональні можливості, розроблені в межах наукових досліджень. Друга стосується відповідності сучасних систем управління зростаючим вимогам до обробки великих обсягів даних, характерних для технологій точного землеробства, з урахуванням їх архітектури, функціональності та масштабованості.

Саме ці виклики безпосередньо пов’язані з еволюцією підходів до аграрного управління, зокрема з переходом від концепції точного землеробства до так званого передписувального (прескриптивного) землеробства (**Prescriptive Farming**), яке є наступним етапом розвитку галузі. Якщо точне землеробство лише відображає та інтерпретує стан процесів у полі, то прескриптивне землеробство переходить до рівня конкретних рекомендацій і фактичних «рецептів» дій, визначаючи не лише те, що відбувається, але й що саме необхідно зробити для досягнення оптимального результату.

6.2.1. Як працює prescriptive farming?

Система збирає величезний масив даних (Big Data), обробляє їх за допомогою ШІ та видає файл-завдання для трактора чи робота. Процес виглядає так:

1. ***Збір історичних даних:*** Карти врожайності за минулі роки, типи ґрунтів, рельєф (RTK-висоти).
2. ***Поточний моніторинг:*** Супутникові знімки (NDVI), дані з датчиків вологості та метеостанцій.
3. ***Алгоритмічне рішення:*** Програма (наприклад, та сама **ifarma/PreFer**, про яку ти згадував) вираховує: "Ось на цій ділянці в 2 гектари потенціал врожайності вищий, тому сюди треба дати на 15% більше азоту, а на солончаках - зменшити дозу, щоб не викидати гроші на вітер".
4. ***Виконання:*** Файл завантажується в бортовий комп'ютер техніки, і обприскувач чи розкидач добрив автоматично змінює норму внесення під час руху.

Ключові відмінності від звичайного підходу:

- ***Диференційоване внесення (VRA)*:** Замість середньої норми на все поле, кожна ділянка отримує індивідуальну "порцію".
- ***Гіперлокальність:*** Рішення приймаються на рівні квадратних метрів або навіть окремих рослин (якщо працює робот).

- ***Автоматизація інтелекту:*** Агроному не потрібно вручну рахувати норми для кожної зони - система пропонує варіанти, базуючись на математичних моделях.

Чому це важливо для роботів (UGV)?

Саме для автономних наземних роботів прескриптивне землеробство є "мізками". Робот без прескрипції - це просто керована машина. Робот із прескрипцією - це автономна одиниця, яка:

- Знає, де саме зупинитися для точкового підживлення.
- Регулює тиск форсунок залежно від фази росту конкретної рослини.
- Економить до 30-50% добрив та ЗЗР.

Приклади систем (FMIS):

- ifarma/PreFer
- Trimble Ag Software
- Climate Field View (Bayer)
- John Deere Operations Center

6.2.2. Платформа ifarma/PreFer

Новий модуль **PreFer** у складі системи **ifarma** було розроблено з урахуванням необхідності поєднання функціональних можливостей сервісу точного внесення добрив із інфраструктурою системи управління фермерським господарством. Основна концепція розробки передбачала збереження повної функціональної самостійності та методологічної цілісності сервісу PreFer як окремого інструменту точного землеробства. Одночасно було використано базові переваги системи ifarma, зокрема відкритість архітектури та можливість забезпечення взаємодії між різними інформаційними компонентами. Додатково інтеграція дозволила реалізувати потенціал системи щодо ведення економічного обліку та агротехнологічної документації, включаючи формування календаря вирощування культур.

Первинна структура сервісу PreFer базується на використанні геоінформаційної системи, у якій здійснюється зберігання та обробка повного набору геопросторових даних фермерського господарства (рис. 6.1). Геоінформаційна база даних виступає ключовим елементом сервісу, з якого модуль PreFer, інтегрований у систему ifarma, отримує картографічну інформацію для подальшого аналізу та використання. Одночасно ця система виконує функцію центрального вузла, що забезпечує інтеграцію та взаємодію з іншими джерелами даних і аналітичними компонентами.

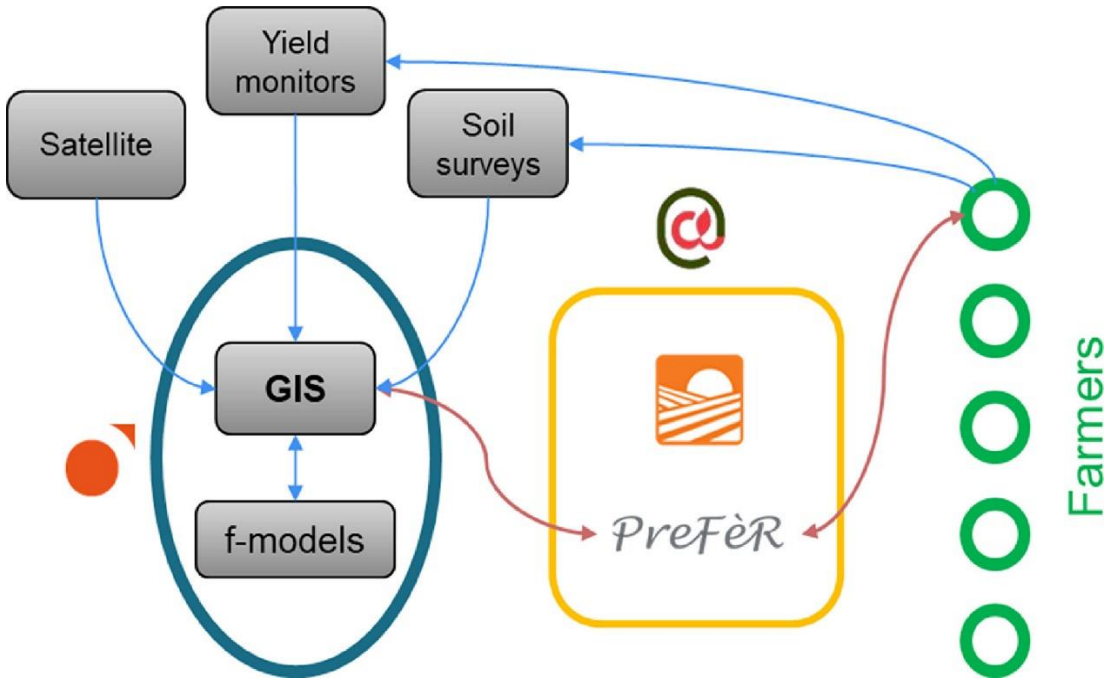


Рис. 6.1. Операційний зв'язок PreFer як послуги з платформою ifarma

До таких компонентів належать результати агрохімічного обстеження ґрунтів, що формуються на основі відбору проб і лабораторного аналізу, дані дистанційного зондування Землі, включаючи супутникові зображення та метеорологічну інформацію, а також дані, отримані з бортових систем моніторингу врожайності, встановлених на збиральній техніці. Окреме місце у структурі займають алгоритми машинного навчання, які використовуються для формування рекомендацій щодо диференційованого внесення добрив у вигляді відповідних моделей прийняття рішень.

Таким чином, запропонований підхід забезпечує комплексну інтеграцію різнорідних джерел даних у межах єдиної інформаційної системи, що створює передумови для підвищення точності агротехнологічних рішень і ефективності управління виробничими процесами.

Водночас новий програмний продукт мав відповідати низці важливих вимог, що визначали його архітектуру та принципи функціонування. Зокрема, необхідно було зберегти основний тип даних, який використовується в оригінальному протоколі сервісу PreFer, а саме векторні точкові дані, організовані у вигляді регулярної сітки. Це обумовлено тим, що сам сервіс продовжує функціонувати на геоінформаційному сервері господарства. Паралельно виникла потреба у реалізації в середовищі ifarma можливості відображення як растрових, так і векторних геопросторових шарів, що фактично імітує

функціональність геоінформаційної системи. Додатковим обмеженням стала необхідність роботи з наборами даних обмеженого обсягу, включаючи зображення, з метою забезпечення високої швидкості відображення та оновлення інформації.

У результаті як базову геопросторову структуру нового модуля було обрано регулярну точкову сітку, яка вже використовувалася в геоінформаційній системі господарства. На наступному етапі ця сітка експортується у вигляді електронної таблиці, що містить координати точок у форматі x та y. Далі відбувається перетворення табличних даних у псевдорастрове представлення в середовищі відображення картографічної інформації модуля PreFer шляхом призначення відповідних атрибутів відображення для кожного стовпця даних. У процесі експериментальної перевірки було встановлено, що оптимальним є використання просторового розділення з розміром комірки 5 метрів, що забезпечує баланс між деталізацією та швидкістю обробки.

Запропонований підхід передбачає дворівневу організацію зберігання та обробки даних, за якої користувацька інформація розміщується у хмарному середовищі, тоді як геоінформаційна база даних для аналітичних задач зберігається на спеціалізованому сервері. Така архітектура обумовлена необхідністю багаторазового виконання складних аналітичних процедур протягом вегетаційного періоду із застосуванням алгоритмів машинного навчання, розроблених у внутрішньому середовищі. При цьому значна частина етапів обробки даних потребує контролю з боку фахівців та, у разі необхідності, ручного коригування результатів. У подальшому передбачається розширення рівня автоматизації як аналітичних процедур, так і процесів обміну даними між компонентами системи.

6.2.3. Сервіс PreFer

PreFer є агросервісом, призначеним для формування карт-завдань диференційованого внесення добрив при основному та підживлювальному удобренні польових культур. Сервіс започатковано компанією Ecodevelopment S.A. у 2016 році та орієнтовано на реалізацію підходів точного землеробства у виробничих умовах.

На початковому етапі сервіс був реалізований у середовищі геоінформаційної системи у вигляді векторних полігональних карт, де окремі полігони відповідали зонам управління. Для кожної зони формувалися та зберігалися результати агрохімічного обстеження ґрунтів і агрономічні характеристики, а також рекомендації щодо

внесення добрив, отримані на основі експертних знань із використанням відповідного програмного забезпечення.

До 2022 року взаємодія з користувачами здійснювалася через платформу візуалізації геопросторових даних, де інформація подавалася у вигляді трьох окремих векторних карт. Перша карта відображала межі полів із прив'язаною агрономічною та історичною інформацією щодо культур, друга містила точкові дані агрохімічного аналізу ґрунтів, а третя представляла зони управління із відповідними рекомендаціями щодо удобрення.

Зі збільшенням обсягів даних, отриманих із різних джерел, зокрема результатів ґрунтових обстежень, супутникових зображень та систем моніторингу врожайності, виникла необхідність удосконалення підходів до формування карт-завдань. У зв'язку з цим було впроваджено методи машинного навчання для автоматизованого формування рекомендацій. Одночасно відбувалося поступове зменшення розмірів зон управління завдяки накопиченню нових даних і підвищенню деталізації аналітичних процедур.

Паралельно змінювався і тип просторового представлення даних: від полігональної моделі було здійснено перехід до точкового формату з регулярною сіткою. Просторове розділення поступово уточнювалося - від 90×90 м до 30×30 м і, зрештою, до 5×5 м, що дозволило суттєво підвищити деталізацію та точність сформованих рекомендацій. Сучасна версія алгоритму PreFer використовує комплекс вхідних параметрів, який включає показники властивостей ґрунту, агрономічні характеристики полів, спектральні індекси рослинності, отримані на основі супутникових даних, кліматичні параметри, а також карти врожайності попередніх періодів.

Оскільки алгоритм значною мірою базується на характеристиках ґрунту, важливим етапом є проведення польових агрохімічних обстежень. Відбір зразків ґрунту здійснюється спеціалістами з подальшим лабораторним аналізом у сертифікованих установах. Агрономічна інформація збирається безпосередньо від виробників за допомогою стандартизованих опитувальних форм. Кліматичні показники та спектральні характеристики культур для кожної точки регулярної сітки розраховуються із застосуванням хмарних геоінформаційних платформ обробки супутникових даних. Дані про врожайність отримуються з бортових систем моніторингу, встановлених на збиральній техніці, після чого проходять процедури очищення та калібрування на основі фактичних вагових вимірювань для кожного поля.

6.2.4. Платформа ifarma

Платформа ifarma (рис. 6.2), представлена на ринку Греції у 2014 році, є хмарною інтегрованою системою управління фермерським господарством, розробленою компанією Agrostis. Вона поєднує сучасні інформаційні технології для підтримки як індивідуальних фермерів, так і аграрних об'єднань, орієнтованих на впровадження інтелектуального та точного землеробства. На сьогодні ifarma є відомим програмним продуктом у сфері аграрного менеджменту та широко використовується різними суб'єктами агробізнесу, включаючи великі аграрні компанії, виноробні господарства, торговельні та експортні підприємства, кооперативи, організації виробників, а також малі та середні фермерські господарства.

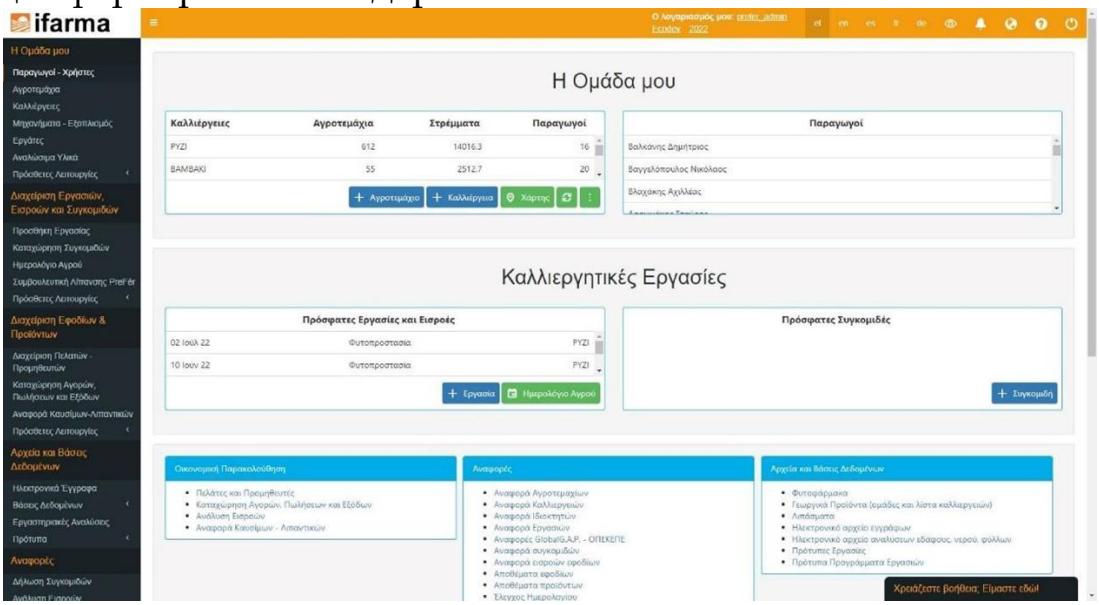


Рис. 6.2. Головна сторінка платформи ifarma (https://ifarma.agrostis.gr/).

Основу функціональності системи становить управління об'єктами фермерського господарства. Програмне забезпечення забезпечує можливість роботи з кількома господарствами одночасно, у межах яких інтегруються всі ключові елементи виробництва, зокрема посіви, поля, технологічні операції та використані ресурси. Система дозволяє здійснювати планування, моніторинг та облік усіх агротехнологічних заходів протягом повного виробничого циклу вирощування культур. Усі виконані операції відображаються у календарі та можуть бути просторово прив'язані до конкретних ділянок на карті, що забезпечує наочність і контроль виконання робіт.

Важливим компонентом є управління матеріальними ресурсами, яке передбачає облік закупівель, автоматичну фіксацію використання матеріалів у межах виконання технологічних операцій, а також ведення

детальної історії транзакцій. Це дозволяє забезпечити прозорість використання ресурсів та підвищити ефективність їх планування.

Фінансовий модуль системи забезпечує формування даних щодо обсягів отриманої продукції на основі результатів збирання врожаю, а також проведення аналітики рентабельності на рівні окремих полів, культур і господарства в цілому. Таким чином, платформа ifarma виступає як комплексний інструмент підтримки управлінських рішень, що інтегрує технологічні та економічні аспекти агровиробництва.

Паралельно мобільна версія платформи ifarma розширює функціональні можливості системи, забезпечуючи користувачам інструменти для перегляду, відстеження та створення технологічних операцій, налаштування сповіщень, фіксації фотоматеріалів із прив'язкою до конкретних полів, отримання нагадувань про прострочені завдання, а також використання мобільних засобів позиціонування для контролю виконання польових робіт. Додатково реалізовано набір інтелектуальних інструментів для виконання агротехнологічних розрахунків, що підвищує зручність використання системи у виробничих умовах.

Модель даних ifarma інтегрує всю інформацію, пов'язану з функціонуванням фермерського господарства, включаючи земельні ділянки, посіви, технологічні операції, а також ресурси і матеріали, що використовуються у процесі планування та виконання цих операцій. Організація даних здійснюється за ієрархічним принципом, де верхній рівень займає господарство як цілісна система управління.

У межах цієї структури господарство складається з набору культур, кожна з яких вирощується на одному або кількох полях і супроводжується послідовністю технологічних операцій. Кожна операція включає відповідні ресурси та матеріали, необхідні для її виконання. При цьому ресурси представлені як узагальнені категорії, що описують типові характеристики, зокрема трудові витрати, техніку, обладнання та матеріальні засоби.

Конкретні ресурси господарства моделюються у вигляді окремих інформаційних сутностей, таких як працівники, добрива, засоби захисту рослин, машини та інші елементи виробничої інфраструктури. Для кожного ресурсу та вхідного елементу визначаються показники вартості та ефективності використання в межах окремих операцій, що дозволяє розраховувати загальні обсяги витрат і потреби ресурсів при виконанні технологічних процесів.

У якості системи управління базами даних у платформі ifarma використовується реляційна модель, реалізована засобами мови структурованих запитів. Такий підхід передбачає організацію

інформації у вигляді взаємопов'язаних таблиць, що забезпечує структурованість даних, їх цілісність і ефективність обробки в межах веб-орієнтованої інформаційної системи.

Система управління базами даних, що використовується у платформі ifarma, підтримує широкий спектр прикладних задач, включаючи очищення даних, формування сховищ даних, реалізацію електронної комерції, ведення журналів подій та створення веб-порталів. Вона може інтегруватися з різними мовами програмування, що дозволяє розширювати функціональність системи та забезпечувати її адаптацію до специфічних потреб користувачів.

Окремий клас інформаційних сутностей у структурі системи призначений для відображення фінансових операцій фермерського господарства. Усі фінансові транзакції прив'язуються до конкретного виробничого сезону, що створює можливість проведення детального аналізу витрат і прибутковості в межах визначеного періоду. Такий підхід забезпечує обґрунтованість економічної оцінки результатів господарської діяльності.

Додатково у структурі даних передбачено використання стандартних значень, які формують ієрархічну систему класифікації від більш специфічних до узагальнених категорій. Це дозволяє уніфікувати представлення даних та забезпечити їх узгодженість у межах системи (рис. 6.3).

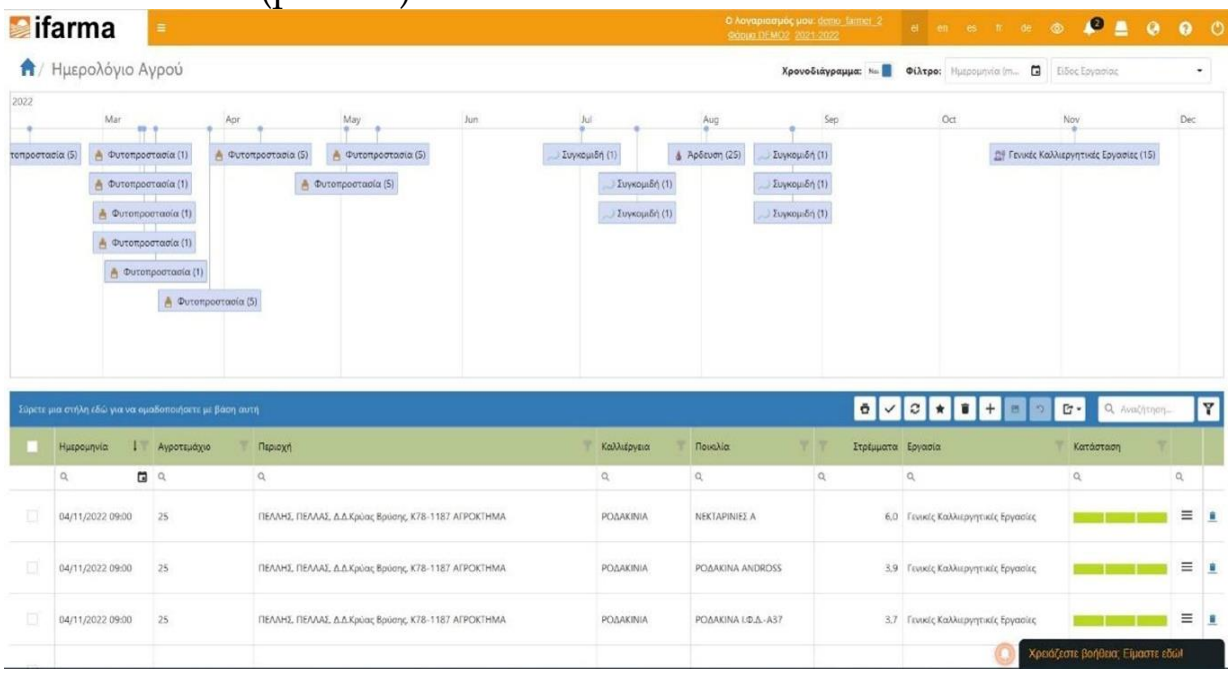


Рис. 6.3. Функція календаря врожаю на платформі ifarma

Одним із базових функціональних елементів платформи є календар вирощування культур, який надає можливість фіксувати як заплановані, так і фактично виконані агротехнологічні операції

протягом усього виробничого циклу. Система містить попередньо налаштовані календарі для широкого спектра сільськогосподарських культур, що значно спрощує процес планування та організації виробничої діяльності.

Станом на 2026 рік ifarma використовується серед найбільших компаній, що працюють у сільськогосподарському секторі Греції, такими як виноробні, торговельні та експортні компанії, кооперативи та групи виробників, які разом керують понад 9000 виробників.

6.2.5. Модуль PreFer

Модуль PreFer реалізовано як незалежний функціональний компонент у складі системи управління фермерським господарством ifarma та інтегровано в головне меню платформи як окремий сервіс. Такий підхід забезпечує зручність доступу до інструментів точного удобрення та їх органічне поєднання з іншими функціональними можливостями системи.

Функціональні можливості користувача в середовищі ifarma/PreFer охоплюють базові адміністративні операції, пов'язані з управлінням обліковими записами, а також роботу з просторовими та агрономічними даними. Зокрема, реалізовано імпорт меж полів із зовнішніх геоінформаційних джерел або їх створення безпосередньо у картографічному середовищі системи. Передбачено введення агрономічної інформації для кожного поля за допомогою стандартизованих форм, інтегрованих у інтерфейс модуля, а також можливість експорту меж полів разом із відповідними атрибутами у форматах, придатних для подальшого використання у геоінформаційних системах. Окремо забезпечено завантаження тематичних карт у табличному форматі, представлених у вигляді регулярних точкових сіток із координатами.

Структура даних PreFer базується на використанні регулярної точкової сітки як основного носія просторової інформації. Для передачі даних між геоінформаційним сервером PreFer і платформою ifarma застосовуються електронні таблиці, що містять координати точок і відповідні атрибути. Такий підхід забезпечує швидке та автоматизоване оновлення геобаз даних фермерських господарств, підвищуючи оперативність обробки інформації.

Модуль PreFer також інтегрується з іншими компонентами платформи ifarma, що дозволяє використовувати вже наявні дані та функціональні можливості системи. Зокрема, забезпечується взаємодія з модулем управління земельними ділянками для імпорту або

створення меж полів, а також із модулем управління посівами для використання збереженої агрономічної інформації.

Користувачі мають можливість переглядати перелік полів із подальшою фільтрацією за різними параметрами, такими як культура, сорт, назва або площа. Для кожного поля передбачено введення та оновлення агрономічних характеристик, які включають інформацію про сорт, строки сівби, способи зрошення, інтенсивність вирощування, середню врожайність та інші показники. Ці параметри є важливими вхідними даними для алгоритмів PreFer і можуть передаватися до геоінформаційної системи через експорт у відповідному форматі.

Із переліку полів у модулі PreFer користувач має можливість обрати довільну кількість ділянок для одночасного відображення в окремому робочому вікні, яке має назву «Crop Maps». У цьому середовищі забезпечується візуалізація різних типів тематичних карт, попередньо завантажених адміністратором системи. Такі карти поділяються на растрові, що відображають безперервні просторові характеристики, та точкові, які використовуються, зокрема, для представлення результатів агрохімічного аналізу ґрунтів.

Завантажені тематичні карти організовано у вигляді ієрархічного списку, що структурований за п′ятьма основними групами з можливістю подальшої деталізації через підкатегорії (рис. 6.4).



Рис. 6.4. Приклад вибраних полів, перелічених (ліворуч), з відповідною тематичною картою (праворуч) в ifarma/PreFer

До першої групи належать показники властивостей ґрунту, які охоплюють набір основних агрохімічних параметрів. Друга група відображає потреби у мінеральному живленні рослин і включає

показники для основних елементів живлення. Третя група містить інформацію щодо фактичного внесення добрив, перелік яких поступово розширюється відповідно до практичних потреб. Четверта група представлена супутниковими індексами, що характеризують стан рослинності на основі спектральних ознак. П'ята група включає карти врожайності, сформовані на основі даних, отриманих із систем моніторингу під час збирання врожаю.

Така організація даних забезпечує зручний доступ до різнорідної інформації та створює умови для комплексного аналізу агрономічних показників у межах єдиного інформаційного середовища.

Під час вибору типу тематичної карти також доступна опція відображення дати її створення, що дозволяє користувачеві відслідковувати актуальність просторових даних. Крім того, передбачено функцію накладання точкової карти зразків ґрунту на будь-яку раніше відображену растрову тематичну карту. Доступ до шару зразків ґрунту здійснюється через окрему функціональну кнопку інтерфейсу. У разі вибору окремої точки відбору проб користувач може переглянути результати відповідного агрохімічного аналізу, що забезпечує оперативний доступ до детальної інформації на рівні конкретного місця відбору.

Функціональність та інтерфейс модуля PreFer можуть бути додатково налаштовані адміністратором системи шляхом зміни, видалення або додавання нових функцій, символів, одиниць вимірювання, діапазонів значень, шаблонів або стандартів відображення. Така гнучкість дозволяє адаптувати систему до різних агротехнологічних умов та вимог користувачів.

Водночас слід підкреслити, що тематичні карти в середовищі ifarma/PreFer призначені виключно для візуалізаційних цілей. Натомість прикладні карти, що формуються на сервері геоінформаційної системи PreFer-GIS, передаються безпосередньо фермеру та до терміналів систем диференційованого внесення ресурсів у вигляді окремих файлів у відповідних форматах, придатних для автоматизованого виконання технологічних операцій.

6.2.6. Приклади

Для кращого розуміння потенціалу модуля PreFer для практичного застосування у фермерських господарствах наведено два характерні приклади.

У першому прикладі відображається карта вмісту органічної речовини в ґрунті. Ця карта формується як результат просторової інтерполяції наявних зразків ґрунту, відібраних у межах конкретних

полів протягом певного періоду часу (**рис. 6.5**). Процедура інтерполяції, як і інші геопросторові аналітичні операції, виконується на сервері геоінформаційної системи PreFer-GIS із використанням найбільш доцільних методів, що відповідають структурі наявного набору даних, а також з урахуванням можливих методологічних та інших обмежень.

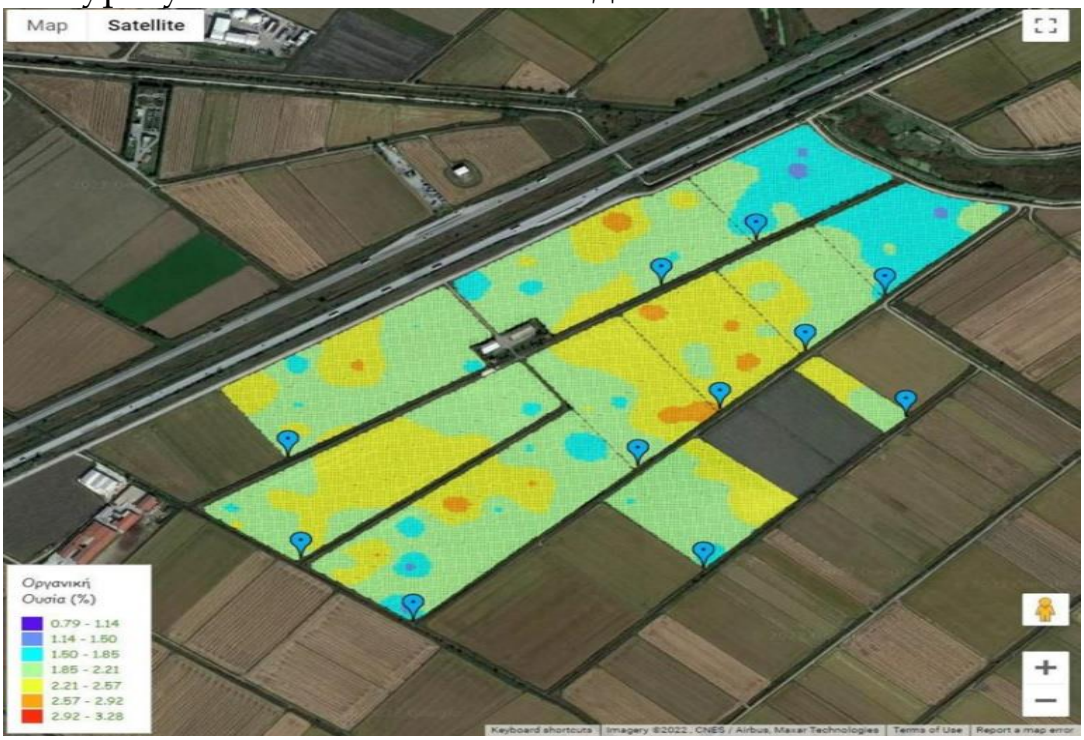


Рис. 6.5. Растрова тематична карта властивостей ґрунту (у даному випадку - вміст органічної речовини) в системі ifarma/PreFer

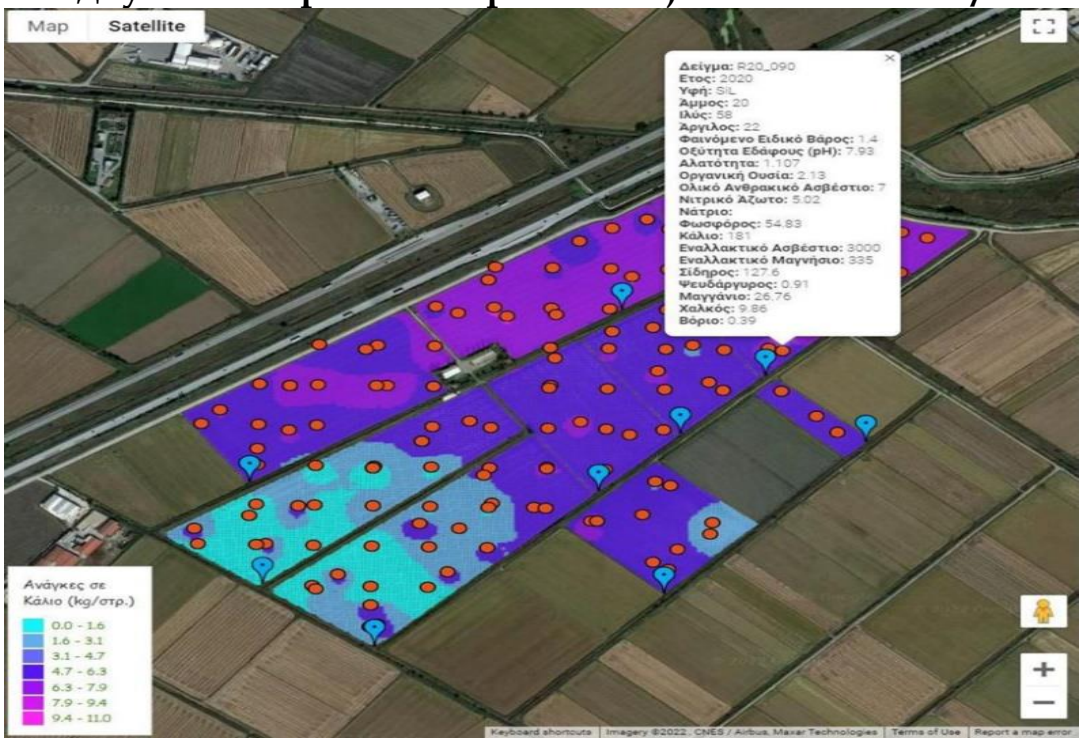


Рис. 6.6. Растрова тематична карта потреби в елементах живлення з накладанням шару точкових зразків ґрунту в системі ifarma/PreFer

Паралельно агрономічна інформація, закріплена за кожною земельною ділянкою, може бути оперативно отримана користувачем у будь-який момент шляхом вибору відповідного маркера на карті. Застосування такої функціональності забезпечує швидкий доступ до детальних характеристик полів і сприяє більш обґрунтованому прийняттю рішень у межах системи управління агровиробництвом.

У другому прикладі відображається карта потреби у калії (K). Дана карта є результатом роботи алгоритму машинного навчання модуля PreFer (рис. 6.6). На цей шар може бути накладена карта точкових зразків ґрунту, при цьому повний агрохімічний аналіз кожного зразка доступний у будь-який момент шляхом вибору відповідної точки на карті.

6.3. Досвід упровадження

До впровадження платформи ifarma передача даних сервісу PreFer, таких як межі полів, результати відбору проб ґрунту та карти-завдання (рекомендаційні карти), здійснювалася переважно із використанням безкоштовного програмного забезпечення Google Earth. Хоча ця платформа є достатньо зручною для відображення та обміну векторними даними, її функціональні можливості щодо управління просторовими шарами, налаштування картографічної символіки, роботи з растровими даними та реалізації розширених картографічних інструментів є суттєво обмеженими.

Крім того, передача інформації здійснювалася шляхом надсилання файлів електронною поштою безпосередньо фермеру, після чого користувач самостійно виконував завантаження, організацію та налаштування шарів у середовищі Google Earth (рис. 6.7). Такий підхід вимагав від користувача додаткових технічних навичок і збільшував ризик помилок при роботі з просторовими даними. Як альтернативу Google Earth, у 2018 році компанією Ecodevelopment були випробувані професійні веб-ГІС застосунки для передачі та візуалізації геобаз даних фермерських господарств у більш інтегрованому та функціонально повному середовищі. У цьому випадку витрати на використання програмного забезпечення були включені до загальних витрат підприємства. Однак на практиці такий підхід виявився недостатньо зручним для фермерів, оскільки навіть базові функції вимагали значних зусиль для освоєння. Додатковою проблемою була необхідність створення та супроводу окремої веб-сторінки для кожного господарства, що ускладнювало адміністрування системи та знижувало її ефективність. У результаті цей підхід був досить швидко відхилений.

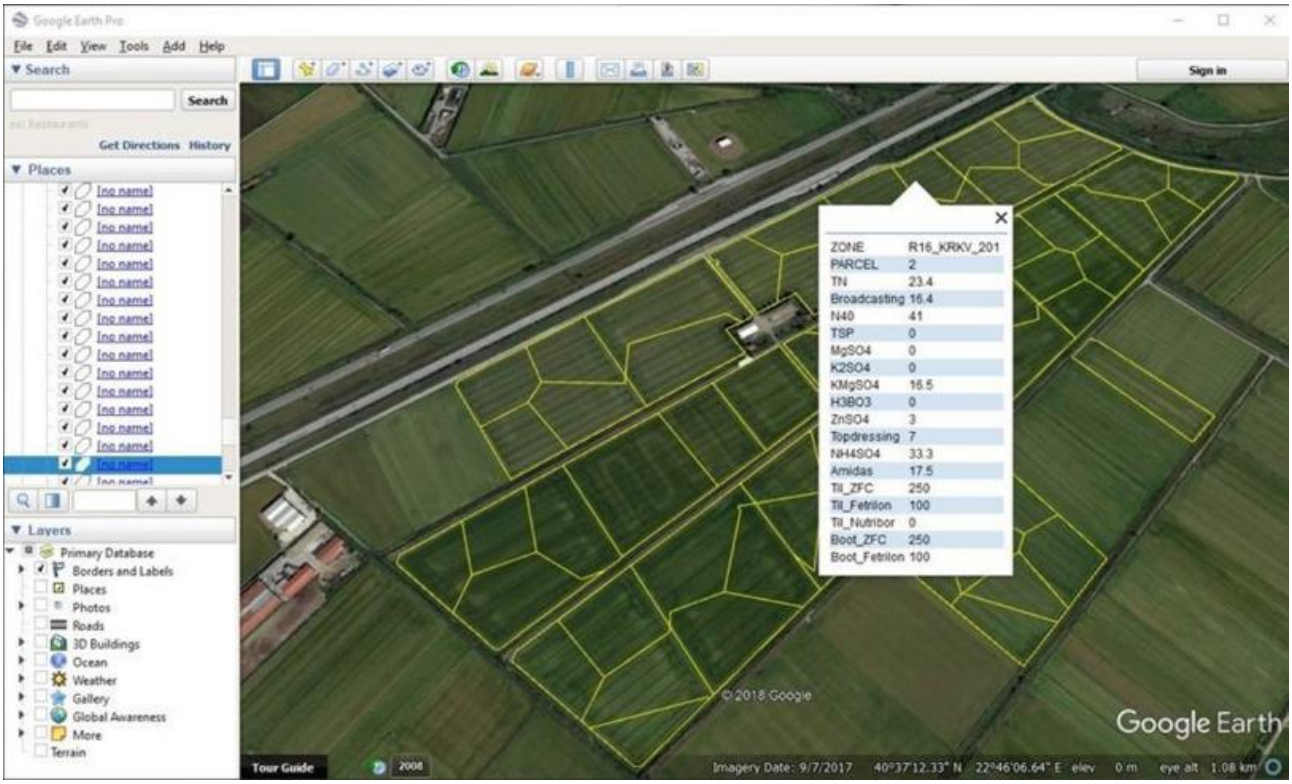


Рис. 6.7. Приклад карт-завдань PreFer, що передавалися фермерам через застосунок Google Earth (до інтеграції сервісу PreFer з платформою ifarma)

Модуль PreFer у складі платформи ifarma забезпечує користувачам повноцінний інтерфейс до функціональної геобази даних, фактично імітуючи середовище геоінформаційної системи. Такий підхід дозволяє уникнути обмежень безкоштовних застосунків та надмірної складності професійних ГІС-рішень. Крім того, запропонована конфігурація мінімізує витрати на використання системи та час передачі даних, одночасно забезпечуючи можливість централізованого адміністрування великої кількості користувачів і значних обсягів інформації.

6.3.1. Платформа Trimble Ag Software

Платформа Trimble Ag Software позиціонується як цілісне екосистемне рішення, яке інтегрує польові операції, агрономічне планування та фінансовий менеджмент у єдиний цифровий простір. Для фахівця з агрохімсервісу цей інструмент стає центральним вузлом обробки даних, де інформація з бортових комп'ютерів техніки поєднується з результатами лабораторних аналізів ґрунту.

Розробником платформи Trimble Ag Software є американська корпорація Trimble Inc. (штат Каліфорнія), яка є одним зі світових лідерів у сфері технологій позиціонування, автоматизації та зв'язку для

будівельної, геопросторової та сільськогосподарської галузей (https://www.ptxag.com/us/en/). Компанія має багаторічну історію розвитку інженерних рішень, що дозволило їй створити програмний продукт, здатний об'єднувати апаратне забезпечення тракторів із хмарними сервісами управління даними. Це робить платформу універсальним інструментом, оскільки розробник забезпечує повну сумісність програмного коду з власними терміналами серій GFX та TMX, а також підтримку відкритого протоколу ISOBUS для інтеграції з обладнанням інших виробників.

Trimble Ag Software є глобальним продуктом, орієнтованим на міжнародні стандарти діджиталізації. Платформа має часткову національну локалізацію для українського ринку, що включає переклад інтерфейсу основних модулів та підтримку локальних одиниць вимірювання. Проте повна адаптація до специфічних національних стандартів агрохімічної звітності або автоматична інтеграція з державними реєстрами в Україні, за даними авторів станом на 2026 рік, залишається обмеженою. Користувачі часто стикаються з необхідністю ручного налаштування шаблонів звітів під вимоги вітчизняного документообігу, оскільки базові алгоритми системи орієнтовані на західні методики агрохімічного аналізу та класифікації ґрунтів.

Для фахівців із автоматизації відсутність глибокої регіональної кастомізації алгоритмів розрахунку добрив означає необхідність самостійного внесення локальних агрономічних формул у середовище системи. Водночас технічна підтримка та дилерська мережа в Україні забезпечують адаптацію технічних параметрів роботи систем автопілотування та диференційованого внесення до місцевих умов зв'язку та систем координат. Таким чином, Trimble Ag Software виступає як потужна міжнародна база, що потребує інтелектуального налаштування під конкретні умови національного агрохімсервісу для отримання максимальної ефективності.

Процес цифровізації починається з формування електронних карт полів та автоматизованого планування сітки відбору проб. Система дозволяє агрохіміку точно прив'язувати кожну пробу до GPS-координат, що є критично важливим для подальшої побудови картограм розподілу поживних елементів. Після завантаження результатів аналізів платформа самостійно інтерполює дані, створюючи візуальну модель родючості кожної ділянки поля.

На основі отриманих цифрових карт спеціаліст формує завдання для диференційованого внесення добрив. Програмне забезпечення розраховує необхідні дози препаратів відповідно до заданих агрономічних алгоритмів і конвертує їх у файли формату ISO-XML, які

розпізнаються терміналами більшості сучасних тракторів та обприскувачів. Це забезпечує безпосередній зв'язок між аналітичним центром та виконавчим механізмом у полі.

Завершальним етапом роботи в системі є аналіз карт фактичного виконання робіт, які автоматично завантажуються в хмару після проходу техніки. Такий підхід дає змогу агрохіміку порівнювати заплановані та реальні норми внесення, оперативно виявляти технічні відхилення в роботі автоматики та вести точний облік використаних ресурсів. Використання Trimble Ag Software трансформує агрохімсервіс із набору розрізнених операцій у високоточний кіберфізичний процес із повним контролем кожного етапу живлення рослин.

6.3.2. Платформа Climate FieldView

Платформа Climate FieldView, розроблена компанією The Climate Corporation (цифровий підрозділ Bayer), функціонує як інтелектуальна екосистема, що супроводжує агрохімічний сервіс на всіх етапах - від планування до фінального аналізу врожайності. Технологічна основа сервісу базується на використанні пристрою FieldView Drive (рис. 6.8), який через пряме підключення до CAN-шини техніки забезпечує автоматизований збір даних безпосередньо під час виконання операцій. Такий підхід дозволяє спеціалісту з автоматизації повністю усунути людський фактор і отримувати об'єктивну інформацію про норми внесення добрив у режимі реального часу.



Рис. 6.8 Climate FieldView Drive

Climate FieldView Drive автоматично зчитує дані обладнання після приєднання до діагностичного роз'єму з шиною CAN трактора або комбайна та передає дані на карту через бездротове з'єднання за допомогою Bluetooth. Процес цифрового планування в системі FieldView розпочинається з інтеграції архівних даних та використання супутникового моніторингу високої роздільної здатності. Спеціаліст використовує автоматичну генерацію зон для створення карт-завдань змінного нормування, що дозволяє адаптувати технологію живлення до неоднорідності кожного поля. Протягом вегетації система використовує вдосконалений алгоритм аналізу біомаси, що дозволяє агрохіміку вчасно виявляти дефіцит живлення або вологи та коригувати плани підживлення.

The Climate Corporation (Сан-Франциско, США) забезпечила високий рівень адаптації продукту для українських користувачів (https://www.climatefieldview.com.ua/). Сервіс має повноцінний україномовний інтерфейс, локальні бази даних засобів захисту рослин та повну підтримку одиниць вимірювання, прийнятих у вітчизняному агровиробництві. Завдяки наявності офіційної команди підтримки в Україні та сумісності з більшістю брендів сільськогосподарської техніки через протокол ISOBUS, платформа легко інтегрується в існуючий парк машин агропідприємства.

Завершальний етап роботи полягає в детальному аналізі врожайності за допомогою інструментів Yield Analysis, які накладають карти внесених ресурсів на фінальні результати збирання (рис. 6.9).

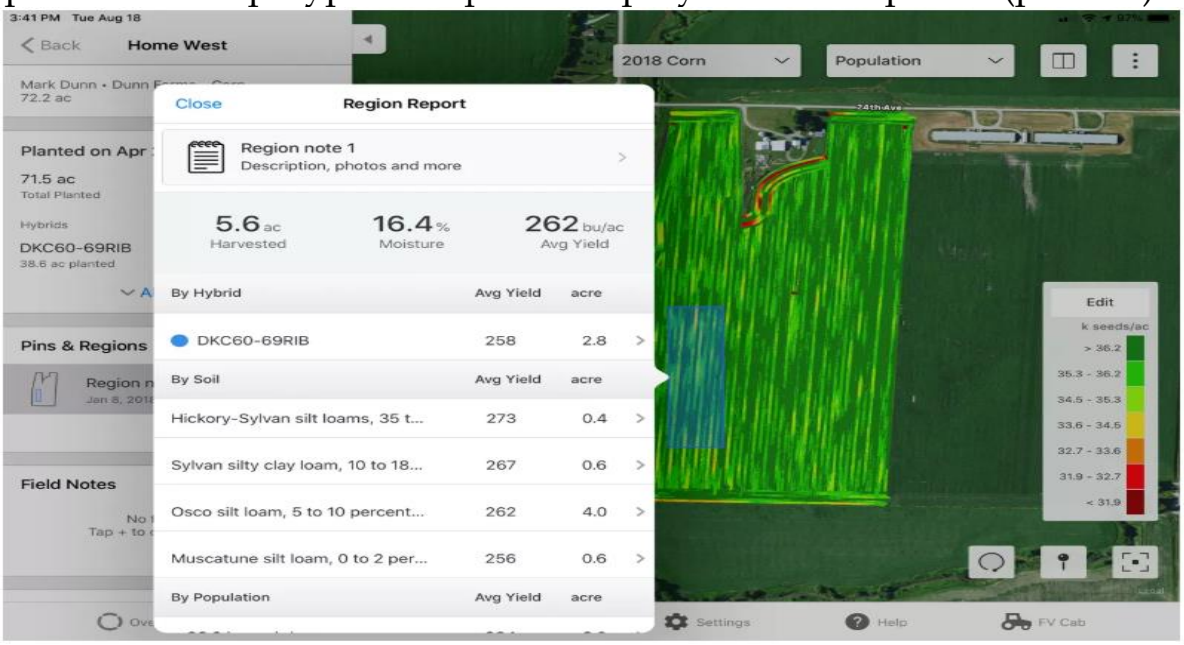


Рис. 6.9. Інструменти аналізу врожайності FieldView перетворюють кожне поле на тестову ділянку з аналізом регіону поля та звітами

Навіть для техніки, не обладнаної заводськими системами моніторингу, розробник пропонує рішення FieldView Yield Kit, що дозволяє створювати мапи врожайності на будь-якому комбайні. Такий ретроспективний аналіз дає агрохіміку можливість точно оцінити ефективність кожного прийнятого рішення та трансформувати накопичені дані у стратегію прибутковості для наступних сезонів.

6.3.3. John Deere Operations Center

Для агрохіміка **John Deere Operations Center (JDOC)** є цифровою лабораторією, де дані хімічного аналізу ґрунту перетворюються на стратегію живлення. Основна цінність системи полягає у можливості точного дозування діючої речовини на кожному квадратному метрі поля, що дозволяє оптимізувати витрати дорогих добрив та уникнути екологічного навантаження. Сайт українського представництва компанії https://www.deere.ua/uk-ua

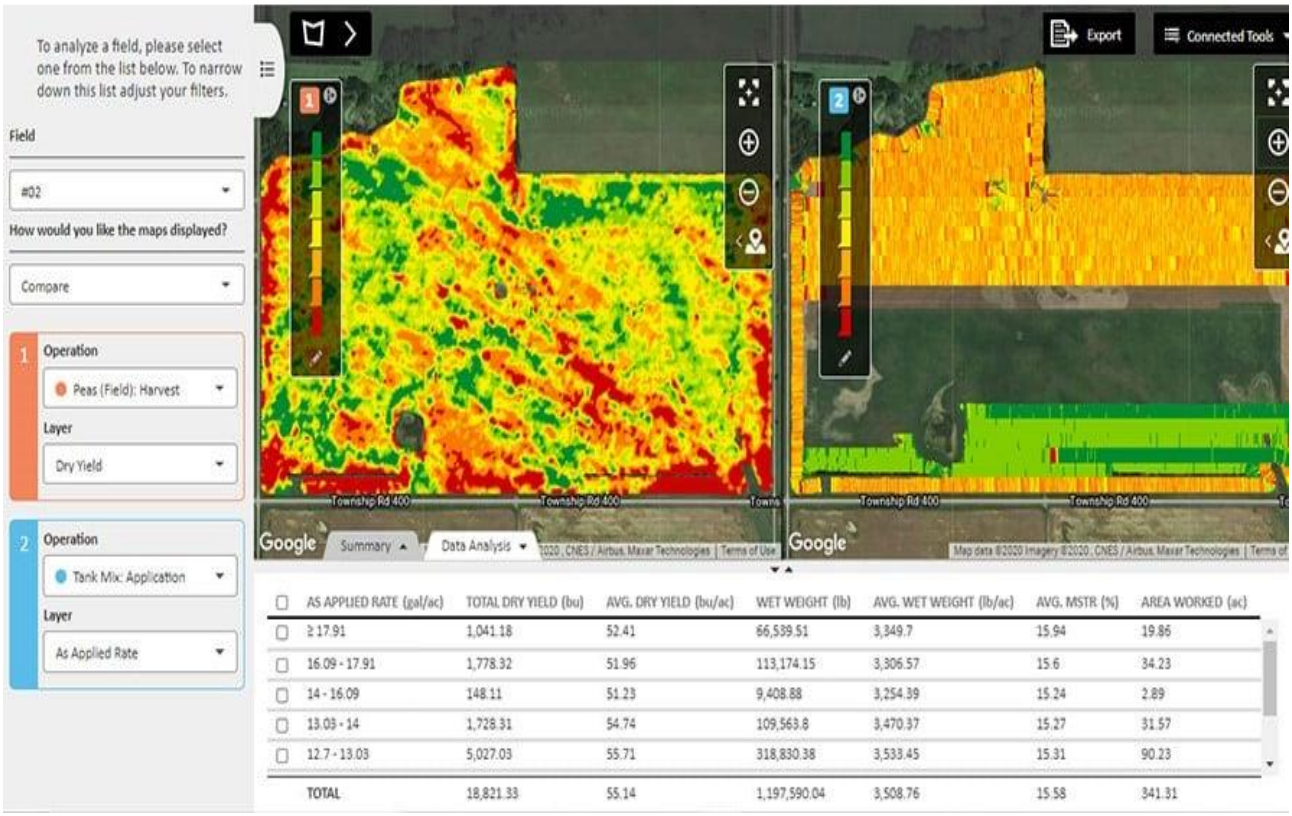


Рис. 10 Інтерфейс додатку Field Analyzer Beta системи John Deere Operations Center

На рисунку 6.10 представлена карта врожайності гороху у додатку Field Analyzer Beta. Програмне забезпечення дозволяє швидко

порівнювати дві операції, наприклад, збирання врожаю (операція №1) та внесення препарату (операція №2). На зображенні та в таблиці нижче в першому стовпці вказано норму внесення, у другому - реакцію врожайності на цю норму, а в третьому - площу, якої стосуються ці показники. Навіть при побіжному огляді помітно, що при нормі 12,7–13,03 було отримано найкращий результат врожайності - 37,47 ц/га, тоді як при вищій нормі 16,09–17,91 зафіксовано найнижчу врожайність - 34,94 ц/га. Користувачі також можуть вивести на екран обидві карти (збирання та внесення), щоб візуально оцінити отриманий ефект. Ці записи зберігаються в Operations Center і доступні для перегляду в будь-який час.

6.4. Ключові інструменти для управління живленням

1. ***Планування агрохімічного обстеження та імпорт даних*** Платформа дозволяє імпортувати результати сторонніх лабораторій. Агрохімік може накладати сітки відбору проб на карти рельєфу або вегетації попередніх років. Це дає змогу створювати не просто регулярні сітки, а «розумні» карти обстеження, орієнтовані на зони продуктивності.

2. ***Конструктор диференційованого внесення*** **(*VRA Prescriptions*)** Інструмент **Agrian** (інтегрований у JDOC) або вбудований редактор приписів дозволяє агрохіміку розраховувати норми внесення добрив у фізичній або діючій речовині. Ви можете створювати карти завдань для:

- Базового внесення (P, K, вапно) на основі карт дефіциту елементів.
- Підживлення азотом у реальному часі, використовуючи дані супутникового індексу NDVI.
- Локально-стрічкового внесення під час посіву.

3. ***Контроль якості та фактичного виливу*** **(As-Applied Data)** Після проходу розкидачів або обприскувачів, обладнаних системою **John Deere Section Control**, агрохімік отримує карту фактичного внесення. Це дозволяє миттєво побачити:

- Чи була дотримана цільова норма в кожній точці.
- Де виникли перекриття або пропуски.
- Точну кількість використаного добрива для списання та фінансової звітності.

Порівняння систем показано в таблиці 6.1.

Таблиця 6.1. Порівняння прескриптивних агроплатформ

Характеристика	John Deere Operations Center	Climate FieldView	Trimble Ag Software
Для агрохіміка	Краща інтеграція з дозувальними системами (контролери сухих та рідких добрив).	Пріоритет у азотному менеджменті та скриптах під конкретні гібриди	Глибока робота з геодезичними даними та складанням точних агрохімічних карт
Передача завдань	**JDLink:** Карта завдання надсилається з кабінету прямо в термінал трактора без флешок	**FieldView Drive:** Передача через iPad/Bluetooth, що потребує фізичної присутності планшета	**AutoSync:** Потребує налаштування складних хмарних протоколів синхронізації
Аналіз живлення	Функція **Field Analyzer** дозволяє порівняти карту внесення з картою врожайності для оцінки окупності добрив	**Yield Analysis:** Сфокусовано на порівнянні ефективності препаратів різних брендів	Орієнтовано на загальний облік ресурсів та історію поля за багато років

Висновки

Запропонований підхід передбачає дворівневу організацію зберігання та обробки даних, за якої користувацька інформація розміщується у хмарному середовищі, тоді як геоінформаційна база даних для аналітичних задач зберігається на спеціалізованому сервері. Така архітектура обумовлена необхідністю багаторазового виконання складних аналітичних процедур протягом вегетаційного періоду із застосуванням алгоритмів машинного навчання, розроблених у внутрішньому середовищі. При цьому значна частина етапів обробки даних потребує контролю з боку фахівців та, у разі необхідності, ручного коригування результатів. У подальшому передбачається розширення рівня автоматизації як аналітичних процедур, так і процесів обміну даними між компонентами системи.

Питання для обговорення та самоперевірки

1. Які архітектурні компроміси були зроблені при інтеграції PreFer у FMIS ifarma і як вони вплинули на баланс між точністю аналітики та доступністю для кінцевого користувача?

2. Як вибір регулярної просторової сітки (grid) замість полігональних зон впливає на якість агрономічних рекомендацій і обчислювальну складність моделі?

3. Які переваги та обмеження має двоконтурна архітектура зберігання даних (GIS-сервер + хмара) у контексті точного землеробства?

4. Чому інтероперабельність даних є критичним фактором у розвитку сучасних FMIS, і як це реалізовано в ifarma/PreFer?

5. Яким чином еволюція просторового розділення (90 м → 30 м → 5 м) впливає на машинне навчання та стабільність моделей PreFer?

6. Наскільки доцільним є використання машинного навчання у задачах формування агрохімічних рекомендацій порівняно з експертними системами?

7. Які ризики виникають при інтеграції агрономічних, супутникових, кліматичних і врожайних даних в єдину ML-модель?

8. Як зміна парадигми від precision agriculture до prescriptive agriculture впливає на роль агронома у прийнятті рішень?

9. Чому підхід із використанням Google Earth та web-GIS виявився менш ефективним з точки зору UX та адміністрування системи?

10. Які умови необхідні для масштабування подібних систем (ifarma/PreFer) на міжнародний рівень з урахуванням різних агрокліматичних зон і типів господарств?

РОЗДІЛ 7. ПОРІВНЯННЯ КОНЦЕПЦІЙ РОБОТІВ ДЛЯ НОВИХ СТАЛИХ СИСТЕМ РОСЛИННИЦТВА

7.1. Нові системи рослинництва
7.2. Вимоги до систем робототехніки для рослинницької галузі
7.3. Роботизовані концепції
7.4. Порівняння якості виконання робіт роботами різних типів у процесі сівби

Сьогодні спостерігається зростаючий попит на більш сталі, ефективні та різноманітні системи виробництва рослинницької продукції. Чим раціональніше використовуються виробничі ресурси, тим більше зменшується потреба у внесенні мінеральних добрив, застосуванні пестицидів, а також знижується негативний вплив на клімат. Високоавтоматизовані роботизовані системи здатні суттєво сприяти досягненню цих цілей, хоча суспільство частково сприймає такі технологічні трансформації з певним скептицизмом.

Подальша інтенсифікація традиційних систем виробництва, орієнтована на отримання вищих врожаїв, може супроводжуватися посиленням негативного впливу на довкілля та розширенням монокультур, що розглядається як небажаний сценарій розвитку. Водночас використання сільськогосподарських роботів відкриває альтернативний підхід, за якого велика кількість невеликих взаємодіючих машин здатна забезпечити баланс між продуктивністю та збереженням біорізноманіття, одночасно оптимізуючи трудові витрати.

У даному розділі розглядається доцільність застосування автономних роботів у новітніх екологічно орієнтованих системах рослинництва. На основі цього формуються вимоги до побудови роботизованих агровиробничих систем і аналізуються різні концепції роботів з урахуванням типів енергозабезпечення, габаритів, модульності, багатофункціональності та рівня інтелектуалізації. Окрему увагу приділено оцінці ефективності малогабаритних роботів у межах прикладного дослідження, що дозволяє обґрунтувати потенціал використання колективів мобільних роботів у рослинництві.

7.1. Нові системи рослинництва

Протягом останніх десятиліть інтенсифікація сільського господарства призвела до спрощення агроландшафтів, у результаті чого раніше різнорідні території перетворилися на регіони з переважанням монокультур. Основним чинником таких змін стало

прагнення використовувати більш потужну та великогабаритну сільськогосподарську техніку для підвищення продуктивності та, передусім, зниження витрат на працю. Водночас така просторова уніфікація негативно вплинула на зовнішній вигляд ландшафтів і, як наслідок, призвела до зменшення біорізноманіття, яке є основою функціонування важливих екосистемних послуг.

Останнім часом цілі ведення рослинництва та механізованого управління агровиробництвом трансформуються у напрямі врахування просторової та часової неоднорідності з метою підвищення ефективності використання ресурсів, а також ідентифікації та підтримки сприятливих біологічних умов росту культур. Такий підхід відповідає принципам точного землеробства. Паралельно з цим посилюється суспільний запит на вирішення проблем, пов'язаних зі зміною клімату, що передбачає підвищення енергоефективності, формування кліматично стійких систем виробництва та зупинення й відновлення біорізноманіття.

Підвищення рівня біорізноманіття має значний потенціал для зменшення поширення хвороб і шкідників, що особливо характерно для великих площ монокультур. Поділ поля на менші ділянки з вирощуванням різних культур, зокрема у вигляді смугового вирощування або так званого «піксельного» підходу, а також індивідуалізований догляд за окремими рослинами, сприяє суттєвому зростанню біорізноманіття. Це, у свою чергу, покращує умови росту культур і підвищує ефективність біологічного контролю бур'янів і шкідників, що дозволяє зменшити використання синтетичних засобів захисту рослин у традиційних системах.

Разом з тим практична реалізація нових систем рослинництва, заснованих на дрібномасштабній організації, потребує додаткового обґрунтування їх впливу на екосистемні послуги та біорізноманіття. Перехід до таких систем є міждисциплінарним завданням, що охоплює аграрні, соціальні, комп'ютерні науки, екологію та економіку, і передбачає трансформацію складної соціо-екологічної системи сільського господарства. Важливою складовою цього процесу є координація агровиробничих заходів на рівні ландшафту для досягнення позитивного ефекту для біорізноманіття.

У цьому контексті нові технологічні рішення відіграють ключову роль, оскільки саме вони забезпечують реалізацію управлінських рішень у вигляді механічного впливу на природні системи. Дрібномасштабні системи вирощування формують високу неоднорідність умов у межах поля, що вимагає принципово нових підходів до механізації. Завдяки своїй гнучкості автономні роботизовані

системи розглядаються як перспективна альтернатива для роботи в таких умовах, тоді як традиційна великогабаритна техніка не забезпечує необхідного рівня адаптивності та масштабованості при роботі з неоднорідними агроекосистемами.

7.2. Вимоги до систем робототехніки для рослинницької галузі

Для того щоб роботизовані системи стали повноцінною складовою майбутніх агровиробничих систем, вони повинні бути належним чином інтегровані в існуючу інфраструктуру механізації та інформаційних технологій господарства. У цьому контексті сучасні ІТ-архітектури слід розглядати як ключовий елемент функціонування фермерських господарств майбутнього. Незалежно від напрямів розвитку, такі системи базуватимуться на поєднанні кількох фундаментальних концепцій: технологій Інтернету речей із міжмашинною взаємодією на основі стандартизованих моделей даних, використання хмарних і периферійних обчислень для забезпечення захищеного зберігання даних і обробки в реальному часі, застосування моделей, керованих даними, що ґрунтуються на досягненнях штучного інтелекту, а також інтеграції мобільних і стаціонарних роботизованих платформ наземного та повітряного типу. Подальший розвиток систем управління рослинництвом неминуче пов’язаний із поглибленням цифровізації аграрного виробництва.

Поєднання зазначених компонентів відкриває можливості для впровадження підходів, запозичених з інших галузей, зокрема концепції цифрового двійника. Автономні наземні роботи та безпілотні літальні апарати здатні суттєво підвищити часову роздільну здатність збору даних під час моніторингу агротехнологічних процесів. Використання великих масивів даних у поєднанні з інтелектуальними моделями дозволяє не лише прогнозувати, а й моделювати перебіг виробничих процесів із високою точністю. Інтеграція таких моделей у замкнені контури управління з реальними об’єктами створює передумови для суттєвої оптимізації польових операцій і агровиробництва загалом.

Розуміння фермерського господарства як соціотехнічної системи, де люди взаємодіють із роботами, підсиленими штучним інтелектом, і всі елементи інтегровані в єдину інформаційну інфраструктуру, зумовлює необхідність розроблення відповідних системних архітектур. Такі архітектури повинні забезпечувати стійке функціонування на різних рівнях - від окремого робота чи машини до рівня поля, господарства та міжгосподарської взаємодії. Ключовими властивостями таких систем є адаптивність до значної просторово-часової

варіабельності умов, гнучкість щодо швидкої зміни планів і технологічних операцій, зокрема під впливом погодних факторів, а також стійкість до відмов окремих підсистем, включаючи втрати зв'язку, механічні несправності чи обмеження знань у програмних компонентах на основі штучного інтелекту. Забезпечення цих характеристик, особливо для автономних роботів, є одним із центральних завдань сучасних досліджень у галузі штучного інтелекту, що визначає його ключову роль у розвитку аграрних технологій. Водночас інтеграція штучного інтелекту в агровиробничі процеси супроводжується низкою викликів і ризиків, які потребують окремого комплексного аналізу.

З метою зменшення залежності від централізованих ІТ-компонентів, таких як хмарні сервіси або централізовані системи управління господарством, важливого значення набуває застосування принципів керованої самоорганізації. Це особливо актуально для впровадження колективів інтелектуальних роботів у сільському господарстві. У цьому контексті перспективним напрямом є розроблення агентно-орієнтованих архітектур, що дозволяють забезпечити автономну та узгоджену взаємодію окремих елементів системи. Подальший розвиток цих підходів пов'язаний із формуванням багатоагентних систем, у яких численні роботи здатні до кооперації та самоорганізації.

Такий підхід відкриває можливості для впровадження ройової робототехніки в аграрному секторі. Ройова робототехніка передбачає реалізацію принципів колективного інтелекту в групах роботів і забезпечує масштабованість системи та її високу надійність завдяки відсутності єдиного центру керування. У сільському господарстві такі системи можуть застосовуватися для моніторингу стану посівів, картування бур'янів, а також координації роботи груп роботів з метою підвищення ефективності виконання розподілених польових операцій.

7.3. Роботизовані концепції

На сучасному етапі розвитку аграрної робототехніки простежуються щонайменше два основних напрями формування типів роботизованих систем і принципів їх функціонування. Перший тип характеризується габаритами та конструкцією, близькими до традиційних тракторно-агрегатних комплексів, тоді як другий представлений малогабаритними та легкими роботами (табл. 7.1).

Таблиця 7.1. Порівняння системних властивостей та продуктивності комерційно доступних сільськогосподарських роботів

Характеристика	Тип A	Тип B
Потужність двигуна	Висока: 100–500 (кВт)	Низька: 5–50 (кВт)
Тип двигуна	Двигун внутрішнього згоряння та гібрид	Електричний
Вага машини	Велика (як у традиційних тракторних агрегатів) > 8 (т)	Мала (легка конструкція) 0,05–2 (т)
Вплив на ґрунт	Високий ризик деградації ґрунту	Ефективний захист ґрунту
Багатофункціональність та інтерфейси	Стандартне зчеплення (триточкова навіска, гідравліка, електрика та інтерфейс даних ISOBUS)	Мала платформа або машина, спеціалізована для конкретних завдань
Продуктивність та залежність від розміру ферми	Висока потужність (га/год), підходить переважно для великих ферм / полів	Потребує «рою» для високої потужності (масштабованість), підходить для ферм будь-якого розміру
Необхідні польові умови	Ідеалізована геометрія, видалення біотопів, живоплотів, ставків тощо	Природні елементи можуть бути збережені або навіть відновлені завдяки малим розмірам та універсальності роботів
Ступінь інтелекту машини	Переважно сучасне електронне керування	Вищий рівень використання методів штучного інтелекту завдяки вдосконаленим сенсорам, приводам та координації рою
Інвестиційні витрати	Високі витрати	Масштабовані витрати
Можлива точність управління посівами	Диференційоване управління (PF), автопілот, контроль секцій тощо	Аж до рівня окремих рослин (висока просторова роздільна здатність)

Порівняння цих підходів доцільно здійснювати з урахуванням технічних параметрів машин, зокрема встановленої потужності та типу приводу, маси, потенційного впливу на ущільнення ґрунту, особливостей агрегатування з робочими органами та продуктивності виконання технологічних операцій. Водночас важливими є й економічні характеристики, серед яких інвестиційні витрати та загальні можливості управління технологічними процесами вирощування культур.

З огляду на подальший розвиток аграрної робототехніки, що значною мірою визначається інтеграцією методів машинного навчання та сучасних технологій штучного інтелекту, суттєвого значення набуває ще один параметр - рівень інтелектуалізації роботизованих систем. Саме цей показник визначає здатність роботів до автономного прийняття рішень, адаптації до змінних умов середовища та ефективної взаємодії в межах складних агротехнологічних систем.

Тип А

Окремі виробники сільськогосподарської техніки вже демонструють і частково комерційно впроваджують потужні високоавтоматизовані безпілотні машини, що належать до роботизованих систем типу А і призначені для використання в рослинництві. Такі платформи можуть агрегатуватися з наявними в господарстві знаряддями, що суттєво спрощує їх інтеграцію та знижує витрати на впровадження. Розробляються також електричні трактори кабельного типу потужністю до 300 кВт, які працюють без акумуляторів. При використанні обладнання зі стандартом ISOBUS роботизована система здатна здійснювати взаємодію між машинами на основі вже існуючих протоколів обміну даними.

Цей тип роботів можна розглядати як наступний етап розвитку механізації, оскільки він продовжує тенденцію до зменшення трудових витрат не лише за рахунок підвищення потужності та швидкості, але й шляхом повної заміни оператора машини. З точки зору виконання агротехнологічних операцій такі системи не відрізняються від сучасних підходів, включаючи використання секційного контролю та інших функцій точного землеробства. Водночас їх суттєвою перевагою є можливість безперервної роботи протягом 24 годин за умови відповідності польових умов.

Ефективне використання таких машин потребує адаптації структури полів до їх габаритів, що передбачає спрощення конфігурації ділянок і усунення перешкод, таких як дерева, лісосмуги чи водойми, а також відмову від дрібномасштабного поділу полів із різними культурами. Це, у свою чергу, обмежує можливості підтримки

та відновлення біорізноманіття. Рівень інтелектуалізації таких систем переважно зосереджений на виконанні окремих технологічних операцій і включає забезпечення надійної навігації, контроль якості виконання робіт і функціональну безпеку. Остання реалізується через моніторинг навколишнього середовища, аналіз ситуації та автоматичне реагування, зокрема шляхом аварійної зупинки при виявленні об'єктів поблизу.

Отже, попри підвищення рівня автоматизації, роботизовані системи типу А переважно відтворюють існуючі підходи до ведення рослинництва і мають обмежений потенціал щодо суттєвого зниження негативного впливу на довкілля. Вони забезпечують подальший розвиток механізації, однак не створюють принципово нових можливостей для переходу до більш екологічно орієнтованих систем виробництва.

Тип В

Сучасний розвиток робототехніки у сільському господарстві демонструє другий важливий напрям - використання автономних малогабаритних роботів, які, як правило, спеціалізуються на виконанні окремих технологічних операцій. Невеликі розміри та відносно низька швидкість таких машин компенсуються можливістю їх одночасного застосування у вигляді багатороботних систем або навіть ройових структур, що забезпечує масштабованість рішень для господарств різного розміру. Такий підхід також сприяє зниженню інвестиційних витрат завдяки поступовому нарощуванню кількості технічних засобів.

Хоча для окремого робота характерна нижча продуктивність у перерахунку на площу, ця особливість може розглядатися як перевага. Невеликі автономні машини, що працюють із меншою швидкістю, здатні забезпечити значно вищу якість виконання технологічних операцій порівняно з великогабаритною технікою. Це особливо актуально для процесів сівби та боротьби з бур'янами, де важливо реалізувати принципи високоточного землеробства. Використання сенсорів дозволяє отримувати детальну інформацію про стан ґрунту та рослин, а виконавчі механізми забезпечують виконання операцій із високою просторовою роздільною здатністю - до рівня окремих мікроділянок або навіть індивідуальних рослин.

Малогабаритні роботи також створюють передумови для механізації таких систем, як смугове та локальне вирощування культур, що сприяє підвищенню біорізноманіття агроекосистем. Перехід до догляду за окремими рослинами, зокрема у вирощуванні овочевих чи нішевих культур, відкриває нові можливості для підвищення врожайності та ефективності використання ресурсів, зокрема добрив.

Рівень інтелектуалізації таких систем має бути значно вищим порівняно з роботами типу А, оскільки виконання індивідуалізованих операцій із рослинами є складним завданням. Це висуває підвищені вимоги до надійності сенсорних систем, точності виконавчих механізмів та здатності до маніпулювання. Для забезпечення ефективної роботи необхідне впровадження більш складних алгоритмів штучного інтелекту, які дозволяють роботам діяти гнучко, адаптивно та стійко на різних рівнях - від виконання окремих операцій до координації в межах багатороботних систем.

Зокрема, це включає точне виявлення бур'янів і прийняття рішень щодо їх контролю з урахуванням економічних порогів шкодочинності, а також оптимізацію взаємодії та логістики між роботами на рівні господарства. Очікується, що майбутні масштабовані багатороботні системи характеризуватимуться ще вищим рівнем інтелектуалізації, що потребує подальших досліджень і розвитку відповідних технологій.

7.4. Порівняння якості виконання робіт роботами різних типів у процесі сівби

Для підтвердження положення про високий потенціал роботизованих систем типу В щодо підвищення якості виконання технологічних операцій порівняно з системами типу А представлено прикладне дослідження. У його межах як об'єкт аналізу обрано повністю автоматизований робот для точного висіву зернових культур, який використано для оцінювання якості виконання сівби (рис. 7.1).



Рис. 7.1. Мала роботизована платформа з рядовим індивідуальним прецизійним висівом зернових культур
(електричний привід, потужність 10 кВт, вага 0,65 т)

Зазначений робот дозволяє реалізувати високоточне розміщення насіння з урахуванням просторових характеристик поля та агротехнологічних вимог. Для порівняння як базовий варіант було використано швидкісну великогабаритну роботизовану систему типу А, що за своїми характеристиками може відповідати як автономному роботу, так і традиційній тракторно-агрегатній системі. Таке порівняння дає можливість оцінити відмінності у якості виконання сівби, зокрема з точки зору точності розміщення насіння, рівномірності висіву та здатності адаптуватися до локальних умов поля, що є критично важливим для сучасних систем точного землеробства.

Внесення насіння у підготовлений ґрунт або посівне ложе є доцільною та важливою операцією. Чим краща якість виконання цієї роботи, тим вищий потенціал досягнення високих урожаїв і ефективного використання ресурсів. Глибина загортання насіння, відстань між насінинами, їх покриття ґрунтом та повторне ущільнення (інкорпорація насіння) суттєво впливають на проростання та польову схожість сходів. Особливо рівномірне розміщення насіння зменшує внутрішньовидову конкуренцію між рослинами та сприяє підвищенню польової схожості.

Точний висів зернових культур сьогодні не є поширеним. Традиційна техніка, як і великі роботизовані системи, використовують висів великими дозами через висівні апарати, які розміщують насіння випадковим чином у борозні. Відокремлення та індивідуальне поводження з зернівками є технічно складним завданням, однак агрономічні переваги такого підходу, як зазначено вище, є загальновизнаними та очевидними.

Компоненти сівалки, що використовуються в технологіях точного висіву зернових, були розроблені для традиційної механізації із застосуванням стандартних тракторів (SingularSystem, HORSCH Maschinen GmbH, Шварндорф, Німеччина). У традиційній механізації швидкість руху досягає 10–15 км/год, тоді як для малих польових роботів характерні значно нижчі швидкості - 1,8–3,6 км/год. Висівні колеса (рис. 7.2) з 1, 2, 3 та 4 комірками досліджувалися при швидкостях обертання ротора від 700 до 2100 об/хв відповідно до швидкості руху. Це забезпечувало можливу частоту подачі насіння 12–140 насінин/с.

Пристрій випробовувався у стаціонарних умовах з одним висівним модулем у лабораторії шляхом зміни швидкості ротора та вимірювання різниці часу падіння насіння при проходженні через висівний сошник. Для вимірювання часу падіння використовувався електрооптичний датчик, який є складовою частиною сівалки та стандартним компонентом кожного висівного сошника. Для реєстрації

змін вихідної напруги застосовувалась багатофункціональна система введення/виведення даних (DAQ 10 кS/s, NATIONAL INSTRUMENTS CORP.).



Рис. 7.2. Дозувальний пристрій (SingularSystem) для точного висіву зернових культур (Джерело: компанія HORSCH)

Досліджувана сівалка демонструвала значно кращі показники якості роботи з точки зору точності розміщення насіння, особливо за низьких швидкостей руху вперед. Одержані результати підтверджують, що повільно рухомі роботи можуть забезпечувати суттєво вищу якість виконання операцій порівняно з традиційною тракторно-агрегатною технікою або швидкісними великими роботизованими системами.

Подібні результати були отримані і для систем обприскування, орієнтованих на індивідуальне знищення бур'янів. Що стосується площі, обробленої за одиницю часу, малі та повільно рухомі роботи можуть компенсувати порівняно нижчу продуктивність за рахунок збільшення кількості роботів, одночасно зберігаючи суттєві переваги у якості виконання технологічних операцій.

Висновки

Сучасні мета-аналізи та експериментальні результати, представлені в літературі, надають початкові докази того, що впровадження малих сільськогосподарських роботів дозволяє подолати обмеження традиційних систем управління рослинництвом. Малі роботи здатні виконувати необхідні операції значно точніше при низьких швидкостях руху, із кращим захистом ґрунту завдяки невеликій масі машин і насамперед із суттєво меншим споживанням енергії.

Крім того, стають можливими нові схеми розміщення культурних рослин у межах господарства або навіть окремих полів без втрати переваг, які забезпечує зростання рівня автоматизації. Це означає, що в майбутньому більш складні біологічні вимоги до ефективного вирощування культур можуть отримати належну увагу завдяки підвищеній гнучкості використання техніки та масштабування технологічних рішень.

У загальному випадку відхід від великих робочих ширин і важкої техніки означає, що поля більше не повинні бути максимально укрупненими та «очищеними» від елементів ландшафту. Традиційні елементи агроландшафту (наприклад, живоплоти, ставки) можуть бути навіть відновлені, оскільки вони не знижують продуктивність і не обмежують площу роботи для малих автономних машин. Такі об’єкти можуть бути один раз нанесені на карту і враховані у плануванні операцій.

Отже, можна очікувати, що завдяки використанню аграрних роботів буде досягнуто суттєвого підвищення біорізноманіття сільськогосподарських ландшафтів або навіть його відновлення при збереженні високого рівня продуктивності та автоматизації, необхідних для забезпечення продовольчої безпеки та подолання дефіциту робочої сили.

Майбутнє сільського господарства може розвиватися у напрямку більш високої біологічної інтенсифікації через впровадження дрібномасштабного точного рослинництва з використанням інтелектуальних технологій, що потенційно сприятиме біорізноманіттю. Поєднання складних біологічних систем із можливостями малих роботів щодо індивідуального догляду за рослинами може призвести до парадигмального зсуву: технологія буде адаптуватися до природи, а не навпаки.

Хоча вже існують перші комерційні роботизовані рішення, застосування аграрної робототехніки, особливо інтелектуальних

роботів у сільському господарстві, все ще можна вважати таким, що перебуває на ранньому етапі розвитку.

Питання для обговорення та самоперевірки

1. Які ключові технологічні компоненти забезпечують функціонування робототехнічних систем точного землеробства?

2. У чому полягає роль робототехнічних систем точного землеробства?

3. Як аналітика великих даних трансформує парадигму від точного до прескриптивного землеробства?

4. Як інтеграція робототехнічних систем і сервісів точного землеробства вирішує проблему аналізу даних?

5. Які переваги дає використання робототехнічних систем?

6. Які основні джерела аграрних Big Data і як вони інтегруються в єдину робототехгітичну систему?

7. Як машинне навчання робототехнічних систем підвищує точність прогнозування врожайності?

8. Які ключові бар'єри (технологічні, організаційні, соціальні) обмежують широке впровадження робототехнічних систем у сільському господарстві та харчових системах?

9. Як інтеграція робототехнічних систем змінює архітектуру сучасних СППР в агрохімічних системах?

10. Поясніть, як взаємодіють блоки попередньої обробки, аналізу даних та прийняття рішень у робототехнічних системах.

11. Які переваги та ризики використання моделей машинного навчання в робототехнічних систем?

12. Як забезпечити якість, актуальність і сумісність даних у робототехнічних системах?

РОЗДІЛ 8. СІЛЬСЬКОГОСПОДАРСЬКІ ДРОНИ ДЛЯ ОБПРИСКУВАННЯ

8.1. Сучасне місце агродронів
8.2. Типи та конструкції сільськогосподарських дронів для обприскування
8.3. Технології керування процесом обприскування
8.4. Ройові обприскувальні безпілотні літальні апарати
8.5. Вплив експлуатаційних параметрів на якість обприскування
8.6. Процес вибору обприскувального безпілотного апарата

8.1. Сучасне місце агродронів

Сучасний розвиток сільського господарства характеризується активним впровадженням робототехнічних систем та алгоритмів штучного інтелекту, які здатні виконувати повторювані та трудомісткі операції з високою точністю. Роботизовані рішення знаходять застосування у виявленні шкідників на ранніх стадіях, боротьбі з бур'янами та хворобами як наземними, так і повітряними засобами, локалізованому внесенні засобів захисту рослин, збиранні врожаю, сортуванні продукції та інших технологічних процесах.

Важливу роль у межах сучасного етапу розвитку відіграють багатороторні безпілотні літальні апарати, які поєднують компактність, високу маневреність і здатність працювати в складних умовах. Вони можуть здійснювати зліт і посадку без спеціально підготовлених злітно-посадкових смуг, працювати на обмежених ділянках і ефективно виконувати завдання навіть за недостатнього освітлення.

У сільському господарстві дрони застосовуються для моніторингу посівів, оцінювання стану рослин, виявлення захворювань і дефіциту вологи, а також оптимізації живлення. Використання мультиспектральних і гіперспектральних камер дозволяє отримувати детальну інформацію про фізіологічний стан рослин і їх розвиток. Крім того, безпілотні літальні апарати застосовуються для картографування полів і створення тривимірних моделей, що покращує планування агротехнологічних операцій, зокрема обприскування.

Окремим напрямом є використання дронів для запилення високорослих культур, таких як фінікові пальми або волоські горіхи, де традиційні методи є надзвичайно трудомісткими. Проте найбільш поширеним і практично значущим застосуванням є саме обприскування посівів. Дрони забезпечують високоточне внесення пестицидів, гербіцидів і добрив, що дозволяє зменшити витрати хімічних речовин та мінімізувати негативний вплив на довкілля.

Сучасні багатороторні безпілотні апарати здатні ефективно працювати в умовах складного рельєфу, включаючи схили виноградників, а також демонструють стабільність польоту в умовах турбулентних повітряних потоків. Продуктивність таких систем становить у середньому від 4 до 20 гектарів за годину залежно від моделі та умов поля, що може досягати 30–150 гектарів за добу. Дрони оснащуються баками для робочих розчинів об'ємом від 5 до 50 літрів. Їх використання також значно знижує ризики для операторів, пов'язані з контактом із хімічними препаратами, що є важливим фактором підвищення безпеки праці в аграрному виробництві.

Сільськогосподарські дрони для обприскування (ASD) довели свою ефективність у межах сучасної аграрної робототехніки завдяки низці ключових переваг. Однією з них є повне покриття площі поля, що забезпечує рівномірне внесення робочого розчину та сприяє збереженню довкілля. Оскільки дрони здійснюють обробку посівів із повітря, це дозволяє уникнути пошкодження рослин колесами техніки, а також запобігти ущільненню ґрунту, що є критично важливим для збереження його агрофізичних властивостей.

Використання ASD забезпечує високу маневреність, зниження витрат на робочу силу та мінімізацію механічного впливу на посіви. Порівняно з традиційними ранцевими обприскувачами, продуктивність дронів може бути у десятки разів вищою, що робить їх ефективною альтернативою у виробничих умовах. Важливою перевагою є також суттєве зменшення використання води та засобів захисту рослин, що підвищує ресурсну ефективність агровиробництва. Результати досліджень на різних культурах, таких як рис, пшениця, кукурудза, ріпак, бавовник, перець і цукрова тростина, підтверджують широкі можливості застосування дронів для обприскування.

У порівнянні з пілотованою авіацією, безпілотні системи є безпечнішими та економічно доцільнішими. Виконання обприскування літаком на малих висотах пов'язане з підвищеним ризиком для пілотів, тоді як дрони усувають цей фактор. Крім того, багатороторні апарати не потребують злітно-посадкових смуг і можуть працювати безпосередньо з поля. Якщо традиційна авіація ефективна переважно на великих масивах із монокультурами, то дрони забезпечують гнучкість і можуть застосовуватися на невеликих ділянках із різними культурами та різними видами агрохімікатів. Також для дронів характерний менший рівень зносу робочого розчину за межі оброблюваної зони, що підвищує точність внесення. Вартість обприскування із застосуванням безпілотних систем, як правило, є нижчою порівняно з пілотованою авіацією.

Окрім технічних переваг, ASD забезпечують значний економічний ефект. Незважаючи на відносно високі початкові інвестиції у придбання обладнання, у довгостроковій перспективі вони дозволяють суттєво знизити експлуатаційні витрати. Це досягається за рахунок скорочення потреби в робочій силі, підвищення точності внесення препаратів і зменшення тривалості виконання операцій. Якщо традиційне обприскування із застосуванням тракторної техніки потребує кількох операторів і значного часу для обробки площі, то дрон здатний виконати ті самі роботи швидше і з меншими ресурсними витратами.

Використання дронів також оптимізує застосування агрохімікатів, зменшуючи як прямі витрати на матеріали, так і негативний вплив на навколишнє середовище, включаючи скорочення споживання води та зниження викидів. Це відповідає принципам сталого розвитку та сучасним вимогам до екологізації аграрного виробництва. Водночас економічна доцільність впровадження таких систем залежить від розміру господарства: для площ понад приблизно 2,3 гектара використання дронів є більш вигідним, тоді як для менших ділянок традиційні методи можуть залишатися конкурентними.

Сучасні тенденції наукових досліджень у сфері застосування дронів для обприскування в сільському господарстві демонструють чіткий перехід до вирішення ключових експлуатаційних обмежень за рахунок впровадження передових технологій. Аналіз актуальних публікацій свідчить про формування трьох домінуючих напрямів інноваційного розвитку.

Перший напрям пов’язаний із збільшенням тривалості польоту, що є одним із головних обмежуючих факторів ефективності безпілотних систем. У цьому контексті активно досліджуються альтернативні джерела енергії, зокрема використання водневих паливних елементів та гібридних енергетичних систем, які дозволяють суттєво перевищити можливості традиційних акумуляторів і забезпечити більш тривалу та стабільну роботу дронів у польових умовах.

Другий напрям стосується розвитку ройових технологій. Сучасні підходи до організації рою поділяються на два основні підтипи: класичні ройові системи, орієнтовані на обробку великих сільськогосподарських масивів, та мікророї, призначені для невеликих фермерських господарств. Такий підхід дозволяє адаптувати технологію під різні масштаби виробництва, забезпечуючи як високу продуктивність, так і гнучкість застосування.

Третій напрям характеризується глибокою інтеграцією з технологіями Інтернету речей. Особливу увагу приділяють поєднанню даних із ґрунтових сенсорів у реальному часі з адаптивними алгоритмами обприскування. Це дозволяє реалізувати принципи точного землеробства, коли внесення агрохімікатів відбувається диференційовано залежно від стану ґрунту, рослин і мікрокліматичних умов.

У сукупності ці тенденції відображають перехід від базових функціональних можливостей дронів до більш сталих, масштабованих і керованих на основі даних рішень. При цьому інновації в енергетичних системах і розвиток ройового інтелекту поступово випереджають традиційні напрями вдосконалення механічних компонентів обприскувачів, формуючи нову парадигму розвитку високотехнологічного аграрного виробництва.

8.2. Типи та конструкції сільськогосподарських дронів для обприскування

Безпілотні літальні апарати, або аеророботи, є різновидом роботизованих систем, здатних здійснювати політ у автоматичному режимі на основі команд оператора із землі або заздалегідь сформованої місії. Саме ця автономність і гнучкість керування зумовлюють їх стрімке поширення у сільському господарстві. Загалом роботизовані системи застосовуються для виконання фізично складних, повторюваних або небезпечних робіт, що особливо актуально для аграрного виробництва.

Залежно від маси та принципу створення підйомної сили безпілотні апарати поділяються на дві основні категорії: легші за повітря та важчі за повітря. Обидві категорії можуть бути як моторизованими, так і немоторизованими. Моторизовані апарати створюють підйомну силу та рух за рахунок тяги двигунів, тоді як немоторизовані використовують аеродинамічні сили для переміщення у повітрі. До апаратів, легших за повітря, належать дирижаблі та повітряні кулі, які можуть застосовуватися для окремих завдань моніторингу, хоча їх використання в обприскуванні обмежене.

Більш поширеними в аграрній практиці є апарати, важчі за повітря, які мають різноманітні конструктивні виконання. Серед них виділяють безпілотники з нерухомим крилом, апарати з махаючим крилом, гелікоптери та багатороторні системи.

Безпілотні літальні апарати з нерухомим крилом відрізняються аеродинамічною конструкцією, яка забезпечує триваліший час польоту та більшу дальність, що є перевагою для моніторингових завдань.

Водночас вони потребують більш складних умов для зльоту та посадки (рис. 8.1, 8.2).



Рис. 8.1. БПЛА Spectator-M у польоті (зліва) та у переносному кейсі (справа)



Рис. 8.2. БПЛА Spectator-M із спектральним сенсорним обладнанням Slantrange, розміщеним у фюзеляжі. Тривалість польоту до 3-х годин

Апаратам із махаючим крилом властиве формування підйомної сили та тяги за рахунок руху крил, подібного до польоту птахів або комах. Такі системи знаходяться переважно на стадії досліджень і мають обмежене практичне застосування в аграрному секторі.

Найбільшого поширення у задачах обприскування набули багатороторні безпілотні літальні апарати, які належать до класу гвинтокрилих систем (рис. 8.3). Вони характеризуються високою маневреністю, здатністю зависати в повітрі та стабільністю польоту навіть за наявності турбулентних потоків. До цієї категорії належать бікоптери, трикоптери, квадрокоптери, гексакоптери та октокоптери, які відрізняються кількістю роторів і, відповідно, вантажопідйомністю та надійністю.



Рис. 8.3. Гексакоптер DJI 600 із камерою на підвісі

Окрему групу становлять планери (рис. 8.4), які є немоторизованими апаратами, що використовують підйомну силу крил для переміщення у повітрі. Їх застосування в аграрних технологіях обмежене, проте вони можуть використовуватися для довготривалого спостереження.



Рис. 8.4. AeroVironment RQ-11 Raven (зліва) і ABRIS DG FLIRT Arrow (справа)

Варто зазначити, що сучасний розвиток безпілотних систем призводить до появи гібридних конструкцій, які поєднують ознаки різних типів апаратів. Зокрема, апарати вертикального зльоту і посадки можуть одночасно мати нерухоме крило та кілька роторів, що дозволяє поєднати переваги тривалого польоту та можливість роботи на обмежених ділянках без спеціальної інфраструктури. Такі рішення є перспективними для подальшого розвитку систем обприскування у точному землеробстві.

Багатороторні безпілотні літальні апарати, як правило, характеризуються нижчою швидкістю польоту, меншою дальністю та тривалістю роботи порівняно з апаратами з нерухомим крилом. Це зумовлено підвищеними енергетичними витратами, необхідними для створення підйомної сили та підтримання стабільного польоту за рахунок роботи кількох роторів.

Октокоптери, що оснащені вісьмома роторами, зберігають основні переваги квадрокоптерів і гексакоптерів, зокрема високу маневреність і стабільність, проте відзначаються більшою потужністю та вантажопідйомністю. Це дозволяє використовувати їх для виконання складніших технологічних операцій, зокрема транспортування більшого об'єму робочих розчинів або встановлення додаткового обладнання.

Незважаючи на відносно високу вартість, такі системи забезпечують високу якість виконання завдань, зокрема точність позиціонування та стабільність у повітрі, що є важливим для ефективного обприскування та отримання якісних аероданих у сільському господарстві.

Основні компоненти дронів для обприскування.

Дрони для обприскування складаються з ряду ключових компонентів, які у взаємодії забезпечують їх політ і функціональність. Незважаючи на певні відмінності залежно від типу та призначення апарата, базовий набір елементів є типовим для більшості таких систем. Саме ці компоненти формують основу конструкції безпілотного апарата та забезпечують виконання технологічних операцій. Як показано на рис. 8, їх узгоджена робота дозволяє дрону здійснювати політ, навігацію та виконувати різноманітні завдання, що робить його універсальним інструментом у сучасному агровиробництві. Водночас окремим і надзвичайно важливим елементом є система керування обприскуванням, яка значною мірою визначає ефективність роботи дрона і розглядається у наступному підрозділі.

Рама дрона є несучою конструкцією, що об'єднує всі компоненти в єдину систему. Вона виготовляється з легких і міцних матеріалів, таких як карбон, пластик або алюміній, що дозволяє зменшити масу апарата та підвищити його надійність і довговічність.

Пропелери кріпляться до двигунів і створюють тягу, необхідну для руху та маневрування у повітрі. Їх конструкція має вирішальне значення, оскільки саме вони формують підйомну силу, необхідну для зльоту та зависання. Найбільш поширеною є конфігурація з чотирма пропелерами, однак у сільськогосподарських дронах застосовуються й

інші варіанти. У практиці широко використовуються складні пропелери, що полегшують транспортування та експлуатацію техніки.

Двигуни є електричними виконавчими елементами, які обертають пропелери та забезпечують створення підйомної сили і керування рухом дрона. Регулювання швидкості їх обертання здійснюється за допомогою сигналу широтно-імпульсної модуляції, що дозволяє точно контролювати силу тяги та кутові моменти. У більшості сучасних систем застосовуються безколекторні двигуни постійного струму, які відзначаються високою ефективністю, надійністю та тривалим ресурсом роботи.

Електронні регулятори швидкості є невід'ємною частиною системи керування і виконують функцію перетворення команд польотного контролера у сигнали для двигунів. Вони отримують керуючі сигнали через різні протоколи зв'язку, що визначають швидкість обертання, напрям руху та динаміку відгуку двигунів. Найпростішим і одним із перших є протокол широтно-імпульсної модуляції, в якому швидкість визначається тривалістю імпульсу. Подальший розвиток привів до появи швидших аналогових протоколів із коротшою тривалістю сигналу, що зменшують затримки та підвищують чутливість керування, хоча вони залишаються чутливими до електричних завад і потребують калібрування.

Наступним етапом стало впровадження високошвидкісних протоколів, які забезпечують ще меншу затримку та точніше регулювання тяги, проте вимагають більш ретельного налаштування системи.

- Протоколи Oneshot125 та Oneshot42 є швидшими аналоговими рішеннями, що функціонують за тим самим принципом, що й широтно-імпульсна модуляція, проте використовують значно коротшу тривалість імпульсів, наприклад 125 або 42 мікросекунди. Це дозволяє зменшити затримки сигналу та підвищити швидкість реакції двигунів. Водночас, оскільки ці протоколи залишаються залежними від точності вимірювання часу, вони зазвичай потребують калібрування і є більш чутливими до електричних завад.
- Протокол Multishot є ще швидшим аналоговим рішенням, розробленим переважно для високодинамічних систем, зокрема гоночних дронів. Він використовує надзвичайно короткі імпульси тривалістю приблизно від 5 до 25 мікросекунд, що суттєво зменшує затримку та забезпечує високу точність керування тягою. Разом з тим така швидкодія супроводжується підвищеною чутливістю до шумів, що вимагає ретельного налаштування системи.

- Протокол Proshot1000 є гібридним рішенням, яке поєднує ознаки аналогових і цифрових підходів. У цьому випадку сигнал передає не безперервну тривалість імпульсу, а закодовані цифрові значення з високою швидкістю передачі даних на рівні 1000 кбіт/с. Це дозволяє поєднати швидкодію, характерну для Multishot, із точністю цифрового керування. Як правило, такий підхід не потребує калібрування, що спрощує експлуатацію.
- Сучасні протоколи DSHOT150, DSHOT300 і DSHOT600 є повністю цифровими та передають команди двигунам у вигляді цифрових пакетів, а не через тривалість імпульсів. Кожна команда кодується послідовністю бітів, що усуває необхідність калібрування і забезпечує вбудовану перевірку помилок, підвищуючи надійність системи. Числові позначення у назві відповідають швидкості передачі даних у кілобітах за секунду. Завдяки високій точності, стійкості до завад і простоті реалізації ці протоколи стали фактичним стандартом у сучасних безпілотних літальних апаратах.

Загалом, широтно-імпульсна модуляція залишається найбільш сумісним і широко підтримуваним протоколом керування, проте сучасні цифрові рішення, такі як DSHOT і Proshot, забезпечують суттєві переваги з точки зору зменшення затримок, підвищення точності та спрощення експлуатації. Аналогові протоколи, зокрема Oneshot і Multishot, і надалі використовуються у задачах, де критичною є висока швидкодія, однак вони більш чутливі до електричних завад і потребують калібрування.

На рисунку 8.5 показано взаємодію між польотним контролером і електронним регулятором швидкості, де різні протоколи передачі сигналів забезпечують формування трифазних вихідних сигналів для керування безколекторними двигунами постійного струму.

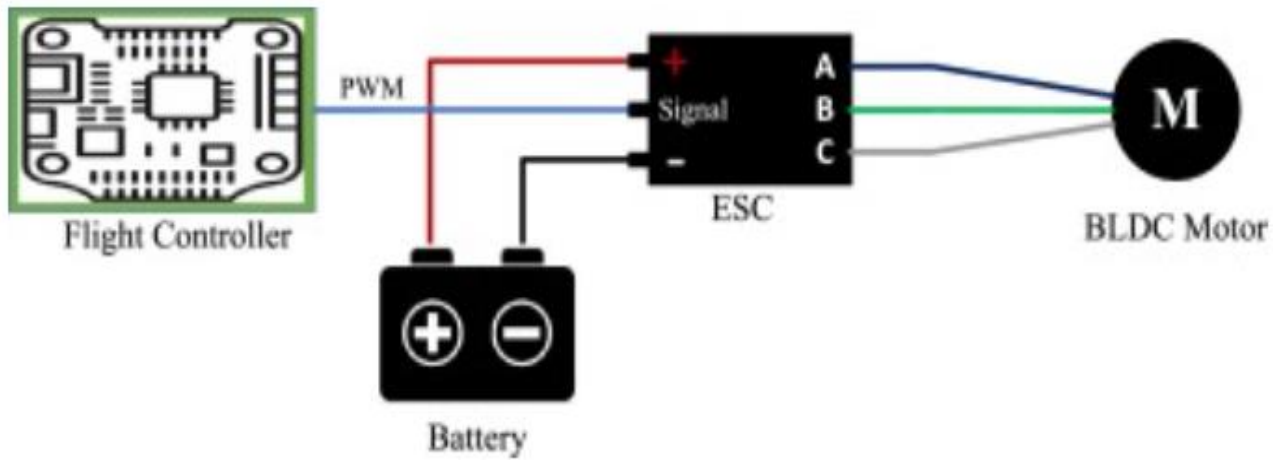


Рис. 8.5. Електрична схема двигуна LDC: ESC отримує заряд від акумулятора та керуючий сигнал від блоку FC і надсилає команди двигуну

З практичної точки зору вибір між використанням широтно-імпульсної модуляції та сучасних протоколів керування електронними регуляторами швидкості, таких як OneShot, MultiShot або DShot, значною мірою визначається вимогами до виконання технологічних операцій обприскування. Сигнали PWM і надалі залишаються широко поширеними завдяки своїй сумісності та нижчій вартості, що робить їх доцільними для невеликих господарств або базових моделей дронів, де надвисока швидкодія не є критичною. Водночас у випадках, коли необхідна висока точність обприскування, зокрема у садах із щільною кроною або на полях зі складним рельєфом, більш швидкі та стабільні протоколи, такі як DShot, забезпечують кращу реакцію двигунів і підвищену надійність, зменшуючи похибки знесення робочого розчину. Таким чином, незважаючи на актуальність PWM для економічно чутливих застосувань, у професійному агровиробництві все частіше перевага надається сучасним протоколам, які забезпечують високу точність і стійкість роботи системи.

Польотний контролер є одним із ключових елементів безпілотного літального апарата і виконує функцію його «інтелектуального центру». Він обробляє інформацію, що надходить від різноманітних сенсорів, і формує керуючі сигнали для двигунів. Контролер отримує команди від оператора або автономної системи керування та розраховує необхідні параметри роботи двигунів для забезпечення стабільності польоту і досягнення заданих характеристик руху.

Для оцінювання стану дрона польотний контролер використовує дані з акселерометрів, гіроскопів, барометрів і супутникових навігаційних систем, що дозволяє визначати орієнтацію, висоту, швидкість і координати апарата. У процесі керування застосовуються спеціалізовані алгоритми, зокрема пропорційно-інтегрально-диференціальні регулятори, які забезпечують точне налаштування керуючих впливів і стабільність польоту. У цілому польотний контролер відіграє визначальну роль у забезпеченні безпечної, надійної та ефективної роботи дронів у задачах обприскування.

Як показано на рисунку 8.6, польотні контролери (FC) можна поділити на дві основні групи: інтегровані та незалежні (автономні) системи керування. Контролери типу Ready-to-Flight (RTF) інтегровані в загальну конструкцію дрона і зазвичай поставляються у попередньо змонтованому та готовому до використання вигляді. Вони оптимізовані для роботи з іншими компонентами конкретної платформи, тому їх

заміна на альтернативні контролери з іншими геометричними параметрами або архітектурою, як правило, неможлива.

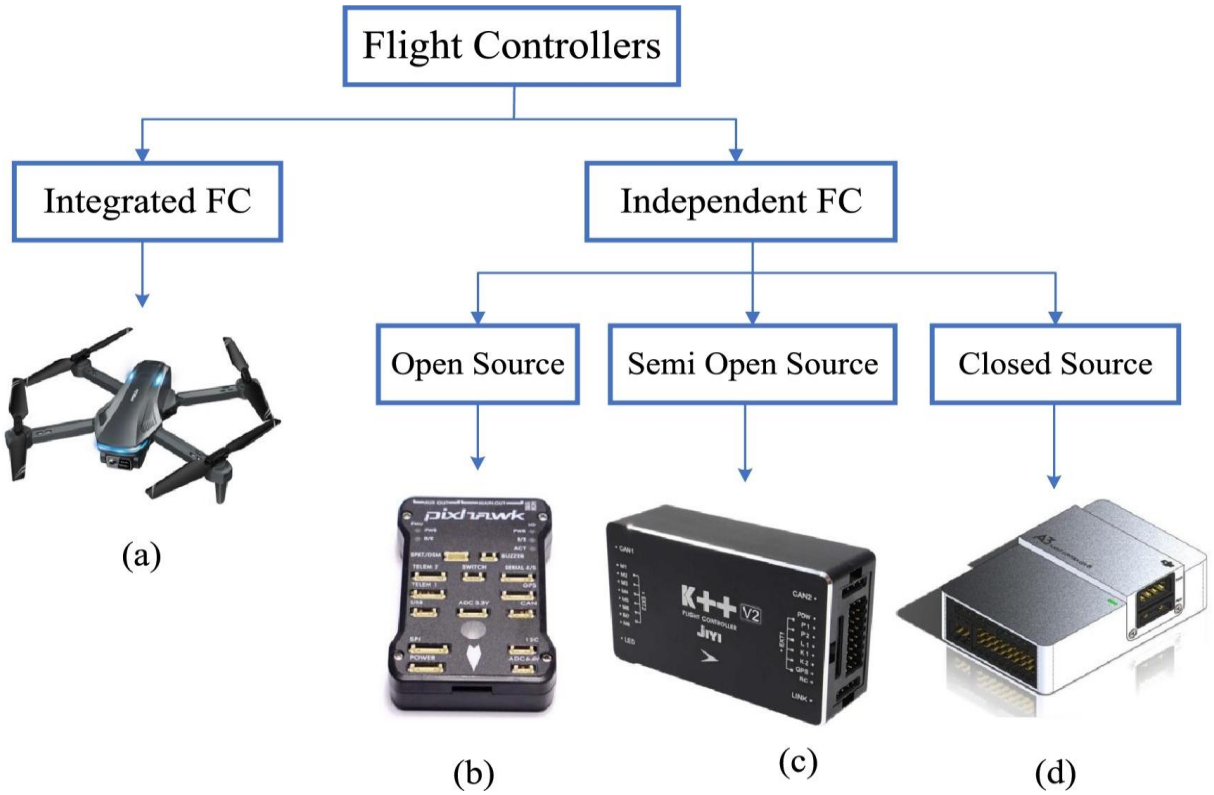


Рис. 8.6. Класифікація FC з прикладами:
(a) Дрон RTF, (b) Pixhawk, (c) JIYI K++V2, (d) DJI A3

Натомість незалежні польотні контролери не прив'язані до конкретної конструкції багатороторного апарата і можуть застосовуватися в різних конфігураціях дронів. З точки зору доступності програмного забезпечення та вихідного коду такі системи додатково поділяються на три категорії: закриті, напіввідкриті та відкриті.

Закриті польотні контролери, наприклад DJI A3 FC, не надають користувачам доступу до вихідного коду, що унеможливлює зміну алгоритмів керування або модифікацію внутрішньої логіки системи. Напіввідкриті рішення, такі як JIYI K++ FC, надають обмежений доступ до програмного забезпечення: користувач може змінювати окремі параметри або коефіцієнти, однак основна структура алгоритмів керування залишається недоступною для редагування.

Відкриті польотні контролери, зокрема сімейство Pixhawk, забезпечують повну доступність програмного забезпечення і високу гнучкість налаштувань. Це дозволяє користувачам адаптувати алгоритми керування відповідно до конкретних задач, модифікувати

логіку роботи системи та інтегрувати додаткові функції, що є особливо важливим для дослідницьких і спеціалізованих аграрних застосувань.

Радіопередавач, як показано на рисунку 8.7, також відомий як пульт керування, використовується для дистанційного керування безпілотним літальним апаратом. Його робота ґрунтується на передачі радіосигналів до приймача, встановленого на дроні. Передавач оснащується джойстиками, перемикачами та іншими елементами керування, які дозволяють оператору змінювати основні параметри польоту, зокрема тягу, рискання, тангаж і крен. Під час переміщення органів керування пульт формує відповідні сигнали, які передаються радіохвилями до приймача на борту дрона. Отримані сигнали декодуються та передаються до польотного контролера, який, у свою чергу, коригує швидкість обертання двигунів і параметри стабілізації для виконання заданих команд польоту.

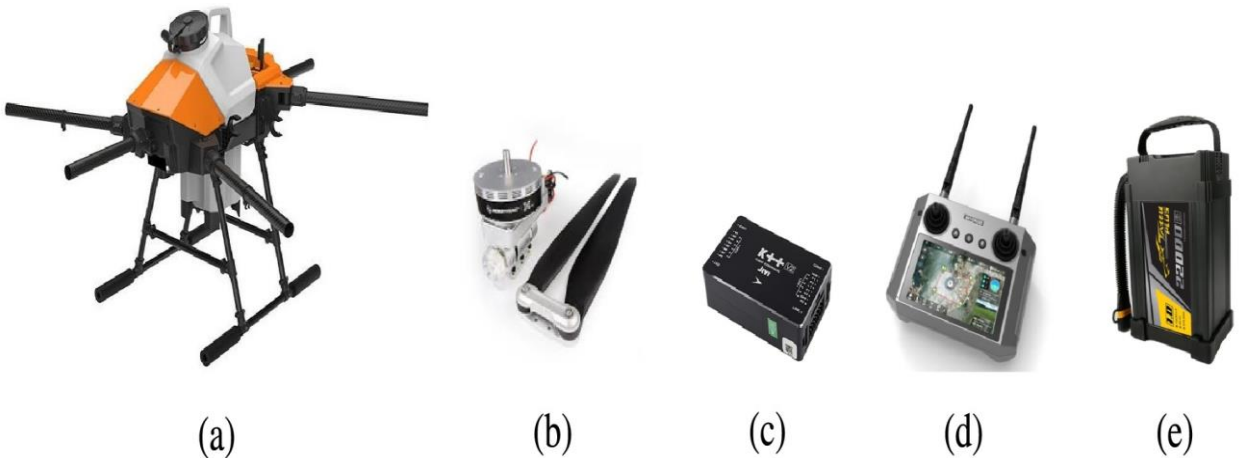


Рис. 8.7. Основні компоненти квадрокоптера:
(a) рама EFT G610, (b) двигун Hobbywing X9 BLDC та блок ESC з пропелерами Hobbywing, (c) JIYI K++V2 FC JIYI, (d) радіопередавач Skydroid H12 та (e) літій-полімерний акумулятор Tattu ємністю 22000 мАг

Така система забезпечує безперервний обмін інформацією в режимі реального часу між оператором і безпілотним апаратом, що є критично важливим для точного та безпечного керування. У випадку сільськогосподарських дронів для обприскування радіокеруючі системи виконують не лише функцію передачі команд до польотного контролера, але й часто забезпечують зворотний зв'язок. Зокрема, вони можуть відображати інформацію про позицію дрона, висоту польоту та швидкість руху в межах поля. Це дозволяє оператору більш ефективно контролювати процес обробки посівів і оперативно коригувати траєкторію польоту відповідно до умов місцевості та технологічних вимог.

Джерело енергії є одним із найважливіших елементів безпілотного літального апарата, оскільки саме воно визначає тривалість польоту, вантажопідйомність та загальну ефективність роботи дрона. У сучасних системах обприскування застосовуються два основні типи енергетичних установок: паливні та електричні.

У паливних моделях зазвичай використовується двигун внутрішнього згоряння, вихідна потужність якого передається на генератор. Генератор, у свою чергу, перетворює механічну енергію, отриману від двигуна, в електричну, яка живить електродвигуни та інші системи дрона. Такі безпілотні апарати характеризуються високою енергетичною щільністю палива, що забезпечує тривалу безперервність польоту. Водночас складність конструкції, підвищені вимоги до обслуговування та більша маса системи обмежують їх широке впровадження в аграрній практиці.

Електричні системи залишаються найбільш поширеними у сучасних дронах для обприскування завдяки їх простоті, надійності та зручності експлуатації. У таких апаратах джерелом енергії є акумуляторні батареї, які забезпечують живлення всіх основних компонентів, включаючи двигуни та електроніку.

Найчастіше використовуються літій-іонні або літій-полімерні (LiPo) акумулятори, які відзначаються високою питомою енергоємністю та здатністю забезпечувати значні струми розряду, необхідні для роботи багатороторних систем. Під час польоту батарея є єдиним джерелом електричної енергії, що безпосередньо впливає на тривалість роботи дрона та ефективність виконання операцій обприскування.

8.2.2. Компоненти системи обприскування

Системи обприскування, що встановлюються на безпілотні літальні апарати, є спеціалізованими технологічними модулями, призначеними для точного нанесення рідких агрохімічних речовин, таких як пестициди, гербіциди або добрива, на сільськогосподарські культури. Вони розробляються з урахуванням вимог до малої маси, високої енергоефективності та точності дозування. Як показано на рисунку 8.8, основними складовими таких систем є резервуар для робочої рідини, насос, розпилювальні форсунки (сопла) та блок керування.

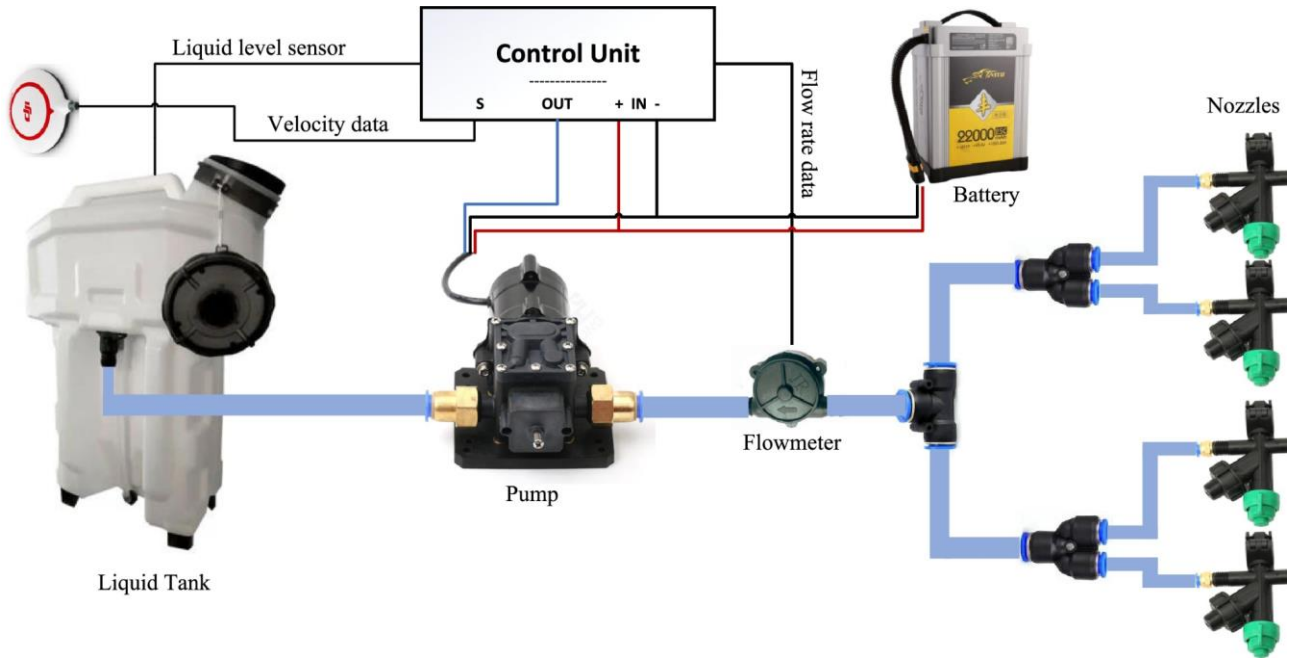


Рис. 8.8. Схема системи розпилення: *Блок системи керування отримує сигнал швидкості від GPS, а також дані про рівень рідини від відповідного датчика, обробляє інформацію та надсилає ШІМ-сигнал на насос, тим самим встановлюючи витрату. Блок керування також отримує зворотний зв'язок від витратоміра для кращого регулювання витрати*

Кожен із цих компонентів виконує важливу функцію в забезпеченні стабільного та рівномірного процесу обприскування.

Резервуар для рідини.

Сучасні резервуари для рідини розробляються як легкі, але водночас міцні конструкції, що дозволяють дронам транспортувати їх без погіршення льотних характеристик. Зазвичай вони виготовляються з таких матеріалів, як поліетилен високої щільності або скловолокно, які стійкі до корозії та хімічного впливу. Резервуари також проєктуються з урахуванням аеродинамічної ефективності, що зменшує опір повітрю та мінімізує вплив на характеристики польоту дрона. Крім того, хоча частина резервуарів жорстко інтегрована в корпус дрона, багато з них є знімними, що спрощує їх заповнення та очищення.

Одним із ключових аспектів проєктування резервуарів є забезпечення стабільної витрати та рівномірного розпилення. Це досягається завдяки використанню спеціальних насосів і форсунок, які забезпечують рівномірне покриття цільової площі. Деякі резервуари також оснащуються мішалками для запобігання осіданню частинок і забезпечення однорідності робочого розчину. Іншим важливим аспектом є місткість. Об’єм резервуарів може змінюватися від кількох літрів до кількох десятків літрів залежно від вантажопідйомності дрона

та площі обробки. Більші резервуари забезпечують довший час польоту та меншу кількість заправок, підвищуючи ефективність операцій обприскування.

Під час проєктування резервуарів важливим фактором є ефект плескання рідини (sloshing effect), що означає рух рідини всередині бака під час руху дрона. Резервуари зазвичай проєктуються так, щоб мінімізувати цей ефект і забезпечити стабільність та запобігти втратам рідини під час транспортування. Це може досягатися за допомогою перегородок або плаваючих пінних елементів усередині бака, які зменшують рух рідини шляхом розбиття потоку та демпфування коливань. Крім того, форма та розмір резервуара також впливають на цей ефект. Резервуари з нижчим центром мас і більш стабільною формою менш схильні до плескання. Матеріал конструкції також відіграє роль: більш жорсткі та менш гнучкі матеріали сприяють зменшенню цього ефекту.

З точки зору керування, сучасні резервуари для рідини часто оснащуються електронними системами, які забезпечують точний контроль параметрів обприскування. Це може включати регулювання витрати рідини, форми факела розпилення та напрямку роботи форсунок, що в сукупності підвищує ефективність і точність обробки.

Контроль рівня рідини в резервуарах дронів є необхідним для запобігання перериванням роботи, забезпечення стабільної норми внесення та оптимізації планування місій шляхом заправки лише за необхідності, що дозволяє економити час і ресурси.

Для визначення наявності або рівня рідини в резервуарі можуть використовуватися три основні типи датчиків:

- Датчик наявності рідини: бінарний датчик, який визначає наявність або відсутність рідини в резервуарі. Зазвичай встановлюється в нижній частині бака і сигналізує про повне витрачання рідини.
- Багаторівневий датчик рівня рідини: удосконалений варіант бінарного підходу, при якому кілька датчиків встановлюються на різних рівнях резервуара для отримання більш детальної інформації про кількість рідини. Наприклад, датчики можуть бути розміщені на рівнях 3 літри, 7 літрів і 14 літрів, що дозволяє оцінити приблизний залишок рідини.
- Безперервний датчик рівня рідини: на відміну від бінарних або багаторівневих систем, забезпечує безперервне вимірювання точного об’єму рідини в резервуарі в режимі реального часу. Такий датчик дозволяє отримувати точну інформацію про рівень рідини та

забезпечує більш точний моніторинг і керування запасами робочого розчину.

Насос.

Насоси є ключовими компонентами систем обприскування дронів і відповідають за подачу робочого розчину до форсунок для подальшого нанесення. Вони відіграють важливу роль у забезпеченні рівномірного покриття та ефективного використання робочої рідини. У безпілотних системах обприскування застосовуються різні типи насосів, кожен з яких має свої переваги та недоліки.

Одним із поширених типів є мембранні насоси. Вони працюють за принципом використання гнучкої мембрани, яка створює розрідження для всмоктування рідини в насос, після чого відбувається її нагнітання та подача під тиском до форсунок. Мембранні насоси відомі своєю надійністю та здатністю працювати з різними типами рідин і в широкому діапазоні тисків. Водночас вони можуть бути відносно громіздкими та важчими порівняно з іншими типами насосів.

Іншим поширеним типом є відцентрові насоси. Їх принцип роботи базується на використанні обертового робочого колеса (імпелера), яке створює відцентрову силу та переміщує рідину до периферії, підвищуючи її тиск. Відцентрові насоси відрізняються простотою конструкції та високою ефективністю, однак можуть бути менш придатними для роботи з високов'язкими рідинами або у випадках, коли потрібен високий тиск.

До переваг насосів у системах обприскування дронів належить здатність забезпечувати точну та стабільну витрату рідини, що є критично важливим для рівномірного покриття посівів. Вони також сприяють більш ефективному використанню робочого розчину, зменшуючи втрати. Водночас насоси можуть бути схильні до засмічення, особливо при використанні суспензій або розчинів із твердими частинками. Тому регулярне технічне обслуговування та очищення є необхідними для підтримання їх оптимальної роботи.

Форсунки.

Розпилювальні форсунки відповідають за диспергування рідини на дрібні краплі та рівномірний розподіл їх по цільовій площі. Залежно від необхідного розміру крапель і форми факела розпилення використовуються різні типи форсунок. У безпілотних системах обприскування застосовується кілька основних типів форсунок, кожен з яких має власний принцип роботи, сферу застосування, переваги та

недоліки. Зазвичай форсунки виготовляються з пластику, сталі або латуні.

Плоскофакельні форсунки формують плоский віялоподібний факел розпилення. Вони зазвичай мають один отвір, який створює широкий потік крапель. Такі форсунки використовуються для суцільного обприскування, де потрібне рівномірне покриття великої площі. Вони застосовуються для внесення пестицидів, гербіцидів і добрив. До переваг належать рівномірне покриття великої площі, можливість роботи на відносно високих швидкостях без втрати якості та широкий діапазон витрат і кутів розпилення. Недоліком є схильність до знесення вітром, особливо при малих розмірах крапель, а також потреба у частому калібруванні.

Поширеними промисловими зразками є форсунки серії TeeJet even flat fan, відомі своєю надійністю та ефективністю. Робочий тиск для металевих форсунок становить 2–4 бари, а поширені кути розпилення - 80° і 110°. Типові витрати становлять 1, 1,5 та 2 галони за хвилину (GPM). Наприклад, TeeJet 11001 VP означає рівномірну плоскофакельну форсунку з кутом 110° і витратою 1 GPM, виготовлену з пластику.

Конусні форсунки формують факел розпилення у вигляді повного, порожнистого або регульованого конуса, при цьому краплі розподіляються по коловій траєкторії. Форсунки з повним конусом забезпечують рівномірне покриття всередині всієї конусоподібної області і застосовуються там, де потрібна однорідна обробка великої площі. Форсунки з порожнистим конусом концентрують краплі по периферії та використовуються для точкового або локального внесення, зокрема у густих кронах рослин. Загалом конусні форсунки менш схильні до знесення вітром порівняно з плоскофакельними та можуть працювати при нижчих тисках, що зменшує енергоспоживання. Водночас вони більш схильні до засмічення та покривають меншу площу за один прохід.

Форсунки з регульованим конусом дозволяють змінювати кут розпилення та розмір крапель, забезпечуючи гнучкість для різних умов обприскування. Вони можуть використовуватися як для суцільного внесення, так і для локальних обробок, однак потребують частішого налаштування та мають обмежений діапазон параметрів порівняно зі спеціалізованими форсунками.

Центрифужні форсунки, на відміну від традиційних, використовують обертовий диск для розпилення рідини у вигляді дрібного туману. Рідина подається на диск, що обертається, і під дією відцентрової сили розпадається на дрібні краплі. Перевагою є

формування дуже дрібного аерозолю, що покращує покриття та ефективність обприскування, а також відносна простота конструкції. Недоліками є непридатність для високого тиску та можливі втрати рідини через надлишкове розпилення.

Форсунки з повітряною індукцією використовують ефект Вентурі для змішування рідини з повітрям, утворюючи більші та більш однорідні краплі, які менш схильні до знесення вітром. Вони ефективні у вітряних умовах або там, де необхідне зменшення дрейфу. До їх переваг належать зменшення знесення, формування більших крапель і можливість роботи при нижчих тисках. Недоліками є менш рівномірне покриття та обмежений вибір кутів і витрат.

Узагальнено, вибір форсунок залежить від типу культури, цільового об'єкта обробки та умов навколишнього середовища. Для забезпечення стабільної роботи системи обприскування важливими є правильний підбір форсунок, їх налаштування та регулярне обслуговування. Для запобігання засміченню застосовуються фільтри, які очищають робочу рідину; розмір їхніх комірок зазвичай менший за 0,01 дюйма, що не дозволяє частинкам більшого розміру потрапляти до форсунок і пошкоджувати їх.

Витратоміри.

Витратоміри є важливими компонентами систем обприскування дронів і використовуються для вимірювання витрати рідини, що подається насосом під час внесення агрохімікатів, таких як пестициди або добрива. Загалом виділяють п'ять основних типів витратомірів: турбінні, ультразвукові, електромагнітні, вихрові та диференціального тиску. У безпілотних системах обприскування найчастіше застосовуються перші три типи.

Механічні витратоміри зазвичай використовують ротор або шестерню для визначення об'єму рідини за кожен оберт. Їх принцип роботи базується на вимірюванні швидкості обертання або об'єму, що проходить за один цикл обертання. Турбінні витратоміри, як один із різновидів механічних, використовують обертову турбіну для вимірювання витрати. Вони відзначаються компактністю, малою масою та придатністю для вимірювання малих і середніх витрат. Водночас вони можуть зазнавати зношування і потребують регулярного технічного обслуговування.

Ультразвукові витратоміри використовують ультразвукові хвилі для вимірювання витрати рідини. Зазвичай вони складаються з двох ультразвукових перетворювачів, розташованих у напрямку потоку та проти нього, і визначають витрату за різницею часу проходження

сигналу. Такі пристрої є безконтактними, можуть вимірювати потік у двох напрямках і підходять для широкого діапазону витрат. Вони практично не потребують обслуговування, однак є відносно дорогими та можуть мати обмеження в окремих умовах експлуатації.

Електромагнітні витратоміри використовуються для вимірювання витрати електропровідних рідин, таких як водні розчини пестицидів або добрив. Їх робота базується на законі електромагнітної індукції Фарадея, згідно з яким у провідній рідині, що рухається в магнітному полі, індукується напруга, пропорційна швидкості потоку. Такі витратоміри забезпечують високу точність, можуть працювати у двох напрямках і мають низькі втрати тиску. Вони підходять для широкого діапазону витрат, однак чутливі до електропровідності рідини і потребують калібрування для різних робочих середовищ. Крім того, їх вартість може бути вищою порівняно з ультразвуковими аналогами при подібних умовах використання.

Блок керування системою.

Система керування включає електронні та програмні компоненти, які забезпечують функціонування системи обприскування. Вона може включати такі функції, як GPS-навігація, регулювання змінної норми внесення та автономна робота. На рис. 12 загалом показано структуру системи керування обприскуванням.

Відповідно, джерело живлення забезпечує електричну або механічну енергію для роботи насоса та інших компонентів системи керування обприскуванням. У безпілотних системах таким джерелом зазвичай є акумулятор дрона або бортовий генератор.

Приймач отримує необхідну інформацію (наприклад, швидкість дрона або висоту польоту), яка використовується для корекції витрати розпилення. Відповідно до заданої стратегії керування, яка визначається необхідною нормою внесення та витратою, блок керування формує сигнал для зміни швидкості роботи насоса з метою забезпечення заданого потоку рідини.

8.3. Технології керування процесом обприскування

У цьому розділі детально розглядаються способи керування обсягом внесення робочої рідини під час виконання місії безпілотними системами обприскування (ASD). Загалом виділяють три основні стратегії визначення необхідної витрати робочого розчину на полі.

Технологія швидкісно-адаптивного змінного обприскування спрямована на підвищення рівномірності внесення пестицидів шляхом використання швидкості БПЛА як керуючої змінної, а кількості

пестициду - як регульованої змінної. Традиційні методи точного змінного внесення включають зміну тиску, зміну концентрації та PWM-технологію. Керування змінним тиском є простим і економічно вигідним, однак має недоліки, такі як деформація крапель і нестабільність тиску. Керування змінною концентрацією є більш складним і дорогим, а також характеризується затримкою зміни концентрації. Ці методи переважно застосовуються в наземній техніці, а не в БПЛА.

PWM-технологія, натомість, регулює витрату шляхом керування коефіцієнтом заповнення (duty cycle) та частотою роботи соленоїдного клапана, що покращує однорідність крапель і стабільність системи. Попри розвиток цих методів, швидкісно-адаптивне обприскування все ще стикається з проблемами нерівномірності внесення, спричиненими змінами швидкості польоту дрона. Подальші вдосконалення мають бути спрямовані на підвищення стабільності в реальному часі та врахування факторів навколишнього середовища, таких як швидкість вітру та індукційний потік повітря від гвинтів.

Агротехнологічні підрозділи розглядають рівномірний розподіл обприскування по всій площі як ключовий критерій ефективності. У швидкісно-адаптивному підході витрата насоса дрона визначається такими параметрами, як швидкість польоту, ширина обробки та бажана норма внесення робочої рідини на гектар. Для забезпечення рівномірності потоку необхідно враховувати два основні фактори. По-перше, рівномірність обробки забезпечується підтриманням сталої висоти польоту. По-друге, витрата пестициду безпосередньо залежить від швидкості руху дрона, тобто збільшення (або зменшення) швидкості має компенсуватися відповідним збільшенням (або зменшенням) витрати.

Технологія змінного обприскування на основі карт-завдань (Prescription-based variable spraying-control technology) використовує детальну інформацію про просторовий розподіл шкідників і бур'янів для керування процесом внесення. Вона передбачає створення карт-завдань змінного внесення на основі даних, отриманих від БПЛА дистанційного зондування, оснащених сенсорними системами виявлення. Такі карти містять інформацію про стан рослин, наявність шкідників та географічні особливості, що дозволяє наземній техніці захисту рослин і БПЛА виконувати цільове диференційоване внесення.

Наразі дана технологія переважно орієнтована на розподіл шкідників і бур'янів, а не на структуру рослинного покриву. Подальший розвиток має враховувати специфічні характеристики культур і оптимізувати моделі прийняття рішень щодо обприскування,

зокрема взаємозв'язок між морфологією пологу рослин, параметрами обприскування та онлайн-системами прийняття рішень.

Технологія змінного обприскування в реальному часі (Real-time variable spray technology) використовує сучасні сенсорні системи (інфрачервоні, ультразвукові, LiDAR та мультиспектральні) і супутникову навігацію для виявлення об'єктів і збору характеристик у режимі реального часу. До таких характеристик належать положення рослин, їх форма, внутрішня структура, щільність гілкування, а також наявність шкідників і бур'янів. Отримані дані дозволяють динамічно змінювати параметри внесення, зменшуючи використання пестицидів на нецільових ділянках.

Хоча ця технологія є добре розвиненою для наземної техніки, її застосування в БПЛА є обмеженим через труднощі контролю дрейфу крапель, складність виявлення цілей на відстані та вимоги до низької затримки системи внесення. Серед сенсорних технологій LiDAR забезпечує вищу точність і швидкість порівняно з ультразвуковими методами, однак для повної інтеграції в UAV-системи необхідні подальші дослідження.

Додаткові компоненти: сенсори.

Окрім основних компонентів дрона та системи обприскування, різні додаткові пристрої та сенсори можуть підвищувати функціональність і продуктивність системи. Вони забезпечують отримання важливих даних і реалізацію розширених можливостей, зокрема:

• ***Глобальні навігаційні супутникові системи*** (GNSS) та GPS-модулі забезпечують майже точні координати об'єкта на основі відносного положення між об'єктом і щонайменше чотирма супутниками. Сукупність GPS зазвичай складається з 24 супутників, що рухаються на висоті приблизно 20 200 км зі швидкістю близько 14 000 км/год. Точність GPS становить приблизно 3 м у горизонтальній площині та 5 м по висоті. У сільському господарстві близько 50% фермерів використовують GPS-кероване обладнання, що дозволяє зменшити використання пестицидів на 20–30%. Водночас у зонах густої рослинності спостерігається втрата сигналу на рівні 10–20%.

RTK (Real-Time Kinematic) - це високоточна технологія позиціонування, яка підвищує точність GPS до сантиметрового рівня. Вона базується на порівнянні сигналів супутників із сигналами базової станції з відомими координатами. RTK використовується у геодезії, картографії та точному землеробстві, де критично важлива висока

точність. Технологія підвищує точність за рахунок використання фазових вимірювань несучого сигналу GPS.

Також RTK-модуль може використовувати дві антени GPS або GNSS для визначення напрямку руху літального апарата. Така конфігурація, відома як Dual GNSS, дозволяє одночасно визначати курс і виконувати функції приймача (Rover) у RTK-системі. Для роботи в режимі високоточного позиціонування необхідна базова антена; інакше система використовується лише для визначення напрямку.

На відміну від цього, традиційні дрони використовують компас, що має недоліки, пов'язані з калібруванням і впливом магнітних полів у сільськогосподарському середовищі. Калібрування передбачає обертання дрона в різних напрямках, що є складним для великих систем обприскування, особливо в умовах наявності ліній електропередач. Щоб уникнути впливу магнітних завад, дрони без RTK-модуля повинні підтримувати відстань 7–10 м від джерел магнітних полів. RTK-система усуває залежність від магнітного середовища, визначаючи курс за супутниковими сигналами та забезпечуючи стабільність навіть поблизу завад.

• ***Барометри*** - це прилади для вимірювання атмосферного тиску, зазвичай у мілібарах (mb) або дюймах ртутного стовпа (inHg). Стандартний атмосферний тиск на рівні моря становить приблизно 1013,25 mb або 29,92 inHg. У дронах барометри використовуються для визначення висоти, оскільки між атмосферним тиском і висотою існує передбачуваний зв'язок: зі збільшенням висоти на 8,3 м (27 футів) тиск зменшується приблизно на 1 mb. Барометри відіграють ключову роль у підтриманні висоти та навігації дрона, забезпечуючи дані в реальному часі.

• ***Радіолокаційні сенсори*** (радарні системи) широко використовуються в дронах для дотримання рельєфу, виявлення перешкод і уникнення зіткнень. Вони випромінюють радіохвилі та вимірюють час їх повернення після відбиття від об'єктів, формуючи карту навколишнього середовища. До основних типів належать ультразвукові, лазерні та мікрохвильові радари. Ультразвукові є дешевими, але чутливими до умов середовища. Лазерні забезпечують високу точність і дальність, але є дорожчими. Мікрохвильові мають більшу дальність і меншу чутливість до погодних умов, проте є найдорожчими.

За структурою розрізняють планарні та 360° радари. Планарні сканують горизонтальну площину та використовуються для аналізу рельєфу і виявлення перешкод. 360° радари забезпечують повний огляд навколишнього середовища, але є складнішими та дорожчими. Окремо

виділяють висотомірні радари, призначені для точного вимірювання висоти над поверхнею, хоча вони можуть мати обмежений діапазон.

• ***LiDAR-сенсори*** (Light Detection and Ranging) використовують лазерні імпульси для високоточного вимірювання відстаней і формування детальних 3D-моделей середовища. У дронах вони застосовуються для картографування, виявлення перешкод, навігації та точного обприскування. LiDAR дозволяє отримувати точні дані про крону рослин, що забезпечує корекцію параметрів розпилення в реальному часі, підвищує рівномірність покриття та зменшує витрати пестицидів. Попри вплив зовнішніх умов, LiDAR залишається перспективною технологією для підвищення точності аграрних дронів.

• ***Камери*** є важливими компонентами систем обприскування і використовуються для моніторингу та картографування полів, оцінки стану культур, виявлення стресу або хвороб і оптимізації процесу внесення. Також можуть застосовуватися подвійні FPV-камери для виявлення перешкод у напрямку польоту. Основні типи включають RGB-камери (звичайні зображення), мультиспектральні камери (декілька спектральних діапазонів) і тепловізійні камери (температурні відмінності рослин). Вони допомагають приймати рішення щодо зрошення, внесення добрив і пестицидів, підвищуючи врожайність і зменшуючи витрати.

У сукупності ці сенсори та додаткові пристрої доповнюють основні компоненти дрона та системи обприскування, забезпечуючи розширену функціональність, точне керування та ефективну роботу в аграрних застосуваннях.

Багатороторні дрони загалом мають однакові основні компоненти, однак можуть відрізнятися за низкою параметрів: кількістю роторів, їх розташуванням, розміщенням і конфігурацією форсунок, типами та кількістю форсунок, відстанню між ними, а також вертикальною відстанню між роторами і форсунками.

Під час проєктування дрона для обприскування першим кроком є оцінка корисного навантаження. Після визначення вантажопідйомності здійснюється підбір основних компонентів дрона. Вибір акумулятора залежить від вимог до струму та напруги, які визначаються енергоспоживанням усіх модулів системи.

На завершальному етапі конструкція рами дрона проєктується відповідно до кількості плечей (рамних променів) і необхідної вантажопідйомності, що забезпечує необхідну міцність і стабільність під час виконання операцій обприскування.

Планування траєкторії покриття (Coverage Path Planning, CPP).

Планування траєкторії покриття полягає у визначенні оптимальних маршрутів руху безпілотного літального апарата з метою мінімізації тривалості місії та енергоспоживання. Цей етап передбачає побудову маршруту на основі карти-завдання для забезпечення повного покриття оброблюваної площі та підвищення загальної ефективності витрат.

Алгоритми CPP поділяються на дві основні категорії: класичні та евристичні. Евристичні алгоритми використовують різні підходи до пошуку оптимальних рішень, зокрема еволюційну оптимізацію, алгоритми, натхненні поведінкою людини, а також жадібні методи та пошук на графах. До еволюційних алгоритмів належать метод рою частинок, генетичні алгоритми, диференціальна еволюція, алгоритми мурашиних та бджолиних колоній. Алгоритми, натхненні діяльністю людини, моделюють роботу мозку та здатність до навчання і включають нейронні мережі та навчання з підкріпленням. Жадібні методи та алгоритми пошуку на графах, такі як алгоритми Дейкстри, A*, D*, theta*, пошук у глибину та пошук у ширину, також застосовуються для розв'язання задач CPP.

До класичних алгоритмів належать різні стратегії покриття, зокрема хаотичне покриття, випадкове блукання, покриття на основі остовного дерева, динамічне програмування, метод штучного потенціального поля, дослідження на основі фронту, а також вибіркові методи, включаючи ймовірнісні дорожні карти, швидкозростаючі випадкові дерева та підхід вибору найкращої наступної точки спостереження.

Незважаючи на значну кількість досліджень, присвячених плануванню траєкторій безпілотників для задач спостереження, уникнення перешкод, інспекції та картографування територій, безпосередньо задачам покриття для обприскувальних дронів приділено відносно небагато уваги. Водночас, оскільки проблема планування траєкторій є універсальною і не обмежується конкретною сферою застосування, усі зазначені підходи можуть бути адаптовані для задач внесення пестицидів і добрив.

У практичних застосуваннях запропоновано низку підходів до планування траєкторій для аграрних дронів. Зокрема, розроблено систему обприскування на основі БПЛА для відкритих полів, у якій використовувалися попередньо задані польотні маршрути. Безпілотник, оснащений камерою, отримував дані дистанційного зондування для визначення меж посівів і ділянок із рослинністю, після

чого ці дані оброблялися у середовищі геоінформаційних систем для формування карти поля.

Інший підхід поєднує задачі покриття території та планування траєкторії для біологічного захисту рослин, де безпілотник здійснює внесення капсул у заражених зонах. Розміщення капсул здійснюється на основі шестикутної геометрії з урахуванням центрів мас підділянок, а для побудови маршруту використовуються алгоритми мурашиної колонії, локального пошуку та оптимізації маршрутів.

Також запропоновано метод точного обприскування садів, у якому використовується бінокулярний сенсор глибини та кольору для отримання відеоданих. На основі об'єднання кольорової та глибинної інформації виконується сегментація зони листкового покриву та виділення ключових ділянок інтересу, після чого траєкторія польоту визначається за середніми точками між цими зонами.

Для багатодронових систем запропоновано підхід до розподілу завдань між кількома квадрокоптерами, що здійснюють обприскування сільськогосподарських угідь. Використання математичних моделей та методів квадратичного програмування дозволяє уникнути перекриття зон обробки та забезпечити ефективний розподіл ресурсів.

Окремі дослідження пропонують застосування модифікованого методу рою частинок для планування траєкторій обприскування у плантаціях. У цьому випадку маршрут коригується залежно від ступеня ураження рослин, що дозволяє адаптувати інтенсивність обробки до реального фітосанітарного стану насаджень.

Таким чином, сучасні методи планування траєкторій покриття створюють основу для підвищення ефективності використання агродронів у системах точного землеробства, забезпечуючи оптимальне поєднання якості обробки, витрат ресурсів та часу виконання технологічних операцій.

8.4. Ройові обприскувальні безпілотні літальні апарати.

Безпілотні літальні апарати мають обмеження щодо тривалості польоту, вантажопідйомності та дальності дії, особливо у випадку використання електричних джерел живлення. Ці обмеження особливо проявляються під час обробки великих сільськогосподарських площ, коли виникає потреба у частій заміні акумуляторів та дозаправленні робочої рідини в межах однієї місії, що знижує загальну ефективність і підвищує трудомісткість виконання робіт. Підвищення ефективності лише за рахунок збільшення вантажопідйомності чи тривалості польоту є недостатнім, тому актуальним напрямом є використання ройових систем безпілотників, які працюють у кооперативному режимі.

Рой безпілотників функціонує на основі заздалегідь визначених режимів роботи, що дозволяє одночасно виконувати кілька завдань. Такий підхід скорочує тривалість виконання окремих операцій, прискорює завершення місій та суттєво підвищує ефективність обробки. Крім того, ройові системи відзначаються вищою надійністю порівняно з одиночними безпілотниками, оскільки навіть у разі відмови окремих апаратів завдання може бути завершене за рахунок інших елементів системи. Додатковою перевагою є можливість динамічного розподілу завдань між окремими апаратами залежно від характеристик ділянок та умов виконання місії, що забезпечує оптимізацію використання ресурсів.

Сучасні дослідження у сфері інтелекту ройових безпілотних систем розглядають їх функціонування в межах багаторівневої архітектури, яка включає рівні прийняття рішень, планування траєкторій, керування, комунікації та прикладного застосування. Такий підхід дозволяє комплексно аналізувати та вдосконалювати роботу ройових систем у задачах точного землеробства.

У прикладних рішеннях для аграрного сектору використовуються різні підходи до організації роботи рою. Зокрема, на основі аерофотознімків або супутникових даних формується двовимірна сіткова модель поля, де визначаються стартові позиції, цільові зони обробки, а також безпечні та небезпечні області. На основі цієї моделі здійснюється попереднє планування маршрутів польоту, після чого під час реальної місії застосовуються алгоритми оперативного планування, що враховують технічний стан апаратів і змінні умови середовища.

Існують також системи, у яких два безпілотники працюють синхронно, маючи спільну систему внесення робочої рідини. Такий підхід дозволяє збільшити ширину захвату та обсяг обробки за один прохід, проте вимагає високоточного узгодження рухів, що реалізується за допомогою систем візуальної або комунікаційної координації. У більш складних багатокомпонентних ройових системах враховуються відмінності між апаратами, форма полів, вплив зносу препарату та рівень підготовки оператора. Для цього розробляються математичні моделі, які дозволяють оптимально розподіляти завдання між безпілотниками та підвищувати ефективність захисту рослин у реальних умовах.

Окремі алгоритмічні рішення забезпечують повне покриття території та виявлення ключових об’єктів інтересу без участі оператора. Вони передбачають розподілену взаємодію апаратів, адаптивне регулювання швидкості руху та уникнення перекриття зон обробки. Водночас такі підходи можуть мати обмеження, зокрема відсутність

механізмів уникнення перешкод або перепланування маршрутів, а також вимоги до наявності прямої видимості для забезпечення зв'язку між апаратами.

Окрім взаємодії між безпілотними літальними апаратами, перспективним напрямом є інтеграція повітряних і наземних роботизованих систем. У таких комплексах безпілотники виконують функції моніторингу, картографування та виявлення проблемних зон, тоді як наземні роботизовані платформи здійснюють безпосереднє внесення препаратів на основі отриманих даних. Такий підхід відкриває можливості для реалізації високоточного диференційованого обприскування. Проте на сьогодні ці технології ще перебувають на стадії активних досліджень і потребують подальшого розвитку для широкого впровадження у виробничу практику.

8.5. Вплив експлуатаційних параметрів на якість обприскування

У сучасних дослідженнях значна увага приділяється оптимізації експлуатаційних параметрів безпілотних обприскувальних систем з метою підвищення ефективності покриття рослинного пологу, особливо у задачах захисту рослин. Отримані результати сприяли вдосконаленню агротехнологій і розглядаються як важливий етап розвитку точного землеробства. Аналіз наукових напрацювань свідчить про поступове вдосконалення застосування безпілотників у системах захисту рослин та формування практичних рекомендацій щодо підвищення ефективності й економічної доцільності обприскування.

Якість обприскування є комплексним показником, який охоплює такі характеристики, як розмір крапель, ширина захвату, рівномірність розподілу робочої рідини та ступінь знесення препарату. На ці показники впливає сукупність технічних і експлуатаційних параметрів.

З метою підвищення ефективності роботи доцільною є оптимізація конфігурації обприскувальних систем безпілотників для забезпечення внесення препаратів у вигляді висококонцентрованих розчинів з низьким об'ємом. Як правило, обприскувальні дрони використовують норми витрати в межах 8–20 л/га для польових культур і 20–60 л/га для садів, що у десятки разів менше порівняно з традиційними системами обприскування.

Дослідження показують, що на якість обприскування істотно впливають тиск у системі, тип форсунок, їх кількість і просторове розташування, які визначають формування факела розпилення та розмір крапель. Водночас витрата робочої рідини, що задається у літрах на гектар, також є критичним параметром, оскільки впливає на

щільність покриття та ступінь проникнення препарату у рослинний покрив.

Суттєву роль відіграють і параметри польоту безпілотника, зокрема висота та швидкість руху. Вони безпосередньо впливають на ширину захвату, рівномірність обробки та рівень знесення робочої рідини. Окрім цього, аеродинамічні ефекти, зумовлені потоком повітря від пропелерів, також змінюють траєкторію руху крапель і впливають на їх осадження на рослинній поверхні.

Оцінювання якості обприскування є ключовим етапом як при проєктуванні нових безпілотних систем, так і при вдосконаленні існуючих технологій. Якість обприскування визначається, зокрема, розміром крапель та характером їх просторового розподілу. Просторовий розподіл крапель формує ширину смуги обробки і впливає на рівномірність покриття, тоді як діаметр крапель визначає точність внесення та ефективність дії препарату.

На формування цих характеристик впливають різні фактори, серед яких конфігурація форсунок, витрата рідини, повітряні потоки від гвинтів та погодні умови, зокрема вітер. Для коректної оцінки якості обприскування необхідно застосовувати методи, що дозволяють кількісно визначати як розміри крапель, так і параметри їх осадження.

Методи оцінювання якості обприскування поділяються на контактні та безконтактні. Контактні методи передбачають фізичне уловлювання крапель на спеціальні носії, тоді як безконтактні базуються на використанні оптичних або лазерних технологій, що не впливають на процес розпилення. До безконтактних методів належать лазерна дифракція, фазово-доплерівський аналіз частинок та високошвидкісна відеозйомка. Серед контактних методів у польових умовах найбільш поширеним є використання водочутливого паперу, а також методи занурення у рідину.

З огляду на практичні вимоги до польових досліджень безпілотних систем, використання водочутливого паперу є простим, надійним і економічно доцільним підходом, який дозволяє ефективно збирати та аналізувати дані про осадження крапель у реальних умовах експлуатації.

8.6. Процес вибору обприскувального безпілотного апарата

Після розгляду конструктивних особливостей обприскувальних безпілотних систем, методів керування та планування траєкторій доцільно сформувати практичні рекомендації щодо вибору відповідного обладнання для конкретних агротехнологічних завдань. Процес вибору обприскувального дрона передбачає врахування низки

ключових параметрів, які визначають ефективність його застосування у польових умовах. До таких параметрів належать конфігурація безпілотника, тип форсунок, режим обприскування, а також наявність і тип сенсорних систем, зокрема радарів висоти та перешкод, витратомірів, подвійних систем супутникової навігації та RTK-технологій. Особливості вибору також залежать від типу сільськогосподарських угідь, які умовно поділяються на відкриті поля та сади.

Вибір конфігурації безпілотного апарата, наприклад гексакоптера або октокоптера, суттєво впливає на надійність та енергоспоживання системи. Конфігурації з кількістю роторів більше чотирьох забезпечують підвищену надійність за рахунок резервування, проте характеризуються більшими витратами енергії, що призводить до зменшення тривалості польоту.

Тип форсунок є одним із визначальних факторів якості обприскування. Для відкритих полів із незначними перепадами висот широко застосовуються відцентрові форсунки типу Micron-Air, а також форсунки типу TeeJet. У садівництві перевага надається відцентровим форсункам, які забезпечують високу точність та ефективність внесення препаратів у складних умовах рослинного покриву.

Важливим параметром є об’єм бака для робочої рідини, який визначається площею обробки та вантажопідйомністю безпілотника. Для невеликих площ відкритих полів достатнім є бак об’ємом близько 10 літрів, для середніх площ доцільно використовувати баки об’ємом 10–20 літрів, тоді як для великих площ можуть знадобитися системи з об’ємом понад 20 літрів. У садівництві, з огляду на підвищену норму внесення препаратів, зазвичай застосовуються баки об’ємом понад 30 літрів.

Режими обприскування визначаються як типом ділянки, так і технологічними вимогами. Автоматичний режим передбачає виконання польоту за заздалегідь заданою програмою, тоді як у ручному режимі управління здійснюється оператором. Режими з постійною або змінною витратою робочої рідини дозволяють відповідно підтримувати сталу норму внесення або адаптувати її до умов ділянки. Також розрізняють локальне обприскування окремих ділянок та суцільне обприскування всієї площі.

Для відкритих полів із пересіченим рельєфом доцільно застосовувати автоматичні режими з регульованою витратою робочої рідини. На рівнинних ділянках можливе використання як автоматичного, так і ручного режиму, однак перевага надається системам зі змінною витратою для підвищення рівномірності покриття.

У садівництві для однорідних насаджень ефективними є автоматичні режими зі змінною витратою, тоді як у неоднорідних садах доцільно використовувати весь спектр режимів залежно від умов.

Використання радарів висоти та виявлення перешкод є важливим для забезпечення безпечної та точної роботи. На відкритих полях із ухилами понад 15° застосування таких сенсорів є обов'язковим, тоді як на рівнинних ділянках вони мають рекомендаційний характер. У садівництві використання радарів є практично необхідним через складність просторової структури насаджень.

Вибір витратомірів також залежить від умов експлуатації. Ультразвукові та електромагнітні витратоміри забезпечують високу точність і надійність, тому є пріоритетними для садів і систем зі змінною витратою. У випадку застосування постійної витрати можливе використання простіших типів витратомірів.

Системи супутникової навігації відіграють ключову роль у забезпеченні точності позиціонування. Використання подвійних GNSS-систем є доцільним на ділянках із наявністю магнітних завад, а також рекомендованим у стандартних умовах для підвищення надійності навігації. У садівництві такі системи є обов'язковими. Технологія RTK забезпечує високоточне позиціонування і є бажаною для відкритих полів та однорідних садів, але стає необхідною у випадку складних, неоднорідних насаджень, де потрібна максимальна точність внесення препаратів.

Обмеження обприскувальних безпілотних систем

Впровадження обприскувальних безпілотних літальних апаратів у практику індивідуальних господарств відбувається відносно повільно, що зумовлено низкою технічних, економічних і нормативних чинників. Однією з ключових проблем є недостатня кількість узагальнених і достовірних досліджень, які б дозволяли об'єктивно порівняти ефективність дронів із традиційними наземними обприскувачами та авіаційною технікою. Наявні результати часто мають суперечливий характер, що пояснюється значною варіативністю конструкцій і параметрів безпілотних систем.

Важливим обмеженням є нижча продуктивність дронів у перерахунку на площу обробки за одиницю часу порівняно з літаками та наземною технікою. Крім того, тривалість польоту обмежена і зазвичай становить близько 5–15 хвилин при повному завантаженні бака, що зумовлює необхідність частих перерв для заміни акумуляторів і дозаправлення. Для часткового вирішення цієї проблеми застосовується використання кількох акумуляторів і швидкісних

зарядних пристроїв, що дозволяє скоротити простої. Однак більшість безпілотників використовують літій-полімерні акумулятори, ресурс яких обмежений кількома сотнями циклів заряджання-розряджання, після чого виникає потреба у їх заміні, що збільшує експлуатаційні витрати.

Суттєвий вплив на використання обприскувальних дронів мають нормативно-правові обмеження. У багатьох країнах встановлюються вимоги щодо максимальної маси безпілотника разом із корисним навантаженням, обов'язкового візуального контролю польоту оператором, обмеження польотів у певному повітряному просторі та часові рамки експлуатації. Додатково можуть існувати обмеження щодо одночасного керування кількома безпілотниками одним оператором, що ускладнює впровадження ройових технологій. Також слід враховувати, що інструкції до застосування засобів захисту рослин не завжди містять чіткі рекомендації щодо використання безпілотної авіації, що створює додаткові труднощі при їх практичному застосуванні.

Окрім технічних і нормативних аспектів, існують і практичні обмеження. Експлуатація обприскувальних дронів потребує регулярного технічного обслуговування, включаючи очищення та заміну форсунок, обслуговування насосів і контроль стану акумуляторів. Це підвищує загальні витрати та вимагає наявності відповідної технічної підтримки. Важливим фактором є також необхідність підготовки кваліфікованих операторів, оскільки управління безпілотниками передбачає знання навігаційних систем, налаштування параметрів обприскування та дотримання вимог безпеки.

Економічні та соціальні аспекти також відіграють значну роль, особливо для малих господарств. Висока початкова вартість обладнання та обмежений доступ до фінансування можуть стримувати впровадження цих технологій. Крім того, певний консерватизм у традиційних аграрних практиках також уповільнює процес адаптації нових технологічних рішень.

Таким чином, наявні обмеження свідчать про необхідність подальшого розвитку технологій, удосконалення нормативної бази, розширення програм підготовки фахівців та створення ефективної інфраструктури підтримки для забезпечення широкого впровадження обприскувальних безпілотних систем у сучасному сільському господарстві.

Висновки

Подальший розвиток обприскувальних безпілотних систем пов’язаний із переходом до інтелектуальних технологій точного внесення передусім засобів біологічного захисту рослин. Перспективним напрямом є створення комплексних систем, у яких безпілотники, оснащені мультиспектральними або гіперспектральними сенсорами, здійснюють виявлення проблемних зон посівів і передають координати до ройових обприскувальних систем для автоматизованого локального внесення препаратів. Важливим завданням є забезпечення ефективної роботи таких систем на великих площах, що потребує подальшої оптимізації алгоритмів та технічних рішень.

Серед інших перспективних напрямів слід відзначити підвищення ємності баків для робочих розчинів і збільшення тривалості польоту безпілотників, що дозволить зменшити кількість технологічних перерв і підвищити продуктивність. Актуальними залишаються дослідження, спрямовані на вдосконалення якості обприскування шляхом оптимізації параметрів польоту та роботи обприскувальної системи залежно від конкретних агротехнологічних умов.

Інтерес становить також розвиток ієрархічних ройових систем, що поєднують взаємодію повітряних безпілотників і наземних роботизованих платформ. Такий підхід відкриває можливості для більш точного, адаптивного та ресурсоефективного виконання агрохімічних операцій.

Окремо варто підкреслити значний потенціал інтеграції сучасних методів штучного інтелекту та машинного навчання. Використання алгоритмів прийняття рішень у реальному часі дозволить динамічно змінювати параметри обприскування відповідно до стану рослин і умов навколишнього середовища, що підвищить точність і екологічну безпечність застосування препаратів. Подальший розвиток пов’язаний із впровадженням цифрових двійників аграрних систем, мереж Інтернету речей та хмарних платформ обробки даних, які забезпечують моніторинг, прогнозування технічного стану обладнання та оптимізацію виробничих процесів.

Таким чином, подальший розвиток обприскувальних безпілотних систем визначається інтеграцією інтелектуальних технологій, удосконаленням технічних характеристик і розширенням функціональних можливостей, що забезпечить їх широке впровадження у практику сучасного точного землеробства.

Питання для обговорення та самоперевірки

1. Які основні переваги використання обприскувальних БПЛА для внесення спеціалізованих бакових сумішей у порівнянні з традиційними наземними та авіаційними методами?
2. Які особливості норм внесення (л/га) характерні для дронів при застосуванні спеціалізованих бакових сумішей і як це впливає на ефективність обробки?
3. Яким чином розмір крапель впливає на ефективність покриття рослин при внесенні спеціалізованих бакових сумішей?
4. Як параметри польоту БПЛА (висота, швидкість) впливають на рівномірність внесення спеціалізованих бакових сумішей?
5. Яку роль відіграє тип форсунок при внесенні спеціалізованих бакових сумішей і які з них є найбільш доцільними для різних культур?
6. Як впливає витрата робочого розчину на ефективність застосування спеціалізованих бакових сумішей?
7. Яким чином повітряний потік від пропелерів впливає на осадження спеціалізованих бакових сумішей на рослинах?
8. Які переваги використання карт-завдань (prescription maps) при диференційованому внесенні спеціалізованих бакових сумішей?
9. Як алгоритми планування траєкторії (CPP) впливають на якість і ефективність внесення спеціалізованих бакових сумішей?
10. У яких випадках доцільно застосовувати ройові БПЛА для внесення спеціалізованих бакових сумішей?
11. Які основні фактори слід враховувати при виборі БПЛА для внесення спеціалізованих бакових сумішей у польових умовах та садах?
12. Як використання сенсорів (мультиспектральних, RTK, витратомірів) підвищує точність внесення спеціалізованих бакових сумішей?
13. Які методи контролю якості обприскування можна застосовувати для оцінки внесення спеціалізованих бакових сумішей у польових умовах?
14. Які основні технічні та організаційні обмеження застосування БПЛА при внесенні спеціалізованих бакових сумішей?
15. Які перспективні напрями розвитку обприскувальних БПЛА можуть покращити ефективність застосування спеціалізованих бакових сумішей у системах точного землеробства?

РОЗДІЛ 9. РОЛЬ ГЕНЕРАТИВНОГО ШТУЧНОГО ІНТЕЛЕКТУ В ЦИФРОВІЙ АГРОПРОДОВОЛЬЧІЙ СФЕРІ

9.1. Суть і значення генеративного штучного інтелекту
9.2. Підходи генеративного штучного інтелекту
9.3. Можливості генеративного ШІ в контексті агропродовольчого сектору
9.4. Існуючі дослідження трансформації агропродовольчого сектору за допомогою генеративного ШІ
9.5. Потенційні сценарії використання генеративного ШІ в агропродовольчому секторі
9.6. Обмеження генеративного ШІ

9.1. Суть і значення генеративного штучного інтелекту

Генеративний штучний інтелект - це сукупність складних алгоритмів і моделей, здатних створювати новий контент, формувати аналітичні висновки та генерувати рішення на основі навчання з використанням наявних даних. Застосування таких підходів, як генеративно-змагальні мережі та великі мовні моделі, дозволяє синтезувати зображення, текстову інформацію та прогнозні моделі, які можуть відтворювати й удосконалювати реальні процеси. В умовах зростання глобальних викликів, пов'язаних зі зміною клімату, екологічною стійкістю та продовольчою безпекою, агропродовольчий сектор потребує інноваційних рішень, здатних забезпечити підвищення продуктивності виробництва, зменшення негативного впливу на довкілля та стабільність постачання продуктів харчування.

За сучасними оцінками, значна частка глобальних викидів парникових газів пов'язана саме з функціонуванням продовольчих систем, включаючи виробництво, переробку, транспортування та втрати харчової продукції. Викиди формуються внаслідок діяльності у рослинництві й тваринництві, змін у землекористуванні, зокрема вирубування лісів, а також деградації торфовищ. Водночас сучасна продовольча система, яка забезпечує харчування більшості населення світу та є джерелом засобів існування для значної кількості людей, перебуває під тиском як кліматичних, так і некліматичних факторів. Це обумовлює необхідність збільшення обсягів виробництва якісної та безпечної продукції за одночасного дотримання принципів екологічної сталості.

Штучний інтелект уже відіграє важливу роль у трансформації агропродовольчого сектору. Його застосування охоплює моніторинг стану тварин і прогнозування захворювань, оптимізацію строків сівби

та режимів зрошення, автоматизацію контролю якості під час переробки продукції, а також удосконалення процесів логістики й реалізації харчових продуктів. У цьому контексті особливу увагу привертає генеративний штучний інтелект, який розширює можливості традиційних підходів.

На відміну від класичних систем штучного інтелекту, що переважно орієнтовані на виявлення закономірностей і прийняття рішень на основі історичних даних, генеративні моделі здатні створювати нові дані та сценарії. Вони використовують великі масиви інформації для формування текстів, зображень і симуляцій. Наприклад, традиційні моделі можуть прогнозувати потребу в зрошенні на основі попередніх погодних умов, тоді як генеративний підхід дозволяє моделювати нові кліматичні сценарії, зокрема тривалі періоди посухи, та формувати адаптивні стратегії управління водними ресурсами. Аналогічно, у харчовій промисловості традиційні системи обробки природної мови забезпечують стандартні відповіді на типові запити, тоді як генеративні моделі здатні формувати контекстно-орієнтовані рішення з урахуванням конкретної виробничої ситуації.

Актуальність інтеграції генеративного штучного інтелекту в цифрову агропродовольчу сферу зумовлена необхідністю забезпечення глобальної продовольчої безпеки в умовах змін клімату та зростання населення. Сучасні виклики вимагають підвищення якості, безпечності та доступності харчових продуктів при одночасному збереженні природних ресурсів. У цьому контексті генеративний штучний інтелект відкриває нові можливості для створення прогнозних моделей навіть за обмеженої кількості навчальних даних, наприклад для моделювання стійких до посухи сівозмін або прогнозування спалахів шкідників за нестабільних погодних умов.

Крім того, генеративні підходи дозволяють формувати рекомендаційні рішення, зокрема динамічно адаптувати режими зрошення в умовах екстремальних температур або розробляти склади харчових продуктів із підвищеною поживною цінністю з урахуванням ризиків порушення логістичних ланцюгів. Використовуючи великі обсяги даних - від супутникових знімків до інформації про мікробіоту ґрунтів - генеративний штучний інтелект здатний підвищити врожайність культур, покращити якість і безпечність харчової продукції, а також сприяти розробці стійких стратегій розвитку агропродовольчого сектору в умовах зростаючих кліматичних викликів.

Незважаючи на суттєвий прогрес у впровадженні штучного інтелекту в агропродовольчому секторі, у науковій літературі

зберігається прогалина щодо всебічного аналізу можливостей, впливу та перспектив розвитку саме генеративного штучного інтелекту в цій сфері. Наявні оглядові дослідження переважно зосереджені на загальних аспектах застосування штучного інтелекту в сільському господарстві, тоді як потенціал генеративних підходів для трансформації всієї агропродовольчої галузі потребує більш глибокого вивчення. Окремі дослідження розглядають вплив генеративного штучного інтелекту лише в межах вузькоспеціалізованих підсекторів, що обмежує можливість формування цілісного бачення його ролі в аграрній економіці.

У зв'язку з цим метою даного розділу є узагальнення та аналіз застосування генеративного штучного інтелекту в цифровому агропродовольчому секторі. Особлива увага приділяється тому, щоб зробити ці технології зрозумілими для спеціалістів агропродовольчої сфери без необхідності глибокої попередньої підготовки у сфері штучного інтелекту.

9.2. Підходи генеративного штучного інтелекту

Системи штучного інтелекту загалом поділяються на дві основні категорії: дискримінативні та генеративні. Дискримінативні підходи орієнтовані на описовий і прогнозний аналіз даних та використовуються для виконання таких завдань, як класифікація, виявлення залежностей, кластеризація, регресійний аналіз і прогнозування. У контексті агропродовольчої сфери такі системи застосовуються, зокрема, для оцінювання стану посівів, прогнозування врожайності або визначення потреби в добривах на основі історичних даних.

На відміну від них, генеративні моделі не лише аналізують дані, але й здатні формувати нові варіанти рішень, що відповідають заданим умовам. Таким чином, вони забезпечують не тільки описовий і прогнозний, а й рекомендаційний рівень аналітики, що є особливо важливим для прийняття управлінських рішень в агрохімії, наприклад при оптимізації систем удобрення або адаптації технологій вирощування до змін клімату.

Генеративні системи можуть працювати з різноманітними типами вхідних даних, включаючи текстову інформацію, зображення, відео, аудіосигнали, а також багатопараметричні дані, зокрема спектральні характеристики, які широко використовуються у сучасних системах моніторингу якості продукції та стану рослин. На основі аналізу великих масивів даних такі моделі здатні генерувати новий контент, який є статистично подібним до реальних спостережень.

Завдяки використанню методів глибинного навчання генеративний штучний інтелект може створювати тексти, програмний код, аналітичні звіти, а також пропонувати варіанти вирішення прикладних задач, що виникають у виробничих процесах агропродовольчої галузі. Це відкриває можливості для автоматизації не лише фізичних операцій, але й інтелектуальної підтримки прийняття рішень.

У цьому розділі розглядаються основні підходи до побудови генеративних систем. До найбільш поширених належать трансформерні моделі, великі мовні моделі та генеративно-змагальні мережі. Додатково враховуються такі підходи, як змагальне навчання та цифрові двійники, які доповнюють можливості генеративного штучного інтелекту в агропродовольчій сфері.

9.2.1. Трансформери

Трансформери є сучасною архітектурою машинного навчання, яка відзначається здатністю обробляти та аналізувати великі обсяги даних. Вони не потребують попередньо нормалізованих або чітко розмічених наборів даних, що робить їх особливо ефективними у задачах, де інформація є різнорідною або частково неструктурованою.

У різних прикладних задачах трансформери здатні генерувати різні типи вихідної інформації, працюючи з такими даними, як зображення, текст або інші форми цифрових сигналів. Їх ключовою особливістю є механізм уваги (attention mechanism), який дозволяє моделі визначати, які саме елементи вхідних даних є найбільш важливими для формування результату. Це забезпечує глибоке розуміння контексту та взаємозв'язків між елементами інформації.

У задачах обробки природної мови трансформери можуть, наприклад, аналізувати великі текстові документи та формувати їх короткий зміст або витяги. Крім того, вони ефективно працюють із більш складними типами даних, такими як програмний код, послідовності ДНК, а також хімічні структури та білкові молекули. Це робить їх корисними у біоінформатиці та аграрних науках.

У поєднанні з методами глибокого навчання трансформери можуть застосовуватися для задач розпізнавання харчових продуктів у реальному часі, що відкриває можливості для аналізу харчової цінності та контролю якості продукції в агропромисловому комплексі.

Однією з головних переваг трансформерів є здатність ефективно працювати з довгими послідовностями даних, що є важливим для задач, де необхідно враховувати широкий контекст. Крім того, вони добре

піддаються паралельній обробці, що значно пришвидшує процес навчання порівняно з класичними підходами.

Водночас трансформери є обчислювально складними моделями та потребують значних обсягів пам'яті й обчислювальних ресурсів, що може обмежувати їх використання у ресурсно обмежених системах, зокрема в польових умовах аграрного сектору або на периферійних пристроях.

9.2.2. Великі мовні моделі

Великі мовні моделі є одним із ключових досягнень у розвитку генеративного штучного інтелекту. Їх особливістю є здатність працювати з надзвичайно великими обсягами даних, що включають мільярди й навіть трильйони параметрів, завдяки чому досягається високий рівень точності та узагальнення знань у межах навчальних вибірок. Такі моделі виконують не лише функцію зберігання інформації, а й виступають інструментом генерації нового контенту у різних формах, зокрема тексту, зображень і аудіо.

Важливим напрямом розвитку є мультимодальний штучний інтелект, у межах якого моделі здатні обробляти різнорідні вхідні дані, наприклад текстові описи або зображення, та формувати відповідні результати. Це відкриває можливості для створення комплексних цифрових сервісів, які можуть поєднувати аналіз даних і генерацію рекомендацій. У практичному вимірі такі системи можуть функціонувати як інтерактивні консультанти, здатні не лише відповідати на запити, а й формувати аналітичні висновки.

У агропродовольчій сфері великі мовні моделі можуть застосовуватися для надання рекомендацій агровиробникам на основі аналізу даних про погодні умови, властивості ґрунту та стан посівів. Це особливо актуально для агрохімії, де необхідно враховувати комплекс факторів при прийнятті рішень щодо систем удобрення або захисту рослин. Однією з ключових переваг таких моделей є здатність генерувати змістовні та різноманітні відповіді навіть за обмеженої вхідної інформації, що робить їх ефективними інструментами підтримки прийняття рішень.

Водночас розробка та впровадження великих мовних моделей пов'язані зі значними обчислювальними витратами та потребою у великих масивах даних для навчання. Крім того, актуальними залишаються питання етичного використання таких систем, зокрема ризики виникнення упередженості у відповідях і поширення недостовірної інформації, що потребує додаткових механізмів контролю.

9.2.3. Генеративно-змагальні мережі

Генеративно-змагальні мережі є одним із фундаментальних підходів у генеративному штучному інтелекті, що забезпечує створення нових даних, максимально наближених до реальних. Ця архітектура базується на взаємодії двох компонентів - генератора та дискримінатора. Генератор формує нові дані, починаючи з випадкових вхідних сигналів, намагаючись відтворити характеристики реальних об'єктів, тоді як дискримінатор оцінює ці дані, визначаючи їхню достовірність.

У процесі навчання обидва компоненти постійно вдосконалюються: генератор прагне створювати більш реалістичні результати, а дискримінатор - точніше їх розрізняти. Така змагальна взаємодія забезпечує поступове підвищення якості згенерованих даних. У результаті формуються моделі, здатні відтворювати зображення, відео та інші типи даних із високим рівнем достовірності.

У агропродовольчій сфері генеративно-змагальні мережі знаходять практичне застосування, зокрема для створення синтетичних зображень захворювань рослин. Це є важливим у випадках, коли реальні дані обмежені або складні для отримання, наприклад на ранніх стадіях розвитку хвороб. Такі підходи дозволяють підвищити ефективність систем діагностики та моніторингу стану посівів.

Перевагою генеративно-змагальних мереж є здатність формувати високоякісні та різноманітні дані, що робить їх корисними як у наукових дослідженнях, так і в практичних застосуваннях. Водночас процес їх навчання є обчислювально складним і може супроводжуватися нестабільністю, що потребує ретельного налаштування параметрів моделей. Додатковою проблемою може бути обмежена різноманітність згенерованих даних, коли модель відтворює лише вузький набір варіантів, що слід враховувати при їх практичному використанні в агропродовольчих системах.

9.2.4. Дифузійні моделі

Дифузійні моделі є сучасним підходом у генеративному штучному інтелекті, який демонструє високу ефективність у створенні реалістичного та узгодженого візуального контенту, насамперед зображень і відео.

Основний принцип роботи таких моделей полягає в ітеративному додаванні шуму до зображення з подальшим навчанням процесу його відновлення. Іншими словами, модель поступово «зашумлює» вихідні дані, а потім вчиться відтворювати початковий стан, моделюючи

ймовірнісний розподіл пікселів зображення за допомогою статистичних і математичних методів.

Завдяки цьому підходу дифузійні моделі здатні генерувати високоякісний візуальний контент із заданими характеристиками, такими як стиль, текстура або тематичне наповнення, забезпечуючи при цьому високий рівень деталізації та реалістичності. Це відкриває широкі можливості для їх застосування у наукових дослідженнях, де синтетичні дані можуть доповнювати або частково замінювати реальні спостереження.

В аграрному секторі дифузійні моделі можуть використовуватися для генерації синтетичних супутникових зображень високої роздільної здатності з метою моделювання різних кліматичних умов, типів ґрунтів або сценаріїв розвитку посівів. Такі дані можуть бути корисними для тестування алгоритмів аналізу та підтримки прийняття рішень у точному землеробстві.

Перевагами дифузійних моделей є здатність генерувати різноманітний та візуально достовірний контент, що суттєво підвищує якість методів комп'ютерного зору та дослідницьких підходів. Водночас їх основним недоліком є висока обчислювальна складність і потреба у значних ресурсах, а також необхідність ретельного налаштування параметрів для досягнення оптимальних результатів.

9.2.5. Авторегресійні моделі

Авторегресійні моделі є класом моделей, що спеціалізуються на прогнозуванні послідовних даних. Їх ключова перевага полягає у здатності передбачати наступний елемент послідовності на основі аналізу попередніх значень, що робить їх особливо ефективними для роботи з часовими рядами та іншими впорядкованими даними.

Основний принцип авторегресійного підходу полягає в тому, що попередні спостереження містять інформацію, яка дозволяє оцінювати майбутні значення. Це забезпечує можливість не лише прогнозування, але й генерації нових елементів послідовності, які узгоджуються з уже наявними закономірностями.

У контексті генеративного штучного інтелекту такі моделі широко застосовуються для створення тексту, музики, прогнозування фінансових ринків, погодних умов та інших процесів, що мають часову або структурну послідовність. Здатність зберігати логічну цілісність і послідовність робить їх особливо цінними для задач, де важливо підтримувати причинно-наслідкові зв'язки у згенерованих даних.

В агрохімічних та агротехнологічних застосуваннях авторегресійні моделі можуть використовуватися, наприклад, для

прогнозування процесів псування харчової продукції. Аналізуючи історичні дані температури, вологості та умов зберігання, вони дозволяють оцінювати терміни придатності продукції та оптимізувати логістичні ланцюги постачання.

Водночас обмеженням авторегресійних моделей є їх придатність переважно до тих ймовірнісних розподілів, де легко обчислюються ймовірності префіксів. Це спрощує процес навчання, однак може знижувати виразність моделі порівняно з підходами, які дозволяють моделювати приховані змінні або складніші залежності.

9.2.6. Адвесаріальне машинне навчання

Адвесаріальне машинне навчання є спеціалізованим напрямом у галузі машинного навчання, що спрямований на підвищення стійкості моделей шляхом їх навчання на навмисно спотворених або «суперницьких» (adversarial) даних. Основна мета такого підходу полягає у покращенні здатності моделей розрізняти справжні та модифіковані (підроблені або атаковані) вхідні дані.

Хоча генеративно-суперницькі мережі (GAN) використовують принцип змагального навчання, саме адвесаріальне машинне навчання не є суто генеративним підходом. Водночас воно суттєво підсилює генеративні системи, підвищуючи їхню надійність у нестабільних або потенційно ворожих середовищах.

У практичних застосуваннях, зокрема в кібербезпеці, адвесаріальне навчання використовується для створення систем, здатних виявляти та нейтралізувати складні атаки, такі як фішингові повідомлення або шкідливе програмне забезпечення, які можуть бути непомітними для традиційних методів захисту.

Механізм роботи таких моделей передбачає подання на вхід як «чистих» даних, так і спеціально модифікованих прикладів, які створюються шляхом незначних змін вихідної інформації з метою введення моделі в оману. Це можуть бути тексти, зображення, транзакційні записи або мережевий трафік. У процесі ітеративного навчання модель коригує свої параметри для мінімізації помилок у розрізненні справжніх і атакуючих зразків.

Завдяки такому підходу моделі стають більш стійкими до непередбачуваних або зловмисних впливів. Це особливо важливо у критичних сферах, зокрема в кібербезпеці, логістиці, а також у забезпеченні безпечності та автентичності харчових продуктів в агропромисловому комплексі, де наслідки шахрайства можуть бути значними.

Водночас суттєвим недоліком адвесаріального навчання є висока обчислювальна складність. Кожна ітерація оптимізації потребує обчислення градієнтів для оновлення параметрів мережі, а також додаткових обчислень для формування змагальних прикладів, що значно збільшує витрати ресурсів.

9.2.7. Симуляції та цифрові двійники

Симуляції та цифрові двійники поєднують реальні процеси функціонування об'єктів із їх віртуальним моделюванням. Цифровий двійник є віртуальною копією фізичного об'єкта або системи, яка постійно оновлюється на основі даних, що надходять від реального аналога, що дозволяє моделювати, аналізувати та прогнозувати його поведінку в цифровому середовищі.

Такий підхід забезпечує можливість глибокого аналізу, оптимізації та тестування різних сценаріїв без необхідності проведення дорогих або ризикованих реальних експериментів. Створення цифрових двійників починається зі збору даних, які описують фізичні, хімічні та біологічні властивості об'єктів, зокрема харчових продуктів і мікробіоти. Використання сенсорних систем у режимі реального часу забезпечує безперервний обмін даними між фізичною системою та її цифровим відображенням.

Хоча цифрові двійники не є суто генеративними моделями, вони часто інтегрують синтетичні дані, отримані за допомогою генеративних моделей, зокрема GAN, або сценарного моделювання на основі трансформерів. Це дозволяє відтворювати рідкісні або малоймовірні події, які складно зафіксувати в реальних умовах.

У сільському господарстві та харчовій промисловості цифрові двійники можуть використовуватися для моделювання кризових ситуацій, наприклад порушень у ланцюгах постачання, спричинених природними катастрофами або іншими зовнішніми факторами. Це дозволяє заздалегідь оцінювати ризики та розробляти стратегії реагування.

Основною перевагою цифрових двійників є можливість тестування та оптимізації рішень у безпечному віртуальному середовищі. Водночас їхнє впровадження потребує високоякісних даних у режимі реального часу, а також значних зусиль для створення точних моделей. Додаткова інтеграція генеративного штучного інтелекту підвищує обчислювальне навантаження, що вимагає балансу між рівнем деталізації моделі та її продуктивністю.

9.3. Можливості генеративного ШІ в контексті агропродовольчого сектору

Генеративний штучний інтелект відкриває широкий спектр можливостей для вирішення різних завдань у агропродовольчому секторі. Його ключові властивості та функціональні характеристики є особливо актуальними для сільського господарства, харчового виробництва та логістики.

9.3.1. Генерація синтетичних даних

Однією з базових можливостей генеративних моделей є створення синтетичних даних за допомогою методів глибокого навчання. У контексті агропродовольчого сектору синтетичні дані являють собою машинно згенеровану інформацію, яка відтворює реальні сценарії сільськогосподарського виробництва, переробки та розподілу харчової продукції.

Це має особливе значення для агросфери, де збір даних часто ускладнений через віддаленість об'єктів, складність біологічних систем, обмеження конфіденційності, а також високу мінливість природних умов.

Серед основних підходів до генерації таких даних особливе місце займають генеративно-суперницькі мережі (GAN) та дифузійні моделі. GAN формують реалістичні дані через змагальне навчання між генератором і дискримінатором, тоді як дифузійні моделі навчаються шляхом поступового додавання шуму та відновлення вихідного розподілу даних, що дозволяє відтворювати складні та реалістичні сценарії.

У сільському господарстві синтетичні дані можуть використовуватися для моделювання росту культур у різних кліматичних умовах, поширення хвороб рослин або прогнозування стану тваринництва. Наприклад, у тваринництві такі моделі дозволяють імітувати поширення інфекційних захворювань, зокрема пташиного грипу, що дає змогу завчасно розробляти профілактичні заходи.

У харчовій промисловості синтетичні дані застосовуються для оптимізації рецептур, упаковки, технологічних процесів та логістики. У сфері безпечності харчових продуктів вони дозволяють прогнозувати ризики хімічного чи біологічного забруднення, розвиток мікробіологічних процесів, а також оцінювати якість і стійкість виробничих систем.

Крім того, генерація синтетичних даних сприяє виявленню фальсифікацій харчової продукції та підвищенню рівня контролю якості в агропродовольчих ланцюгах постачання.

9.3.2. Генерація контенту, орієнтованого на зміст

Генеративний ШІ також здатний створювати контент, орієнтований на конкретну тематику або предметну область. Такі системи навчаються генерувати нову інформацію в межах визначеної предметної сфери, забезпечуючи адаптацію до спеціалізованих завдань.

В агропродовольчому секторі це відкриває можливості для створення спеціалізованої інформації для аграріїв, розробки стратегій точного землеробства та формування індивідуалізованих раціонів для тваринництва.

Наприклад, генеративні моделі можуть створювати зображення шкідників або хвороб рослин, які складно ідентифікувати в реальних умовах, що сприяє ранньому виявленню та оперативному реагуванню.

У харчовому виробництві такі моделі можуть використовуватися для розробки нових харчових продуктів, оптимізації поживної цінності, адаптації рецептур під специфічні дієтичні вимоги, а також підвищення безпечності продукції.

Додатково генеративний ШІ може застосовуватися для створення навчальних матеріалів для фермерів і виробників харчової продукції, включаючи текстові та візуальні ресурси щодо сталих практик, нових технологій і ринкових тенденцій.

У маркетинговій сфері агропродовольчого сектору генеративні системи дозволяють створювати персоналізовані рекламні матеріали, генерувати реалістичні зображення продукції ще до її фізичного виробництва, а також прогнозувати споживчі тренди й формувати відповідний контент для майбутнього попиту.

9.3.3. Оцінювання та прийняття рішень

В агропродовольчому секторі важливою властивістю генеративних систем штучного інтелекту є їхня здатність оцінювати та вдосконалювати згенерований контент. Такий механізм самоперевірки дозволяє підвищити надійність результатів, що використовуються у процесах прийняття рішень у сільському господарстві та харчовому виробництві.

Завдяки внутрішнім механізмам оцінювання моделі можуть перевіряти згенеровані рекомендації, звіти та аналітичні матеріали на предмет узгодженості, точності та релевантності до поставленої задачі.

Це є критично важливим, оскільки результати роботи таких систем часто безпосередньо впливають на виробничі рішення.

Наприклад, система може формувати рекомендації щодо оптимальних стратегій висіву певної культури або умов харчової переробки продукції, одночасно перевіряючи власний вихід на логічну послідовність, мовну коректність, відповідність контексту та технічну обґрунтованість. Такий підхід знижує ризик помилкових або некоректних рекомендацій.

Крім того, здатність генеративних моделей до оцінювання якості контенту є важливою для створення освітніх ресурсів та навчальних матеріалів у агропродовольчій сфері. Це сприяє більш ефективній передачі знань фермерам, студентам аграрних спеціальностей та фахівцям харчової промисловості.

У сфері комунікацій і маркетингу такі моделі можуть забезпечувати створення текстів опису продукції, рекламних матеріалів та інформаційного контенту, одночасно перевіряючи їх на точність, інформативність і переконливість.

9.3.4. Прогнозна аналітика

Генеративні моделі можуть використовуватися для прогнозування майбутніх результатів в агропродовольчому секторі на основі великих обсягів різнорідних даних, включаючи супутникові знімки, сенсорні дані, генетичну інформацію та ринкові тенденції.

У рослинництві прогнозна аналітика дозволяє оцінювати майбутню врожайність, стан посівів та оптимальні терміни сівби і збору врожаю. Для цього аналізуються погодні умови, характеристики ґрунтів та історичні дані щодо врожайності культур.

У харчовій промисловості, зберіганні та логістиці прогнозні моделі допомагають оптимізувати закупівлі сировини, коригувати технологічні процеси, оцінювати залишковий термін придатності продукції, прогнозувати ризики безпечності харчових продуктів, а також підтримувати планування виробничих процесів.

На відміну від класичних методів машинного навчання, генеративні моделі мають додаткову перевагу у вигляді здатності до навчання на малих вибірках (few-shot learning) та роботи з даними поза межами розподілу навчальної вибірки. Це дозволяє їм робити обґрунтовані прогнози навіть за обмеженої кількості прикладів і адаптуватися до нових сценаріїв.

У сфері роздрібної торгівлі харчовою продукцією такі моделі можуть прогнозувати попит на різні товари, що допомагає ефективніше управляти запасами. Аналізуючи дані про споживчу

поведінку, вони здатні визначати періоди підвищеного попиту, наприклад під час свят або акційних кампаній.

У тваринництві генеративні моделі використовуються для прогнозування стану здоров'я тварин, темпів росту та результатів розведення, що дозволяє підвищити ефективність управління виробничими процесами.

9.3.5. Системи моніторингу та керування

Інтеграція генеративного штучного інтелекту в автоматизовані системи моніторингу та керування дозволяє суттєво підвищити ефективність управління процесами вирощування сільськогосподарських культур і утримання тварин.

У рослинництві такі системи використовують комплекс сенсорів, безпілотні літальні апарати та супутникові знімки для безперервного спостереження за станом агроценозів. Це включає контроль вологості ґрунту, рівня поживних речовин, а також оцінку стану рослин. Традиційні методи штучного інтелекту вже відіграють важливу роль у таких задачах, однак генеративні моделі розширюють їх можливості за рахунок здатності створювати синтетичні дані для моделювання різних сценаріїв розвитку агросистем.

Це дозволяє прогнозувати поведінку системи за умов, які ще не були спостережені в реальності, зокрема у випадках екстремальних погодних умов або змін агротехнічних режимів.

У тваринництві генеративні моделі, такі як варіаційні автокодери (Variational Autoencoders), можуть використовуватися для аналізу поведінки тварин на основі даних з носимих інерційних сенсорів. Завдяки генерації доповнених часових рядів підвищується якість класифікації поведінкових патернів і точність визначення стану здоров'я тварин навіть за умов обмеженого обсягу даних.

Генеративний ШІ також знаходить застосування у харчовій промисловості, зокрема в процесах переробки, зберігання та розподілу продукції. Тут він використовується для оптимізації технологічних процесів, підвищення рівня безпеки та контролю якості продукції.

Наприклад, автоматизовані системи можуть здійснювати моніторинг виробничих ліній на харчових підприємствах, виявляючи відхилення від встановлених параметрів якості та забезпечуючи оперативне коригування технологічних режимів у режимі реального часу.

Застосування генеративного ШІ в системах моніторингу та керування дозволяє масштабувати агропродовольчі операції до рівня великих розподілених систем. Такі рішення здатні одночасно керувати

різними виробничими об’єктами, враховуючи специфіку культур, порід тварин або типів продукції, а також адаптуватися до змінних умов навколишнього середовища.

9.4. Існуючі дослідження трансформації агропродовольчого сектору за допомогою генеративного ШІ

Сьогодні у світі спостерігається активний пошук інтелектуальних і «розумних» рішень для забезпечення продовольчої безпеки. Багато країн інвестують значні ресурси у розвиток агропродовольчих систем, прагнучи стати самодостатніми у виробництві харчових продуктів, забезпечити населення достатньою кількістю безпечної та якісної їжі, а також формувати експортний потенціал для отримання економічних вигод.

У межах цієї глобальної стратегії у 2023 році на конференції ООН з питань зміни клімату було підписано декларацію, до якої приєдналися 159 країн. Документ був спрямований на посилення продовольчої безпеки, розвиток сталого сільського господарства, покращення кліматичного менеджменту та формування стійких харчових систем. У рамках цієї ініціативи було також оголошено про наміри інвестувати понад 85,1 млрд доларів США у проєкти, пов’язані з адаптацією аграрного сектору до кліматичних викликів та впровадженням інноваційних технологій.

Розвиток генеративних моделей, зокрема великих мовних моделей, суттєво покращив можливості аналізу агрономічних даних, отриманих із сільськогосподарських угідь. Такі технології здатні ефективно обробляти різнорідні набори даних без необхідності тривалого попереднього навчання, включаючи метеорологічну інформацію, дані про поживність ґрунтів та якість водних ресурсів, що підтримує процеси прийняття аграрних рішень.

Цифровий агропродовольчий сектор розглядається як одна з ключових перспектив сучасного сільського господарства та харчового виробництва. Генеративний штучний інтелект може забезпечувати фермерів розширеною аналітичною інформацією щодо врожайності, якості продукції та оптимальних строків сівби, використовуючи синтетичні дані та прогнозні моделі, що враховують вибір насіння та сезонні варіації.

Великі мовні моделі

Застосування великих мовних моделей (LLM) в агропродовольчому секторі демонструє значний потенціал у сферах розробки харчових продуктів, організації виробництва та

агроконсультування. Їх ключова цінність полягає у підвищенні доступності знань та підтримці процесів прийняття рішень у складних аграрних системах.

Окрему групу застосувань становлять аграрні чат-боти та системи питання–відповідь. Такі системи можуть надавати фермерам практичні рекомендації щодо вирощування культур, захисту рослин та управління агротехнологічними процесами. У багатьох випадках вони забезпечують високу якість відповідей і можуть частково замінювати традиційні консультаційні служби. Водночас їх ефективність знижується при вирішенні складних агрономічних задач, що потребують високої точності, таких як визначення строків сівби, норм внесення добрив або специфічних технологічних операцій.

Важливим напрямом є також інтеграція LLM із базами знань і графами знань для підвищення ефективності аграрного інформаційного пошуку. Це дозволяє формувати більш точні, структуровані та контекстно релевантні відповіді, що сприяє покращенню якості управлінських рішень у сільському господарстві.

У ширшому контексті LLM розглядаються як інструмент демократизації доступу до аграрних знань. Вони можуть надавати персоналізовані рекомендації з урахуванням локальних умов, що є особливо важливим для фермерів у регіонах з обмеженим доступом до традиційних консультаційних сервісів. Водночас ефективність таких систем суттєво залежить від якості та релевантності навчальних даних, а також від рівня цифрової інфраструктури.

Окремі прикладні реалізації демонструють використання LLM у системах підтримки фермерів, де моделі застосовуються для оцінювання ризиків, дотримання нормативних вимог та адаптації рекомендацій до регіональних умов ведення сільського господарства.

Крім того, LLM можуть застосовуватися для симуляції поведінки фермерів та ринкових реакцій, що дозволяє тестувати аграрну політику та прогнозувати наслідки управлінських рішень до їх практичного впровадження.

Загалом великі мовні моделі відкривають нові можливості для агропродовольчого сектору, поєднуючи функції аналітики, консультування та моделювання складних соціально-економічних і виробничих процесів.

Аналіз, симуляція та моделювання

Аналіз застосування генеративного штучного інтелекту в агропродовольчому секторі демонструє широкий спектр підходів до підвищення ефективності сільського господарства та харчового

виробництва через вдосконалене моделювання, симуляцію та аналітику. Основна увага в цих дослідженнях приділяється оптимізації використання ресурсів, зменшенню негативного впливу на довкілля та підвищенню продуктивності агросистем.

Важливим напрямом є розробка технологій для зниження викидів парникових газів у сільському господарстві. У цьому контексті розглядаються підходи до енергоефективного управління агровиробництвом, зокрема із застосуванням методів нечіткої логіки та нейронних мереж. Такі підходи спрямовані на зменшення викидів CO_2 та забезпечення сталого розвитку аграрного виробництва при мінімальному екологічному навантаженні.

Окрему увагу приділено системам керування мікрокліматом у теплицях. Сучасні підходи базуються на методах глибокого підкріплювального навчання, які дозволяють адаптивно регулювати умови вирощування рослин залежно від зовнішніх факторів. Такі системи здатні суттєво знижувати енергоспоживання, одночасно підтримуючи оптимальні умови для росту культур, зокрема томатів, і підвищуючи їх продуктивність.

У продовження теми мікрокліматичного контролю розглядаються методи точного прогнозування температурних режимів у тепличних умовах. Для цього використовуються як класичні статистичні методи регресії, так і ймовірнісні моделі машинного навчання, що забезпечують високу точність прогнозування температури. Водночас генеративні моделі, зокрема GAN, застосовуються для створення синтетичних наборів даних, що дозволяє покращити якість прогнозних моделей у випадках дефіциту або нестабільності реальних вимірювань.

Генерація синтетичних аграрних даних є окремим важливим напрямом досліджень. Використання варіаційних автокодерів та генеративно-суперницьких мереж дозволяє формувати високоякісні штучні набори даних для систем рекомендацій щодо вирощування культур. Це, у свою чергу, підвищує ефективність навчання моделей та покращує якість рішень у сфері управління агровиробництвом.

Синтетичні дані також активно застосовуються для покращення систем прогнозування та підтримки прийняття рішень у точному землеробстві. Їх використання дозволяє компенсувати нестачу реальних даних, характерну для багатьох аграрних задач, та підвищує стійкість моделей до змінних умов середовища.

Окремий напрям становлять дослідження у сфері генетичного поліпшення сільськогосподарських культур. Сучасні генеративні моделі дозволяють аналізувати великомасштабні фенотипічні та геномні дані, що сприяє відбору більш продуктивних і стійких

генотипів. Це підвищує ефективність селекційних процесів, зменшує витрати ресурсів та скорочує час виведення нових сортів.

У ширшому контексті розглядається трансформація продовольчих систем під впливом генеративного штучного інтелекту та великих даних. Такий підхід сприяє переходу від традиційної моделі «від ферми до столу» до більш орієнтованих на споживача та дані систем. Це включає використання цифрових технологій для створення стійких, безпечних та поживно збалансованих харчових систем, зокрема з урахуванням можливостей синтетичної біології та інтелектуального моделювання виробничих процесів.

Метавсесвіт та доповнена реальність

Дослідження ролі метавсесвіту в агропродовольчому секторі зосереджені на підвищенні операційної ефективності, вдосконаленні управління рослинництвом та посиленні практик сталого розвитку. Концепція аграрного метавсесвіту (AgriVerse) представляє собою новий етап інтеграції віртуальних і реальних процесів у сільському господарстві.

У межах таких систем генеративний штучний інтелект виконує ключову роль, забезпечуючи створення високореалістичних віртуальних середовищ. Вони використовуються для навчання, планування сценаріїв та підтримки прийняття рішень аграріями та агрономами. Завдяки цьому стає можливим моделювання різних умов ведення сільського господарства у цифровому середовищі без ризиків для реальних виробничих процесів.

Такі віртуальні середовища дозволяють тестувати різні стратегії управління посівами, оцінювати їх ефективність та прогнозувати результати, включаючи динаміку росту рослин або поширення хвороб. Синтетичні дані, що генеруються в межах цих систем, можуть використовуватися для побудови моделей розвитку агроекосистем і підвищення точності прогнозування.

Важливими компонентами аграрного метавсесвіту є цифрові платформи прийняття рішень, які інтегрують дані сенсорних систем і прогнозні моделі, а також децентралізовані підходи до організації аграрних досліджень і обміну знаннями. Це сприяє демократизації доступу до аграрної інформації та підсилює колаборацію між науковцями, виробниками та технологічними компаніями.

Доповнена реальність (AR) та змішані реальності також активно досліджуються як інструменти для трансформації навчальних і виробничих процесів у сільському господарстві. Вони знаходять застосування у підготовці фахівців, підвищенні ефективності операційних процедур, а також у сферах простежуваності харчових

продуктів, оцінки раціонів харчування та контролю безпечності продукції.

Генеративний ШІ суттєво підсилює можливості AR/VR-систем завдяки створенню реалістичних симуляцій та прогнозних моделей. Це дозволяє підвищити якість навчання та ефективність практичних рішень у виробничих умовах.

У контексті забезпечення простежуваності харчових продуктів розглядається інтеграція метавсесвітніх технологій із системами розподіленого реєстру, що забезпечують надійне збереження даних про виробничі та логістичні процеси. Такий підхід підвищує прозорість і довіру до агропродовольчих ланцюгів постачання.

Загалом еволюція аграрних технологій від традиційних підходів до сучасних цифрових систем демонструє поступовий перехід до високорівневої інтеграції віртуальних середовищ, сенсорних мереж та інтелектуальних алгоритмів. Генеративний ШІ у цьому контексті виступає ключовим інструментом, що забезпечує створення реалістичних симуляцій, підтримку прийняття рішень та формування нових моделей взаємодії між учасниками агропродовольчої системи.

Робототехніка

Робототехнічні технології значно трансформували сучасне сільське господарство, охоплюючи як базові польові операції, так і складні автономні системи прийняття рішень. Якщо початкові етапи розвитку аграрної робототехніки були зосереджені переважно на механічних задачах, таких як сівба та збирання врожаю, то сучасні системи дедалі частіше інтегрують елементи штучного інтелекту, що забезпечують поєднання сенсорики, аналітики та виконавчих механізмів.

Інтеграція генеративного ШІ в робототехнічні системи дозволяє значно розширити їх функціональні можливості. Зокрема, такі моделі використовуються для моделювання різних сценаріїв роботи роботів у польових умовах, оптимізації траєкторій руху, а також генерації синтетичних даних для навчання автономних систем. Це сприяє підвищенню точності та адаптивності роботизованих рішень у змінних умовах агровиробництва.

Сучасні агророботи все частіше базуються на поєднанні експертних систем, сенсорних технологій та методів штучного інтелекту. Для цього застосовуються підходи, що включають нечітку логіку, нейронні мережі та еволюційні алгоритми, які забезпечують комплексну підтримку всіх етапів агровиробничого циклу - від обробітку ґрунту до збору врожаю.

Такий розвиток відображає перехід від трудомістких процесів до високотехнологічних автоматизованих систем, що підвищують продуктивність і зменшують залежність від ручної праці. У концепції «Агро 5.0» робототехніка та генеративний ШІ розглядаються як інтегровані компоненти інтелектуального та сталого сільського господарства.

Окрему увагу приділено використанню роботів для навігації у польових умовах та виконання операцій з догляду за рослинами. Застосування методів глибокого навчання та інших алгоритмів штучного інтелекту дозволяє підвищити точність таких операцій, як обприскування, ідентифікація рослин та локалізація шкідників.

Ці технології не лише підвищують ефективність виробництва, але й сприяють екологічній стійкості завдяки зменшенню використання пестицидів і більш точному розподілу ресурсів. Розробка мобільних роботизованих платформ із маніпуляторами також демонструє можливості автоматизації складних завдань, таких як збирання плодів і робота в складних польових умовах.

У харчовій промисловості робототехніка використовується для автоматизації процесів пакування, різання та сортування продукції. Роботи виконують повторювані та фізично складні операції з високим рівнем точності, дотриманням гігієнічних вимог та стандартів безпеки.

Водночас у цій сфері існують суттєві виклики, пов’язані з необхідністю відтворення складних сенсорних взаємодій людини, таких як зір, дотик і слух, особливо при роботі з делікатними харчовими продуктами. Генеративний ШІ може частково вирішувати ці проблеми шляхом моделювання людоподібної поведінки, створення навчальних даних для роботизованих систем та оптимізації рухів роботів у режимі реального часу на основі багатосценарного навчання.

Цифрові двійники

У цьому підрозділі розглядається, як технології цифрових двійників у поєднанні з генеративним штучним інтелектом трансформують традиційні аграрні практики у високоефективні, керовані даними системи управління.

Цифрові двійники являють собою віртуальні відображення фізичних об’єктів або процесів, які постійно оновлюються на основі даних, що надходять у режимі реального часу. У сільському господарстві це дозволяє створювати інтегровані системи моніторингу та керування, що охоплюють різні виробничі процеси.

Одним із прикладів є застосування цифрових двійників в інтелектуальному рибництві. Такі системи базуються на концепції

AIoT, де сенсори та виконавчі пристрої, вбудовані у виробниче обладнання, забезпечують безперервний збір та передачу даних для дистанційного та оперативного моніторингу. У межах таких рішень реалізуються ключові функції, зокрема автоматизоване годування, оцінка виробничих показників, моніторинг навколишнього середовища та контроль стану здоров'я біологічних об'єктів. Інтеграція моделей штучного інтелекту дозволяє підвищити точність прогнозування, оптимізації та аналітики, що в результаті покращує ефективність виробництва та економічні показники.

Генеративний ШІ значно розширює можливості цифрових двійників завдяки здатності створювати синтетичні дані, моделювати альтернативні сценарії розвитку подій та підтримувати прогнозну аналітику. Це дозволяє тестувати різні варіанти управління агросистемами без впливу на реальні виробничі процеси.

Іншим важливим напрямом є інтеграція цифрових двійників із генеративними моделями для підвищення ефективності та сталості агропродовольчих систем. У таких системах забезпечується безперервна взаємодія між фізичними об'єктами та їх цифровими аналогами через двонаправлений обмін даними.

У харчових системах це передбачає збір детальної інформації про фізичні, хімічні та мікробіологічні властивості продукції, а також використання сенсорних технологій для забезпечення актуальності даних у режимі реального часу. Такий підхід дозволяє створювати точні цифрові моделі виробничих процесів і продуктів харчування.

У поєднанні з генеративними та прогнозними моделями, зокрема трансформерами та дифузійними моделями, цифрові двійники можуть використовуватися для моделювання фізичних систем, оптимізації точного землеробства, управління ресурсами та моніторингу обладнання.

Завдяки двонаправленому обміну даними між фізичним і цифровим середовищем забезпечується можливість адаптивного управління аграрними процесами. Це дозволяє коригувати реальні виробничі сценарії на основі результатів цифрового моделювання, що суттєво підвищує якість прийняття рішень у агропродовольчому секторі.

Комп'ютерний зір та генерація зображень

Інтеграція технологій комп'ютерного зору відіграє дедалі важливішу роль у трансформації аграрного та харчового секторів. Сучасні системи візуального аналізу дозволяють підвищити ефективність моніторингу стану посівів, управління шкідниками та

оптимізації виробничих процесів за допомогою різноманітних методів обробки зображень, включаючи гіперспектральну зйомку та 3D-сканування.

Використання генеративних моделей у цьому контексті дозволяє більш точно аналізувати стан ґрунтів, визначати потребу в поживних речовинах, а також прогнозувати оптимальні строки та способи сівби. Це сприяє підвищенню точності агротехнічних рішень і ефективнішому використанню ресурсів.

Одним із важливих напрямів є застосування гіперспектрального зображення, яке забезпечує отримання детальної спектральної інформації про поверхню Землі. У поєднанні з інтерактивними інструментами візуалізації ця технологія дозволяє здійснювати високоточний моніторинг стану рослин і навколишнього середовища, що є важливим для сталого розвитку сільського господарства.

Для вирішення задач сегментації рослинних об'єктів та оцінки біомаси застосовуються комбіновані підходи, що поєднують генеративні моделі (зокрема GAN) і архітектури сегментаційних нейронних мереж. Такі системи дозволяють отримувати точні фенотипічні дані, які є критично важливими для селекції культур та генетичних досліджень.

Застосування комп'ютерного зору виходить за межі рослинництва і активно використовується в тваринництві та харчовій промисловості. Наприклад, у свинарстві розробляються системи автоматизованого сортування та моніторингу тварин, які використовують алгоритми машинного навчання для ідентифікації особин, оцінки ваги та виявлення ознак захворювань за візуальними характеристиками. Додаткове використання генеративних моделей для покращення якості зображень підвищує точність розпізнавання в умовах складного освітлення або часткової оклюзії.

Дослідження у сфері тепличного господарства підтверджують ефективність глибокого навчання для задач моніторингу росту рослин, виявлення шкідників і оцінки врожайності. Водночас зазначається низка викликів, зокрема адаптивність моделей до різних умов середовища, обмежена кількість розмічених даних, обчислювальні ресурси та необхідність інтеграції мультисенсорних систем.

У задачах збирання врожаю особливо важливими є системи машинного зору, здатні працювати в складних умовах із високим рівнем візуального шуму. На ефективність таких систем суттєво впливають умови зйомки, включаючи кут огляду камери та освітлення, що прямо визначає точність виявлення об'єктів у тепличному середовищі.

Комп'ютерний зір також активно застосовується в садівництві та системах контролю бур'янів. У цих задачах використовуються різні типи візуальних даних, включаючи 2D-зображення, відео, гіперспектральні дані та 3D-точкові хмари. Вони забезпечують можливість моніторингу росту рослин, виявлення захворювань, оцінки якості та врожайності, а також автоматизації процесів збирання.

Однією з ключових проблем є недостатня кількість якісних навчальних наборів даних. Для її вирішення застосовуються підходи на основі генерації синтетичних зображень, включаючи використання генеративних моделей для створення штучних варіантів рослинних об'єктів. Дослідження показують, що комбінування реальних і синтетичних даних може забезпечити порівнянну або навіть покращену якість виявлення та сегментації об'єктів. При цьому використання змішаних наборів даних сприяє підвищенню точності оцінки біомаси та інших агрономічних параметрів.

Також розглядаються підходи до виявлення хвороб плодових дерев за допомогою моделей щільнісної оцінки та мультиспектральних сенсорів. Підвищення точності таких систем можливе за рахунок інтеграції часових моделей і методів видалення фону, що дозволяє покращити стабільність і надійність діагностики у складних умовах.

9.5. Потенційні сценарії використання генеративного ШІ в агропродовольчому секторі

Попередні розділи продемонстрували, що генеративний штучний інтелект уже активно застосовується в різних підсистемах агропродовольчої галузі. У цьому розділі розглядаються додаткові перспективні напрями, де такі технології можуть суттєво підвищити ефективність виробничих і управлінських процесів.

9.5.1. Проєктування харчових продуктів і технологічних процесів

Застосування генеративного ШІ у проєктуванні харчових продуктів швидко розвивається та поступово трансформує традиційні підходи до харчового виробництва. Сучасні генеративні моделі дозволяють враховувати складність харчових систем, а також зростаючі вимоги споживачів до якості, персоналізації та сталості продукції.

Одним із ключових напрямів є інверсійне проєктування харчових продуктів, коли на основі заданих вимог (рецептур, технологічних обмежень, харчової цінності або баз даних інгредієнтів) формуються нові рецептури та харчові формули. Це дозволяє автоматизувати

процес створення нових продуктів із заданими властивостями та оптимізувати їх склад.

Іншим важливим трендом є розвиток технологій адитивного виробництва харчових продуктів (3D-друк їжі). У цьому напрямі досліджуються альтернативні джерела білка, зокрема рослинні, мікробні, грибні, водоростеві та комахові білки, які характеризуються високою поживною цінністю та функціональними властивостями. Такі підходи дозволяють створювати персоналізовані харчові рішення та розширювати можливості функціонального харчування.

У перспективі генеративний ШІ може суттєво змінити процеси дизайну харчових продуктів завдяки створенню персоналізованих, стійких і інноваційних рішень. Великі мовні моделі можуть аналізувати великі масиви даних про харчування та здоров'я людини для формування індивідуалізованих дієтичних рекомендацій з урахуванням медичних показників, способу життя та смакових уподобань.

Глибокі генеративні моделі здатні проєктувати нові рецептури та харчові продукти, які відтворюють смакові та текстурні характеристики традиційних продуктів із використанням більш сталих джерел сировини, включаючи рослинні або лабораторно отримані інгредієнти.

Багатомодальні моделі дозволяють поєднувати дані з різних джерел, зокрема сенсорного аналізу, споживчих відгуків і ринкових тенденцій, для оптимізації смаку, текстури та загальної споживчої привабливості нових продуктів. Це забезпечує більш швидке реагування харчової промисловості на зміну споживчих уподобань і ринкових умов.

Окрему роль відіграють дифузійні моделі, які можуть моделювати поступові зміни властивостей інгредієнтів у процесі приготування їжі, що дозволяє тонко налаштовувати органолептичні характеристики, зокрема інтенсивність смаку та текстурні властивості.

Інтелектуальні агентні системи можуть бути використані для зменшення харчових відходів шляхом оптимізації виробничих і логістичних процесів. Вони здатні прогнозувати терміни придатності продукції та адаптивно коригувати виробничі плани відповідно до реального попиту, що дозволяє мінімізувати надлишки продукції.

Крім того, генеративний ШІ може застосовуватися для оцінювання екологічного впливу різних варіантів виробництва харчових продуктів. За допомогою симуляційних моделей на основі глибокого навчання можна аналізувати вуглецевий слід, споживання водних ресурсів та загальний екологічний вплив виробничих процесів.

Це підтримує прийняття обґрунтованих рішень щодо впровадження більш сталих технологій у харчовій промисловості.

9.5.2. Боротьба зі зміною клімату

Сільськогосподарське виробництво у всьому світі дедалі більше зазнає впливу змін клімату, що створює серйозні виклики для продовольчої безпеки, стабільності агросистем та економічної стійкості. У цьому контексті концепція кліматично розумного сільського господарства (Climate-Smart Agriculture, CSA) спрямована на трансформацію агропродовольчих систем у більш сталий та кліматостійкий формат.

Підходи CSA передбачають підвищення адаптивності агровиробництва до змінних кліматичних умов, зниження вразливості систем та оптимізацію використання природних ресурсів. Серед ключових напрямів розвитку виділяють удосконалення структури посівів, інтеграцію цифрових метеорологічних сервісів та розширення механізмів аграрного страхування, що дозволяє зменшити ризики, пов'язані з погодними коливаннями.

Оцінювання впливу кліматичних змін на сільське господарство базується на аналізі вразливості агросистем, включаючи їхню чутливість, рівень експозиції та адаптаційні можливості. Такий підхід дозволяє визначати найбільш уразливі регіони та формувати ефективні стратегії адаптації до кліматичних ризиків.

Генеративний штучний інтелект може відігравати трансформаційну роль у реалізації підходів CSA. Зокрема, мультиагентні системи штучного інтелекту дозволяють покращити прогнозування кліматичних змін та аграрної продуктивності шляхом поєднання різних моделей аналізу даних. Це сприяє більш точному плануванню агротехнічних заходів і підвищує готовність до екстремальних погодних умов.

Глибокі генеративні моделі можуть використовуватися для симуляції різних кліматичних сценаріїв та оцінювання їхнього впливу на аграрне виробництво. Це дозволяє розробляти більш стійкі агротехнологічні практики, здатні адаптуватися до змінних погодних умов, включаючи екстремальні явища та довгострокові кліматичні тренди.

Окремий напрям становить підтримка цифрових технологій у сільському господарстві, зокрема систем збору та аналізу даних у реальному часі. Інтеграція таких рішень забезпечує оперативне реагування на кліматичні зміни та підвищує ефективність адаптаційних стратегій.

Додатково поєднання технологій блокчейн і генеративного ШІ дозволяє підвищити прозорість і відстежуваність кліматичних ініціатив. Використання розподілених реєстрів забезпечує надійне зберігання даних щодо кліматичних умов, стану посівів і використання ресурсів, що сприяє більш відповідальному управлінню екологічними процесами.

Цифрові двійники також відіграють важливу роль у моделюванні кліматичної адаптації. Вони дозволяють симулювати вплив кліматичних факторів на врожайність, водоспоживання та доступність ресурсів, забезпечуючи підтримку прийняття рішень у складних і невизначених умовах.

9.5.3. Сталість харчових систем

Стійкість агропродовольчих систем є одним із ключових викликів сучасного сільського господарства, що потребує інтеграції біотехнологій, цифрових технологій та методів штучного інтелекту. У цьому контексті важливим напрямом є поєднання біотехнологічних рішень і штучного інтелекту для підвищення ефективності та екологічної збалансованості харчового виробництва.

Інтеграція сучасних підходів дозволяє оптимізувати процеси виробництва харчової продукції, підвищувати врожайність та покращувати стійкість агросистем до зовнішніх впливів. Особливу увагу приділяють використанню інтелектуальних систем для раннього виявлення хвороб рослин, оцінки стану посівів та підвищення ефективності використання ресурсів.

Водночас впровадження таких технологій супроводжується низкою викликів, зокрема високими початковими інвестиціями, необхідністю розвитку цифрової інфраструктури, питаннями захисту даних та потребою у підготовці кваліфікованого персоналу для роботи з інтелектуальними системами.

У перспективі генеративний штучний інтелект може суттєво розширити можливості забезпечення сталості харчових систем. Зокрема, мультиагентні аналітичні системи можуть використовуватися для прогнозування неврожаїв, спалахів шкідників і дефіциту поживних речовин, що дозволяє своєчасно впроваджувати коригувальні агротехнічні заходи.

Роботизовані системи, інтегровані з генеративним ШІ, можуть автоматично реалізовувати такі втручання у виробничі процеси, зменшуючи втрати ресурсів та підвищуючи ефективність агровиробництва. Це сприяє переходу до більш точного та автоматизованого управління агросистемами.

Окремим напрямом є використання генеративного дизайну для створення нових сортів рослин, стійких до стресових факторів навколишнього середовища, таких як посуха, підвищені температури або засолення ґрунтів. Це відкриває можливості для довгострокового підвищення стійкості аграрного виробництва.

Симуляційні моделі на основі штучного інтелекту дозволяють оцінювати довгострокову екологічну та економічну сталість різних агротехнологічних практик. Такі моделі забезпечують підтримку прийняття рішень для фермерів і політиків шляхом прогнозування наслідків застосування різних стратегій ведення сільського господарства.

У сфері безпечності харчових продуктів генеративні моделі можуть використовуватися для прогнозування ризиків забруднення та виявлення потенційних загроз у режимі реального часу. Аналіз історичних даних дозволяє виявляти закономірності, пов'язані з виникненням забруднень, і формувати превентивні заходи для запобігання їх поширенню, що забезпечує відповідність харчової продукції стандартам безпеки.

9.5.4. Моделювання та прогнозування захворювань

Моделювання та прогнозування інфекційних захворювань є критично важливим напрямом для забезпечення безпеки харчових систем і громадського здоров'я. Особливу увагу приділяють зоонозним та харчовим інфекціям, які становлять значну частку нових інфекційних загроз і можуть передаватися між тваринами та людьми.

Сучасні підходи базуються на використанні інтелектуальних систем аналізу даних для виявлення закономірностей поширення патогенів, оцінки факторів ризику та прогнозування епідемічних процесів. Такі моделі дозволяють краще розуміти динаміку поширення захворювань та підтримують прийняття рішень у сфері ветеринарного і громадського здоров'я.

Окремі системи підтримки прийняття рішень використовуються для прогнозування спалахів, зокрема у випадку пташиного грипу, на різних просторових рівнях. Це дозволяє підвищити рівень ситуаційної обізнаності та забезпечити своєчасне реагування з боку відповідних служб для стримування поширення інфекцій.

Генеративний штучний інтелект суттєво розширює можливості моделювання та прогнозування захворювань. Зокрема, генеративні моделі можуть створювати синтетичні набори даних для рідкісних або нових зоонозних захворювань, де обсяг реальних спостережень є

обмеженим. Це дозволяє підвищити якість навчання моделей і покращити точність прогнозів.

Методи навчання з підкріпленням можуть використовуватися для симуляції різних стратегій втручання у випадку спалахів захворювань, що дозволяє оцінювати ефективність потенційних заходів контролю та профілактики. Такий підхід сприяє більш обґрунтованому плануванню заходів громадського здоров'я.

Технології перенесення навчання дозволяють швидко адаптувати моделі до нових патогенів, використовуючи знання, отримані на основі подібних захворювань. Це є особливо важливим у випадках появи нових інфекцій, коли критично важлива швидкість реагування.

Трансформерні архітектури можуть застосовуватися для інтеграції та аналізу геномних, епідеміологічних та клінічних даних, що підвищує точність виявлення та прогнозування поширення інфекцій. Поєднання різних типів даних у мульти-модальних системах дозволяє отримати більш повне уявлення про механізми передачі захворювань та фактори ризику.

Крім того, моделі штучного інтелекту можуть використовуватися для довгострокового прогнозування впливу зоонозних захворювань з урахуванням кліматичних змін і особливостей взаємодії людини з навколишнім середовищем. Це забезпечує основу для стратегічного планування ресурсів та підготовки систем охорони здоров'я до потенційних майбутніх епідемічних викликів.

9.5.5. Оптимізація ланцюгів постачання та простежуваність

Оптимізація ланцюгів постачання в агропродовольчому секторі є критично важливою для забезпечення ефективного руху продукції від виробника до кінцевого споживача. Використання генеративних алгоритмів дозволяє аналізувати великі обсяги різнорідних даних, включаючи обсяги виробництва, погодні умови, ринковий попит і логістичні параметри, з метою прогнозування можливих збоїв у ланцюгах постачання.

Такі системи здатні завчасно виявляти потенційні «вузькі місця» або дефіцити ресурсів, що дозволяє учасникам ринку оперативно коригувати виробничі та логістичні процеси. Наприклад, генеративний ШІ може оптимізувати графіки збирання врожаю та маршрути транспортування з урахуванням даних у реальному часі, що скорочує час доставки продукції та зменшує втрати.

Окремим важливим напрямом є забезпечення простежуваності харчових продуктів. Генеративні моделі можуть фіксувати та відтворювати повний життєвий цикл продукції - від виробництва до

споживання, включаючи інформацію про походження, партії, умови вирощування та обробки.

Інтеграція генеративного ШІ з технологіями блокчейн та IoT-пристроями дозволяє створювати прозорі та надійні системи відстеження, де кожен продукт може бути простежений до конкретного джерела виробництва. Це суттєво підвищує рівень безпеки харчових продуктів і довіру споживачів.

Додатково методи змагального машинного навчання можуть використовуватися для виявлення вразливостей у даних агропродовольчих систем, що підвищує стійкість і безпеку цифрової інфраструктури ланцюгів постачання.

Подальший розвиток цього напряму пов'язаний із використанням цифрових двійників ланцюгів постачання. Такі моделі дозволяють симулювати та оптимізувати логістичні процеси у віртуальному середовищі, що сприяє більш ефективному управлінню ресурсами, зниженню витрат і мінімізації екологічного впливу.

Інтеграція даних із різних джерел, таких як IoT-сенсори, RFID-мітки та ринкові інформаційні системи, забезпечує формування комплексного уявлення про стан ланцюгів постачання. Це підвищує точність систем простежуваності та дозволяє краще контролювати якість і безпечність продукції на всіх етапах її руху.

Крім того, генеративні моделі можуть використовуватися для симуляції різних сценаріїв функціонування ланцюгів постачання, включаючи різкі коливання попиту або перебої в постачанні. Це дозволяє завчасно оцінювати стійкість системи та розробляти ефективні стратегії реагування на кризові ситуації.

9.5.6. Новітні технології

Розвиток новітніх технологій відкриває принципово нові можливості для трансформації агропродовольчого сектору, зокрема через появу штучного загального інтелекту (AGI) та квантових обчислень, які можуть суттєво розширити межі застосування генеративного штучного інтелекту.

Штучний загальний інтелект (AGI) розглядається як наступний етап еволюції ШІ-систем, здатний до універсального навчання, розуміння та виконання широкого спектра завдань, подібно до людського інтелекту. У контексті аграрної сфери AGI потенційно може забезпечити інтегроване управління складними агросистемами, що включають рослинництво, тваринництво та харчове виробництво.

Такі системи здатні аналізувати надвеликі обсяги даних, включаючи геномні та феномні характеристики, параметри

навколишнього середовища, а також дані в режимі реального часу з фермерських господарств. Це дозволяє формувати комплексні рішення для управління агровиробництвом, підвищуючи його ефективність та стійкість.

AGI може суттєво покращити процес прийняття рішень у сільському господарстві шляхом одночасного аналізу різнорідних даних, таких як погодні умови, стан ґрунтів, показники здоров'я рослин, ринкові тенденції, а також параметри харчового виробництва, включаючи стан обладнання, умови переробки та зберігання продукції. Це створює основу для формування більш точних і комплексних прогнозів на рівні експертного або навіть надекспертного аналізу.

Квантові обчислення є ще одним перспективним напрямом, який здатний радикально змінити обчислювальні можливості штучного інтелекту. Завдяки здатності обробляти складні багатовимірні задачі з високою швидкістю, квантові технології можуть значно підвищити ефективність генеративних моделей у аграрному секторі.

Інтеграція квантових обчислень із генеративним ШІ дозволяє одночасно моделювати велику кількість сценаріїв, наприклад, для оптимізації строків сівби з урахуванням багатьох змінних, включаючи погодні умови, тип ґрунту та доступність ресурсів. Це сприяє підвищенню точності прогнозування врожайності та більш ефективному управлінню агровиробництвом.

У харчовій промисловості такі технології можуть використовуватися для моделювання впливу різних пакувальних матеріалів на термін зберігання продуктів, що дозволяє обирати найбільш екологічно та економічно ефективні рішення.

Крім того, поєднання квантових обчислень і генеративного ШІ має значний потенціал у сфері сталого розвитку. Воно дозволяє моделювати кліматичні сценарії та оцінювати їхній вплив на сільськогосподарське виробництво, а також формувати стратегії, спрямовані на мінімізацію вуглецевого сліду, оптимізацію використання водних і поживних ресурсів.

Можливі перспективи генеративного ШІ в агропродовольчому секторі. Кейс-стаді та реальні впровадження генеративного ШІ в агропродовольчому секторі

Генеративний ШІ вже має низку практичних реалізацій у різних напрямах аграрної галузі - від генерації синтетичних даних до систем підтримки прийняття рішень і цифрових двійників.

Одним із поширених застосувань є використання генеративно-змагальних мереж для створення синтетичних зображень хвороб і шкідників рослин. Це дозволяє суттєво підвищити різноманітність навчальних наборів даних і покращити якість моделей комп'ютерного зору для виявлення аграрних загроз. Зокрема, синтетично згенеровані зображення шкідників можуть підвищувати точність розпізнавання та зменшувати залежність від обмежених реальних датасетів.

Промислові рішення також демонструють ефективність інтеграції інтелектуальних систем у сільське господарство. Наприклад, платформи на основі сенсорних мереж і прогнозних моделей дозволяють здійснювати моніторинг мікроклімату та зменшувати похибки прогнозування параметрів, таких як вологість ґрунту. Це сприяє більш точному управлінню ресурсами та підвищенню ефективності агровиробництва.

Великі мовні моделі також активно застосовуються у сфері аграрного консультування. Вони використовуються для підтримки фермерів у питаннях дотримання нормативних вимог, прийняття агротехнічних рішень та інтерпретації складної агрономічної інформації. Досвід впровадження таких систем показує, що вони можуть бути більш привабливими для користувачів порівняно з традиційними консультаційними підходами, хоча потребують подальшого вдосконалення через інтеграцію з експертними знаннями та зворотним зв'язком від агрономів.

Окремі дослідження також демонструють застосування мовних моделей у підтримці прогнозування ризиків захворювань рослин шляхом трансформації модельних результатів у зрозумілі рекомендації для користувачів. При цьому виявлено, що більш просунуті моделі здатні краще адаптувати стиль і зміст повідомлень до рівня ризику, формуючи більш контекстно-орієнтовані рекомендації, тоді як спрощені моделі забезпечують більш стандартизовані та лаконічні відповіді.

Водночас результати експертних оцінок підкреслюють, що такі системи потребують подальшого навчання на предметно-специфічних даних для підвищення точності та надійності. Це є критично важливим для їх ефективного використання у прийнятті рішень в агропродовольчому секторі, де помилки можуть мати суттєві економічні та екологічні наслідки.

Виклики оцінювання генеративного ШІ

Оцінювання систем генеративного штучного інтелекту в агропродовольчому секторі пов'язане з низкою специфічних

труднощів, які суттєво відрізняють їх від традиційних моделей машинного навчання з прогнозною спрямованістю. Якщо класичні моделі зазвичай оцінюються за допомогою стандартизованих метрик точності, то для генеративних моделей необхідно застосовувати багатовимірні підходи, що враховують якість, реалістичність, різноманітність і практичну корисність згенерованих результатів.

Однією з ключових проблем є відсутність об'єктивного еталону для оцінювання вихідних даних. Генеративні моделі, такі як генеративно-змагальні мережі та великі мовні моделі, створюють синтетичні зображення, тексти або симуляції, для яких часто не існує прямого «істинного» аналога. Традиційні метрики якості зображень не завжди відображають агрономічну релевантність результатів, наприклад, відповідність синтетичних даних реальним умовам вологості ґрунту чи стану рослин.

Додатковою складністю є висока варіативність агропродовольчих систем. Кліматичні умови, типи ґрунтів, агротехнології та регіональні особливості суттєво впливають на дані, що використовуються для навчання моделей. У результаті система, навчена на даних одного регіону, може демонструвати знижену ефективність при перенесенні на інші умови через відмінності у середовищі та відсутність узагальнювальної здатності.

Для вирішення цих проблем пропонується використання комплексних підходів до оцінювання генеративних моделей. По-перше, доцільним є поєднання кількісних метрик якості з експертною оцінкою результатів, що дозволяє враховувати як технічні характеристики, так і агрономічну доцільність згенерованих даних.

По-друге, важливим є підхід із залученням людини до процесу оцінювання (human-in-the-loop), де фахівці аграрної сфери, зокрема агрономи, науковці та політики, беруть участь у ітеративному тестуванні та валідації результатів моделей. Це підвищує надійність і практичну придатність систем генеративного ШІ.

По-третє, перспективним напрямом є створення спеціалізованих бенчмарків для агропродовольчої галузі, які враховують як предметні області (стан посівів, тваринництво, якість харчових продуктів), так і типи завдань (генерація синтетичних даних, виявлення аномалій у реальному часі). Такі стандартизовані набори дозволять більш об'єктивно порівнювати різні моделі та підвищити рівень відтворюваності результатів досліджень.

Виклики, інтеграції та бар'єри впровадження генеративного ШІ

Інтеграція генеративного штучного інтелекту в агропродовольчий сектор супроводжується низкою технічних, економічних і соціальних викликів, які необхідно враховувати для забезпечення його широкого впровадження та ефективного використання.

З технічної точки зору одним із ключових бар'єрів є висока обчислювальна складність навчання та експлуатації генеративних моделей. Це особливо актуально для задач синтезу даних, кліматичного моделювання та цифрових двійників, які потребують значних обчислювальних ресурсів, розвиненої хмарної інфраструктури та стабільних потоків даних у реальному часі. Для багатьох малих і середніх агропідприємств такі вимоги є обмежувальними.

Додатковою проблемою є дефіцит якісних, різноманітних і розмічених наборів даних. У сільському господарстві умови виробництва суттєво варіюються залежно від регіону, клімату та агротехнологій, що ускладнює формування універсальних датасетів. Це знижує здатність моделей до узагальнення та обмежує їхню ефективність у нових умовах.

Економічні бар'єри також відіграють важливу роль у стримуванні впровадження генеративного ШІ. Високі початкові витрати на обладнання, програмне забезпечення та залучення кваліфікованих фахівців можуть бути недоступними для багатьох фермерських господарств, особливо в регіонах із обмеженими фінансовими ресурсами. Крім того, економічна ефективність таких технологій у короткостроковій перспективі залишається невизначеною, особливо для дрібних виробників із низькими маржинальними доходами.

Попри потенційні переваги у вигляді підвищення врожайності, оптимізації ресурсів і зменшення втрат, довгострокові економічні вигоди від впровадження генеративного ШІ ще потребують додаткового підтвердження на практиці.

Соціальні аспекти також суттєво впливають на рівень впровадження технологій. Ефективне використання генеративного ШІ залежить від рівня цифрової грамотності, довіри користувачів і готовності до технологічних змін. Значна частина працівників аграрного сектору може не мати достатнього досвіду або підготовки для роботи з інтелектуальними системами, що ускладнює їх інтеграцію у виробничі процеси.

Без належних програм навчання та розробки інтуїтивно зрозумілих інтерфейсів існує ризик поглиблення цифрового розриву між високотехнологічними агропідприємствами та малими

господарствами з обмеженими ресурсами. Це може призвести до нерівномірного розвитку аграрного сектору.

Додатковим викликом є екологічний аспект використання генеративного ШІ. Високі енергетичні витрати на навчання та експлуатацію моделей можуть сприяти збільшенню вуглецевого сліду, що суперечить цілям сталого розвитку та кліматичної нейтральності.

Для подолання зазначених бар'єрів необхідна координація зусиль на рівні політиків, науковців і технологічних компаній. Важливим напрямом є розробка економічно доступних і масштабованих рішень, адаптованих до потреб аграрного сектору.

Серед перспективних підходів виділяються технології периферійних обчислень, децентралізовані архітектури ШІ та енергоефективне апаратне забезпечення, що дозволяє знизити обчислювальні витрати. Окрему увагу слід приділяти розвитку навчальних програм та систем підтримки прийняття рішень, орієнтованих на кінцевих користувачів, із підвищеною зручністю та доступністю.

9.6. Обмеження генеративного ШІ

Попри значний потенціал генеративного штучного інтелекту в агропродовольчому секторі, його практичне впровадження супроводжується низкою суттєвих обмежень, які необхідно враховувати для забезпечення надійності та ефективності таких систем.

- Високі вимоги до якості даних і навчання моделей. Точність прогнозів генеративного ШІ значною мірою залежить від якості вхідних даних та ефективності процесу навчання моделей. Використання неякісних або шумних даних може призводити до некоректних результатів. Наприклад, похибки в сенсорних вимірюваннях вологості ґрунту можуть спричиняти помилки в рекомендаціях щодо внесення добрив, що призводить до їх надлишкового або недостатнього застосування.
- Управління ризиками та вразливостями. Генеративні моделі можуть бути чутливими до різних ризиків, включаючи упередженість даних, змагальні (adversarial) атаки та непередбачувані побічні ефекти. У аграрному контексті це може мати серйозні наслідки, наприклад, у випадку атак на роботизовані системи, що керують польовими операціями, що потенційно може призвести до пошкодження посівів або обладнання.
- Проблеми впровадження та інтеграції. Інтеграція генеративного ШІ з існуючими інформаційними системами та технологічними процесами в аграрному виробництві та харчовій

промисловості часто є складною задачею. Багато застарілих систем, таких як контролери зрошення або системи управління виробництвом, можуть бути несумісними з сучасними AI-рішеннями без суттєвої модернізації. Це вимагає ретельного планування та адаптації до специфіки виробничих процесів.

- Оцінювання та тестування моделей. Надійне впровадження генеративних моделей потребує ретельного тестування на всіх етапах життєвого циклу - до, під час і після розгортання. Відсутність комплексної оцінки може призвести до критичних помилок, наприклад, неспроможності системи своєчасно виявити ризики псування продукції, що потенційно може спричинити порушення безпечності харчових продуктів.
- Недостатній рівень довіри до технологій. Серед фермерів і агровиробників часто спостерігається обмежена довіра до систем штучного інтелекту, особливо щодо точності та стабільності їхніх прогнозів. Формування довіри є критично важливим фактором для широкого впровадження генеративного ШІ. У разі непослідовних або неточних результатів користувачі можуть надавати перевагу традиційним методам ведення господарства.
- Проблеми обробки та передачі даних. Більшість сучасних генеративних AI-рішень базуються на хмарних обчисленнях, що дозволяє обробляти великі обсяги даних, але водночас може спричиняти затримки через передачу інформації між віддаленими аграрними об’єктами та центрами обробки даних. Це особливо критично для регіонів із слабкою інтернет-інфраструктурою, де затримки у передачі даних можуть негативно впливати на оперативність прийняття рішень.

Хоча генеративний ШІ відкриває значні можливості для агропродовольчого сектору, його ефективне використання потребує вирішення комплексних технічних, організаційних та соціальних обмежень.

Відповідальне використання та управління генеративним ШІ

Генеративний штучний інтелект, а також використання роботизованих систем і дронів, суттєво трансформують аграрне виробництво та харчову промисловість. Водночас впровадження цих технологій супроводжується новими викликами, пов’язаними з безпекою, сталим розвитком, організацією даних і розумінням технічних вимог.

Важливим аспектом є формування підходів до відповідального використання ШІ, які враховують не лише технологічну ефективність, а й соціальні та екологічні наслідки. Ключовим елементом у цьому

контексті є розробка систем довіри, що підтримують автономність фермерів і забезпечують контроль над прийняттям рішень, не витісняючи людину з процесу управління.

Окрему увагу слід приділяти питанням управління даними та їхньої власності. Необхідно формувати політики, які гарантують, що агровиробники зберігають контроль над своїми даними та отримують справедливі переваги від використання AI-рішень. Це є критичним для формування довіри та стимулювання впровадження інновацій.

Також важливим є соціальний вимір трансформацій. Зміни на ринку праці, спричинені автоматизацією та інтелектуальними системами, вимагають проактивних заходів щодо перекваліфікації та підвищення кваліфікації працівників аграрного сектору. Це дозволяє зменшити ризики витіснення робочої сили та забезпечити плавний перехід до нових моделей виробництва.

Окремим стратегічним завданням є забезпечення глобальної рівності доступу до технологій. Впровадження генеративного ШІ має сприяти скороченню цифрового розриву між різними соціально-економічними групами фермерів, забезпечуючи інклюзивний розвиток агропродовольчого сектору.

Важливим принципом є також залучення стейкхолдерів до процесу розробки та впровадження систем ШІ. Активна участь фермерів, працівників харчової промисловості та сільських громад дозволяє краще враховувати реальні потреби та підвищує прийнятність технологій у практичному використанні.

Упередженість і справедливість результатів

Ефективність генеративних моделей значною мірою залежить від якості та неупередженості даних, на яких вони навчаються. Використання викривлених або нерепрезентативних наборів даних може призводити до відтворення та навіть посилення існуючих упереджень.

Такі викривлення можуть мати суттєві наслідки в агропродовольчій сфері, впливаючи на точність прогнозів урожайності, стану тварин, розподілу ресурсів та прийняття управлінських рішень. У результаті це може призводити до економічних втрат, зниження продовольчої безпеки та нерівномірного розподілу ресурсів, особливо для малих і вразливих фермерських господарств.

Для мінімізації цих ризиків необхідно формувати різноманітні та репрезентативні набори даних, а також розробляти алгоритми, здатні виявляти та коригувати упередження. Це передбачає постійний моніторинг і аудит моделей на всіх етапах їх життєвого циклу.

Важливо також забезпечити комплексне тестування систем, оскільки упередження можуть виникати на різних етапах - від формування даних і налаштування параметрів до процесу оцінювання результатів. Систематичний аналіз дозволяє своєчасно виявляти та зменшувати такі викривлення.

Залучення кінцевих користувачів і зацікавлених сторін до процесу розробки є ключовим фактором забезпечення справедливості та адаптивності систем. Такий підхід дозволяє краще враховувати різноманітні потреби аграрного сектору та підвищує якість прийнятих рішень у реальних умовах.

Прозорість

У рішеннях на основі штучного інтелекту в агропродовольчому секторі прозорість є критичним фактором формування довіри між технологією та її користувачами. Особливо це стосується систем генеративного ШІ, які працюють із великими обсягами різнорідних даних і можуть ухвалювати складні багатокрокові рішення.

Дотримання нормативно-правових вимог щодо захисту даних є базовою умовою забезпечення прозорості. Регуляторні документи встановлюють вимоги до обробки, зберігання та використання персональних і виробничих даних, що особливо важливо для аграрного сектору, де дані часто мають чутливий характер.

Водночас генеративні моделі нерідко використовують дані з різних джерел, що може ускладнювати контроль за їх походженням та відповідністю нормативним вимогам. Це створює ризики недостатньої прозорості процесів обробки інформації та знижує рівень довіри з боку кінцевих користувачів.

Для подолання цього розриву необхідно впроваджувати механізми, які забезпечують чітке відстеження джерел даних, їх структури та способів обробки. Це включає документування всіх етапів роботи моделі, а також забезпечення відповідності процесів встановленим стандартам захисту даних.

У контексті агропродовольчих застосувань, наприклад при прогнозуванні врожайності, важливо забезпечити прозоре відображення того, які саме типи даних використовуються для формування прогнозів - супутникові знімки, історичні агрономічні дані чи метеорологічні спостереження. Такий підхід дозволяє користувачам краще розуміти логіку системи та оцінювати надійність отриманих результатів.

Залучення зацікавлених сторін до процесу розробки та впровадження систем також є важливим елементом забезпечення

прозорості, оскільки дозволяє враховувати практичні потреби користувачів і підвищує загальний рівень довіри до технологій.

Пояснюваність

Пояснюваність є ключовою етичною вимогою до впровадження систем штучного інтелекту в агропродовольчій сфері, оскільки вона забезпечує зрозумілість методів, моделей і даних, що використовуються для прийняття рішень.

Сучасні генеративні моделі часто мають складну внутрішню структуру, що ускладнює інтерпретацію їхніх результатів. Це створює потребу у використанні підходів Explainable AI, які дозволяють зробити процес прийняття рішень більш прозорим для користувачів.

Методи пояснюваного штучного інтелекту дозволяють аналізувати внесок окремих факторів у кінцевий результат моделі та надавати користувачам зрозуміле обґрунтування отриманих рекомендацій. Це є особливо важливим у сільському господарстві, де рішення безпосередньо впливають на врожайність, якість продукції та економічні результати.

Впровадження таких підходів дозволяє підвищити рівень довіри до систем ШІ та сприяє їх більш ефективному використанню в практичних умовах. Це також забезпечує можливість критичного аналізу результатів і виявлення потенційних помилок у моделюванні.

Наприклад, при визначенні оптимальних строків сівби для конкретних культур пояснювані моделі дозволяють зрозуміти, як саме такі фактори, як тип ґрунту, погодні умови та сорт культури, впливають на фінальну рекомендацію. Це робить процес прийняття рішень більш обґрунтованим і зрозумілим для агровиробників.

Конфіденційність і безпека

Питання конфіденційності є особливо критичними при використанні генеративного штучного інтелекту в агропродовольчому секторі через чутливий і часто комерційно цінний характер даних. Такі системи можуть оперувати детальною інформацією про технології вирощування культур, врожайність, стан ґрунтів та здоров’я тварин, що вимагає надійного захисту від несанкціонованого доступу та витоку даних.

Існує ризик, що дані, які використовуються для навчання моделей, можуть бути скомпрометовані або неправомірно використані, що здатне призвести до втрати конкурентних переваг агровиробників або порушення конфіденційності виробничих процесів. Тому впровадження ефективних механізмів захисту даних є обов’язковою умовою безпечного використання таких технологій.

Для підвищення рівня конфіденційності застосовуються спеціалізовані підходи, зокрема методи диференційної приватності та федеративного навчання, які дозволяють аналізувати дані без розкриття індивідуальної інформації. Це забезпечує можливість отримання узагальнених аналітичних висновків без доступу до персоналізованих даних окремих господарств.

Додатковими заходами захисту є шифрування даних як під час передачі, так і при зберіганні, а також впровадження багаторівневих систем контролю доступу. Такі підходи дозволяють мінімізувати ризики витоку інформації та несанкціонованого використання даних.

Безпека генеративних AI-систем є не менш важливою, особливо з огляду на їх інтеграцію у критично важливі процеси агровиробництва та харчової промисловості. Потенційні кібератаки можуть призвести до порушення систем управління, викривлення рішень щодо вирощування культур або збоїв у логістичних ланцюгах.

Тому необхідно забезпечувати комплексний підхід до безпеки, який охоплює весь життєвий цикл даних і моделей - від збору та обробки до розгортання і експлуатації. Особливу увагу слід приділяти захисту від змагальних атак, які спрямовані на введення моделей в оману або викривлення їхніх результатів.

Оскільки сучасні агросистеми часто включають мережу взаємопов'язаних пристроїв - від польових сенсорів до хмарних аналітичних платформ - необхідним є комплексний підхід до кібербезпеки. Він має включати як цифровий, так і фізичний захист інфраструктури, а також враховувати людський фактор.

Важливим елементом є навчання персоналу основам кібербезпеки, що дозволяє зменшити ризики, пов'язані з людськими помилками. Регулярний аудит безпекових систем, оновлення захисних механізмів та міжгалузева співпраця є ключовими умовами забезпечення стійкості агропродовольчих систем, що використовують генеративний ШІ.

Надійність і стійкість

Надійність і стійкість є фундаментальними характеристиками генеративних моделей, які використовуються в агропродовольчому секторі. Умови сільськогосподарського виробництва є динамічними та часто непередбачуваними, тому системи штучного інтелекту повинні забезпечувати стабільну роботу навіть за умов варіативних і складних вхідних даних.

Стійкі моделі здатні коректно обробляти різні типи вхідних даних і не втрачати точність при появі нових або нетипових сценаріїв. Це є особливо важливим для таких завдань, як моніторинг стану посівів,

прогнозування хвороб рослин або оцінка продуктивності тваринництва.

Для підвищення стійкості застосовуються спеціальні методи навчання, резервування компонентів систем і механізми відмовостійкості, які дозволяють продовжувати роботу навіть у разі часткових збоїв або втрати даних.

Ключовим етапом є також комплексне тестування моделей у наближених до реальних умов середовищах. Це включає моделювання крайніх сценаріїв, нестандартних ситуацій та потенційних збоїв системи, що дозволяє оцінити її поведінку в умовах невизначеності.

Наприклад, у задачах прогнозування хвороб рослин стійка система повинна зберігати здатність до виявлення ранніх ознак захворювань навіть за умов змін клімату, варіацій агротехнологій або неповних даних.

Залучення кінцевих користувачів до процесу розробки та тестування є важливим інструментом підвищення надійності моделей, оскільки дозволяє враховувати реальні умови експлуатації та адаптувати системи до практичних потреб аграрного сектору.

Висновки

Узагальнюючи наведений матеріал, слід підкреслити, що штучний інтелект, і зокрема генеративні моделі, поступово стають одним із ключових інструментів трансформації рослинницької галузі в напрямі точного, даноорієнтованого та ресурсоефективного землеробства.

У рослинництві такі технології забезпечують якісно новий рівень аналізу агроекосистем завдяки інтеграції даних із різних джерел - супутникового моніторингу, ґрунтових сенсорів, метеорологічних спостережень, безпілотних систем і історичних агрономічних баз. Це дозволяє не лише оцінювати поточний стан посівів, але й формувати прогнозні сценарії розвитку культур з урахуванням кліматичних і технологічних факторів.

Особливо важливим є внесок генеративного ШІ у моделювання та симуляцію агрономічних процесів. Генеративні моделі здатні створювати синтетичні дані для рідкісних або недостатньо представлених сценаріїв, що підвищує стійкість систем прийняття рішень до невизначеності та сприяє більш точному плануванню агротехнологічних операцій. У поєднанні з комп'ютерним зором це забезпечує раннє виявлення хвороб, дефіциту поживних речовин та стресових факторів у рослин.

Разом із тим, подальший розвиток ШІ в рослинництві потребує подолання низки викликів, пов'язаних із якістю даних, адаптивністю моделей до регіональних умов, інтероперабельністю систем та рівнем цифрової зрілості аграрних підприємств. Не менш важливими залишаються питання довіри користувачів, прозорості алгоритмів та етичного використання технологій.

Таким чином, штучний інтелект у рослинницькій галузі слід розглядати як інструмент стратегічного розвитку агровиробництва, що поєднує підвищення продуктивності з принципами екологічної безпеки та сталого використання природних ресурсів. Його ефективне впровадження можливе лише за умови комплексного підходу, який включає технологічні інновації, підготовку кадрів та формування відповідної інфраструктури цифрового землеробства.

Питання для самоперевірки

1. Які основні завдання агрохімсервісу можуть бути автоматизовані або підтримані штучним інтелектом?
2. Як штучний інтелект може допомогти в аналізі родючості ґрунтів та формуванні рекомендацій щодо удобрення?
3. Які типи даних використовуються для навчання моделей ШІ в агрохімічному моніторингу (ґрунтові, супутникові, сенсорні тощо)?
4. У чому полягає різниця між класичними методами агрохімічного аналізу та підходами на основі машинного навчання?
5. Як генеративні моделі можуть використовуватись для моделювання сценаріїв живлення рослин?
6. Які переваги дає інтеграція даних дистанційного зондування з агрохімічними показниками через ШІ?
7. Як ШІ може сприяти оптимізації внесення мінеральних добрив у системах точного землеробства?
8. Які ризики можуть виникати при використанні ШІ для агрохімічних рекомендацій (помилки даних, упередженість моделей тощо)?
9. Чому важливо враховувати регіональні особливості ґрунтів при використанні моделей штучного інтелекту?
10. Як забезпечити достовірність і валідацію результатів, отриманих за допомогою ШІ в агрохімсервісі?
11. Яку роль можуть відігравати цифрові моделі ґрунту (soil digital twins) в агрохімічному моніторингу?
12. Як штучний інтелект може допомогти у прогнозуванні дефіциту елементів живлення у рослин?
13. Які переваги та обмеження використання синтетичних даних у агрохімічних дослідженнях?
14. Як забезпечити баланс між автоматизованими рекомендаціями ШІ та експертною оцінкою агрохіміка?
15. Які перспективи розвитку агрохімсервісу з використанням генеративного ШІ у найближчі 5–10 років?

РОЗДІЛ 10. ТРЕНДИ КІБЕРБЕЗПЕКИ ДЛЯ АГРАРНОЇ ГАЛУЗІ (ІНДУСТРІЯ 4.0 ТА 5.0)

10.1. Передумови створення систем кібербезпеки
10.2. Кібератаки в сільському господарстві та їх наслідки
10.3. Заходи кібербезпеки

10.1. Передумови створення систем кібербезпеки

Різні галузі сучасного світу характеризуються активним впровадженням цифрових технологій. Це явище описується як четверта промислова революція, або Індустрія 4.0, у межах якої відбувається цифрова трансформація виробничого середовища. Ключовою особливістю Індустрії 4.0 є широке застосування цифрових технологій, зокрема Інтернету речей, комунікаційних систем та галузевих стандартів, що забезпечують автоматизацію процесів і обмін даними в режимі реального часу. У результаті відбувається перехід від традиційних підходів до виробництва до більш ефективних, гнучких і керованих технологічних процесів.

Системи Agriculture 4.0 та 5.0

Одним із напрямів розвитку Індустрії 4.0 є концепція Agriculture 4.0, яка передбачає інтеграцію сучасних технологій, таких як Інтернет речей, штучний інтелект і великі масиви даних, у всі етапи сільськогосподарського виробництва (рис. 10.1).

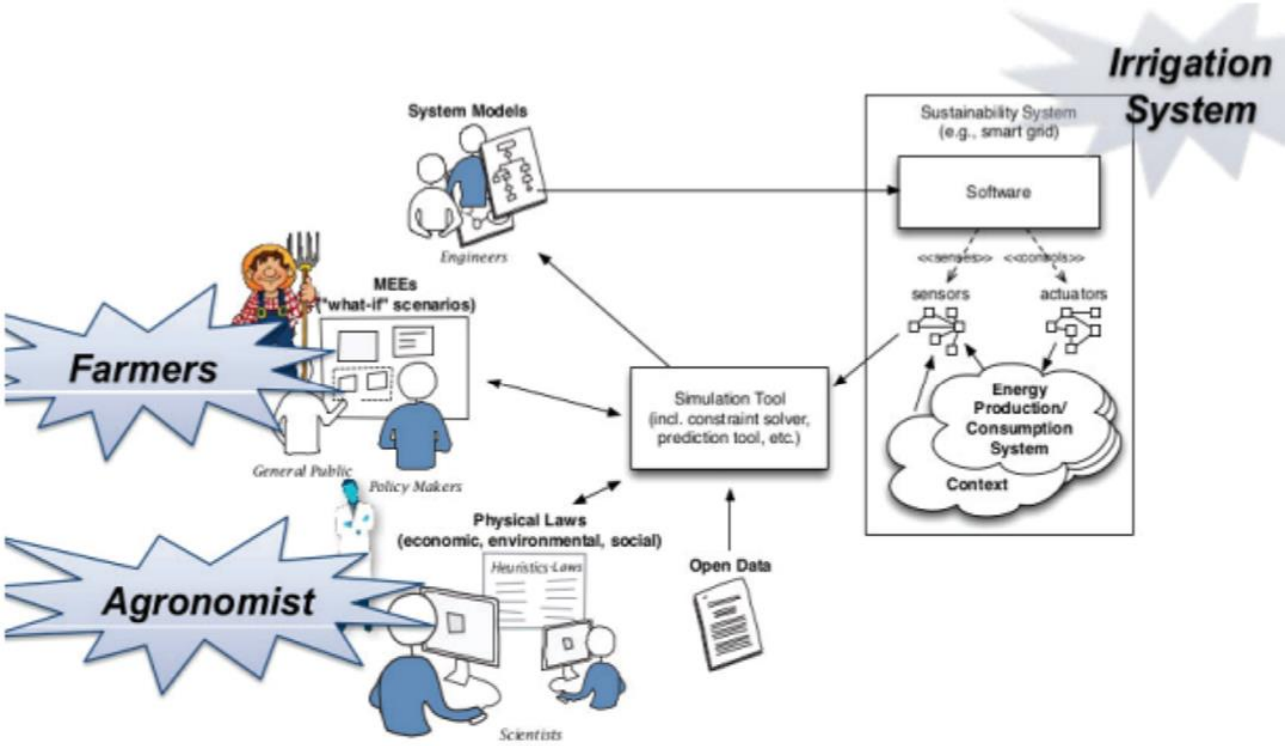


Рис. 10.1 Системна структура сільського господарства 4.0 та 5.0

Подальшим етапом розвитку є Agriculture 5.0, що орієнтована на створення інтелектуальних рішень, які дозволяють підвищувати продуктивність агровиробництва зі зменшеним впливом на довкілля, а також враховують соціальні та економічні аспекти функціонування продовольчих систем.

У сучасному аграрному середовищі ці підходи знаходять широке практичне застосування. Зокрема, активно розвивається точне землеробство, яке забезпечує раціональне використання добрив, засобів захисту рослин і водних ресурсів із урахуванням конкретних умов поля та фаз розвитку культур. Технології точного внесення добрив і зрошення базуються на інтеграції інформаційних систем у виробничі процеси, що дозволяє підвищити ефективність агровиробництва.

10.2. Кіберзагрози в системах Agriculture 4.0 та 5.0

Незважаючи на значний потенціал цифрових технологій у підвищенні ефективності агровиробництва, у межах концепцій Agriculture 4.0 та 5.0 виникає низка суттєвих викликів. Одним із ключових є проблема кібербезпеки, що супроводжує впровадження інформаційно-комунікаційних технологій у сільському господарстві. Використання цифрових платформ, сенсорних мереж і автоматизованих систем створює умови, за яких кіберзлочинці можуть здійснювати несанкціонований доступ до фінансових ресурсів, комерційної інформації, інтелектуальної власності та інших нематеріальних активів аграрних підприємств.

Окрім викрадення даних, кіберзагрози можуть безпосередньо впливати на функціонування «розумних» аграрних систем. Зокрема, втручання в роботу безпілотних літальних апаратів, що використовуються для обприскування посівів, або в системи дистанційного керування мікрокліматом (опаленням і охолодженням) може призводити до порушення технологічних процесів і значних виробничих втрат. Реальні приклади кібератак на великі агропромислові та суміжні компанії свідчать про зростання актуальності цієї проблеми на глобальному рівні.

Ситуація ускладнюється тим, що аграрні підприємства часто приділяють недостатню увагу інвестиціям у кібербезпеку. У результаті галузь стає привабливою ціллю для зловмисників, оскільки потенційна вигода від атак є високою, а рівень захищеності систем - відносно низьким. Це створює передумови для зростання кількості кіберінцидентів у сільському господарстві.

Збільшення кіберризиків у «розумному» землеробстві обумовлене низкою технологічних факторів. Одним із них є використання відкритих бездротових мереж для передачі даних, що спрощує можливість перехоплення інформації та несанкціонованого доступу. Додатковим фактором є широка доступність цифрових технологій і наявність численних точок доступу до систем, що розширює потенційну поверхню атак. Наприклад, дані з аграрних об'єктів можуть бути доступні як у польових умовах, так і дистанційно - з офісу або навіть із домашніх пристроїв.

Ще однією особливістю є обмежені обчислювальні можливості сенсорних пристроїв, які часто не підтримують складні механізми захисту, зокрема криптографічні методи. Крім того, використання віддаленого керування технологічними процесами, хоча й підвищує гнучкість і ефективність управління, водночас створює додаткові вразливості для зовнішнього втручання.

Наслідком зазначених факторів є підвищений ризик втрати даних і фінансових ресурсів, а також порушення конфіденційності інформації. Кіберзагрози можуть призводити до розкриття критично важливих даних, що негативно впливає на діяльність агропідприємств. У зв'язку з цим особливої актуальності набуває розроблення та впровадження комплексних підходів до забезпечення кібербезпеки в системах Agriculture 4.0 та 5.0, що дозволить підвищити надійність і стійкість сучасних цифрових агротехнологій.

Фактори, що підвищують кібербезпекові ризики в Agriculture 4.0 та 5.0

Аналіз сучасних досліджень свідчить, що кібербезпекові ризики в умовах розвитку Agriculture 4.0 та 5.0 формуються під впливом комплексу взаємопов'язаних чинників. Для системного розуміння ці ризики доцільно розглядати через три взаємодоповнюючі аспекти: архітектуру цифрових систем, класифікацію джерел ризиків та специфіку кіберзагроз у аграрному секторі. Архітектурний підхід дозволяє сформувати цілісне уявлення про структуру інтелектуальних агросистем і визначити вразливі точки на різних рівнях їх функціонування. Класифікаційний аспект охоплює групування джерел ризику, серед яких виділяють фізичну безпеку, вплив зовнішніх факторів, людський фактор та недоліки внутрішніх процесів. Третій аспект пов'язаний із конкретними видами кіберзагроз, які характерні саме для аграрних цифрових систем і відрізняються від загальноіндустріальних.

Структура (фреймворк). У контексті аналізу архітектури цифрових технологій у розумному землеробстві (рис. 10.2) визначено, що сучасні агросистеми базуються на багаторівневій структурі, яка включає фізичний рівень, рівень периферійних обчислень, прикладний рівень, сервісний рівень та мережеву інфраструктуру. Кожен із цих рівнів має власні функціональні особливості та відповідні вразливості, що створює передумови для реалізації кіберзагроз.

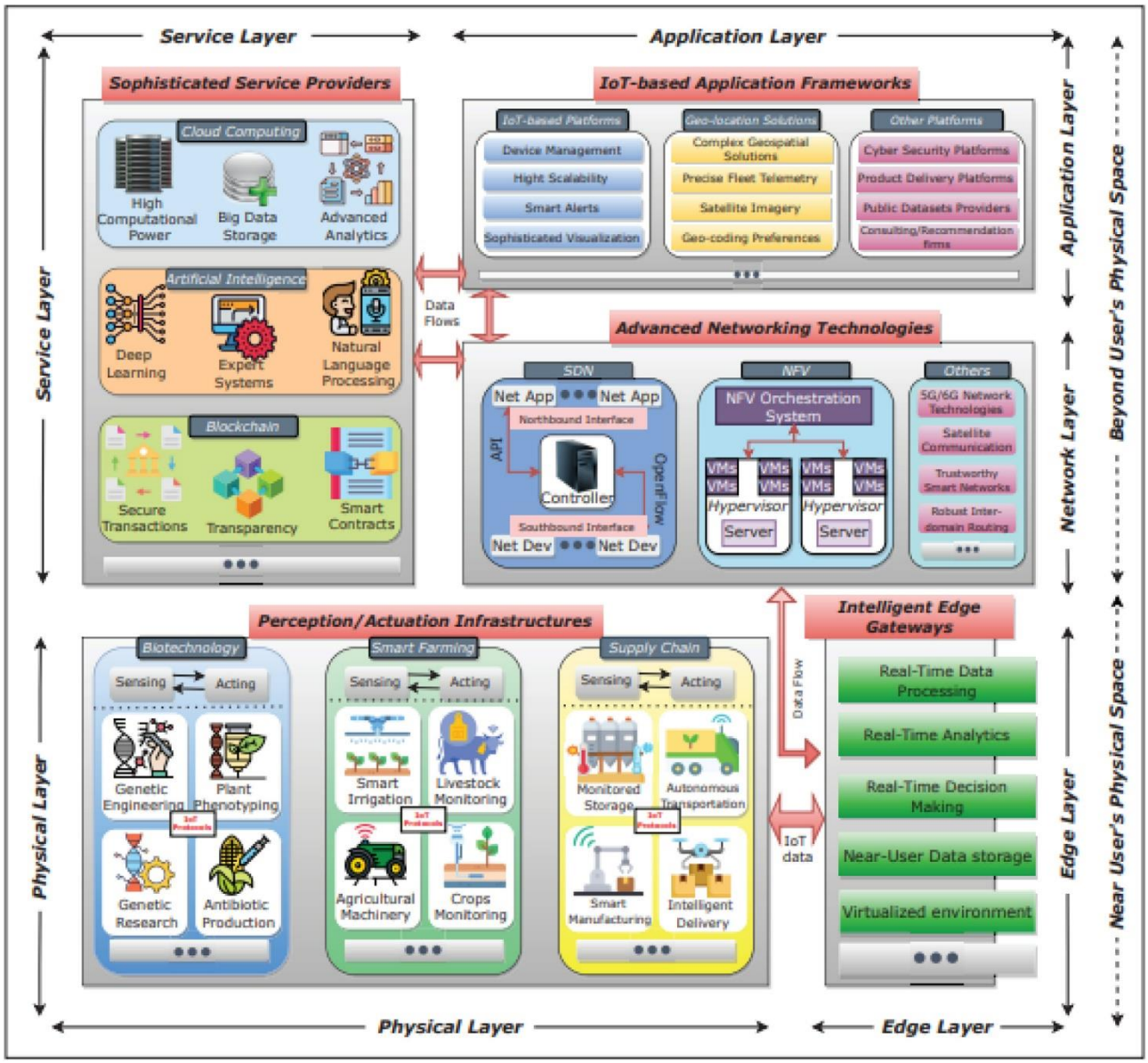


Рис. 10.2. Цифрова структура для розумної сільськогосподарської системи

Однією з ключових проблем є мережеві атаки, спрямовані на порушення зв'язності між пристроями Інтернету речей. У таких умовах можливе порушення роботи сенсорних систем, виконавчих механізмів і безпілотних платформ, що застосовуються для моніторингу стану посівів, оцінювання вологості ґрунту та внесення засобів захисту

рослин. Особливу небезпеку становить використання застарілих бездротових технологій і програмного забезпечення без своєчасного оновлення, що значно підвищує вразливість систем.

Пристрої Інтернету речей, які широко застосовуються в аграрному виробництві, характеризуються підвищеним рівнем кіберризику. Це зумовлено використанням прошивок без належного оновлення, а також застосуванням стандартних паролів, що спрощує несанкціонований доступ до мережі. Додатковим фактором ризику є обмежені обчислювальні ресурси таких пристроїв, які ускладнюють впровадження сучасних криптографічних методів захисту. Вразливості комунікаційних протоколів, недостатній рівень стандартизації вимог до безпеки, значна різноманітність пристроїв та використання недостатньо захищених бездротових протоколів також створюють сприятливі умови для здійснення кібератак.

Таким чином, сукупність технологічних обмежень, організаційних недоліків і особливостей функціонування IoT-інфраструктури в аграрному секторі формує підвищений рівень кіберзагроз. Це зумовлює необхідність комплексного підходу до забезпечення кібербезпеки, що охоплює всі рівні архітектури інтелектуальних агросистем.

Таксономія кіберзагроз

Одним із ключових чинників, що підвищують вразливість інтелектуальних агротехнологій до кібератак, є недосконаліть або відсутність внутрішніх процесів безпеки, зокрема механізмів контролю доступу до обладнання. У сучасних системах розумного землеробства значна кількість пристроїв має можливість віддаленого підключення, однак належний рівень автентифікації та авторизації користувачів часто не забезпечується. Це створює передумови для несанкціонованого втручання у функціонування технічних засобів.

Практичні приклади свідчать про реальність таких загроз. Зокрема, випадки несанкціонованого доступу до сільськогосподарської техніки демонструють, що за відсутності ефективного контролю доступу сторонні особи можуть змінювати програмне забезпечення обладнання, що не лише порушує його роботу, але й створює ризики для безпеки виробничих процесів. Подібні ситуації вказують на те, що частина цифрових агросистем проєктується без урахування сучасних вимог кіберзахисту.

Додаткову загрозу становлять вразливості бездротових мереж, які широко використовуються для обміну даними між польовими сенсорами, автономною технікою та центральними системами управління. Уразливості таких мереж можуть бути використані

зловмисниками для перехоплення або модифікації даних, а також для віддаленого керування обладнанням. Це особливо критично у періоди підвищеного навантаження, наприклад під час збирання врожаю, коли збої в роботі систем можуть призвести до значних економічних втрат.

Суттєвою проблемою залишається використання слабких механізмів автентифікації, зокрема стандартних паролів, які не змінюються після встановлення обладнання. Така практика значно спрощує доступ до систем для потенційних зловмисників і сприяє реалізації атак на рівні окремих пристроїв і всієї мережі господарства. До найбільш уразливих об'єктів належать інтелектуальна сільськогосподарська техніка, безпілотні літальні апарати, сенсорні системи моніторингу та інші елементи цифрової інфраструктури (рис. 10. 3).

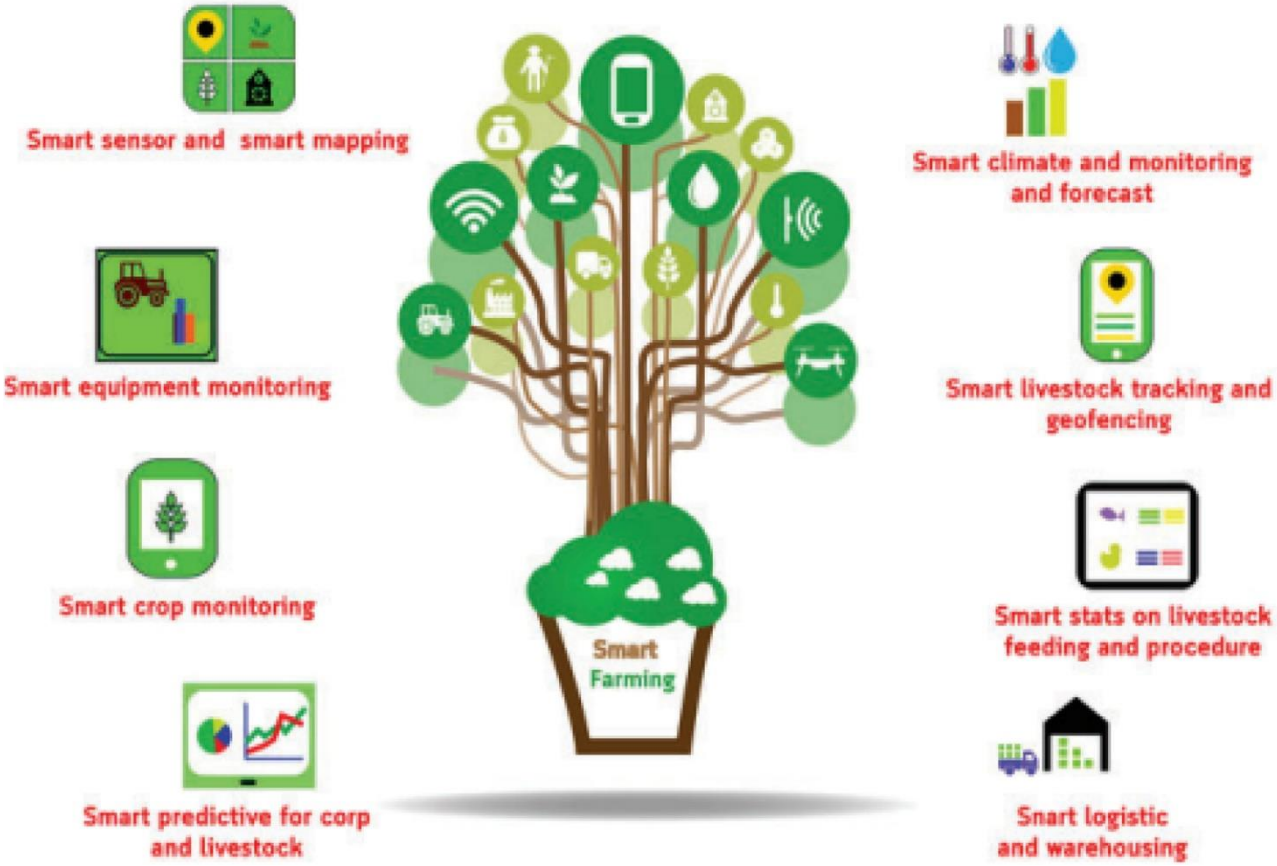


Рис. 10.3. Розумні пристрої, що використовуються в сільському господарстві 4.0 та 5.0

Узагальнення результатів досліджень свідчить, що однією з першопричин підвищених кіберризиків є недостатній рівень обізнаності користувачів щодо питань кібербезпеки. Відсутність належної підготовки фермерів і технічного персоналу призводить до використання застарілих або неефективних методів захисту, що, у свою чергу, робить системи розумного землеробства легкою мішенню для

атак. Таким чином, поряд із технологічними рішеннями, важливим елементом забезпечення кібербезпеки є підвищення рівня знань і формування практичних навичок безпечної експлуатації цифрових агросистем.

Фізична безпека

Відсутність належних механізмів фізичної безпеки є ще одним суттєвим чинником, що підвищує вразливість інтелектуальних агросистем до кібератак. Багато пристроїв, які використовуються у розумному землеробстві, можуть бути легко викрадені або піддані несанкціонованому втручанню, внаслідок чого зловмисники отримують можливість встановлювати шкідливе програмне забезпечення та змінювати їх функціонування.

Особливістю таких пристроїв є їх компактність і розміщення безпосередньо в польових умовах. Сенсори, безпілотні літальні апарати та інші елементи цифрової інфраструктури часто не оснащені засобами фізичного захисту, що робить їх доступними для стороннього впливу. У разі порушення цілісності пристрою зловмисники можуть модифікувати прошивку, впроваджувати шкідливі програми, отримувати доступ до зібраних даних та навіть здійснювати віддалене керування технічними засобами.

Додаткову проблему становить відсутність конструктивних елементів захисту, таких як антивандальні або герметизовані корпуси. У польових умовах пристрої піддаються не лише навмисним діям, але й випадковим пошкодженням, зокрема внаслідок контакту з сільськогосподарською технікою або впливу тварин. Такі пошкодження можуть призводити до втрати даних, їх спотворення або повної недоступності інформаційних потоків.

Зростання кіберризиків у сільському господарстві також пов’язане із активним впровадженням цифрових технологій управління, що базуються на широкому використанні інформаційно-комунікаційних технологій та Інтернету речей. У структурі таких систем виділяються різні рівні, які можуть бути об’єктами атак, що ілюструється на рисунку 10.4. Розвиток сучасного агровиробництва із залученням інтелектуальних комунікаційних рішень супроводжується появою нових вразливостей, пов’язаних із передачею та обробкою даних.

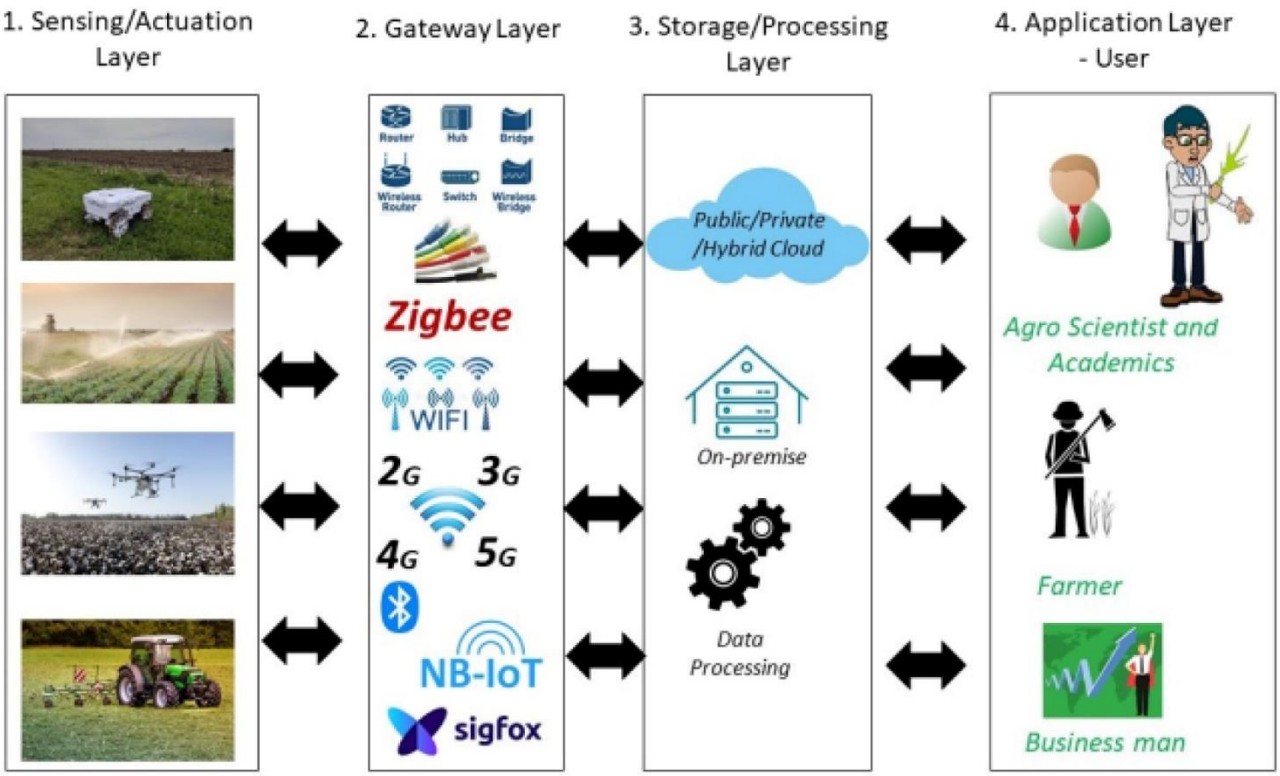


Рис. 10.4. Шари, що є ціллю атак на інтелектуальні сільськогосподарські системи

Інтенсивне використання комунікаційних технологій підвищує ризик несанкціонованого доступу до інформаційних ресурсів і систем управління. Чим більш інтегрованою та взаємопов'язаною є аграрна система, тим більше потенційних точок входу для кібератак вона містить. Аналогічно, широке застосування технологій обробки великих даних у сільському господарстві створює додаткові виклики, пов'язані із забезпеченням конфіденційності та захисту інформації.

Великі обсяги аграрних даних, що накопичуються у цифрових системах, становлять значну цінність і привертають увагу кіберзлочинців. Однією з найбільш поширених загроз є атаки типу програм-вимагачів, спрямовані на блокування доступу до баз даних із подальшим вимаганням викупу. Це свідчить про те, що інформаційні ресурси стають стратегічним активом у сучасному агровиробництві, а їх захист є критично важливим елементом забезпечення надійності функціонування інтелектуальних агросистем.

Людський фактор

Вагомим чинником зростання кіберризиків у сільському господарстві є людський фактор, який проявляється як у недостатньому рівні підготовки персоналу, так і в особливостях використання сучасних технологій. Активне впровадження пристроїв Інтернету

речей супроводжується збільшенням обсягів оброблюваної інформації, у тому числі чутливих даних, що підвищує привабливість таких систем для кіберзлочинців. При цьому багато пристроїв не мають достатнього рівня інформаційного захисту, що робить їх легкою мішенню для атак.

Однією з ключових проблем є дефіцит кваліфікованих фахівців у галузі кібербезпеки в аграрному секторі. Це призводить до надмірної залежності від автоматизованих систем управління, які, за відсутності належного супроводу та налаштування, стають вразливими до зовнішнього втручання. Такі системи можуть піддаватися маніпуляціям через шкідливе програмне забезпечення, що спричиняє порушення їх функціонування або витік даних.

Додатковим фактором є використання недостатньо ефективних засобів захисту. У багатьох випадках цифрові платформи, що застосовуються в аграрному виробництві, базуються на базових протоколах безпеки, які не здатні протистояти сучасним складним кібератакам. Відсутність або неправильне впровадження засобів захисту, а також нехтування стандартними заходами кібербезпеки суттєво підвищують рівень ризику.

Таким чином, людський фактор проявляється як у технічній необізнаності, так і в організаційних недоліках, що разом формують сприятливе середовище для реалізації кіберзагроз у системах розумного землеробства.

Зовнішні фактори

Окрему групу ризиків становлять зовнішні чинники, пов'язані з нормативно-правовим та економічним середовищем функціонування аграрних цифрових систем. Недостатній рівень регулювання у сфері кібербезпеки, зокрема відсутність чітких стандартів і вимог до захисту пристроїв Інтернету речей, ускладнює забезпечення належного рівня безпеки та сприяє поширенню вразливостей.

Попри зростання втрат, пов'язаних із кібератаками, не всі розробники технологій приділяють достатню увагу питанням кіберзахисту. Водночас частина аграрних підприємств, особливо невеликі господарства, усвідомлюють необхідність впровадження заходів безпеки, але стикаються з обмеженістю фінансових ресурсів і відсутністю чітких стратегій захисту.

Наявність суперечливих підходів до впровадження кібербезпеки свідчить про складність цієї проблеми та багатофакторний характер її формування. Сукупний вплив економічних обмежень, недостатнього нормативного забезпечення та різного рівня технологічної готовності

суб’єктів аграрного сектору зумовлює підвищення загального рівня кіберризиків у системах розумного землеробства.

Кіберзагрози: порівняння особливостей аграрного сектору та інших галузей

У контексті аналізу кіберзагроз важливим є врахування специфічних особливостей аграрного виробництва, які можуть як послаблювати, так і підсилювати ризики порівняно з іншими сферами застосування цифрових технологій.

Однією з таких особливостей є вплив погодних умов. У сільському господарстві пристрої Інтернету речей, зокрема сенсори вологості ґрунту або системи виявлення шкідників, функціонують у відкритому середовищі (рис. 6). Це означає, що вони постійно піддаються дії пилу, вологи, хімічних речовин та температурних коливань. У результаті можливі фізичні пошкодження або збої в роботі пристроїв, що знижує їхню надійність і створює додаткові передумови для виникнення кіберзагроз. Несправності сенсорів можуть призводити до некоректної передачі даних або втрати контролю над системами, що відкриває можливості для зловмисного втручання.

На відміну від аграрного сектору, в інших галузях, зокрема у сфері розумного будинку, більшість IoT-пристроїв експлуатується у захищених приміщеннях. Сенсори, що використовуються для керування побутовими приладами, освітленням чи кліматичними системами, мають значно менший вплив зовнішніх факторів, що підвищує їхню стабільність і зменшує ризик відмов. Таким чином, погодні умови виступають фактором, який суттєво підсилює кіберризики саме в аграрному середовищі.

Іншою важливою характеристикою є географічне охоплення систем. У сільському господарстві IoT-пристрої розгортаються на значних територіях, часто у віддалених і важкодоступних районах, що необхідно для повного моніторингу стану ґрунтів, рослин і тварин. Такий масштаб ускладнює не лише процес встановлення обладнання, але й його технічне обслуговування та забезпечення стабільного мережевого з’єднання.

У порівнянні з цим, у багатьох інших секторах цифрові системи функціонують у межах обмежених просторів, де несправності швидко виявляються та усуваються. У сільському господарстві ж значна площа розміщення пристроїв ускладнює оперативне виявлення проблем, оскільки для цього потрібні додаткові часові та ресурсні витрати.

Крім того, широке географічне розосередження обладнання підвищує ризики його викрадення або пошкодження, що пов’язано зі

складністю забезпечення фізичної безпеки. Також виникають проблеми із забезпеченням стабільного зв'язку між пристроями, що може призводити до втрати даних або затримок у їх передачі. У сукупності ці фактори підсилюють кіберзагрози в аграрному секторі, оскільки створюють додаткові вразливості, пов'язані як із фізичною інфраструктурою, так і з мережевими аспектами функціонування систем.

Кіберзагрози: порівняльні особливості апаратного та програмного забезпечення

Ще одним важливим аспектом, що визначає рівень кіберризиків у різних галузях, є особливості використовуваного апаратного та програмного забезпечення. У сільському господарстві широко застосовується обладнання та програмні рішення з тривалим терміном експлуатації, що часто пов'язано з високою вартістю їх заміни або модернізації. Розгортання IoT-пристроїв на великих територіях потребує значних інвестицій, тому оновлення таких систем відбувається повільно. У результаті значна частина інфраструктури функціонує на базі застарілих технологій, які не мають належного захисту від сучасних кіберзагроз.

На відміну від цього, в інших секторах, зокрема у сфері розумного будинку, кількість пристроїв є обмеженою, а їх заміна або оновлення не потребує значних витрат. Це дозволяє швидше впроваджувати нові технології та актуальні засоби кіберзахисту. Таким чином, використання застарілого обладнання та програмного забезпечення в аграрному секторі створює додаткові вразливості, які можуть бути використані зловмисниками.

Реактивність IoT-систем

Ще однією відмінною рисою є рівень реактивності та інтерактивності IoT-пристроїв. У багатьох сучасних галузях застосовуються інтелектуальні системи з можливістю голосового керування та автоматизованого реагування на дії користувача. Такі рішення забезпечують не лише зручність управління, але й додатковий рівень безпеки, зокрема через персоналізовану автентифікацію та централізований контроль підключених пристроїв.

У сільському господарстві більшість IoT-пристроїв не має подібних функцій оперативного реагування. У разі виникнення збоїв або підозрілої активності користувач змушений безпосередньо відвідувати місце встановлення обладнання для діагностики та

усунення проблем. Такий підхід знижує швидкість реагування на інциденти та ускладнює процес управління системами.

Обмежена реактивність і часткова автоматизація аграрних IoT-систем призводять до підвищення кіберризиків, оскільки збільшується час виявлення та локалізації загроз. У той час як у інших галузях проблеми можуть бути оперативно ідентифіковані та усунені дистанційно, в аграрному секторі затримки у реагуванні створюють додаткові можливості для реалізації кібератак.

10.3. Кібератаки в сільському господарстві та їх наслідки

Розгляд попереднього підрозділу показав, що вразливість систем Agriculture 4.0 та 5.0 до кіберзагроз зумовлюється низкою чинників, серед яких використання застарілих програмних рішень, недостатній рівень захисту інфраструктури та недосконалі практики кібербезпеки на рівні господарств. У цьому підрозділі увагу зосереджено на характеристиці основних типів кібератак, які виникають у системах розумного землеробства, а також їхніх наслідках для аграрного виробництва.

Структура розгляду базується на трьох взаємопов'язаних складових. Перша складова відображає архітектуру систем розумного землеробства та точного землеробства, у межах якої визначаються ключові компоненти, що можуть піддаватися кібератакам. Друга складова передбачає класифікацію об'єктів впливу, зокрема апаратного забезпечення, даних і програмного коду. Третя складова деталізує конкретні способи реалізації атак, включаючи застосування програм-вимагачів, витоки інформації та вплив на радіочастотні канали зв'язку.

Узагальнена схема кібератак у сільському господарстві враховує атаки на апаратні компоненти, мережеву інфраструктуру та технологічне обладнання. Окрему групу становлять атаки на дані, які передбачають несанкціонований доступ, зміну або знищення інформації, що використовується у процесах управління.

Важливим напрямом є атаки на програмний код і ланцюги постачання програмного забезпечення, що можуть призводити до впровадження шкідливих компонентів на етапі розроблення або оновлення систем. Також виділяються атаки, пов'язані зі зловживанням функціональними можливостями систем, коли легітимні інструменти використовуються з порушенням їх призначення, що призводить до дестабілізації роботи агротехнологічних процесів.

Таким чином, кібератаки в сучасному сільському господарстві охоплюють широкий спектр впливів на різні рівні цифрової інфраструктури, що зумовлює необхідність комплексного підходу до їх

аналізу та протидії з урахуванням специфіки функціонування інтелектуальних агросистем.

Таксономія цілей кібератак

Апаратне забезпечення

Кібератаки, спрямовані на апаратне забезпечення в системах Agriculture 4.0 та 5.0, пов'язані передусім із порушенням конфіденційності та цілісності інформації, що обробляється в кіберфізичних системах. Одним із характерних видів таких атак є атаки побічними каналами, які передбачають отримання несанкціонованого доступу до критично важливих даних шляхом аналізу фізичних параметрів функціонування пристроїв.

Сутність атак побічними каналами полягає у спостереженні за електричними сигналами, рівнями напруги, енергоспоживанням або іншими характеристиками роботи обладнання з метою отримання інформації про внутрішні процеси системи. Як показано на рисунку 10.5, такі атаки спрямовані на канали зв'язку та дозволяють зловмисникам вилучати чутливі дані, що передаються між окремими компонентами аграрної цифрової інфраструктури. У результаті порушується конфіденційність інформаційних потоків, зокрема даних, які передаються між сенсорами, вбудованими в сільськогосподарську техніку, та мережевими вузлами управління.

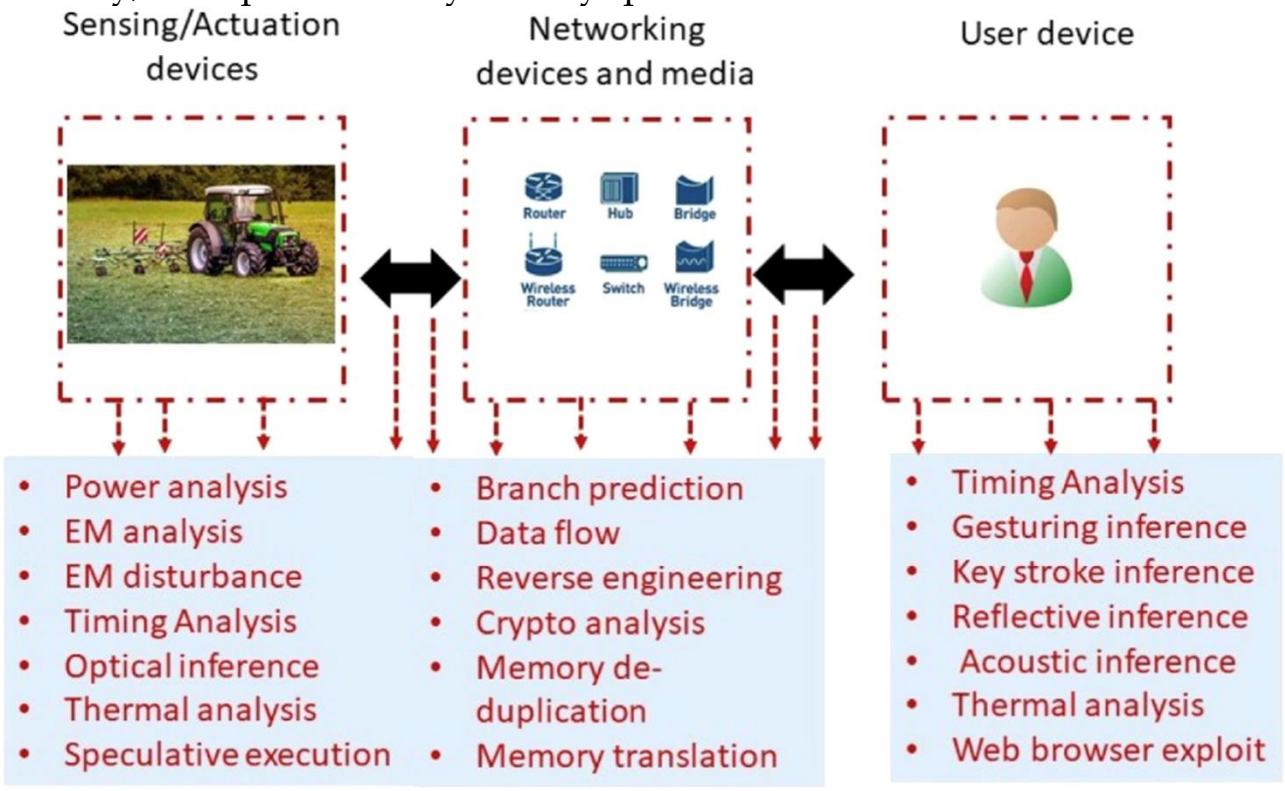


Рис. 10.5. Атака по сторонніх каналах у цифрових застосунках

Особливо небезпечним є те, що за допомогою аналізу витоків інформації, пов'язаних із фізичною реалізацією алгоритмів, зловмисники можуть відновлювати криптографічні ключі, які використовуються для захисту комунікацій. Це створює передумови для подальшого несанкціонованого доступу до систем та компрометації їх функціонування.

Іншим поширеним видом атак на апаратне забезпечення є глушіння радіочастотних сигналів. Такі атаки виникають унаслідок відкритої природи бездротових мереж і обмежених можливостей їх захисту від навмисного впливу. У процесі глушіння створюються перешкоди у радіочастотному діапазоні, що призводить до порушення передачі даних між пристроями.

Наслідком глушіння є втрата доступності систем, що є критичним для функціонування інтелектуальних агросистем. Зокрема, можуть виникати збої у роботі тепличних комплексів, систем моніторингу або автоматизованого керування технологічними процесами. Це призводить до зупинки виробничих операцій, втрати даних та зниження довіри до цифрових рішень з боку користувачів.

Мережі та обладнання

Кіберзлочинці також активно націлюють свої атаки на мережеву інфраструктуру та підключені пристрої, що є критично важливими компонентами систем розумного землеробства. Одним із найпоширеніших типів атак є атаки відмови в обслуговуванні (DoS), метою яких є блокування доступу користувачів до мережевих ресурсів, зокрема серверів, каналів зв'язку та сервісних платформ.

Більш складною формою таких атак є розподілені атаки відмови в обслуговуванні (DDoS), які здійснюються шляхом використання великої кількості скомпрометованих IoT-пристроїв як ботнету. У цьому випадку зловмисники експлуатують вразливості підключених пристроїв і використовують їх для одночасного генерування великого обсягу шкідливого трафіку, спрямованого на перевантаження цільових мереж. Окремим різновидом впливу є використання радіочастотного глушіння, яке також може ініціювати відмову в обслуговуванні шляхом блокування доступних спектрів зв'язку та порушення взаємодії між мережевими вузлами.

Основним наслідком DoS та DDoS атак є порушення доступності критично важливих сервісів у системах інтелектуального сільського господарства. Це включає неможливість отримання даних із серверів, відсутність зв'язку між пристроями та порушення функціонування автоматизованих процесів. У результаті знижується загальна надійність

аграрних цифрових систем, а легітимні користувачі втрачають доступ до необхідних ресурсів.

Ще одним важливим типом мережевих атак є атаки типу «людина посередині» (MITM). Їхня сутність полягає у перехопленні та модифікації даних, що передаються між пристроями через незахищені канали зв'язку. У таких умовах зловмисник може не лише отримувати доступ до конфіденційної інформації, але й повторно відтворювати або змінювати передані дані до моменту їх доставки до кінцевого отримувача.

Наслідком MITM атак є порушення як конфіденційності, так і цілісності інформації, що циркулює в аграрних системах. Використання спотворених або змінених даних призводить до прийняття некоректних управлінських рішень, зокрема щодо внесення ресурсів, контролю мікроклімату або управління технікою. Це безпосередньо впливає на ефективність і безпеку функціонування агровиробничих процесів.

Додаткову загрозу становлять атаки на хмарні обчислювальні середовища, які широко використовуються для зберігання та обробки даних у розумному сільському господарстві. У таких випадках зловмисники можуть отримувати несанкціонований доступ до хмарних ресурсів, використовувати обчислювальні потужності або змінювати конфігурації сервісів, що призводить до порушення нормального функціонування систем.

Атаки на дані

Окрема категорія кіберзагроз у системах розумного сільського господарства спрямована на дані, що зберігаються та передаються в межах кіберфізичної інфраструктури. Під час передавання інформації між комунікаційними пристроями виникає ризик її витоку, що створює серйозні загрози для конфіденційності та безпеки аграрних систем.

Зібрані на рівні господарства дані, такі як показники водного балансу, метеорологічні спостереження або характеристики стану ґрунту, передаються до серверів або інших сховищ для подальшої обробки. У разі несанкціонованого доступу до цих потоків інформації або їх витоку стороннім особам виникають ризики спотворення процесів прийняття рішень, а також неналежного використання критично важливої інформації.

Додатковою проблемою є можливість крадіжки аграрних даних із подальшим їх комерційним використанням або перепродажем. Це підсилює загрозу порушення конфіденційності та вимагає впровадження ефективних механізмів захисту інформаційних потоків і

сховищ даних. Окрім цього, атаки на збережені дані можуть впливати на властивість незаперечності інформації, коли виникають ситуації заперечення походження або автентичності даних, що ускладнює їх використання у процесах управління агровиробництвом.

Окрему групу загроз становлять атаки із застосуванням шкідливого програмного забезпечення, спрямовані на серверні системи зберігання даних. Зокрема, атаки типу програм-вимагачів призводять до блокування доступу до критично важливої інформації з подальшим вимаганням викупу за її відновлення. Такі інциденти мають не лише економічні наслідки для фермерських господарств, але й безпосередньо впливають на продовольчу безпеку, оскільки порушують цілісність і доступність даних, необхідних для управління виробничими процесами.

Крім того, загрози, пов’язані з використанням троянських програм та інших форм шкідливого коду, можуть призводити до несанкціонованої модифікації інформації. Це безпосередньо впливає на достовірність даних, які використовуються для прийняття рішень у сфері захисту рослин, внесення добрив або управління ресурсами.

Атаки на програмний код

Інша важлива категорія кібератак у розумному сільському господарстві пов’язана з впливом на програмне забезпечення та його кодову основу. У таких випадках зловмисники атакують процеси функціонування застосунків, зокрема механізми оновлення програмного забезпечення, що є критично важливими для підтримання безпеки систем.

Порушення процесу оновлення або впровадження шкідливого коду під час його виконання призводить до компрометації цілісності системи. У результаті можуть блокуватися або спотворюватися важливі оновлення безпеки, що створює умови для подальшої експлуатації вразливостей. У деяких випадках атакуючі використовують цей канал для впровадження шкідливих модифікацій, які забезпечують несанкціонований доступ до даних аграрних систем.

Окрему групу становлять атаки на ланцюги постачання програмного забезпечення, а також випадки зловживання фізичними та обчислювальними ресурсами інфраструктури. Такі атаки мають наслідки, подібні до інших видів кіберзлочинної діяльності, і можуть призводити до зміни або фальсифікації даних, що зберігаються в системах управління. Це, у свою чергу, підриває довіру до отриманої інформації та негативно впливає на прийняття агротехнічних рішень, що може мати наслідки для продовольчої безпеки.

Перехід від традиційного до цифрового сільського господарства потребує значних ресурсів, а кіберінциденти додатково збільшують фінансове навантаження на аграрний сектор. Підприємства змушені інвестувати у модернізацію систем захисту, оновлення програмного забезпечення та впровадження нових механізмів кібербезпеки, що формує довгострокові економічні витрати.

У ряді випадків кібератаки на безпілотні системи та інтелектуальну сільськогосподарську техніку призводять до значних фінансових втрат, особливо коли відбувається порушення їх функціонування або глушіння каналів зв'язку. Це безпосередньо впливає на економічну стабільність аграрних підприємств.

Ще одним суттєвим наслідком кібератак є зниження довіри до цифрових технологій у сільському господарстві. Після інцидентів, пов'язаних із вразливістю IoT-систем, частина фермерів повертається до традиційних методів ведення господарства, що уповільнює процес цифрової трансформації галузі. У випадках зараження шкідливим програмним забезпеченням також спостерігається втрата часу, ресурсів і продукції через порушення цілісності аграрних даних і систем управління.

Окремим наслідком кібератак є витік або втрата конфіденційної інформації, включаючи дані працівників і клієнтів аграрних компаній. Такі інциденти підривають приватність та безпеку зацікавлених сторін і можуть призводити до серйозних правових наслідків для організацій, включаючи регуляторні санкції та юридичні позови.

У відповідь на зростання кількості кіберінцидентів посилюються вимоги до стандартів захисту даних та впроваджуються нові моделі безпеки. Кібератаки також стимулюють розвиток досліджень у сфері кіберзахисту, сприяючи вдосконаленню методів виявлення вразливостей і побудові більш стійких систем.

10.4. Заходи кібербезпеки

Перший напрям досліджень у сфері кібербезпеки стосується заходів, спрямованих на захист систем розумного землеробства. Узагальнення наукових підходів свідчить, що такі заходи охоплюють різні рівні забезпечення безпеки, включаючи підвищення обізнаності користувачів, впровадження моделей і методологічних рамок для формування стратегій кіберзахисту, а також розробку індивідуальних практик безпеки, які можуть застосовуватися безпосередньо фермерами та працівниками аграрного сектору.

Обізнаність і навчання з кібербезпеки

Аналіз досліджень підкреслює критичну важливість навчання та підвищення обізнаності у сфері кібербезпеки як ключового інструменту зниження ризиків кібератак. Формування відповідних компетентностей у фермерів і працівників аграрних підприємств дозволяє суттєво зменшити ймовірність успішної реалізації атак, особливо тих, що використовують людський фактор.

У сучасних дослідженнях також наголошується, що проблеми кібербезпеки у віртуальних середовищах мають універсальний характер і проявляються у різних сферах застосування цифрових технологій, включаючи бізнес та сільське господарство. Загальною рисою таких загроз є експлуатація недостатнього рівня знань користувачів у сфері інформаційної безпеки, помилок людини, а також відсутності уніфікованих стандартів безпеки для цифрових середовищ. У цьому контексті підкреслюється, що подібні виклики актуальні як для метапросторів, так і для Системи розумного землеробства.

Загальний спектр кіберризиків у цифрових середовищах включає проблеми конфіденційності, захисту персональних даних, недостатню стандартизацію, людські помилки, а також юридичні та етичні аспекти використання цифрових технологій. Окремо виділяються проблеми сумісності різних систем, що ускладнює інтеграцію та безпечне функціонування цифрової інфраструктури.

У цьому контексті запропоновано багатокомпонентний підхід до кібербезпеки, який передбачає не лише технічні заходи захисту, але й системне навчання користувачів. Такий підхід включає інформування про потенційні загрози, формування навичок безпечної роботи з цифровими системами та підвищення рівня розуміння питань конфіденційності та захисту даних. Впровадження подібних стратегій у сільському господарстві дозволяє підвищити стійкість аграрних систем до кіберзагроз.

Водночас у дослідженнях відзначається наявність обмежень у впровадженні навчальних програм з кібербезпеки, особливо серед малих аграрних підприємств. Основними бар'єрами є нестача фінансових ресурсів, а також недооцінка ризиків, коли кіберзагрози сприймаються як проблема лише великих організацій. Такі установки негативно впливають на готовність до навчання та впровадження заходів кіберзахисту, що, у свою чергу, підвищує загальний рівень уразливості сектору.

Додатково наголошується на ефективності використання інноваційних методів навчання, зокрема ігрових підходів, для підвищення рівня кібербезпекової обізнаності. Такі методи дозволяють

краще засвоювати знання щодо безпечного використання програмного забезпечення та хмарних сервісів. Загалом кібербезпекове навчання є важливим як для користувачів організацій, так і для розробників програмних рішень, оскільки обидві групи мають усвідомлювати актуальні ризики та потенційні загрози.

Окремо відзначається, що поведінкові аспекти працівників суттєво впливають на рівень дотримання кібербезпеки в організаціях. При цьому спостерігаються відмінності у сприйнятті ризиків між різними віковими групами: більш досвідчені працівники зазвичай демонструють вищу обережність і стійкість до кіберзагроз, тоді як молодші співробітники можуть недооцінювати їхню небезпеку.

Узагальнення цих результатів свідчить, що навчальні програми з кібербезпеки повинні бути диференційованими та адаптованими до різних груп користувачів. Такий підхід дозволяє підвищити ефективність засвоєння знань і сформувати стійкі практики безпечної цифрової поведінки, що є критично важливим для зниження рівня кіберризиків у сучасних цифрових системах, зокрема в аграрному секторі.

Моделі та фреймворки кібербезпеки

Подальший аналіз показує, що важливу роль у підвищенні рівня захищеності кіберфізичних систем відіграють різноманітні моделі та фреймворки (структури) кібербезпеки. Вони формують структурований підхід до управління ризиками та визначають комплекс стратегій, спрямованих на зниження ймовірності кіберінцидентів у цифрових середовищах, зокрема в системах Хмарні обчислення.

Розглянуті підходи демонструють, що сучасні фреймворки кібербезпеки орієнтовані на різні аспекти захисту інформаційних систем. Зокрема, виділяються моделі, що базуються на дотриманні нормативних вимог і регуляторних стандартів, які визначають загальні правила та рекомендації для забезпечення безпеки користувачів і систем. Такий підхід дозволяє забезпечити відповідність встановленим вимогам та зменшити ризики, пов’язані з недотриманням базових стандартів захисту.

Окрему групу становлять стандартизовані фреймворки, які пропонують набір кращих практик для управління кібербезпекою на рівні організацій. Вони дозволяють структурувати процеси захисту, визначати критичні активи та формувати системний підхід до запобігання та реагування на кіберзагрози.

Також виділяються комплексні фреймворки, які забезпечують багаторівневий захист даних у різних галузях промисловості. Їх

особливістю є інтеграція технічних, організаційних та управлінських заходів, що дозволяє забезпечити цілісність, конфіденційність та доступність інформації в складних цифрових системах.

Серед найбільш поширених підходів особливе місце займає універсальний фреймворк кібербезпеки, який надає організаціям структуровані рекомендації щодо управління ризиками та вдосконалення систем захисту. Його застосування дозволяє не лише підвищити рівень технічної безпеки, але й сприяє виявленню існуючих прогалин у підходах до кіберзахисту та стимулює впровадження інноваційних рішень.

Узагальнення показує, що використання моделей і фреймворків кібербезпеки є ключовим елементом побудови стійких кіберфізичних систем. У контексті розумного сільського господарства їх застосування дозволяє формувати системний підхід до управління ризиками, підвищувати рівень захисту даних та забезпечувати стабільність функціонування цифрових аграрних технологій.

Поширеним підходом щолдо кібербезпеки є стандарт ISO/IEC 27001, який визначає вимоги до систем управління інформаційною безпекою для організацій різного масштабу. Оновлена версія цього стандарту передбачає комплексний набір заходів, спрямованих на підвищення захищеності інформаційних систем, зокрема у частині захисту від кіберзагроз, виявлення інцидентів та реагування на них.

У структурі стандарту основна увага приділяється заходам захисту, тоді як менша частка положень стосується виявлення та відновлення після атак. До основних механізмів захисту належать розвідка загроз, фізична безпека, використання хмарних сервісів, безпечна розробка програмного забезпечення та контроль доступу до ресурсів. У контексті сільського господарства ISO/IEC 27001 може застосовуватися як основа для постійного вдосконалення системи управління інформаційною безпекою інтелектуальних аграрних технологій. Його впровадження передбачає використання циклічного підходу планування та управління, що забезпечує системне підвищення рівня захисту.

- Перший етап такого підходу полягає у плануванні, під час якого визначаються ключові дані, що потребують захисту, включаючи виробничу та клієнтську інформацію.
- Другий етап передбачає розробку плану управління ризиками на основі рекомендацій стандарту, що включає стратегії захисту від різних типів кіберзагроз. На цьому етапі здійснюється аналіз імовірності таких загроз, як фішингові атаки, витоки конфіденційної інформації, крадіжка ідентичності або

перехоплення комунікацій, з метою оптимального розподілу ресурсів для їхнього мінімізації. Таким чином, впровадження структурованих фреймворків дозволяє забезпечити комплексний і системний підхід до кібербезпеки в аграрному секторі.

- Третій етап передбачає впровадження дій, коли здійснюються необхідні запобіжні або коригувальні заходи у відповідь на виявлені кіберзагрози. На цьому етапі реалізуються рішення, спрямовані на усунення вразливостей, підвищення рівня захисту систем та мінімізацію наслідків можливих інцидентів кібербезпеки.

аходи кібербезпеки для IoT та штучного інтелекту

Результати досліджень демонструють, що в системах розумного сільського господарства значна увага приділяється кіберзахисту пристроїв Інтернету речей та рішень на основі штучного інтелекту. IoT-пристрої є особливо вразливими до кіберзагроз, оскільки компрометація одного елемента може призвести до порушення функціонування всієї мережі та вплинути на роботу взаємопов'язаних систем.

Одним із ключових напрямів підвищення рівня безпеки є вдосконалення механізмів шифрування та автентифікації. Такі підходи дозволяють обмежити несанкціонований доступ до пристроїв і забезпечити захищений обмін даними між компонентами системи. Використання надійних методів автентифікації є критично важливим для запобігання зовнішнім втручанням у роботу аграрної цифрової інфраструктури.

Важливу роль відіграє також регулярне оновлення програмного забезпечення та впровадження політик керування виправленнями (patch management). Це дозволяє своєчасно усувати виявлені вразливості та забезпечувати актуальний рівень захисту від нових типів кіберзагроз. Постійне оновлення систем кібербезпеки є необхідною умовою підтримання стійкості IoT-інфраструктури.

Окремо підкреслюється значення навчання персоналу аграрних підприємств. Регулярне підвищення обізнаності працівників щодо основ кібербезпеки дозволяє сформувати правильну поведінку при роботі з цифровими системами. Зокрема, акцент робиться на розумінні того, як дії користувачів у процесі управління даними можуть впливати на ризик виникнення кібератак, а також як інформація, зібрана в аграрному середовищі, може бути використана конкурентами або сторонніми структурами.

Ще одним важливим підходом є сегментація мережі, яка дозволяє обмежити поширення потенційних атак у межах інфраструктури. У поєднанні з хмарними технологіями це забезпечує додатковий рівень

захисту, оскільки критично важливі дані можуть зберігатися у віддалених сховищах, доступ до яких ускладнений навіть у разі компрометації локальної системи.

Узагальнення результатів свідчить, що ефективний захист IoT-систем у сільському господарстві можливий лише за умови комплексного підходу. Жоден окремий метод не здатний повністю усунути всі потенційні ризики, тому необхідне поєднання технічних, організаційних та освітніх заходів для забезпечення стійкості цифрових агросистем до кіберзагроз.

Рівень кібербезпеки IoT-систем може бути суттєво підвищений за рахунок застосування алгоритмів штучного інтелекту та машинного навчання. Однією з ключових переваг таких технологій є можливість ефективного аналізу великих обсягів мережевого трафіку з метою виявлення аномалій. Це дозволяє ідентифікувати шкідливу активність, зокрема кібератаки, шкідливе програмне забезпечення та спроби фішингу. Застосування глибоких нейронних мереж показує високу ефективність у задачах виявлення вторгнень. Такі моделі здатні виконувати багаторівневу обробку даних, здійснювати виділення ознак і масштабування параметрів, що забезпечує точніше розпізнавання атак. У процесі навчання алгоритми виявляють закономірності у поведінці мережевого трафіку та співвідносять їх із відомими шаблонами атак, що підвищує загальну точність класифікації. Окремий напрям досліджень стосується використання архітектур, що поєднують хмарні та периферійні (edge) обчислення. Такий підхід дозволяє розподілити навантаження між різними рівнями системи та підвищити ефективність обробки даних. Використання методів зменшення розмірності даних дає змогу знизити обчислювальні вимоги, а застосування спеціалізованих нейронних мереж забезпечує своєчасне виявлення атак у режимі, наближеному до реального часу.

Результати показують, що подібні системи здатні суттєво скорочувати час навчання моделей, а також зменшувати вимоги до пам’яті та обчислювальних ресурсів, зберігаючи при цьому високу точність виявлення загроз. Це є особливо важливим для IoT-середовищ, які характеризуються обмеженими ресурсами та високою динамікою даних. Методи машинного навчання демонструють високу ефективність у класифікації шкідливого мережевого трафіку та ідентифікації атак із високою точністю. Такі підходи дозволяють не лише виявляти шкідливу активність, але й визначати вразливі пристрої в мережі, зокрема ті, що підключені через мережеві трансляційні механізми.

У цілому, інтеграція методів штучного інтелекту в системи кіберзахисту IoT дозволяє значно підвищити здатність до виявлення аномальної поведінки, класифікації трафіку та запобігання потенційним загрозам. Це забезпечує більш адаптивний і проактивний підхід до кібербезпеки в інтелектуальних аграрних системах, де своєчасне реагування на атаки є критично важливим.

Заходи на основі блокчейну та робототехніки

Дослідження також вказують на доцільність застосування технологій робототехніки та блокчейну для підвищення рівня кібербезпеки в системах розумного сільського господарства. Роботизовані системи в аграрному секторі використовуються для підвищення точності та сталості виробництва, зокрема для внесення засобів захисту рослин і добрив із мінімізацією втрат ресурсів та підвищенням ефективності агротехнологічних процесів.

У сфері кібербезпеки безпілотні роботизовані системи, включаючи дрони, застосовуються для дистанційного моніторингу, патрулювання територій, перевірки ідентифікаційних даних, виявлення фізичних порушень та реагування на надзвичайні ситуації. Водночас інтеграція роботизованих систем із хмарними технологіями створює додаткові кіберризики, пов’язані із захистом конфіденційної інформації, що зберігається та обробляється у віддалених середовищах.

Додаткові виклики виникають через необхідність обробки великих обсягів даних у режимі реального часу, що ускладнює управління доступом і підвищує вимоги до продуктивності систем. У зв’язку з цим важливим напрямом є вдосконалення програмних архітектур роботизованих систем та оптимізація алгоритмів керування, що дозволяє підвищити стійкість до кіберзагроз, зокрема у рамках використання цифрових двійників. Відсутність чітких правових і регуляторних механізмів відповідальності за інциденти за участю роботизованих систем обмежує їх широке впровадження в аграрному секторі. Також існують ризики, пов’язані з недостатньою захищеністю мережевої інфраструктури, що з’єднує роботизовані пристрої, та вразливістю систем зберігання даних.

У цьому контексті підкреслюється необхідність формування нормативно-правової бази, яка регулюватиме використання робототехніки, забезпечуватиме захист комунікаційних каналів і гарантуватиме безпеку обробки та зберігання даних. Додатково пропонується впровадження обов’язкової сертифікації та маркування рівня кібербезпеки роботизованих систем як інструменту підвищення довіри та стандартизації вимог безпеки.

Окремим напрямом підвищення кіберзахисту є використання технологій блокчейну. Такі системи забезпечують децентралізоване управління ідентифікацією та доступом, що дозволяє підвищити безпеку IoT-пристроїв у сільському господарстві. Важливою перевагою блокчейну є можливість прозорого аудиту транзакцій і підвищення стійкості систем до несанкціонованого втручання. Додаткові переваги включають зниження транзакційних витрат, підвищення рівня прозорості та підзвітності, а також покращення захисту конфіденційності даних завдяки можливості їх простежуваності у разі виникнення інцидентів. У межах аграрних ланцюгів постачання блокчейн сприяє більш ефективній взаємодії між виробниками, постачальниками та споживачами, забезпечуючи надійність фінансових і інформаційних потоків. Крім того, блокчейн може використовуватися для відстеження інформації про ріст культур, якість насіння та попит на продукцію, що сприяє підвищенню ефективності прийняття рішень у сільському господарстві. Використання смарт-контрактів для обміну та верифікації даних додатково підсилює рівень захисту інформації та підвищує загальну безпеку блокчейн-мереж.

Висновки

Виклики впровадження заходів кібербезпеки

Попри те, що сучасні технології кіберзахисту, зокрема штучний інтелект, IoT, блокчейн та квантові обчислення, суттєво підвищують рівень захищеності аграрних цифрових систем, їх впровадження супроводжується низкою суттєвих викликів.

Першим важливим бар'єром є перевантаження працівників та пов'язаний із цим стрес, що формує негативне ставлення до впровадження нових кібербезпекових практик. У таких умовах знижується рівень самоефективності персоналу, а нові технології можуть сприйматися не як інструмент підвищення безпеки, а як загроза скорочення робочих місць. Це призводить до опору змінам і зменшує готовність дотримуватися додаткових вимог кіберзахисту, що ускладнює ефективне впровадження захисних заходів.

Другим суттєвим викликом є правові та регуляторні проблеми, насамперед у сфері захисту персональних даних. Використання інтелектуальних систем може супроводжуватися несанкціонованою обробкою або повторним використанням конфіденційної інформації, що створює ризики порушення приватності. Додатково ускладнює ситуацію недостатня прозорість алгоритмів штучного інтелекту, коли механізми формування результатів залишаються незрозумілими для користувача. Це може призводити до помилкових або упереджених

рішень, зокрема дискримінаційного характеру щодо окремих груп фермерів, що підсилює регуляторні та етичні ризики.

Третім викликом є технічні труднощі впровадження складних технологій, таких як квантові обчислення або просунуті AI-рішення. Значна частина персоналу, особливо у малих та середніх підприємствах, не має достатнього рівня підготовки для роботи з такими системами. Додатково обмеження фінансових ресурсів ускладнює можливість регулярного навчання та підвищення кваліфікації працівників.

Також слід враховувати швидку еволюцію кіберзагроз, зокрема розвиток більш складних форм шкідливого програмного забезпечення та фішингових атак. Це вимагає безперервного оновлення знань персоналу та регулярного навчання для підтримання актуального рівня кіберзахисту.

Узагальнюючи, ефективне впровадження сучасних заходів кібербезпеки в аграрному секторі потребує не лише технологічних рішень, але й врахування людських, правових та організаційних факторів. Саме комплексний підхід дозволяє знизити бар'єри впровадження та забезпечити стійкість цифрових агросистем до кіберзагроз.

Питання для обговорення та самоперевірки

1. Які основні рівні архітектури IoT-систем у смарт-агросистемах і чому вони є вразливими до кібератак?
2. Чому використання застарілого програмного та апаратного забезпечення підвищує ризики кібербезпеки в агросекторі?
3. У чому полягає проблема слабких або відсутніх механізмів контролю доступу в смарт-фермерстві?
4. Які наслідки можуть мати атаки типу RF-jamming для аграрних кіберфізичних систем?
5. Як географічна розподіленість аграрних IoT-систем впливає на їхню безпеку?
6. Чому фізична незахищеність сенсорів і дронів є критичним фактором кіберризику?
7. Які основні типи кібератак спрямовані на мережеву інфраструктуру в агросистемах?
8. У чому полягає різниця між DoS та DDoS атаками в контексті IoT-інфраструктури ферми?
9. Які наслідки має атака типу Man-in-the-Middle для аграрних інформаційних систем?
10. Яким чином ransomware-атаки впливають на прийняття рішень у сільському господарстві?

Список використаних джерел

1. Пасічник Н. А., Опришко О. О., Піскун О. М., Сластін С. О. Дистанційний моніторинг агрофітоценозів : навч. посіб. Київ : НУБіП України, 2023. 490 с.

2. A survey on deep learning in UAV imagery for precision agriculture and wild flora monitoring: Datasets, models and challenges. *Smart Agricultural Technology*. 2024. Vol. 9. Article 100625. DOI: 10.1016/j.atech.2024.100625.

3. Amertet S., Gebresenbet G., Alwan H. M. Application of hyper-automation in farming – an analysis. Smart Agricultural Technology. 2024. Vol. 9. Article 100516. DOI: 10.1016/j.atech.2024.100516.

4. Bessaad N., Atsyo S., Hanjie D., Walkine I., Dhillon R., He L. Autonomous mowing in agriculture: Current status, needs, and future opportunities. Smart Agricultural Technology. 2026. Vol. 13. Article 101796. DOI: 10.1016/j.atech.2026.101796.

5. **Crop monitoring by multimodal remote sensing: A review.** *Remote Sensing Applications: Society and Environment*. 2024. Vol. 33. Article 101093. DOI: 10.1016/j.rsase.2023.101093.

6. Dudnyk, A., Pasichnyk, N., Yakymenko, I., Lendiel, T., Witaszek, K., Durczak, K., & Czekała, W. (2025). Smart resource management and energy-efficient regimes for greenhouse vegetable production. *Energies, 18*(17), 4690. https://doi.org/10.3390/en18174690

7. Kucheruk P., Matveev Y., Komarchuk D., Shvorov S., Lukin V., Opryshko O., Pasichnyk N., Rakhmedov R. Experimental research of the methane fertilization process. Amazon, USA, 2022. ASIN B0BHQNY2TG. URL: https://www.amazon.com/dp/B0BHQNY2TG (дата звернення: 25.09.2026).

8. Eyasin M. S. H., Sobhani M. E., Nasrin S., Al Rafi A. S., Islam A. K. M. M. CropSynergy: Harnessing IoT solutions for smart and efficient crop management. Crop Design. 2026. Vol. 5, № 1. Article 100127. DOI: 10.1016/j.cropd.2025.100127.

9. Gade S. A., Madolli M. J., García-Caparrós P. et al. Advancements in UAV remote sensing for agricultural yield estimation: A systematic comprehensive review of platforms, sensors, and data analytics. *Remote Sensing Applications: Society and Environment*. 2025. Vol. 37. Article 101418. DOI: 10.1016/j.rsase.2024.101418.

10. Griepentrog H. W., Stein A. Comparison of robot concepts for new sustainable crop production systems. Smart Agricultural Technology. 2024. Vol. 8. Article 100499. DOI: 10.1016/j.atech.2024.100499.

11. Hussein J. B., Workneh T. S., Kassim A., Ntsowe K., Melesse S. F., El-Mesery H. S. A review on the impact of big data analytics in transforming agricultural practices, food processing, and preservation strategies. Applied Food Research. 2025. Vol. 5, № 2. Article 101234. DOI: 10.1016/j.afres.2025.101234.

12. Innovative technologies in the management of energy crops collection and processing into biogas. Amazon, USA, 2024. Vol. 2. 393 p. ISBN 979-8344692234.

13. Kandel G. P., Poláková J., Hamouz P., Hruška A., Varvaris I., Manikas I. The role of digitalisation in supporting farmers and strategic policies for food security and sustainability in Europe: A review. Sustainable Futures. 2026. Vol. 11. Article 101702. DOI: 10.1016/j.sftr.2026.101702.

14. Karydas C., Chatziantoniou M., Stamkopoulos K., Iatrou M., Vassiliadis V., Mourelatos S. Embedding a precision agriculture service into a farm management information system – ifarma/PreFer. Smart Agricultural Technology. 2023. Vol. 4. Article 100175. DOI: 10.1016/j.atech.2023.100175.

15. Lozano-Fondón C., Lorenzetti R., Barbetti R., Metzger K., Buttafuoco G., Pinar M. Ö. et al. Accuracies and costs of prediction and mapping soil properties using proximal sensors: A systematic review. Computers and Electronics in Agriculture. 2026. Vol. 243. Article 111378. DOI: 10.1016/j.compag.2025.111378.

16. Maraveas C., Rajarajan M., Arvanitis K. G., Vatsanidou A. Cybersecurity threats and mitigation measures in agriculture 4.0 and 5.0. Smart Agricultural Technology. 2024. Vol. 9. Article 100616. DOI: 10.1016/j.atech.2024.100616.

17. Melesse T. Y. Digital twin-based applications in crop monitoring. Heliyon. 2025. Vol. 11, № 2. Article e42137. DOI: 10.1016/j.heliyon.2025.e42137.

18. Opryshko, O., Pasichnyk, N., Kiktev, N., Łyszczarz, P., Kukharets, V., et al. (2024). European Green Deal: Satellite monitoring in the implementation of the concept of agricultural development in an urbanized environment. *Sustainability, 16*(7), 2649. https://doi.org/10.3390/su16072649

19. Pasichnyk N., Komarchuk D., Opryshko O., Shvorov S., Zui O. Validation of data obtained after field sensing using UAV for management of future crops. CEUR Workshop Proceedings. 2021. Vol. 3126. P. 328–334. URL: http://ceur-ws.org/Vol-3126/paper50.pdf (дата звернення: 25.09.2026).

20. Sarkar S., Ganapathysubramanian B., Singh A., Fotouhi F., Kar S., Nagasubramanian K., Chowdhary G., Das S. K., Kantor G., Krishnamurthy A., Merchant N., Singh A. K. Cyber-agricultural systems for crop breeding and sustainable production. Trends in Plant Science. 2024. Vol. 29, № 2. P. 130–149. DOI: 10.1016/j.tplants.2023.08.001.

21. Sara G., Todde G., Pinna D., Caria M. Evaluating an autonomous electric robot for real farming applications. Smart Agricultural Technology. 2024. Vol. 9. Article 100595. DOI: 10.1016/j.atech.2024.100595.

22. Shahriar S., Corradini M. G., Sharif S., Moussa M., Dara R. The role of generative artificial intelligence in digital agri-food. Journal of Agriculture and Food Research. 2025. Vol. 20. Article 101787. DOI: 10.1016/j.jafr.2025.101787.

23. Storm H., Seidel S. J., Klingbeil L., Ewert F., Vereecken H., Amelung W. et al. Research priorities to leverage smart digital technologies for sustainable crop production. European Journal of Agronomy. 2024. Vol. 156. Article 127178. DOI: 10.1016/j.eja.2024.127178.

24. Subeesh, Chauhan N. Agricultural digital twin for smart farming: A review. Green Technologies and Sustainability. 2026. Vol. 4, № 2. Article 100299. DOI: 10.1016/j.grets.2025.100299.

25. Talaeizadeh A., Sharifi I., Alasty A., Ghatrehsamani S. Agricultural spraying drones: A comprehensive review. Smart Agricultural Technology. 2025. Vol. 12. Article 101519. DOI: 10.1016/j.atech.2025.101519.

26. Talari G., Cummins E., McNamara C., O'Brien J. State of the art review of Big Data and web-based Decision Support Systems (DSS) for food safety risk assessment with respect to climate change. Trends in Food Science & Technology. 2022. Vol. 126. P. 192–204. DOI: 10.1016/j.tifs.2021.08.032.

27. Wang J., Zhang S., Lizaga I. et al. UAS-based remote sensing for agricultural monitoring: Current status and perspectives. *Computers and Electronics in Agriculture*. 2024. Vol. 226. Article 109501. DOI: 10.1016/j.compag.2024.109501.

Предметний покажчик

Big Data – 42, 55, 56, 61-64

Кібер-аграрні системи 150, 154-157, 165

Кібератаки – 279, 293, 294, 298, 303

Метавсесвіт – 258, 259

Моделювання аграрних систем 157-159

Мовні моделі – 148, 242, 245, 246, 255, 256, 264, 272

Тепличне господарство (комплекси, системи) – 128, 162, 262, 295

Робототехніка – 16, 147, 164, 199, 200, 202, 203, 207, 210, 259, 260, 304

Розумне землеробство – 107, 109, 110-115, 124, 137, 139, 144, 149, 286, 290-293, 295, 298-300

СППР – 54, 55, 58, 61-64, 208

Фреймворк 105, 113, 159, 285, 300-302

Хмарні обчислення – 80, 81, 85, 300

Цифрові двійники – 65-70, 74, 78-80, 83, 86-104

Цифрові інструменти – 15, 17, 22, 30, 33

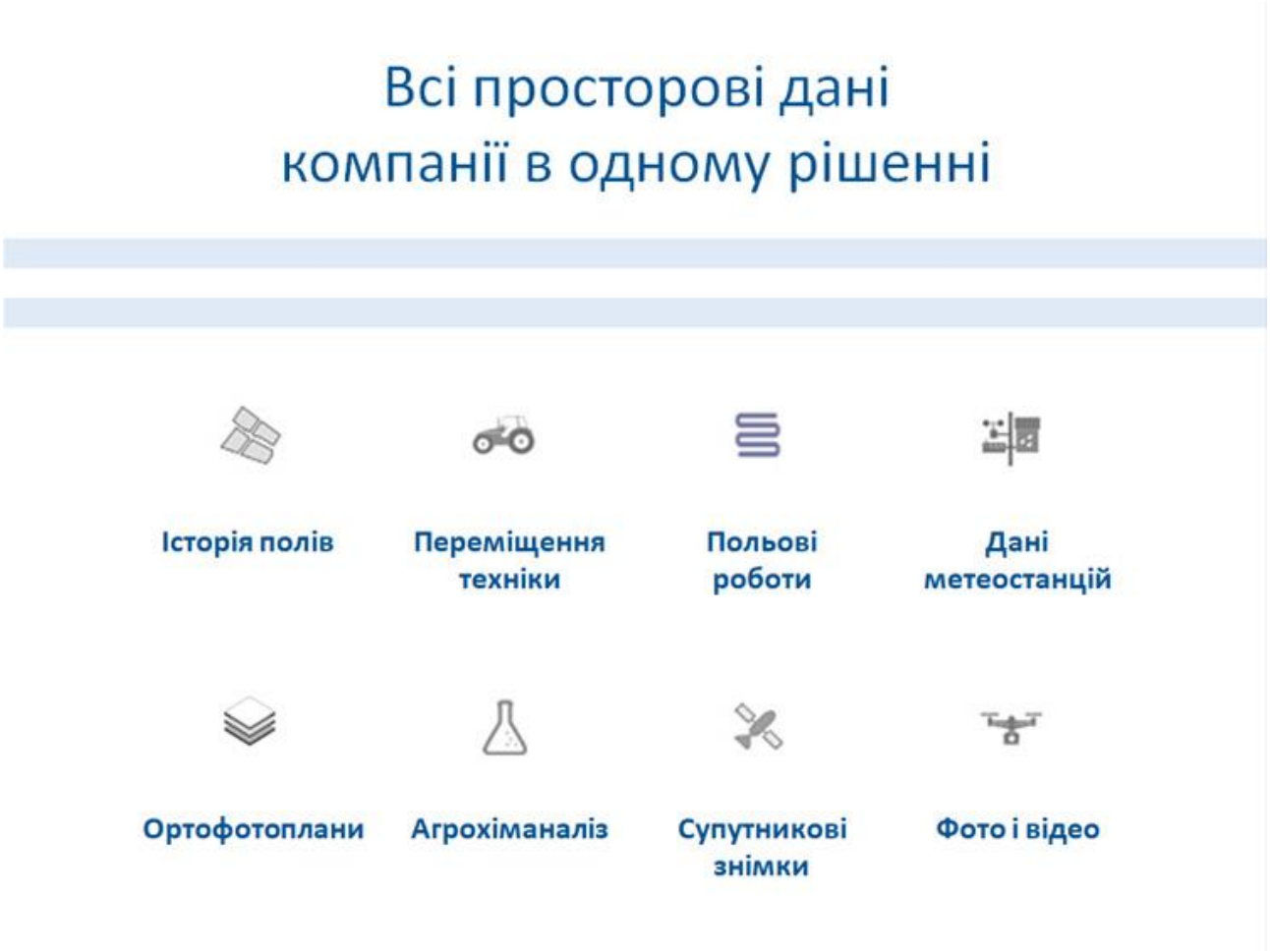
Цифровізація 12, 22, 23, 26, 28, 30-33, 35-40

Цифрові технології 20, 23, 25, 27-29, 40, 100

Штучний інтелект (ШІ) – 20, 27, 65, 75, 77, 86, 105, 107, 117, 143, 148, 170, 242, 243, 245, 246, 251, 255, 258, 265-267, 275, 281, 282, 305

ДОДАТКИ

Додаток А



ТЕХНОЛОГІЇ ВЕЛИКИХ ДАНИХ

п'ять важливих напрямів застосування Big Data для моніторингу агрофітоценозів:

- дистанційне зондування та супутникові знімки;
- прогностична аналітика;
- інтеграція IoT і сенсорних даних;
- виявлення шкідників і хвороб;
- оцінювання та оптимізація врожайності.

Додаток Б
Специфічні знання IoT

Етапи розробки IoT-проекту:

1. Складання фізичного апаратного забезпечення (виконується інженерами-механіками, електриками та іншими технічними спеціалістами). Цей етап, як правило, виконується без участі IoT розробника. Вони отримують від команди апаратного забезпечення вже готові плати та корпуси/компоненти.
2. Програмування пристрою: тут вже необхідні навички програмування для того, щоб зчитувати дані з датчиків, підключених до IoT-пристрою, і надсилати їх на сервер.
3. Програмування сервера, який буде отримувати та зберігати дані з IoT-пристрою, за допомогою мов програмування на стороні сервера (PHP, ASP.NET, Ruby, Python) і запитів до бази даних — як SQL, так і NoSQL.
4. Відображення даних користувачеві через веб сторінку чи програму (це вимагає від IoT-розробника знання веб-розробки PHP, JavaScript, HTML, CSS, фреймворків React та ін.)
5. Тестування — цей етап настільки ж (або навіть більше) важливий у розробці IoT-проектів, як і в звичайній розробці ПЗ, адже фізичне обладнання буде складно замінити, якщо щось піде не так.

Знання мов, фреймворків та технологій:

Мови програмування:

- Python
- JavaScript
- Ruby
- C/C++
- C#
- HTML
- CSS

Фреймворки:

- Ruby on Rails
- Phoenix
- React
- React Native

Методології:

- Agile Development
- Lean Development
- Extreme Programming

Хмарні сервіси

- AWS IoT
- Microsoft Azure IoT
- NervesHub
- Platformio