



ШВОРОВ СЕРГІЙ АНДРІЙОВИЧ

Професор кафедри автоматики та робототехнічних систем ім. акад. І.І. Мартиненка НУБІП України
(<https://nubip.edu.ua/shvorov-serhiy-andriyovych>).
Фахівець з автоматики і робототехніки,
наукові інтереси: інтелектуальні системи керування;
роботизовані системи збору та переробки органічної сировини,



ОПРИШКО ОЛЕКСІЙ ОЛЕКСАНДРОВИЧ

кандидат технічних наук, в.о. завідувача кафедри автоматики та робототехнічних систем ім. академіка І.І. Мартиненка ННІ енергетики, автоматики і енергозбереження НУБІП України
(<https://nubip.edu.ua/opryshko-oleksiy-oleksandrovych>)
Фахівець з автоматики і робототехніки,
наукові інтереси: дистанційний моніторинг,
робототехнічні системи і комплекси



ЦИЦЮРСЬКИЙ ЮРІЙ ЛЕОНТІЙОВИЧ

асистент кафедри автоматики та робототехнічних систем ім. академіка І.І. Мартиненка ННІ енергетики, автоматики і енергозбереження НУБІП України
(<https://nubip.edu.ua/tsytsyurskyi-yuriy-leontiyovych>)
Фахівець з автоматики і біотехнологій,
наукові інтереси: робототехнічні системи і комплекси,
автоматизація біотехнічних об'єктів



ДУДНИК ВІТАЛІЙ ВОЛОДИМИРОВИЧ

лаборант кафедри автоматики та робототехнічних систем ім. акад. І.І. Мартиненка НУБІП України
(<https://nubip.edu.ua/lavinskyi-dmytro-serhiyovych>).
Фахівець з автоматики і біотехнологій,
наукові інтереси: робототехнічні системи і комплекси,
автоматизація біотехнічних об'єктів

ЧАСТИНА 2

СВІТОВИЙ ДОСВІД АВТОМАТИЗАЦІЇ
СУЧАСНИХ ОБ'ЄКТІВ АГРАРНОГО
СПРЯМУВАННЯ

ШВОРОВ С.А.,
ОПРИШКО О.О.,
ЦИЦЮРСЬКИЙ Ю.Л.,
ДУДНИК В.В.

СВІТОВИЙ ДОСВІД АВТОМАТИЗАЦІЇ СУЧАСНИХ ОБ'ЄКТІВ АГРАРНОГО СПРЯМУВАННЯ Частина 2

НАВЧАЛЬНИЙ ПОСІБНИК





**НАВЧАЛЬНІ
ВИДАННЯ**

Шворов С.А., Опришко О.О., Цицюрський Ю.Л., Дудник В.В.

**Світовий досвід автоматизації
сучасних об'єктів аграрного
спрямування. Частина 2**

Навчальний посібник



**НАВЧАЛЬНІ
ВИДАННЯ**

Шворов С.А., Опришко О.О., Цицюрський Ю.Л., Дудник В.В.

Світовий досвід автоматизації сучасних об'єктів аграрного спрямування. Частина 2

Навчальний посібник

Київ

2025

УДК: 631.3(100):681.5

*Рекомендовано до друку рішенням Вченої ради
Національного університету біоресурсів та природокористування України
(протокол № 4 від 22 жовтня 2025 р.)*

Рецензенти:

Камінський В.Ф., академік-секретар відділення землеробства, меліорації та механізації Національної академії аграрних наук, доктор сільськогосподарських наук, академік НААН;

Самохвалов Ю.Я., доктор технічних наук, професор (Київський національний університету імені Тараса Шевченка);

Грудинін Б.О., доктор педагогічних наук, доцент (Національний університет біоресурсів та природокористування України, м.Київ)

Світовий досвід автоматизації сучасних об'єктів аграрного спрямування. Частина 2: навчальний посібник / С.А.Шворов, О.О.Опришко, Ю.Л.Цицюрський, В.В.Дудник – Київ : НУБіП України, 2025. - 246 с.

ISBN 978-617-8718-61-9

Посібник може бути корисним аспірантам і молодим науковцям, які спеціалізуються на автоматизації технологічних процесів у рослинництві та тваринництві, цифровізації агропромислового виробництва, впровадженні Інтернету речей (IoT) та робототехнічних систем. Він також буде корисним дослідникам, що працюють над прецизійним землеробством, сенсорними технологіями для моніторингу рослин і тварин, а також над інтеграцією новітніх технологій у концепції «розумного» і цифрового сільського господарства.



Шворов Сергій Андрійович

доктор технічних наук, професор кафедри автоматики та робототехнічних систем ім. академіка І.І.Мартиненка ННІ енергетики, автоматики і енергозбереження НУБіП України

Фахівець з автоматики і робототехніки, виробництва біогазу.

наукові інтереси: виробництво біогазу, системи прийняття рішень, робототехнічні системи і комплекси



Опришко Олексій Олександрович,

кандидат технічних наук, в.о. завідувача кафедри автоматики та робототехнічних систем ім. академіка І.І.Мартиненка ННІ енергетики, автоматики і енергозбереження НУБіП України

(<https://old.nubip.edu.ua/node/2097>)

Фахівець з автоматики і робототехніки,
наукові інтереси: дистанційний моніторинг,
робототехнічні системи і комплекси



Цицюрський Юрій Леонтійович,

майстер виробничого навчання кафедри автоматики та робототехнічних систем ім. академіка І.І. Мартиненка ННІ енергетики, автоматики і енергозбереження НУБіП України

(<https://old.nubip.edu.ua/node/79404>)

Фахівець з автоматики і біотехнологій,
наукові інтереси: робототехнічні системи і комплекси,
автоматизація біотехнічних об'єктів



Дудник Віталій Володимирович

лаборант кафедри автоматики та робототехнічних систем ім. акад. І.І. Мартиненка НУБіП України

(<https://old.nubip.edu.ua/node/157125>)

Фахівець з систем, автоматики та робототехніки,
наукові інтереси: адитивне виробництво, ЧПК, САПР.

ЗМІСТ

	ВСТУП.	9
Тема 5	Перспективні напрями автоматизації технологічних процесів у рослинництві і тваринництві. Технологічні уклади в АПК.	
5.2	Формування п'ятого технологічного укладу в сільському господарстві: особливості, основні елементи та тенденції	12
5.3	Цифрове тваринництво: напрями та перспективи розвитку.	19
5.4	«Агрокультура 4.0: синергія складних систем, онтологічного підходу, Інтернету речей і космічних технологій	24
5.5	Індустрія 5.0: поєднання IoT, блокчейну та штучного інтелекту	46
	<i>Рекомендована література (перспективні напрями)</i>	73
	<i>Питання для самоперевірки (перспективні напрями)</i>	73
Тема 6	Перспективні напрями застосування Інтернету речей в агропромисловому секторі. Технологія Інтернету речей та перспективи її впровадження в рослинництві	74
6.2	Цифрова трансформація інформаційної інфраструктури АПК як інноваційний чинник переходу до «розумного» сільського господарства	79
6.3	Інтелектуальне землеробство на основі технологій Інтернету речей (IoT)	84
6.4	Архітектура інформаційної системи та підприємства з рослинництва на основі технологій Інтернету речей (IoT)	95
6.5	Зв'язок інтернету речей та аквакультури	106
	<i>Рекомендована література (IoT)</i>	124
	<i>Питання для самоперевірки (IoT)</i>	125
Тема 7	Системи прецензійного позиціонування в аграрному виробництві. Актуальність використання високоточного режиму абсолютного позиціонування для вирішення широкого кола задач супутникової навігації	126
7.2	Дослідження можливостей впровадження технології високоточного позиціонування	129
7.3	Методика вибору системи позиціонування інтелектуальною системою керування мобільного сільськогосподарського робота	139
7.4	Удосконалення елементів системи паралельного водіння при виконанні сільськогосподарських робіт	148
7.5	Інформаційне та інструментальне забезпечення технологій диференційованого внесення агрохімікатів	151
	<i>Рекомендована література (RTK)</i>	155
	<i>Питання для самоперевірки (RTK)</i>	156

Тема 8.	Сучасний стан, проблеми і тенденції застосування сучасного технологічного обладнання в агропромисловому секторі економіки. Інтернет речей та розумні сенсори в сільському господарстві: можливості та виклики	157
8.2	Нанобіосенсори для моніторингу поживних речовин у режимі реального часу	168
8.3	Використання пасивного акустичного моніторингу для агроекологічних схем, орієнтованих на результат: можливості, виклики та наступні кроки	187
8.4	Noise2Weight: Визначення ваги вантажу дрона за сигналами	193
8.5	Пріоритетні конструктивні та технологічні особливості обприскувачів для захисту рослин в умовах технічного переоснащення агропідприємств АПК	205
	<i>Рекомендована література (сенсори)</i>	209
	<i>Питання для самоперевірки (сенсори)</i>	210
Тема 9	Робототехнічні системи аграрної галузі. Концепція роботизованого тепличного комплексу для вирощування томатів з одним оператором	211
9.2	Приклад робототехнічної системи забезпечення тепличного виробництва овочевих культур	219
9.3	Особливості застосування агродронів у системі агрохімічного забезпечення та агропромислового комплексу	225
9.4	Роботизовані цифрові двійники у виробництві: технології, застосування, тенденції та проблеми	229
	<i>Рекомендована література (роботи)</i>	247
	<i>Питання для самоперевірки (роботи)</i>	249

ВСТУП

Сучасний етап розвитку аграрного виробництва характеризується глибокими структурними змінами, що відбуваються під впливом цифровізації, автоматизації та впровадження технологій п'ятого технологічного укладу. Ці процеси зумовлюють появу нових наукових напрямів, орієнтованих на інтеграцію інтелектуальних систем керування, робототехніки, сенсорних мереж, технологій Інтернету речей (IoT), штучного інтелекту (AI) та космічного моніторингу. У цьому контексті сільське господарство перетворюється з традиційної галузі на високотехнологічну систему, де ключову роль відіграють автоматизовані засоби збору, аналізу та управління даними.

Навчальний посібник **«Світовий досвід автоматизації сучасних об'єктів аграрного спрямування. Частина 2»** є логічним продовженням попереднього тому, розширюючи його зміст за рахунок включення сучасних концепцій **Агрокультури 4.0, Індустрії 5.0, інтелектуального землеробства та цифрового тваринництва**. Посібник має на меті не лише ознайомити здобувачів третього освітньо-наукового рівня (PhD) із передовими світовими досягненнями у сфері автоматизації аграрного виробництва, але й сформувати наукове бачення тенденцій розвитку галузі в умовах трансформації технологічних укладів, що базуються на синергії інформаційних, біотехнологічних і когнітивних систем.

Наукова новизна роботи полягає у **систематизації та узагальненні міжнародного досвіду впровадження цифрових технологій в аграрному секторі, виявленні закономірностей формування п'ятого технологічного укладу в АПК, а також у розробленні методичних засад побудови кіберфізичних систем аграрного призначення, інтегрованих з технологіями Інтернету речей та сенсорними мережами**. У межах посібника розглянуто не лише технічні аспекти автоматизації, а й структурно-організаційні підходи до цифрової трансформації підприємств агропромислового комплексу.

Для здобувачів ступеня **доктора філософії за спеціальністю (151/174)/G7 – Автоматизація, комп'ютерно-інтегровані технології та робототехніка**, цей посібник покликаний стати теоретичною та методичною базою для підготовки власних наукових досліджень. Він забезпечує формування системного мислення, вміння аналізувати взаємозв'язки між технологічними, економічними та екологічними складовими аграрного виробництва, а також практичних навичок проектування та моделювання інтелектуальних систем управління технологічними процесами.

Структурно посібник охоплює кілька взаємопов'язаних блоків, кожен із яких підготовлено авторами з урахуванням їхньої наукової спеціалізації:

Посібник підготували д.т.н. проф. Шворов С.А (розділ 5-6), к.т.н. доцент Опришко О.О. (розділ 7 - 9.2), Цицюрський Ю.Л. (розділ 9.3), Дудник В.В. (розділ 9.4).

Посібник містить також питання для самоперевірки та рекомендовану літературу до кожного тематичного розділу, що сприяє формуванню аналітичного мислення та здатності до самостійного наукового пошуку.

Таким чином, представлена праця має міждисциплінарний характер і є результатом синтезу технічних, інформаційних і біоінженерних знань. Вона покликана не лише поглибити фахові компетентності здобувачів, а й сприяти розвитку наукових досліджень, спрямованих на створення інтелектуальних систем нового покоління для аграрного сектору, що відповідають принципам сталого розвитку, енергоефективності та технологічної самостійності України.

5.1 ТЕХНОЛОГІЧНІ УКЛАДИ В АПК

Технологічний уклад — це сукупність освоєних на відповідному історичному етапі інноваційних технологій, які забезпечують якісний стрибок у розвитку продуктивних сил суспільства. Кожен новий уклад зазвичай базується на досягненнях попереднього, включаючи його основні технологічні ядра. У сучасній економіці, зокрема в агропромисловому комплексі (АПК), все ще зберігаються елементи застарілих технологічних укладів, що гальмує подальший прогрес. Розглянемо коротко еволюцію технологічних укладів у сільському господарстві, починаючи з третього.

Третій технологічний уклад (приблизно 1880–1940 роки)

Цей період ознаменувався впровадженням електроенергії у промислове виробництво, широким використанням електродвигунів і двигунів внутрішнього згоряння. Розвиток сталеливарної промисловості дав змогу створити машинні засоби для обробки ґрунту й переробки сільськогосподарської продукції. Разом із прогресом машинобудування зростає механізація великих аграрних підприємств. Однак впровадження техніки в харчове виробництво ще не набуло системного характеру. Навіть у період колективізації, попри створення колгоспів і радгоспів, не було сформовано повноцінних машинних технологічних систем, а в багатьох сферах зберігався ручний труд.

Четвертий технологічний уклад (1930–1990 роки)

Цей уклад пов'язаний із масовим виробництвом автомобілів, тракторів, літаків і товарів народного споживання. У сільському господарстві поширення набула тягово-машинна концепція, зокрема трактор у рослинництві, а також технологічне оновлення у тваринництві. Масове використання тракторів, комбайнів та іншої сільськогосподарської техніки стало основою формування повноцінних машинних систем.

У цей період відбувся перехід аграрного сектору від мануфактурного типу виробництва до великого промислового — на базі колгоспів, радгоспів, заводів та комбінатів. Почали активно застосовуватися мінеральні добрива, створено поточні механізовані та автоматизовані лінії в харчовій промисловості, а також системи упаковки та тривалого зберігання продуктів. Саме у цей період остаточно сформувався агропромисловий комплекс як структурована система. Радянський Союз досяг помітних успіхів у реалізації четвертого технологічного укладу, де провідну роль відігравали машинобудування та важка промисловість.

П'ятий технологічний уклад (орієнтовно 1985–2035 роки)

Цей етап пов'язаний із розвитком мікроелектроніки, інформаційно-комунікаційних технологій, біотехнологій, генної інженерії, альтернативних джерел енергії та нових матеріалів. Технології п'ятого укладу дозволяють значно зменшити втрати на всіх етапах агровиробництва — від збирання до зберігання та переробки сировини.

АПК поступово трансформується у високотехнологічну галузь, де аграрне виробництво розглядається як безперервний ланцюг перетворення первинної сировини у кінцеву продукцію. Відбувається перехід від ізольованих товаровиробників до мережових об'єднань підприємств, які взаємодіють через

електронні платформи та цифрові сервіси. Водночас в аграрних технологіях впроваджуються нові способи передачі енергії до об'єктів обробки та харчових середовищ, з'являються елементи планування інновацій.

Однак розвиток п'ятого укладу в країнах із перехідною економікою стримується через наявність застарілих технологій третього і четвертого укладів. Це призводить до виникнення багатоукладної економіки, де новітні технології співіснують з архаїчними, що уповільнює загальний прогрес.

Шостий технологічний уклад (орієнтовно 2025–2080 роки)

У розвинених країнах уже формуються контури шостого технологічного укладу, який базуватиметься на високих, наукоємних технологіях — біо- та нанотехнологіях, генної інженерії, мембранних і квантових технологіях, мікромеханіці та робототехніці. Його визначальними компонентами стануть інформатика, мікроелектроніка та системи штучного інтелекту.

Поєднання традиційних і новітніх технологій забезпечить нові можливості для людства, покращуючи якість життя та змінюючи структуру виробництва. У сільському господарстві розвиток біотехнологій набуде прикладного значення — від генетично вдосконалених культур до прецизійного землеробства. У тваринництві й рослинництві очікується перехід до індустріальних технологій: мобільні агрозаводи, здатні обробляти десятки тисяч гектарів, або ферми-заводи з утриманням десятків тисяч тварин. З'являться машинні технології з ознаками заводської точності — як у вирощуванні продукції, так і в її обробці. Такий промисловий підхід до виробництва сільськогосподарської продукції дозволяє отримувати її з чітко заданими та вузькими параметрами технологічних властивостей, що є необхідною умовою для організації автоматизованих технологічних процесів переробки, зокрема на роторних лініях, побудованих за роторними технологіями.

Крок до шостого технологічного укладу в агропромисловому комплексі

Аналізуючи еволюцію технологій у різних укладах, варто звернути увагу на одну характерну закономірність: від одного укладу до іншого зростає структурна складність технологій при одночасному підвищенні точності, стабільності, керованості та надійності ключових процесів. Це, у свою чергу, забезпечує функціональну простоту реалізації конкретних технологій. Така тенденція демонструє діалектичний принцип розвитку: ускладнення структури при спрощенні функціонування. Яскравим прикладом є автоматична коробка передач, яка має складну конструкцію, але проста у використанні.

Саме така логіка розвитку визначає необхідність орієнтації аграрної науки й інженерії на принципи шостого технологічного укладу. У центрі уваги мають бути фундаментальні дослідження в галузі сільського господарства та технологій переробки продукції, що дозволить забезпечити якісні зв'язки між усіма ланками харчового виробництва. Важливо правильно обрати пріоритетні напрями наукових досліджень, раціонально розподілити ресурси та оперативно реагувати на виклики, щоб скоротити відставання від провідних країн.

Завдання, що стоїть перед вітчизняною аграрною наукою, полягає не лише у входженні в шостий уклад, але й у забезпеченні продовольчої безпеки країни.

Проте реалізація технологій нового покоління передбачає їх впровадження переважно на базі великих аграрних підприємств і переробних заводів, тобто мова йде про індустріалізацію агровиробництва в усіх його сферах.

Однак у багатьох країнах, що розвиваються, сільське господарство досі базується на малих фермерських господарствах. При цьому рівень товарності приватного виробництва залишається вкрай низьким, що ускладнює закупівлю та переробку продукції. Подібна ситуація спостерігається і з іншими овочевими культурами.

Низька рентабельність, податковий тиск, високі кредитні ставки призводять до масового банкрутства фермерських господарств. Аналітики прогнозували, що вже до 2016 року їх кількість могла скоротитися майже до нуля. Для прикладу, в Краснодарському краї кількість фермерських господарств за кілька років зменшилася більш ніж у шість разів.

Державна підтримка фермерства, зокрема програм підтримки нових господарств, розвитку сімейних ферм тощо, поки що не дає очікуваних результатів. Україна, як і інші пострадянські країни, значною мірою залишається імпортозалежною у забезпеченні продовольством.

Попри складний стан, така ситуація може стати імпульсом для створення нових підходів, технологій і технічних рішень у галузі сільського господарства, харчової промисловості та переробки. Згідно з діалектикою розвитку, кожна система після періоду стагнації неминуче переходить до етапу оновлення та прогресу. Саме тому сьогоднішнє завдання — свідомо активізувати процес оновлення аграрного виробництва, спираючись на закономірності розвитку складних систем.

Перспективна техніка й технології в АПК мають базуватися не на потенціалі дрібних фермерів, а на можливостях великих виробників — державних агрофірм, кооперативів або потужних приватних структур. Саме великі товарні господарства, подібні до радянських агрокомбінатів 1960–1980-х років, здатні здійснити реіндустріалізацію сільського господарства.

Ключовими умовами такого переходу є:

- поглиблена спеціалізація,
- концентрація виробництва,
- впровадження промислових технологій у рослинництві та тваринництві.

Уже сьогодні близько 20% агровиробників забезпечують понад 75% валового збору зернових. Це — великі підприємства, які активно використовують енергонасичену техніку, здатну виконувати численні операції з високою ефективністю. Однак основні канали постачання цієї техніки й запчастин перебувають під контролем іноземних компаній, а власне виробництво сучасної агротехніки поки що розвинене недостатньо.

Отже, реіндустріалізація аграрного виробництва має базуватися на створенні нової, вітчизняної, технологічної основи, насиченої сучасною автоматикою, електронікою, програмними рішеннями та інтелектуальними системами. Саме такий підхід відповідає логіці розвитку шостого технологічного укладу, який визначатиме майбутнє агропромислового комплексу.

5.2 ФОРМУВАННЯ П'ЯТОГО ТЕХНОЛОГІЧНОГО УКЛАДУ В СІЛЬСЬКОМУ ГОСПОДАРСТВІ: ОСОБЛИВОСТІ, ОСНОВНІ ЕЛЕМЕНТИ ТА ТЕНДЕНЦІЇ

У сучасних умовах світова цивілізація перебуває на порозі переходу до шостого технологічного укладу, який поступово формується на базі досягнень і структур п'ятого укладу. В промислово розвинених країнах, зокрема в Європі, США та Японії, цей перехід супроводжується активним впровадженням інноваційних технологій у різні сфери економіки, включно з аграрним сектором. В Україні, частка п'ятого технологічного укладу в економіці поки що є відносно низькою, хоча поступове нарощування його елементів спостерігається, особливо в ІТ-секторі, телекомунікаціях та деяких галузях промисловості. Водночас спостерігається певна локалізація впровадження сучасних технологій: їх активніше застосовують у великих містах і промислових центрах, тоді як аграрні регіони часто залишаються в зоні традиційних методів виробництва. Це створює специфічні виклики для розвитку сільського господарства та його модернізації.

П'ятому технологічному укладу властиві передусім цифрові технології, що включають розвиток мікроелектроніки, широке використання мобільного зв'язку та інтернету, біотехнології, генну інженерію, а також нові види енергії та матеріалів. Українське сільське господарство все активніше інтегрує елементи цих технологій. Зокрема, системи точного землеробства, автоматизація процесів і застосування біотехнологій стають поступовою нормою в провідних агрокомпаніях. Істотною складовою п'ятого укладу є штучний інтелект, який не лише допомагає оптимізувати виробничі процеси, але й здатен самостійно приймати рішення на основі аналізу великої кількості даних, прогнозувати розвиток ситуацій та адаптуватися до змін зовнішніх умов.

В Україні штучний інтелект у сільському господарстві перебуває на початкових стадіях впровадження, однак потенціал для його застосування дуже великий. Вже зараз створюються «розумні» системи моніторингу стану ґрунтів, контролю за розвитком рослин, управління зрошенням і удобренням, а також системи прогнозування врожаїв і захисту від шкідників, що спираються на алгоритми машинного навчання. Ці інновації дозволяють істотно підвищити ефективність виробництва, знизити витрати ресурсів і збільшити якість продукції.

Особливістю розвитку українського сільського господарства є те, що воно залишається важливим сектором економіки, що забезпечує значну частину експорту країни та є джерелом зайнятості для великої кількості населення в сільській місцевості. Проте більшість виробничих підприємств ще використовують традиційні методи, розширюючи площі посівів і збільшуючи поголів'я тварин, що має свої обмеження через високу витратність та екологічні ризики. Тому пріоритетом стає впровадження інновацій, які базуються не на збільшенні традиційних ресурсів, а на підвищенні продуктивності за допомогою новітніх технологій.

Україна має значний потенціал для розвитку інтелектуального сільського господарства, зокрема у південних і центральних регіонах, де розвинена аграрна

інфраструктура та наявний кваліфікований персонал. Застосування штучного інтелекту та пов'язаних технологій дозволить не лише підвищити врожайність і якість продукції, але й більш ефективно управляти природними ресурсами, мінімізувати екологічний вплив та забезпечити стабільність виробництва в умовах кліматичних змін.

Важливо, що досвід інших країн показує: успішність впровадження нових технологій багато в чому залежить від комплексного підходу, включаючи модернізацію інфраструктури, підготовку кадрів, державну підтримку інновацій та розвиток науково-дослідної бази. Для України це означає необхідність посилення співпраці між аграрними підприємствами, науковими установами та ІТ-компаніями, створення сприятливих умов для стартапів у агротехнологічній сфері та адаптацію законодавства до нових реалій.

На прикладі регіонів з розвиненим аграрним сектором, таких як Полтавська, Херсонська чи Вінницька області, вже сьогодні можна побачити активне впровадження цифрових систем контролю, моніторингу та управління. Ці регіони можуть слугувати моделлю для інших, демонструючи, як інновації сприяють підвищенню конкурентоспроможності і зростанню експорту.

Отже, у перспективі розвиток сільського господарства України буде нерозривно пов'язаний із впровадженням елементів п'ятого технологічного укладу, зокрема штучного інтелекту, що дозволить не тільки збільшувати обсяги виробництва, а й суттєво підвищити його якість і стійкість до зовнішніх викликів. Цей процес вимагає системного підходу, який враховуватиме як науково-технічні, так і соціально-економічні аспекти, з урахуванням специфіки національного ринку та аграрного потенціалу країни.

В Україні спостерігається тенденція, коли інтенсивне впровадження сучасних технологій і збільшення інвестицій у аграрний сектор створюють нові тренди розвитку сільського господарства, сприяючи підвищенню врожайності, продуктивності тваринництва і загальної ресурсної ефективності.

Сучасна модель розвитку регіонального агропромислового комплексу в Україні має ознаки так званої секторальної індустріалізації, де оновлення і модернізація відбувається не рівномірно по всіх галузях сільського господарства, а вибірково у тих, що забезпечують найбільш швидкий і вагомий економічний ефект. Це пов'язано не лише з ефективністю вкладень, але й із загальними обмеженнями інвестиційних ресурсів, які в Україні, з огляду на економічну ситуацію, залишаються досить обмеженими. Саме тому пріоритет надається галузям із максимальною окупністю проектів, що формує своєрідний двошаровий розвиток — одні сектори швидко впроваджують новітні технології та практики, а інші залишаються на традиційному рівні з меншою продуктивністю.

Ця ситуація породжує виклики, пов'язані з технологічною та інституційною нерівністю. В українському сільському господарстві, особливо в регіонах із традиційним господарюванням, помітний розрив між тими виробництвами, що працюють за новими парадигмами та оснащені сучасними технічними засобами, і тими, що досі функціонують за архаїчними методами.

При цьому останні, володіючи значним ресурсним потенціалом, через конкуренцію та недостатнє оновлення гальмують загальний розвиток галузі.

У таких умовах надзвичайно важливо посилити і розвивати ринкові механізми в усіх підгалузях і сегментах агросектору, а також стимулювати інституційне різноманіття господарюючих суб'єктів — від малих фермерських господарств до великих агрохолдингів. В Україні це означає необхідність створення високотехнологічних підприємств із сучасними системами менеджменту, логістики та маркетингу, які могли б стати центрами організації та координації нових виробничих ланцюгів, формуючи широкую мережу взаємозалежних аграрних структур, здатних ефективно конкурувати як на внутрішньому, так і на зовнішньому ринках. Такий процес сприятиме формуванню нової, більш гнучкої і стійкої архітектури українського сільського господарства.

Важливою складовою реіндустріалізації аграрного сектора в Україні є активне впровадження штучного інтелекту (ШІ). Аналіз стану застосування технологій п'ятого технологічного укладу в агросекторі країни дозволяє виділити кілька основних типів і підтипів ШІ, що застосовуються на практиці.

Перший тип, який можна умовно назвати адаптивним, характеризується використанням обмеженого набору параметрів і лінійних алгоритмів, що базуються на фіксованих значеннях відхилень від нормативів. Програми цього типу виконують моніторинг параметрів, але не регулюють їх безпосередньо, працюючи в рамках заданих меж. Такий підхід вже знайшов застосування у деяких сегментах тваринництва та рослинництва в Україні. Наприклад, у деяких селекційних центрах, які займаються штучним осіменінням і трансплантацією ембріонів великої рогатої худоби, де ШІ допомагає контролювати умови зберігання ембріонів, оцінювати репродуктивні здібності маточного поголів'я та прогнозувати результативність процедур із високою точністю.

Другий тип ШІ, адитивний, є більш динамічним: він враховує зміни у параметрах і їх взаємозв'язках, здатний оптимізувати структуру систем і комплексів, змінювати окремі параметри у реальному часі для досягнення найкращих результатів. В українських аграрних проектах такі системи застосовуються для управління складними технологічними процесами, наприклад, у автоматизованих системах зрошення, клімат-контролю теплиць чи агропромислових комплексів.

Загалом, інтеграція ШІ у сільське господарство України відкриває можливості для переходу від традиційного ресурсомісткого виробництва до інтелектуального, де основний акцент робиться на підвищення ефективності, точності управління та зниження впливу на навколишнє середовище. Водночас цей процес потребує розвитку інфраструктури, підготовки кадрів і відповідної законодавчої підтримки, що є ключовими викликами для країни на найближчі роки.

Базові ознаки цього типу штучного інтелекту полягають у здатності оцінювати стан параметрів системи, їх відповідність нормативам, визначати ступінь і рівень відхилень від норми, а також вибирати оптимальну реакцію на

ці відхилення. Такий ШІ може впливати на окремі параметри, комбінувати їх та формувати раціональні поєднання факторів для досягнення потрібного результату. Це означає, що він здатен частково змінювати окремі параметри і komponувати оптимальний стан факторів і умов для отримання бажаного результату.

У птахівництві цей тип ШІ застосовується для комплексного управління процесами утримання і вирощування птиці. Система контролює не лише раціон харчування, але й забезпечує формування індивідуальних раціонів для різних категорій птиці залежно від віку та фізіологічного стану. Вона регулює температуру, вологість, освітленість та інші параметри навколишнього середовища в приміщеннях, де утримується птиця чи зберігаються яйця.

Система постійно відслідковує понад десяток параметрів, формуючи на їх основі оптимальний комплекс умов. При виявленні відхилень від нормативних значень вона подає сигнал тривоги і може самостійно здійснювати корекцію: наприклад, при зниженні вологості активується зволожувач повітря, а при надлишку — осушувач. Аналогічним чином відбувається регулювання температури та освітлення. Таким чином відбувається автоматичне підтримання оптимального мікроклімату для здорового розвитку птиці.

Подібні рішення використовуються й у рослинництві, зокрема в тепличних комплексах. Там ШІ автоматично регулює параметри клімату (температуру, вологість, освітленість), контроль за станом поживних речовин і захист рослин від шкідників і хвороб. Основним принципом роботи системи є режим «норма — відхилення», де програма не лише фіксує відхилення, а й реагує на них, здійснюючи необхідні корективи.

Незважаючи на значний рівень автоматизації та адаптивності, такі системи не здатні самостійно виправляти серйозні технічні збої чи програмні помилки. У разі критичних станів вони можуть лише попередити про проблему, після чого необхідне втручання фахівців — програмістів або системних адміністраторів.

Цей же тип штучного інтелекту застосовується в регіональному кластері, пов'язаному з вирощуванням яблук за так званими інтенсивними технологіями садівництва. Слід зазначити, що в цьому регіоні є лідерство за обсягом закладки садів у масштабах країни. На сьогодні функціонує декілька великих компаній, які спеціалізуються на інтенсивному садівництві. Використовувана технологія, що має італійське походження, дозволяє кожному дереву отримувати строго необхідну кількість поживних речовин, що дає змогу повною мірою розкрити смакові та товарні якості різних сортів яблук, а також підвищити врожайність.

В одному з комплексів поряд із садами функціонує фруктосховище, яке включає сортувальний цех і декілька холодильних камер з регульованим газовим середовищем, що забезпечує збереження яблук свіжими і соковитими до одного року. Процес зберігання контролюється штучним інтелектом, який управляє холодильним обладнанням, автоматизуючи всі етапи. Водночас технологи здійснюють цілодобовий моніторинг, дотримуючись рекомендацій європейських партнерів — постачальників обладнання. За рахунок правильно підібраних параметрів відбувається уповільнення дихальних процесів та обміну

речовин у плодах, що дозволяє продовжити строки зберігання без погіршення смакових і естетичних характеристик продукції. СОРТУВАННЯ ЯБЛУК відбувається на автоматизованих лініях, які забезпечують відбір плодів за кольором, вагою і калібром, а якісна упаковка дозволяє транспортувати продукцію по всій країні.

В тваринницькому комплексі даний тип штучного інтелекту реалізовано через роботизацію виробничого циклу доїння корів та вирощування телят. В основі комплексу — сучасне обладнання, яке обслуговує роботи. Більшість корів обробляються саме ними, а невелика частина — вручну за старою методикою. Робот не просто здійснює доїння, а перед початком проводить огляд корови, вимірюючи температуру, оцінюючи її стан, і лише за відповідності параметрів приступає до процедури. Інтелект системи полягає в тому, що вона здатна відслідковувати стан тварини та молока, сигналізуючи про відхилення, після чого оператор приймає рішення.

Кормова база комплексу має змішаний характер: частина кормів виробляється власними силами, інша — закуповується, при цьому прагнучи до повної самозабезпеченості. Уся кормова система працює за принципом замкнутого циклу, де від сировини до кінцевого продукту контроль здійснюють технологічні системи з програмним забезпеченням. Робот оцінює якість сировини, норми додавання кормів і дає дозвіл на їх видачу.

Отже, у даному комплексі штучний інтелект контролює як вирощування яблук — слідкує за станом ґрунтів і регулює живлення рослин, так і підтримання атмосфери. Часті дощі і град наносять значні збитки врожаю, тому проблему вирішують двома способами: захистом садів сітками та активним впливом на атмосферні процеси. Для цього по периметру садів розташовано кілька газових гармат, які автоматично відстежують атмосферні умови — тиск, вологість, стан хмар — і при виявленні ознак граду запускають постріли, щоб не допустити формування граду або перенаправити його в безпечні для садів райони.

Наступний тип штучного інтелекту — саморегулюючий і самовідтворюваний, який здатен у межах заданих параметрів приймати самостійні рішення на основі комбінації факторів, реагувати на зміни, комбінувати умови для оптимального результату.

Четвертий тип штучного інтелекту — це адаптація до змін зовнішньої кон'юнктури. Найчастіше його застосовують у сфері логістики, де ІІ аналізує зовнішні умови, веде пошук клієнтів, формує договори, змінює умови співпраці залежно від ситуації на ринку. Водночас у виробництві цей тип ІІ також знаходить застосування, зокрема в рослинництві, де він пов'язаний із концепцією так званого «розумного зерна».

Ідея «розумного зерна» полягає у створенні насіння, яке здатне самостійно регулювати свій розвиток із мінімальним втручанням людини. Технологічно цей процес складається з кількох етапів. Спочатку звичайне зерно проходить спеціальну обробку, наприклад, криогенну, щоб очистити його від паразитів та видалити браковані зерна. Далі на зерно наносять спеціальне покриття, що має високу «прозорість» для газообміну та інших життєво важливих функцій. Це покриття створюється у спеціальних камерах, де підтримується точний контроль

параметрів – тиску, температури, вологості, освітлення. Така оболонка захищає зерно від фізичних, термічних, світлових, хімічних та інших несприятливих впливів. Слід враховувати, що захисні оболонки зерна відрізняються не лише за складом мінеральних і органічних речовин, їх послідовністю, кількісними та якісними характеристиками, а й за композиційною структурою. Це означає, що в одному випадку шари можуть бути накладені лівостороннім напрямком, а в іншому — правостороннім. В одному випадку наслаювання здійснюється великими площинами, тоді як в іншому — у вигляді ниток, які можуть обвиватися у різних напрямках, формуючи сітку, хрестоподібний візерунок або інші структури. Отже, на властивості оболонок впливає не лише кількість і послідовність нанесених матеріалів, а й їх геометрія: нитки, площини, точки (пуантилізм), а також орієнтація шарів — горизонтальна, вертикальна тощо.

Наступним кроком зерно поміщають у іншу камеру, де на основну оболонку наносяться додаткові шари – кілька захисних оболонок формуються за композитним (аддитивним) принципом із використанням нанонапилення. Кожен шар має унікальний склад мінеральних та органічних речовин, що підбираються за різними критеріями – реагування на температуру, вологість, освітлення, мінералізацію та інші параметри, з урахуванням їх надлишку чи нестачі. У результаті отримується зерно, яке не лише очищене, але й містить в собі алгоритми подальшого розвитку.

Після висіву таке «розумне зерно» починає самостійно реагувати на кліматичні та погодні умови, наприклад, зміни температури, вологості, освітлення. В кожній із захисних оболонок закладена програма, яка відповідає за певний параметр: одна контролює вологість, інша — температуру, третя — освітленість, четверта — стан ґрунту, п'ята — тиск тощо. Завдяки цій системі зерно може адаптуватися і «вмикати» додаткові ресурси, закладені у оболонках, відповідно до змін середовища.

Ця технологія не лише дозволяє значно зекономити на трудових затратах, адже зменшує потребу в додатковому поливі чи інших втручаннях, а й мінімізує негативний вплив на ґрунт та навколишнє середовище. «Розумне зерно» фактично функціонує автономно, враховуючи різні зональні умови, стан ґрунтів та кліматичні особливості місцевості, що робить його універсальним і ефективним засобом у сучасному сільському господарстві.

Важливим і поки що локалізованим напрямком розвитку штучного інтелекту в сільському господарстві є система логістики. У нашому випадку ця система має здебільшого локальний характер. Вона охоплює різні галузі — від тваринництва до овочівництва та плодівництва, де кожен сегмент має власну специфічну логістику. Основним завданням тут є впровадження штучного інтелекту для якісного обслуговування клієнтів, оптимізації логістичних процесів, контролю за складськими запасами і зниження витрат. У деяких випадках це також стосується прогнозування попиту та маркетингових активностей.

Сьогодні активно освоюються інтернет-технології, зокрема створення онлайн-магазинів, які стають важливою частиною розвитку П в аграрному

секторі. Це пов'язано насамперед із аналізом і прогнозуванням поведінки споживачів. У основі роботи такого сегмента штучного інтелекту лежить функціонування вебсайту з різними розділами, між якими відбуваються переходи, а користувачі залишають свої відгуки і коментарі. За допомогою цих даних система формує персоналізовані товарні рекомендації, орієнтовані як на конкретного клієнта, так і на географію ринків, і надсилає їх зареєстрованим користувачам електронною поштою.

Ще одним важливим напрямком є розширення клієнтської бази. Це не лише залучення нових покупців, а й забезпечення стабільності вже існуючих клієнтів. Для підвищення конверсії, повернення колишніх відвідувачів та підвищення ефективності маркетингових розсилок система штучного інтелекту використовує алгоритми навчання, які визначають оптимальний час для взаємодії з клієнтом, враховують його психологічні особливості і переваги, а також стимулюють повторні покупки. Таким чином, ІІ стає не просто інструментом автоматизації, а й ефективним механізмом для глибшого розуміння та задоволення потреб споживачів у сільськогосподарському бізнесі.

Висновки

Перший і найголовніший висновок полягає в тому, що подальший розвиток національного сільського господарства тісно пов'язаний із впровадженням систем штучного інтелекту. Вже сьогодні галузі, що активно використовують ІІІ, демонструють кращі показники: зростання обсягів виробництва, підвищення продуктивності праці, збільшення доходів і прибутку, зниження собівартості продукції. У майбутньому, з урахуванням скорочення чисельності робочої сили, зменшення посівних площ і погіршення екологічної ситуації, роль ІІІ в агросекторі лише зростатиме.

Однак практика виявила низку суттєвих недоліків існуючих систем застосування ІІІ. По-перше, це фрагментарність використання. Сьогодні застосовуються окремі, часто розрізнені елементи та модулі ІІІ, але відсутня цілісна інтегрована система. Необхідно перейти до нової концепції, де базовим принципом стане холістичний підхід — створення системи ІІІ як єдиного цілого, а не сукупності розрізнених частин. Наразі наявні фрагменти поєднуються в еkleктичні чи конгломеративні структури, що знижує загальну ефективність через невідповідність і принцип «слабкого ланцюга», коли одна слабка частина визначає роботу всієї системи. Отже, потрібно розробити нову архітектуру ІІІ в агросекторі, яка, хоча й базуватиметься на модульному принципі, формуватиметься з урахуванням цілісності.

По-друге, відсутність єдиної, замкненої логістичної та інформаційної ланцюга між різними секторами і сегментами сільського господарства. ІІІ застосовується і в рослинництві, і в тваринництві, але здебільшого в окремих сегментах, а деякі галузі залишаються поза увагою. Це пояснюється не стільки галузевими особливостями, скільки типами і блоками ІІІ, які пристосовані до конкретних сегментів (овочівництво, плідівництво, зернове господарство тощо). Відтак необхідно провести тотальну цифровізацію сільськогосподарських земель — створення електронних карт полів, пасовищ, багаторічних насаджень,

впровадити онлайн-моніторинг запасів зерна, цін, логістичних вузлів з використанням сучасних технологій, зокрема блокчейну.

По-третє, надмірна залежність від іноземних систем ШІ. Більшість застосовуваних рішень базуються на закордонному програмному забезпеченні та обладнанні, які продаються в комплексі, де включення їхнього ПЗ та «заліза» є обов'язковим. Це не стільки питання технічної компетентності вітчизняних розробників, скільки стратегічна політика іноземних постачальників, які фактично формують архітектуру ШІ в українському агросекторі. Вирішення цього питання бачиться в двох шляхах: або вступ до іноземних компаній у якості партнерів з можливістю інтеграції власних програмних розробок, або створення паралельних національних систем ШІ за прикладом Китаю, із власними розробками, навчанням і вдосконаленням технологій.

Нарешті, четвертий аспект — існуючі технологічні, організаційні, економічні, етичні та психологічні виклики при впровадженні ШІ, які лише посилюватимуться із зростанням проникнення ШІ у традиційне сільське господарство. Ці виклики потребують своєчасного вивчення і розробки ефективних стратегій реагування.

В цілому, можна виділити два основні напрямки розвитку ШІ в сільському господарстві. Перший — децентралізація, коли кожен агропідприємство чи комплекс має власний автономний ШІ, що створює ситуацію «множинного інтелекту», де конкуренція відбувається не лише продукцією і технологіями, а й рівнем розвитку ШІ.

Другий — протилежний — створення централізованої інтегрованої системи ШІ, що об'єднує всі наявні локальні рішення в єдину мережу, координує, контролює і управляє ними як єдиним організмом. Який із цих шляхів стане провідним, наразі прогнозувати складно, а переносити досвід інших галузей не завжди коректно.

Отже, подальший розвиток ШІ в агросекторі України потребує комплексного, системного підходу, що поєднує гнучкість, цілісність та адаптивність до мінливих умов зовнішнього середовища.

5.3 ЦИФРОВЕ ТВАРИННИЦТВО: НАПРЯМИ ТА ПЕРСПЕКТИВИ РОЗВИТКУ

Аналізуючи основні вектори розвитку світового агропромислового комплексу, варто відзначити стійке посилення процесів концентрації, спеціалізації та інтеграції виробництва. Ці процеси супроводжуються зростаючим застосуванням електроніки, активним розвитком робототехнічних засобів і збільшенням обсягів інвестицій у науково-дослідні розробки та освітні ініціативи. Все це свідчить про те, що аграрна галузь переживає системне оновлення, орієнтоване на цифрову трансформацію.

Ілюстрацією глобальної важливості цього процесу став Глобальний форум з продовольства та сільського господарства (GFFA), що відбувся 17 січня 2019 року в Берліні. Центральною темою форуму було обрано гасло: «Сільське господарство стає цифровим: розумні рішення для аграрного майбутнього» [1].

У цьому контексті цифрове тваринництво слід розглядати вже не як тимчасову тенденцію, а як ключовий напрям розвитку, який відповідає загальній логіці еволюції галузі.

Для українських сільгоспвиробників цифрові технології відкривають можливості для суттєвого зростання ефективності тваринницьких підприємств. Йдеться насамперед про більш точне виконання технологічних операцій, оптимізацію витрат, зниження втрат і підвищення якості виробництва на основі аналізу даних, що надходять із цифрових систем моніторингу та управління.

Системне впровадження інноваційних технологій у тваринництво вже перетворюється на чинник національної конкурентоспроможності. Оскільки традиційні резерви підвищення ефективності практично вичерпані, подальше зростання можливе лише за рахунок технологічного оновлення. Відповідно, технічна політика в галузі має базуватися на створенні нової технологічної платформи, яка забезпечить стабільну модернізацію та підвищення ефективності як наявних, так і нових тваринницьких комплексів.

Виведення тваринництва на якісно новий рівень передбачає інтенсивне впровадження сучасних інформаційних рішень. При цьому зростає значення аналітичної та управлінської функцій, які тепер зосереджуються не безпосередньо у виробничому процесі, а в офісах — через цифрову обробку даних, оптимізацію технологій та прогнозування результатів. Це відповідає вимогам до підвищення продуктивності праці та адаптації до умов глобальної конкуренції.

Сьогодні дедалі більше ІТ-компаній звертають увагу на сільське господарство як перспективну сферу реалізації інновацій, зокрема в рамках концепції «Індустрія 4.0». Символічно, що точкою відліку цифрової епохи вважають період 2008–2009 років, коли кількість пристроїв, підключених до інтернету, вперше перевищила чисельність населення Землі. Саме з цього моменту почалося формування нового технологічного укладу, що змінює як загальні принципи організації виробництва, так і характер управління в аграрному секторі.

Сьогодні цифрове тваринництво — це вже не просто актуальний тренд у світовому сільському господарстві. Його розвиток є закономірним результатом логіки технологічної еволюції галузі. Зростаюче значення цифрових рішень зумовлене не лише їхньою інноваційністю, а й здатністю забезпечити стабільне підвищення ефективності виробництва, особливо у великих аграрних підприємствах.

Підприємці дедалі чіткіше усвідомлюють переваги масштабних тваринницьких господарств: зниження витрат на одиницю продукції, відповідність вимогам ринку м'яса й молока, можливість формування великих товарних партій, зручних для співпраці з переробними підприємствами. Характерним прикладом є Сполучені Штати Америки, де ще у 2010 році частка молока, що вироблялася фермами з поголів'ям понад 1000 корів, перевищила 50%. При цьому 34,6% усієї молочної продукції було отримано з ферм, де утримували понад 2000 голів.

Загалом із 2002 року кількість молочних ферм у США скоротилася на 35%, тоді як кількість великих господарств із поголів'ям понад 1000 корів, навпаки, зросла на той самий відсоток [3,4]. Нині структура молочного виробництва в США виглядає наступним чином: лише 2,9% великих ферм виробляють половину всього обсягу молока в країні. У кількісному вираженні це приблизно 1750 господарств з-поміж 60 тисяч, тобто в середньому понад 36 молочних мегаферм на кожен штат (без урахування Аляски та Гаваїв) [5].

Утім, більшість експертів сходяться на думці, що подальше укрупнення ферм — понад 3000 голів — дає лише обмежені переваги. Наш аналіз засвідчує, що проблеми управління такими великими підприємствами можна ефективно подолати завдяки переходу до цифрової економіки, де розмір господарства вже не є визначальним фактором ефективності. У такій моделі важливішу роль відіграє якість управлінських рішень, підкріплених даними та цифровими технологіями.

У контексті реалізації сучасної технічної політики в тваринництві пріоритетним завданням виступає формування нової технологічної бази для створення конкурентних переваг модернізованих і новозбудованих тваринницьких комплексів. Цей напрям повинен поєднувати вимоги високої продуктивності з принципами безвідходної (циркулярної) економіки, яка передбачає ефективне використання ресурсів і мінімізацію впливу на довкілля.

Серед актуальних завдань на перший план виходить визначення економічно доцільних шляхів технічного прогресу у тваринництві, удосконалення систем організації й управління виробництвом, розвиток автоматизації та роботизації технологічних процесів. Усе більшу увагу приділяють також підвищенню ступеня спеціалізації й концентрації виробництва, удосконаленню систем переробки та збуту продукції, екологічній безпеці, енергозбереженню, ресурсоефективності та оптимізації технічного обслуговування.

Орієнтуючись на інноваційність, важливо сформувати сучасну нормативно-технічну базу та науково-методичне забезпечення для виробничих підприємств. Особливого значення набуває модернізація діючих господарств шляхом впровадження високотехнологічних рішень. Серед них — доїльні роботи, системи автоматизованої годівлі та прибирання гною, комплекси для стрижки овець, пристрої відстеження місцезнаходження тварин, системи моніторингу поведінки та стану здоров'я, роботи для зважування та догляду, роботизовані пастухи, а також автоматизовані комплекси для птахівництва, свинарства й великої рогатої худоби.

Крім технічних аспектів, розвиток галузі потребує врахування низки зовнішніх факторів, серед яких чільне місце посідає правове регулювання. Зокрема, йдеться про підвищення вимог до безпеки та якості продукції, а також про зростання ролі екологічного законодавства, що передбачає жорсткі обмеження для діяльності сільськогосподарських товаровиробників у сфері природокористування й охорони довкілля.

У контексті сучасного розвитку аграрного виробництва під поняттями «цифрова економіка» та «цифрове тваринництво» розуміється не лише автоматизація окремих процесів, а цілісна трансформація галузі, що базується на інформаційно-комунікаційних технологіях і даних як ключовому ресурсі. Така економіка здатна забезпечити наявність ІКТ-інфраструктури та ефективно мобілізувати потенціал цифрових рішень в інтересах споживачів, бізнесу, держави та науково-освітнього середовища.

Це, зокрема, включає виробництво сучасного цифрового обладнання, компонентів для робототехніки, сенсорних систем, бездротового зв'язку, а також розробку програмного забезпечення, медійного контенту та новітніх виробничих технологій. У цифровій економіці вирішальну роль відіграють великі масиви даних, що створюють умови для появи нових технологічних ринків і здатні принципово змінити структуру вже існуючих.

Цифрове тваринництво як складова частина цифрової економіки передбачає формування повноцінної екосистеми, у якій саме дані в цифровій формі виступають основним фактором виробництва. У цій системі забезпечується ефективна взаємодія всіх суб'єктів — бізнесу, держави, науково-освітніх установ і громадян, у тому числі й у транснаціональному вимірі.

Цифровізація тваринництва охоплює комплекс рішень, спрямованих на сталий приріст ефективності виробництва за рахунок застосування інформаційно-комунікаційних систем та технічних засобів, які дозволяють точно контролювати виробничі процеси й ефективно використовувати ресурси.

Однак, попри сформовані підвалини, впровадження концепції «Індустрія 4.0» стикається з низкою бар'єрів. Так, в умовах пострадянського простору значна частина виробничих продуктів ще не повністю оцифрована: повна цифрова інформація про виріб часто відсутня або не адаптована до систем управління життєвим циклом продукції (PDM-систем). У той час як у країнах з розвиненими економіками цей трудомісткий етап уже пройдено, що дозволяє перейти від управління окремими об'єктами до інтегрованого управління цілими процесами та комплексами.

Попри це, технологічні основи для цифрового переходу в тваринництві вже закладені: сучасні тваринницькі комплекси оснащуються обладнанням нового покоління, що дозволяє застосовувати принципи Індустрії 4.0 на практиці. У зв'язку з цим нагальною потребою є розробка нових стандартів виробництва, які сприятимуть інтеграції сільгоспвиробників із роботизованими та цифровими технологіями, стимулюватимуть партнерство між наукою та промисловістю, розширюватимуть можливості для інноваційного розвитку і підвищення загальної продуктивності в галузі.

Одним із ключових завдань цифрового тваринництва є спрощення та оптимізація праці на тваринницьких підприємствах. Водночас подекуди лунають побоювання, що цифровізація може призвести до скорочення робочих місць — аналогічно до ситуації в інших секторах економіки. Проте такі твердження є хибними. Сучасне сільське господарство більше не потребує класичного образу фермера — фізично виснаженої людини, яка щодня виконує ручну працю.

Сьогодні фермер перетворюється на високотехнологічного менеджера, який керує господарством за допомогою комп'ютерних програм, здійснює електронний збір даних і приймає рішення на основі аналітики.

Цифрова трансформація змінює не лише організацію виробничих процесів, а й сам спосіб життя на селі. Це створює передумови для появи нових професій, таких як оператори цифрових систем, аналітики даних, технічні фахівці з обслуговування «розумної» техніки тощо. Усе це формує потребу в переосмисленні пріоритетів технічного прогресу у тваринництві, які мають ґрунтуватися на економічно обґрунтованих напрямках розвитку.

Цифрові технології у тваринництві забезпечують простежуваність походження, якості та безпеки продукції на всіх етапах формування доданої вартості. Це, зокрема, дозволяє попереджувати розповсюдження інфекційних захворювань і протидіяти нелегальній торгівлі продуктами тваринного походження.

Поряд із модернізацією вже існуючих виробничих потужностей, важливим напрямом є створення нових тваринницьких комплексів, заснованих на впровадженні високотехнологічних рішень. Це дає змогу інтегруватися у нову технологічну парадигму — Четверту промислову революцію, що базується на міжмашинній взаємодії (Machine-to-Machine, або M2M).

Сучасне обладнання для молочних ферм уже повинно відповідати цим вимогам. Наприклад, доїльні установки мають працювати безперервно, адже навіть короткочасна зупинка внаслідок поломки призводить до суттєвих фінансових втрат. У зв'язку з цим активно розвиваються цифрові системи управління, що забезпечують безперебійну роботу обладнання, його дистанційне діагностування та обслуговування за допомогою мобільних пристроїв. Усе це підвищує загальну надійність, продуктивність і стійкість виробничих процесів.

Впровадження цифрових технологій у тваринництво дозволяє значно заощаджувати ресурси завдяки здатності швидко виявляти проблеми та оперативно усувати помилки на будь-якому етапі виробництва. Особливо це важливо у сфері контролю якості продукції, де своєчасне реагування може запобігти масштабним втратам. У цьому контексті поява інтелектуальних (або «розумних») ферм є принципово новим напрямом розвитку аграрного сектору. Такі господарства поєднують сучасні цифрові технології, автоматизовані системи управління та сенсори для моніторингу процесів, що в сукупності забезпечує підвищення якості продукції, ефективне управління виробництвом і трансформацію сільського господарства у високорентабельний та інноваційно привабливий бізнес.

Основою технічної політики у тваринництві має стати створення нової технологічної платформи, здатної забезпечити зростання конкурентоспроможності нових і реконструйованих тваринницьких комплексів. Цей процес має орієнтуватися на формування технологічного укладу нового покоління та поступовий перехід до принципів безвідходної (циркулярної) економіки, що є провідною глобальною тенденцією.

Сучасні міжнародні умови змушують країни прискорювати розвиток власного електронного, приладобудівного й аграрного виробництва, оскільки без цього важко забезпечити швидке створення й адаптацію роботів та робототехнічних рішень у сільському господарстві. Відставання у цьому напрямку може коштувати втрати позицій на глобальному ринку. Саме тому розвиток цифрових агротехнологій і створення високотехнологічної інфраструктури стають ключовими чинниками конкурентної боротьби у світовому агропромисловому просторі.

5.4 «АГРОКУЛЬТУРА 4.0: СИНЕРГІЯ СКЛАДНИХ СИСТЕМ, ОНТОЛОГІЧНОГО ПІДХОДУ, ІНТЕРНЕТУ РЕЧЕЙ І КОСМІЧНИХ ТЕХНОЛОГІЙ

Вступ. Про термінологію та ролі

Сьогодні ми спостерігаємо активне зміщення понять і термінів, які раніше належали до різних галузей і майже не перетиналися. Виникають нові терміни, деякі — втрачають актуальність. Одним із таких концептів, що переживає етап переосмислення, є точне землеробство. Його також позначають як прецизійне землеробство, супутникове фермерство (satellite farming) чи керування конкретними культурами (SSCM — site-specific crop management).

Ця концепція ґрунтується на детальному спостереженні, вимірюванні та оперативному реагуванні на просторову змінність як між різними ділянками поля, так і в межах окремої ділянки. Основна мета — створення систем підтримки прийняття рішень (DSS), що дозволяє управляти господарством з максимальною ефективністю, забезпечуючи високу віддачу при збереженні ресурсів. Початково орієнтоване на польові культури, точне землеробство поступово розширилося на сади, тваринництво та інші напрями біоекономіки.

Серед численних методів точного сільського господарства варто виокремити фіто-геоморфологічний підхід, що пов'язує особливості рельєфу місцевості з довгостроковими стабільними характеристиками росту рослин. Інтерес до цього підходу пояснюється тим, що геоморфологічна структура зазвичай визначає гідрологічні умови поля, впливаючи на розподіл вологи, стік і накопичення води — ключові фактори для вирощування культур.

Активний розвиток практик точного землеробства став можливим завдяки впровадженню глобальних навігаційних супутникових систем (GPS і GNSS). Можливість фермера чи дослідника точно визначати своє положення на полі відкрила шлях до створення карт просторової мінливості численних агрономічних показників — урожайності, топографічних особливостей, вмісту органічної речовини, вологості ґрунту, рівнів азоту, рН, електропровідності, магнію, калію та інших параметрів.

Подібні дані також збираються за допомогою сенсорних систем, установлених на сільськогосподарській техніці, обладнаній GPS-навігацією — тракторах, комбайнах тощо. Такі сенсорні масиви включають датчики реального часу, які вимірюють широкий спектр параметрів — від рівня хлорофілу до стану вологи у рослинах, а також формують мультиспектральні зображення.

Отримані дані використовуються разом із супутниковими знімками для реалізації зональних технологій управління (VRT) — зокрема, у сівалках, обприскувачах, системах живлення, що забезпечує оптимальний розподіл ресурсів у межах кожної ділянки.

Важливу роль у розвитку прецизійного землеробства відіграли безпілотні літальні апарати (БПЛА), зокрема моделі на кшталт DJI Phantom. Вони відносно недорогі й придатні для використання навіть операторами-початківцями. Сільськогосподарські дрони можуть бути обладнані гіперспектральними або RGB-камерами, що дозволяє виконувати масове аерофотознімання полів. Отримані зображення обробляються методами фотограмметрії, формуючи ортофотоплани та карти NDVI, що є ключовими для оцінки стану рослин.

Точне землеробство сьогодні розглядається як фундаментальний елемент третьої хвилі аграрних революцій. Перша хвиля — механізаційна — відбулася в період 1900–1930 років і дала змогу одному фермеру забезпечувати харчами до 26 осіб. Друга хвиля — «зелена революція» 1990-х — пов'язана з використанням генетично модифікованих культур, завдяки чому цей показник зріс до 155 осіб на одного аграрія.

Очікується, що до 2050 року населення планети сягне 9,6 мільярдів, тож виробництво продовольства має подвоїтися, аби задовольнити глобальний попит. Новітні цифрові технології в агровиробництві дають змогу прогнозувати, що один фермер зможе забезпечити харчами вже понад 265 осіб, не збільшуючи площі сільськогосподарських угідь.

Європейське агентство з глобальних навігаційних супутникових систем (GSA) — це установа Європейського Союзу, створена з метою захисту суспільних інтересів у сфері супутникової навігації, а також забезпечення представництва цих інтересів у межах європейських програм Galileo та EGNOS (Європейська геостационарна служба навігації).

Програма Galileo покликана забезпечити незалежну та сучасну європейську альтернативу американській системі GPS, надаючи точні навігаційні сигнали з високим рівнем надійності. Агентство було засноване у 2004 році, а з 1 вересня 2012 року розташовується в місті Прага (Чеська Республіка). В його компетенції — управління, моніторинг і контроль використання ресурсів програми, а також координація впровадження новітніх супутникових сервісів.

У червні 2018 року Європейська Комісія ініціювала трансформацію GSA у Європейське агентство з питань космічної програми (EUSPA), з розширенням повноважень на сферу космічної ситуаційної обізнаності (SSA) та інтеграцію систем під спільною назвою EGNSS (European GNSS).

Однією з ключових причин цієї реорганізації стало стрімке зростання кількості застосувань EGNSS у точному землеробстві, яке є одним із найдавніших секторів практичного використання супутникових технологій у Європі. Крім того, під егідою GSA активно розробляються й тестуються компоненти апаратного забезпечення, програмне забезпечення та вбудовані прошивки для пристроїв преміум-сегменту у сфері GNSS, Інтернету речей (IoT)

та інших масових застосувань. Ці розробки здійснюються в межах програм Fundamental Elements (FE), зокрема у рамках успішно реалізованих проєктів FANTASTIC, ESCAPE, PATROL та EDG2E.

Система EGNSS суттєво підсилює можливості сигналу GPS (зокрема у діапазоні L1) в межах регіону ECAC (Європейська конференція цивільної авіації), підвищуючи загальну ефективність супутникової навігації. Це особливо важливо для критичних застосувань, пов'язаних з безпекою, оскільки забезпечується вища точність, надійність і довіра до навігаційної інформації, включаючи можливість отримання попереджень про відхилення. Саме на цих принципах і базуються послуги, що надаються через систему EGNOS.

Точне землеробство — це високоефективна стратегія ведення сільського господарства, що дозволяє підвищити врожайність і продуктивність, одночасно зменшуючи витрати та мінімізуючи негативний вплив на довкілля. В умовах постійного зростання витрат на ресурси та посилення вимог до екологічної безпеки, впровадження раціональних і сталих рішень для фермерських господарств є актуальнішим, ніж будь-коли.

Однак традиційними бар'єрами на шляху широкого впровадження точного землеробства залишаються висока вартість обладнання та дорогі підписки на інформаційні сервіси і послуги, що забезпечують збір і обробку даних.

Показовим є приклад інтеграції системи EGNSS у сільське господарство. Візуалізація зв'язку між EGNSS і точним землеробством подана на **рис. 5.4.1**, а детальна архітектура самої системи — на **рис. 5.4.2**.



Рис. 5.4.1. Схема роботи точного сільського господарства з використанням супутників

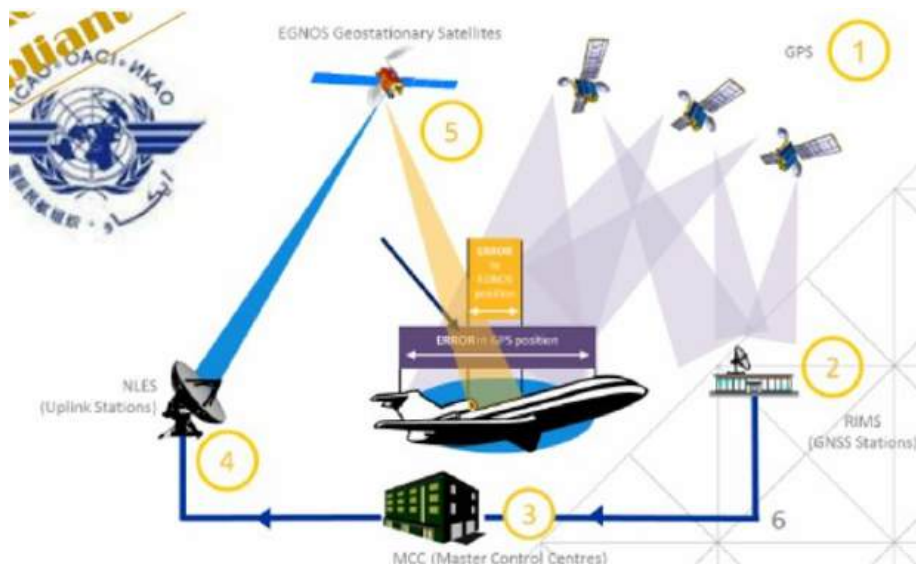


Рис. 5.4.2. Архітектура системи EGNOS та EGNSS

Оскільки ефективність функціонування EGNSS значною мірою залежить від наземної інфраструктури, очікується, що до кінця року її охоплення подвоїться. Варто також зазначити, що система EGNOS, як компонент EGNSS, вже сертифікована ІКАО (Міжнародною організацією цивільної авіації) для використання в управлінні повітряним рухом, що свідчить про високий рівень точності та надійності навігаційних послуг.

Стан використання GNSS у сільському господарстві Європейського Союзу

На сьогодні система EGNOS (Європейська геостационарна служба навігації) разом із супутниковою системою Galileo забезпечують точне, доступне й комплексне навігаційне рішення для потреб агровиробництва. Завдяки високій точності визначення просторових координат і часу, ці технології сприяють підвищенню ефективності господарської діяльності в аграрному секторі, створюючи додаткову цінність на кожному етапі виробничого процесу — від передпосівного планування до обліку врожаю та управління земельними ресурсами.

Інтегрована навігаційна інфраструктура EGNSS активно підтримує сучасні підходи точного землеробства. Серед них — варіативне застосування ресурсів за допомогою технологій змінних норм, автоматизоване керування технікою, моніторинг біомаси та врожайності, контроль за переміщенням тварин і створення віртуальних загороджень, просторовий аналіз післязбиральних процесів, цифрове нанесення меж земельних ділянок, а також облік і управління аграрними активами.

Завдяки таким рішенням сільське господарство країн Європейського Союзу отримує новий рівень точності, адаптивності й екологічної сталості, що відповідає сучасним викликам і потребам сталого розвитку.

У контексті сучасного сільського господарства важливо усвідомлювати, що ми маємо справу з взаємодією численних взаємопов'язаних систем, де результати функціонування однієї підсистеми автоматично стають вхідними

даними для іншої. У найпростішому вигляді це нагадує послідовний обмін інформацією, проте на практиці маємо справу з багаторівневою онтологічною мережею, складність і структура якої динамічно змінюються — зокрема, під впливом природно-кліматичних умов, агрохімічного фону чи ринкових факторів.

Наступним логічним кроком у розвитку таких взаємопов'язаних рішень стає перехід до концепції "системи систем" (System of Systems, SoS). Саме цей рівень взаємодії дозволяє досягти синергетичного ефекту — як у сфері підвищення економічної ефективності, так і в забезпеченні сталого екологічного балансу, точного управління ресурсами та формування нових цифрових сервісів.

Такий підхід і є основою формування парадигми Агрокультури 4.0, яка вже активно розглядається як новий етап аграрної трансформації в межах концепції четвертої промислової революції.

Стан розвитку сервісів точного землеробства як етап переходу до Агрокультури 4.0

На сучасному етапі цифровізації агросектору точне землеробство слугує базовим інструментом, що забезпечує технологічний перехід до більш складних, інтегрованих систем управління — як за ресурсами, так і за ризиками. Саме через поєднання геоданих, супутникових технологій, IoT, штучного інтелекту та онтологічних моделей відбувається трансформація агропрактик відповідно до принципів Агрокультури 4.0.

Сьогодні ключові тенденції розвитку цифрових агротехнологій свідчать про те, що вже сама наявність доступу до систем GNSS та EGNSS виступає потужним стимулом для впровадження інтегрованого управління фермерськими господарствами. Це означає поступовий, але незворотний перехід до парадигми Агрокультури 4.0, де агровиробництво спирається на системи систем, просторову аналітику, автоматизоване управління і цифрову логіку прийняття рішень.

Паралельно з цим спостерігається стрімке зростання споживання безпілотних літальних апаратів (БПЛА), які дедалі активніше використовуються в комерційних секторах, і саме аграрна галузь прогнозовано стане одним з найбільших користувачів цих технологій. Розвиток і ефективність БПЛА в агросекторі прямо залежать від точності та доступності навігаційних сервісів GNSS/EGNSS, що було підтверджено аналітичними даними Європейського агентства GSA.

Статистика споживання GNSS-пристроїв у Європейському Союзі демонструє стабільну динаміку зростання у секторі сільського господарства. Уже сьогодні простежується щорічне зростання попиту на GNSS-рішення, а також зміщення фокусу на конкретні напрямки застосування. Найбільш активно технології використовуються для автоматизованого управління тракторами, що дає змогу дотримуватися точних габаритних параметрів при обробці ґрунту. Цей підхід не потребує повної заміни водія, однак значно підвищує точність і ефективність виконання сільськогосподарських операцій. Другою за

поширеністю сферою використання є автоматичне рульове керування, що ще більше скорочує навантаження на оператора і зменшує ймовірність помилок під час руху техніки.

Таким чином, агросектор не лише адаптує нові цифрові технології, а й формує стійкий попит на високоточні рішення, які стають основою інтелектуального землеробства.

Автоматичне рульове керування за своєю суттю є адаптацією роботизованих систем, подібних до тих, що вже давно використовуються на промислових підприємствах і логістичних складах. У таких середовищах відсутність людей у зоні дії техніки значно спрощувала завдання із забезпечення безпеки, що сприяло швидкому впровадженню повної автоматизації.

Однак у сільському господарстві застосування автоматизованих систем відбувається переважно в консультативному режимі, коли система допомагає оператору, а не повністю замінює його. Це пояснюється складністю умов роботи в полі та потребою врахування численних змінних. Проте така часткова автоматизація стала можливою завдяки багаторічному досвіду галузі у сфері стандартизації електроніки й обміну даними між різними сільськогосподарськими машинами.

Вагомим чинником цього процесу стало існування відкритих галузевих стандартів, зокрема в тракторному сегменті, а також у взаємодії техніки з інформаційними системами управління фермами (FMIS). Найбільш важливим стандартом у цьому контексті є ISO 11783, більш відомий як ISOBUS, включно з форматом обміну даними ISO-XML. Протягом десятиліть ISOBUS де-факто виступає універсальним рішенням, яке забезпечує сумісність тракторів, агрегатів, навісного обладнання та цифрових платформ різних виробників.

Цей стандарт, реалізований у багатьох країнах, регламентує електронну взаємодію між основними сільськогосподарськими машинами, зокрема між трактором і знаряддям. Сучасна реалізація системи ISOBUS передбачає локальну комунікаційну шину на основі протоколу CAN, яка з'єднує трактор, реалізацію (робочий агрегат), термінал керування, допоміжний джойстик та інші компоненти.

Окрім локальної взаємодії, система може бути розширена за рахунок зовнішніх інтерфейсів, які забезпечують обмін даними між машинами (M2M) та підключення до інформаційних систем управління фермами або хмарних порталів виробника. Таким чином, ISOBUS виступає інфраструктурною основою для цифрової трансформації технічного парку сучасного сільського господарства.

Інтерфейси управління даними значно спрощують обмін інформацією між мобільним сільськогосподарським обладнанням та системами керування в польових умовах. Завдяки цій функціональності користувач має можливість отримувати необхідні дані безпосередньо в систему управління фермою для цілей реєстрації та подальшого планування. При цьому нові планові дані можуть генеруватися за допомогою систем підтримки прийняття рішень і повертатися до

сільськогосподарської техніки для реалізації запланованих польових робіт через бездротові служби або портали виробників.

Варто підкреслити, що фізичне забезпечення зв'язку та позиціонування здійснюється саме завдяки системам GNSS. У цьому контексті стандарти обміну даними між мобільним обладнанням і системами управління фермами, або ж системами обробки даних, уніфіковані у частинах 10 і 11 стандарту ISO 11783.

Для забезпечення високих вимог до точності широко застосовуються багатокомпонентні та багаточастотні GNSS-приймачі. Кількість таких приймачів у складі сільськогосподарської техніки у країнах Європейського Союзу постійно зростає і схожа тенденція спостерігається і в інших регіонах світу.

Комерційний сервіс Galileo High Accuracy Service (CSHA) забезпечує позиціонування приймача з похибкою меншою за один десятий метра. Він передає дані корекції в реальному часі по всьому світу, використовуючи технологію PPP (Precise Point Positioning — точне позиціонування точки) через супутниковий канал Galileo E6. Для цього не потрібен додатковий канал зв'язку і немає залежності від близькості до наземних станцій мережі корекцій.

Використання трьохчастотного прийому сприяє подальшому скороченню часу збіжності позиціонування, що дозволяє досягати високої точності швидко та ефективно. Останні оновлення також поліпшили дальність видимості супутників і якість прийому сигналу, особливо у високих широтах.

Європейська комісія та Європейське агентство GNSS (GSA) підтверджують, що перше покоління сервісу Galileo вже надає користувачам послуги з високою точністю позиціонування та автентифікації, що є важливим кроком у розвитку глобальних навігаційних технологій.

Незабаром технологічні розробки дозволять створити недорогі GNSS-приймачі, здатні досягати точності позиціонування на рівні сантиметрів. Основними чинниками такого прогресу є зростаюча доступність бюджетного обладнання з підтримкою багаточастотного прийому, а також посилена інтеграція GNSS із суміжними технологіями, такими як LIDAR, робототехніка, мобільне картографування тощо.

Синергетичний розвиток відбувається і між GNSS та системами дистанційного зондування Землі, що посилюється завдяки активному впровадженню безпілотних літальних апаратів (дронів) у картографічні процеси. Така взаємодія відкриває нові можливості для різних професійних сфер. Зокрема, геодезисти можуть використовувати різноманітні професійні сервіси на основі EGNSS для розширення власного бізнесу.

Паралельно з цим збільшення застосування дронів у точному землеробстві стимулює подальше зростання використання GNSS. Система GNSS стала фундаментом для комерційних безпілотників, забезпечуючи їхню безпечну навігацію і надійність у польотах.

Комплекс систем — включно із системами-системами, Інтернетом речей, робототехнікою та дронами — формує основу концепції Агрокультури 4.0. Ці

технології створюють нові ланцюги доданої вартості для точного сільського господарства і розширюють спектр професійних послуг у сфері геодезії.

Розширення можливостей Агрокультури 4.0 через науково-практичні проекти

Впровадження методів точного землеробства дозволяє Європейському Союзу збільшити обсяги сільськогосподарського виробництва, одночасно забезпечуючи стійкість агропродовольчого сектора Європи. У зв'язку з цим ЄС підтримує передові дослідження та інновації в низці перспективних напрямів, які покликані максимально реалізувати потенціал цієї справжньої аграрної революції XXI століття.

Точне землеробство має значний потенціал для задоволення зростаючого попиту на продукти харчування, пропонуючи більш точний і ресурсоефективний підхід до управління виробництвом, що в суті означає «виробляти більше, витрачаючи менше». Завдяки цифровій революції, технології, орієнтовані на обробку великих даних (Big Data) та Інтернет речей, відкривають численні нові можливості для просування методів точного землеробства.

Сьогодні у 70–80 % нового сільськогосподарського обладнання присутні компоненти точного землеробства, що охоплюють усі чотири етапи циклу вирощування культур — від підготовки ґрунту, посіву, управління рослинами до збирання врожаю. При цьому позитивний вплив технологій точного землеробства відчувають не лише рослинницькі господарства, а й фермери, зайняті тваринництвом.

Європейська Комісія приділяє велику увагу вдосконаленню методів точного землеробства, виділяючи фінансування для нових інвестицій у межах програм FP7 та Horizon 2020. Це спрямовано на те, щоб фермери могли ефективно знижувати витрати без втрати продуктивності, а також значно підвищувати врожайність, забезпечуючи подальше зростання місцевої економіки.

Окрім економічних переваг, точне землеробство також обіцяє суттєві екологічні вигоди, які розглядаються як засіб підвищення стійкості агропродовольчого сектора Європи у довгостроковій перспективі. Особливу увагу приділено скороченню застосування агрохімікатів, зокрема пестицидів. Ці екологічні переваги сприятимуть реалізації масштабних екологічних амбіцій ЄС, зокрема жорстких цілей Паризької кліматичної угоди.

Сільськогосподарські дослідження та інновації відіграють ключову роль у допомозі галузі подолати складний комплекс викликів, зокрема тиск на природні ресурси та фінансову стабільність фермерських господарств. Формування нових знань, а також доступність інформаційних систем і інструментів для моніторингу, збору, обробки та, перш за все, обміну важливою інформацією між основними зацікавленими сторонами створюють умови для підвищення сталості аграрного сектора.

Водночас значна частина наявних знань та інформаційних потоків, на яких вони базуються, поки що не використовується повною мірою. Цей розрив у

продуктивності має серйозні соціальні, екологічні й економічні наслідки. Тому надзвичайно важливо покращити функціонування систем знань і інновацій у сільському господарстві, своєчасно впроваджувати новації та прискорювати темпи створення нових знань.

Одним із головних обмежень є недостатня інтероперабельність і відсутність відкритості різних технічних систем, що звужує можливості фермерів у виборі постачальників інноваційних технологій. Підвищення функціональної сумісності дозволило б розширити обмін даними і сформувати більш комплексні знання на основі їх обробки. Ще однією суттєвою перешкодою є нестача інформації про ефективність нових технологій, що сповільнює їхнє впровадження.

Сучасні дослідження, які фінансуються Європейським Союзом (приклади яких розглядаються у цій частині), повинні враховувати всі наведені аспекти для комплексного розвитку агросектора.

Створюються платформи, які інтегрують різноманітні технології, такі як Інтернет речей (IoT), хмарні обчислення, фотоніка, мережеві рішення та робототехніка, поєднуючи їх із застосуваннями, що базуються на аналізі даних і управлінні знаннями. Важливою складовою є обмін даними та генерація нових знань шляхом збору і трансформації більш точної інформації.

Розробляються системи підтримки прийняття рішень, що включають, але не обмежуються, створенням систем бенчмаркінгу за показниками продуктивності і сталості ферм, а також оцінкою послуг, технологій і практик. Впровадження цих рішень у Європейському Союзі очікується мати помітний вплив. Зокрема, передбачається демонстрація вимірюваних переваг від інтенсивного обміну інформацією у широкому спектрі сільськогосподарських підприємств, з особливим акцентом на малі ферми.

Удосконалення інформаційних потоків та управління ними в цільових секторах сільського господарства і між ними базуватиметься на прозорих і справедливих практиках роботи з даними. Важливим є також ідентифікація потреб користувачів та підтвердження їх прийнятності, зокрема демонстрація життєздатних концепцій, які стосуються конфіденційності, безпеки, вразливості, відповідальності й довіри в пов'язаних інформаційних просторах.

Окрім того, передбачається отримання більш детальної інформації щодо екологічних, соціальних і економічних показників технологій, практик та управління, що сприятиме підвищенню їх прийняття. Створення нових можливостей для підприємців здійснюватиметься через просування нових ринкових відкриттів, забезпечення доступу до цінних масивів даних та безпосередню взаємодію з користувачами, а також через розширення місцевих бізнесів у європейському масштабі.

Водночас передбачається дослідження та валідація нових промислових і бізнес-процесів, а також інноваційних бізнес-моделей, які підтверджуються в контексті пілотних проектів.

Нижче наведені описи кількох проєктів ЄС, які, на нашу думку, демонструють динаміку синергетичного переходу сільського господарства Європи до концепції Агрокультури 4.0.

А. IoF2020 — Інтернет речей для ферм і харчової промисловості

Інтернет речей (IoT) має революційний потенціал. Інтелектуальна мережа датчиків, виконавчих механізмів, камер, роботів, безпілотних літальних апаратів та інших підключених пристроїв забезпечує безпрецедентний рівень контролю та автоматизованого прийняття рішень. Проєкт Internet of Food & Farm 2020 (IoF2020) досліджує потенціал технологій IoT для європейської харчової та сільськогосподарської промисловості.

Амбітна мета проєкту полягає в тому, щоб зробити точне фермерство реальністю і здійснити важливий крок до створення більш сталої ланцюжка доданої вартості. Завдяки IoT технологіям стає можливим досягнення вищих врожаїв і покращення якості продукції, водночас зменшуючи використання пестицидів та добрив, а загальна ефективність виробництва оптимізується. Крім того, технології IoT покращують відстежуваність харчових продуктів, що сприяє підвищенню їх безпеки.

Проєкт IoF2020 є частиною програми промислового лідерства Horizon 2020 і фінансується Європейською комісією з бюджетом у 30 мільйонів євро. Його метою є створення міцної інноваційної екосистеми, що сприяє впровадженню IoT технологій. Для досягнення цієї мети у проєкті беруть участь ключові зацікавлені сторони з ланцюжка створення вартості харчових продуктів, а також постачальники технологічних послуг, компанії-розробники програмного забезпечення і науково-дослідні інститути.

У межах проєкту організовано дев'ятнадцять прецедентів у п'яти секторах — пашня, молочна продукція, фрукти, м'ясо та овочі — які розробляють, тестують і демонструють IoT технології безпосередньо в умовах діючих ферм по всій Європі. Перші результати очікувалися в першому кварталі 2018 року.

IoF2020 прагне забезпечити максимальний ефект як на початковому етапі, так і в довгостроковій перспективі, сприяючи зближенню і об'єднанню учасників попиту та пропозиції IoT технологій у агропродовольчому секторі. З боку пропозиції проєкт підтримує лідерські позиції Європи у світовій індустрії IoT через створення симбіотичної екосистеми постачальників технологій та гравців агропродовольчого сектора, а також просування інноваційних та руйнівних бізнес-моделей.

З боку попиту проєкт сприяє прискоренню добродісного циклу прийняття і розвитку IoT-технологій в агропродовольчому секторі, щоб гарантувати безпечне та адекватне харчування для майбутніх поколінь європейських громадян. Таким чином, IoF2020 прокладає шлях до фермерства, орієнтованого на передачу даних, що здатне забезпечити вищу продуктивність виробництва більш сталим і екологічно відповідальним способом, а також підвищити конкурентоспроможність європейського сільськогосподарського сектора в умовах дедалі більш глобалізованого світу.

Зокрема, IoF2020 має на меті генерувати низку впливів. По-перше, валідацію технологічних рішень, сталості та відтворюваності, а також архітектури, стандартів, властивостей взаємодії й ключових характеристик, таких як безпека та конфіденційність. Далі передбачено дослідження та підтвердження нових галузевих і бізнес-процесів, а також інноваційних бізнес-моделей, апробованих у контексті пілотних проєктів.

Важливою є також перевірка прийняття користувачами вимог щодо конфіденційності, безпеки, вразливості, відповідальності, ідентифікації їхніх потреб, проблем та очікувань щодо IoT-рішень. Значний і вимірюваний внесок проєкту також очікується у формування стандартів і попередніх нормативних заходів шляхом впровадження відкритих платформ.

У результаті передбачається покращення якості життя громадян у державній та приватній сферах, зокрема в аспектах автономії, зручності і комфорту, залучення, здоров'я та способу життя, а також доступу до послуг. Проєкт сприятиме створенню нових можливостей для підприємців завдяки просуванню нових ринкових відкриттів, забезпеченню доступу до цінних наборів даних та безпосередній взаємодії з користувачами, що дозволить розширити місцевий бізнес на європейському рівні.

Завдяки цьому відбуватиметься розвиток безпечних і сталих європейських екосистем IoT та внесок у створення інфраструктури IoT, життєздатної за межами терміну дії пілотного проєкту.

В. DATABIO — великі дані у сільському господарстві, лісовому господарстві та рибальстві

Пілотні проєкти в сільському господарстві, лісовому господарстві та рибальстві в рамках DATABIO охоплюють міждоменні види діяльності, які включають сектори геопросторового та наземного спостереження. Ключові технологічні компоненти Big Data, що розглядаються в проєкті DATABIO, наведені на **рис. 5.4.3**. Однією з важливих тем проєкту є неоднорідність даних. Робота фахівців у галузі інформаційно-комунікаційних технологій (ІКТ), великих даних (Big Data) та спостереження Землі (Earth Observation) забезпечує сприятливі технології для підтримки різноманітності та значної варіативності даних.

Крім того, DATABIO сприятиме підвищенню швидкості розповсюдження та обсягу біорізноманіття даних. Загальна методологія проєкту полягає у створенні експериментальної технології обробки великих даних на базі існуючих технологій і наборів даних за тісної співпраці з кінцевими користувачами, а також у перевірці концепції через кілька пілотних проєктів у вибраних секторах.

Проєкт починається з аналізу вимог кінцевих користувачів і спільного розуміння цих вимог у процесі інноваційної співпраці, що включає розробку, адаптацію, налаштування та інтеграцію набору інтерфейсів, платформ, інструментів і сервісів із використанням існуючих або близьких до ринкових технологій, а також пілотування і валідацію концепцій та послуг. Для успішної

реалізації проєкту важливо застосування чіткої та добре структурованої методології.

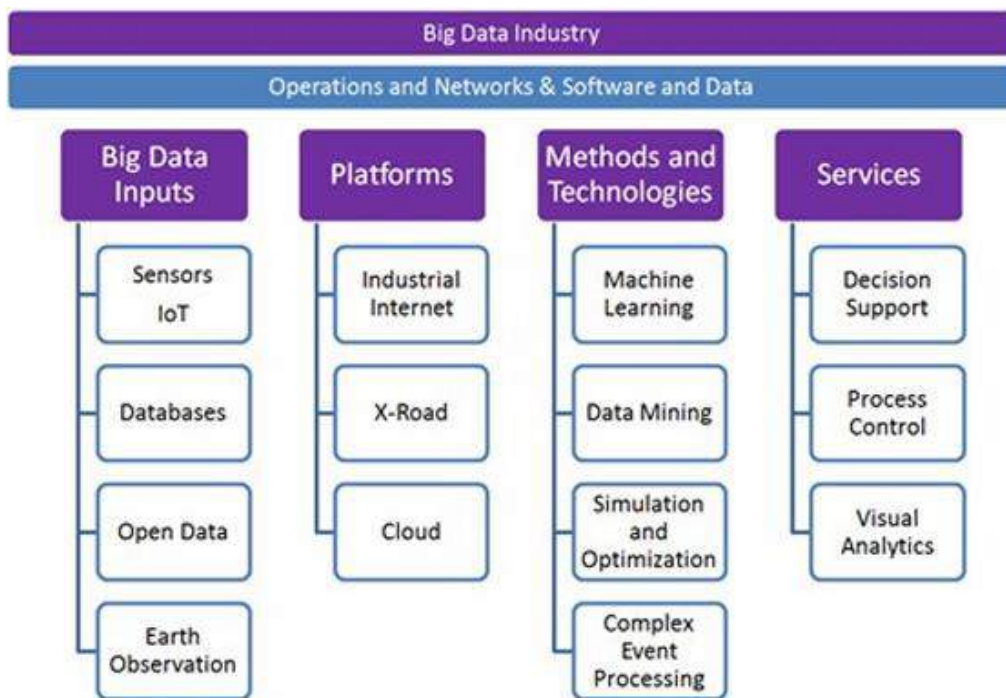


Рис. 5.4.3 Ключові технологічні компоненти Big Data розглядаються в DATABIO

Для забезпечення активної участі користувачів і залучених сторін застосовуються спільні розробки, колаборативні творчі концепції та методи прототипування, такі як семінари, інтерв'ю, опитування, а також онлайн-платформа Owela для спільних інновацій (<http://owela.fi>). Ці інструменти використовуються як на початкових етапах, так і протягом усього циклу проєкту в кожному з пілотних секторів сільського, лісового господарства та рибальства.

Методологія аналізу вимог включатиме порівняння вимог різних секторів сільського господарства, лісового господарства та рибальства для визначення специфічних потреб загальної платформи Big DATABIO. Різні рішення для роботи з великими даними та набори даних будуть суттєво відрізнятися з точки зору користувача у різних секторах біоекономіки, проте зазвичай компоненти великих даних використовуватимуться користувацькими інтерфейсами платформи Big DATABIO (рис. 5.4).

Іншими заходами в рамках спільної інноваційної підготовки стануть розгляд і аналіз правових та регуляторних питань на національному й європейському рівнях, а також врахування потреб інших зацікавлених сторін. Після завершення фази визначення концепції будуть сформовані технічні вимоги та остаточна системна архітектура платформи, після чого розпочнеться інтеграція відповідних технологій.

Секторальні експериментальні реалізації та пілотні проєкти постійно підтримуються та перевіряються експертами з великих даних і спостереження Землі, які впроваджують власні методи, інструменти і технології у процесі реалізації. Планування діяльності пілотів та супровідні завдання у сфері великих

даних і технологій ЕО контролюються за рівнями готовності технологій (TRL) та екологічними аспектами.

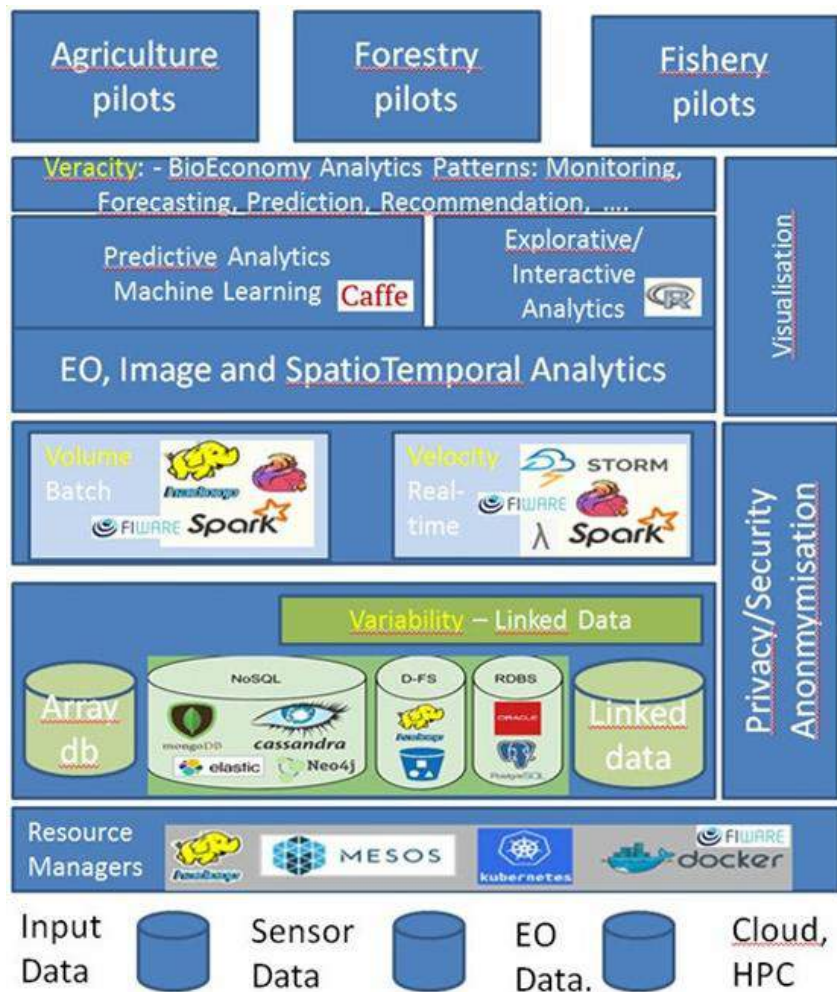


Рис. 5.4.4 Ключові набори даних та їх формати проєкті в DATABIO

Пілотні проєкти будуть тривати протягом усього строку реалізації проєкту: пілоти, які використовують доступні ринкові великі дані і технології ЕО, розпочнуться вже в першому році, а нові функції та майже готові до впровадження технології будуть інтегровані й апробовані у другому та третьому роках. Рівень розвитку пілотів буде поступово нарощуватися на платформі Big DATABIO.

Пілотні проєкти матимуть різні періоди активності, що зумовлено екологічними вимогами, такими як погодні умови, а також сезонністю (весна, літо, осінь, зима), які визначають строки проведення основних робіт і наявність сировини у сільському господарстві, лісовому господарстві та рибальстві. Інтеграція складових багатокористувацьких систем в єдину платформу Big DATABIO та секторальних сервісів здійснюватиметься логічним, економічно вигідним способом із всебічною перевіркою коректності виконання послуг (враховуючи всі номінальні та виняткові сценарії), а також із забезпеченням повного функціонального контролю.

Завдяки великій кількості учасників, широкому охопленню та складності системи буде застосовуватися модель безперервної інтеграції замість моделі інтеграції «Big Bang».

С. Проєкт SemaGrow: семантика великих даних для агрономії

У зв'язку зі зростаючою тенденцією відкритості даних та їх вільного використання в Інтернеті, а також підвищенням обсягів, якості та цінності наданих даних, відповідна спільнота отримала можливість поєднувати, крос-посилатися та аналізувати безпрецедентні обсяги високоякісних даних, створюючи інноваційні застосунки. Це спричинило потужний мережевий ефект, що додав цінності і відкрив нові можливості для всіх учасників, зокрема для первинних постачальників даних.

Втім, значна частина «низьковисоких плодів» уже зібрана, і настав час перейти до наступного кроку — інтегрувати, крос-індексувати та максимально використовувати всі публічно доступні дані, незалежно від їх розміру, швидкості оновлення чи структури. Центральні керовані сховища (навіть розподілені) не здатні ефективно впоратися з майбутніми завданнями, тому необхідно розвивати інфраструктуру для ефективного опитування незалежних федерацій джерел даних у великих масштабах.

Проєкт SemaGrow провів фундаментальні дослідження баз даних та розробив методи й інфраструктуру, заклавши основу для масштабованих, ефективних і надійних сервісів передачі даних, необхідних для наукомістких досліджень 2020 року. В рамках проєкту була задіяна масштабна та складна екосистема обслуговування даних у сфері сільського господарства, яка слугувала тестовим майданчиком для нових технологій.

Під час першого звітнього періоду в роботі проєкту брали участь члени консорціуму та зовнішні зацікавлені сторони з метою визначення потреб користувачів і відповідних джерел даних, а також для розробки технічних вимог і системної архітектури. Проєкт був орієнтований на формування різноманітних варіантів використання на основі запитів зацікавлених сторін. Документування результатів семінарів і практикумів дало змогу ефективно розробляти та оцінювати результати проєкту.

Ідеї й вимоги, сформульовані під час робочих зустрічей, було трансформовано в описи застосунків, які лягли в основу розробки демонстраторів сервісів і забезпечили зв'язок між потребами зацікавлених сторін і технологічними розробками проєкту.

У рамках SemaGrow розглянуто три категорії варіантів використання, що охоплюють різні групи зацікавлених сторін та широкий спектр застосувань. Зокрема, це гетерогенні колекції даних і потоки, орієнтовані на інтенсивні експерименти з моделювання сільського та лісового господарства. Технології проєкту застосовуються для підготовки відповідних вхідних наборів даних, що складаються з багатства різнорідних великих колекцій і доступних потоків. Зацікавлені сторони — це моделювальники, які розробляють експерименти, та IT-фахівці, які їх підтримують. Ці приклади демонструють інтегративні

семантичні можливості стеку SemaGrow, а також його здатність до ефективного пошуку та вилучення великих обсягів даних.

Аналіз реактивних даних базується на порталі AGRIS, який слугує науковою бібліографією та містить відповідні веб-ресурси. Технології SemaGrow використовуються для об'єднання різних кінцевих точок, що забезпечують пошук і отримання ресурсів, семантично релевантних кожному елементу бібліографії AGRIS. Веб-розробники, які підтримують портал, та експерти з аналізу даних, що працюють над удосконаленням механізму оцінки релевантності, є ключовими зацікавленими сторонами. В цих випадках використання перевіряється простота додавання нових учасників до федерації, а також реактивність технологічного стеку SemaGrow при роботі з великими обсягами даних, що дозволяє знаходити не обов'язково великі за розміром, але релевантні результати.

Щодо реактивного пошуку ресурсів, акцент зроблено на застосунок Linked Open Data Hub (LODH), який надає різноманітні бібліографічні та освітні ресурси через простий REST API. Цільовими користувачами є фахівці і ентузіасти LOD, що інтегрують веб-застосунки з використанням веб-сервісів, а також кінцеві користувачі, які шукають відповідні ресурси. Ці варіанти використання демонструють зручність розробки веб-застосунків на основі стеку SemaGrow, а також можливість об'єднання і семантичної інтеграції великої кількості різноманітних джерел даних, навіть якщо окремі з них не є великими за обсягом.

Очікується, що ефективність зацікавлених сторін значно зросте завдяки заміні існуючих методів доступу до даних технологіями SemaGrow без порушення робочих процесів. Зокрема, програмне забезпечення для моделювання сільського та лісового господарства, портал AGRIS та клієнти веб-застосунку ADS зможуть працювати з технологіями SemaGrow без потреби у суттєвій перебудові. Ретельні перевірки підтвердили підвищення продуктивності користувачів та прийнятні витрати з впровадження SemaGrow як інфраструктури для доступу до даних.

В рамках проекту також розв'язувалися такі технічні задачі. Перша полягає у пошуку невеликих, але релевантних результатів у великих обсягах даних — так званій «голці в сіні». Для цього створено інтелектуальний планувальник виконання запитів, який керує процесом таким чином, щоб уникати вилучення великих обсягів непотрібних даних, що не впливають на кінцевий результат, адже вони не з'єднуються з наступними запитом. Робота цього планувальника значною мірою залежить від точності метаданих на рівні окремих екземплярів.

Друга задача стосується обробки великих наборів даних, коли очікуваний результат сам по собі є великим. В таких випадках неможливо уникнути обробки значного обсягу інформації, що відповідає запиту користувача, що створює виклики для механізму виконання запитів та потребує ефективної роботи зі статистичними даними і зворотним зв'язком.

Третя важлива проблема — інтеграція гетерогенних даних. Оскільки різні схеми можуть краще підходити для різних типів даних та застосувань, а єдиної

універсальної схеми чи словника не існує, було розроблено технології, які дозволяють постачальникам публікувати дані у формі, що відповідає їхнім процесам і цілям, а користувачам отримувати їх у зручній для них формі та способом.

D. PANTHEON точне землеробство садів

У рамках проєкту PANTHEON впроваджено систему контролю та збору даних (SCADA), орієнтовану на потреби точного садівництва. Ідеологія цього проєкту перегукується з концепцією Індустрії 4.0 (Агрокультури 4.0), оскільки передбачає цифровізацію моніторингу та управління сільськогосподарськими процесами за допомогою сучасних інформаційних технологій.

Проєкт передбачає створення інтегрованої системи, у якій обмежена кількість наземних та повітряних безпілотників здійснює переміщення садом, збираючи дані та виконуючи типові агротехнічні завдання. Уся зібрана інформація надходить до централізованого оперативного центру, де вона аналізується й використовується як для автоматизованої зворотної дії (наприклад, для регулювання зрошення), так і для прийняття агрономічних рішень.

Особливістю запропонованої SCADA-системи є її здатність здійснювати моніторинг на рівні окремої рослини. Такий підхід дозволяє своєчасно виявляти обмежувальні чинники росту — зокрема, нестачу вологи, ураження шкідниками чи хворобами, — і оперативно на них реагувати. Це, своєю чергою, сприятиме покращенню загального фітосанітарного стану саду.

Запропонована архітектура системи має потенціал підвищити врожайність, зробивши вирощування економічно вигіднішим та екологічно сталим.

Метою проєкту є створення діючого прототипу SCADA-системи, здатної працювати в умовах реального саду. Проєкт реалізується на основі реальних потреб промислового партнера – компанії Ferrero Trading Lux S.A., із фокусом на вирощування ліщини (*Corylus avellana* L.). У межах PANTHEON буде продемонстровано функціонування системи у повному масштабі (1:1) на горіховому саду, розташованому в регіоні Тузія (провінція Вітербо, Італія).

Узагальнена архітектура проєкту представлена на **рис. 5.4.5.**

E. Історія проєкту FATIMA

Інтенсивне рослинництво в Європі перебуває на роздоріжжі, де виникає нагальна потреба у пошуку сталих шляхів розвитку. Зрошуване землеробство залишається ключовим елементом як глобальної, так і національної продовольчої безпеки, і водночас часто є основним джерелом прибутку в сільських регіонах. Проте воно також є найбільшим споживачем водних ресурсів і значним забруднювачем ґрунтів та водойм.

Досягнення екологічної рівноваги та соціальної відповідальності вимагає впровадження нових стратегій управління агровиробництвом, а також стимулів і політик, що забезпечать сталий розвиток сільського господарства та збереження екосистемних послуг.

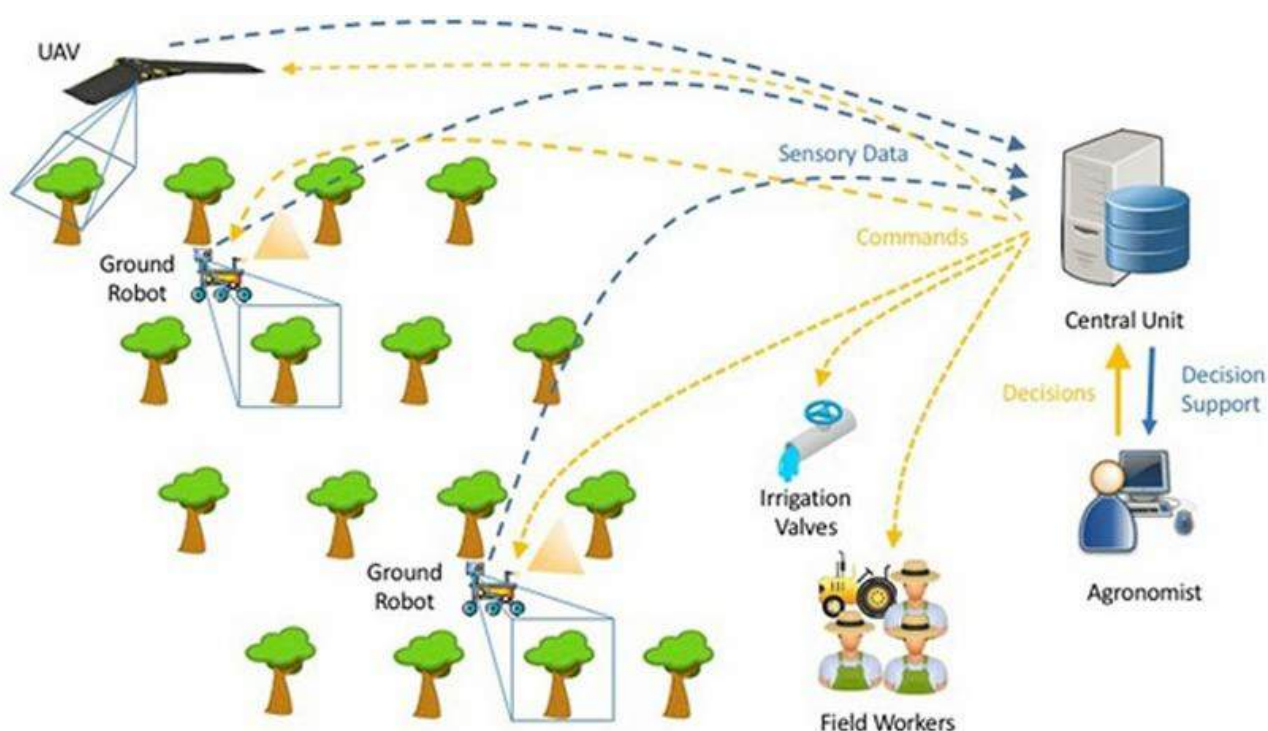


Рис. 5.4.5 Принципова архітектура проекту PANTHEON

Ключовий виклик полягає у досягненні оптимальної врожайності та прибутковості за мінімальних витрат (на добрива, воду, енергію, ЗЗР, кошти), одночасно з охороною довкілля та підтримкою розвитку місцевих громад.

Відповідь на цей виклик і становить основу проекту FATIMA, який пропонує комплексний підхід до оптимізації:

- внесення добрив і води за рахунок використання передових агрономічних знань, моделей прогнозування врожайності, інформаційних і супутникових технологій, що забезпечують фермерів оперативною інформацією про просторову та часову змінність потреб рослин;
- широке практичне застосування результатів – від прецизійного землеробства для високорентабельних культур до впровадження практик відновлення органічної речовини ґрунту та стимулювання на основі соціально-економічного аналізу;
- розширення технологій VRT (змінного нормування) для великих сільськогосподарських районів та малотехнологічних фермерських господарств;
- простота та доступність рішень для різних типів господарств – незалежно від наявності високотехнологічного обладнання – завдяки інструментам, які підтримують пряму взаємодію між користувачами;
- розробка політичних механізмів підтримки сталого агровиробництва, що поєднують інноваційні технології з підходами, орієнтованими на участь фахівців і фермерів, для переходу до екологічно збалансованих агросистем.

Основна мета проекту FATIMA – створення нових інструментів та сервісів, що допоможуть інтенсивному сільському господарству раціонально управляти

ресурсами (водою і добривами) та підвищити продуктивність, забезпечуючи сталу модель вирощування культур із збереженням конкурентоспроможності.

F. Оцінка прогресу на шляху до Агрокультури 4.0 в рамках проєкту SURE-Farm

Сільськогосподарський сектор Європи сьогодні стикається з численними економічними, екологічними та соціальними викликами. Серед них — цінова нестабільність для виробників, конкуренція на лібералізованих і глобалізованих ринках, аномальні погодні явища та зростання ризику екстремального клімату, зміна співвідношення ринкової влади в ланцюгах поставок, тиск з боку приватних стандартів, зростаюча залежність від несільськогосподарських землевласників і фінансових установ, демографічні зсуви, урбанізація, політична нестабільність та зміни у вподобаннях споживачів.

Сукупність цих факторів створює невизначеність і складну мережу взаємозалежностей, що викликає занепокоєння щодо довгострокової життєздатності аграрного виробництва, сталості агросистем, розвитку сільських громад та надання екосистемних послуг.

SURE-Farm спрямований на аналіз, оцінювання та посилення стійкості ферм і аграрних систем у ЄС. Для досягнення цієї мети проєкт:

- розробляє сценарії розвитку та комплексну аналітичну рамку для оцінки стійкості;
- створює інноваційні інструменти управління ризиками;
- вдосконалює моделі демографічного аналізу;
- розробляє політичні інструменти оцінки стійкості;
- спільно із зацікавленими сторонами створює інтегровану модель оцінки стійкості та дорожні карти реалізації стратегій сталого розвитку.

Проєкт SURE-Farm є частиною ширшої програми ЄС з питань стійкого продовольчого забезпечення, зокрема в рамках теми SFS-31, яка стосується сталих і ресурсоефективних ланцюгів створення доданої вартості в агросекторі — від первинного виробництва до кінцевого споживача.

Цей проєкт має на меті знайти інтегровані рішення для подолання викликів, що впливають на стійкість продовольчих систем, і тим самим сприяє переходу до Агрокультури 4.0 — цифровізованого, адаптивного та соціально відповідального сільського господарства.

G. Проєкт EUXDAT — як управляти гетерогенними аграрними даними

Сільське господарство — це не лише основа харчування людства, а й критично важлива галузь, що впливає на економічну стабільність, зайнятість, екологічне здоров'я, політичну рівновагу та життєдіяльність екосистем і суспільств у цілому. Традиційно основна увага приділялася продуктивності, однак для забезпечення сталого розвитку важливо мати глобальний, екосистемний підхід.

У відповідь на ці виклики, проєкт EUXDAT пропонує інтегровану електронну інфраструктуру, призначену для моніторингу сільськогосподарських

ресурсів, оцінювання стану земель, а також енергоефективного планування в контексті підтримки екологічно орієнтованої аграрної політики.

Основна ідея

Сучасне сільське господарство генерує величезні обсяги різномірних (гетерогенних) даних — із супутників, БПЛА, сенсорних систем, польових станцій тощо. EUXDAT націлений на ефективне управління та обробку цих даних, забезпечуючи доступ до високопродуктивних обчислень (HPC) та хмарних сервісів.

Що пропонує EUXDAT:

- Розширений інтерфейс користувача, що дозволяє створювати прикладні рішення на базі готової інфраструктури.
- Візуалізацію, моніторинг, аналітику, доступ до каталогів даних і обробних процесів.
- Можливість використовувати модель Large Data Analytics-as-a-Service для масштабованої роботи з великими обсягами агроданих.
- Підтримку підключення до різних джерел даних (БПЛА, супутникові програми Copernicus, наземні сенсори тощо).
- Інтелектуальне управління ресурсами — система самостійно обирає, чи обробка буде ефективнішою на HPC-кластері чи у хмарі, враховуючи витрати, обмеження доступу, продуктивність і наявність обчислювальних ресурсів.

Проект EUXDAT також підтримує співпрацю з науковими спільнотами, щоб своєчасно враховувати нові тренди, дані та технології, що впливають на розвиток цифрової інфраструктури для сільського господарства.

На завершення буде створено уніфіковану, масштабовану та відкриту інфраструктуру, яка дозволить кінцевим користувачам (фермерам, розробникам, агроаналітикам) розробляти власні інноваційні застосунки, спрямовані на сталий розвиток сільського господарства та ефективне управління природними ресурсами

H. BigDataGrapes: великі дані для галузей, пов'язаних із виноградом

Великі дані стають не просто модним трендом, а реальною силою, що трансформує навіть традиційні галузі, такі як сільське господарство, харчова промисловість та косметика. Особливо помітно це в виноробній індустрії, яка активно залучає сучасні технології для прогнозування врожайності, якості вина та поведінки споживачів. Наприклад, з'являються матеріали на кшталт «Як великі дані можуть передбачити вино століття» або «Машинне навчання + вино: ідеальна пара».

Проект BigDataGrapes спирається на багате історичне, культурне й ремісниче надбання Європи, щоб підтримати компанії, які працюють у двох стратегічних секторах, пов'язаних із вирощуванням винограду:

- виноробство
- натуральна косметика (на основі компонентів виноградної лози)

Його завдання — допомогти цим підприємствам ефективно використовувати можливості, що відкриваються завдяки обробці великих обсягів даних, і реалізувати дві ключові цілі:

- Розробити та продемонструвати потужні інструменти обробки даних, що підвищать продуктивність компаній, які приймають важливі рішення на основі складних, багатовимірних даних.
- Стимулювати розвиток цифрової екосистеми, що сприятиме формуванню економіки даних і створенню конкурентних переваг для ІТ-компаній, які обслуговують виноградно-орієнтовані сектори.

Проект BigDataGrapes зосереджується на вирішенні технологічних завдань, пов'язаних із перетворенням галузей, де виноград є основним ресурсом. Йдеться про масштабну обробку, аналіз і візуалізацію великих і складних наборів даних, зокрема:

- супутникові та метеорологічні дані;
- екологічна та геологічна інформація;
- фенотипові та генетичні характеристики рослин;
- дані щодо ланцюгів постачання продукції;
- економічні та фінансові показники тощо.

BigDataGrapes поєднує міжгалузевий та міжнародний підхід, створюючи синергію між двома галузями з великою європейською цінністю та потенціалом, і просуває використання цифрових технологій для зростання сталості, якості та конкурентоспроможності продукції.

I. EOPEN – великі дані та супутникові технології

Проект EOPEN створює цифрову платформу, яка забезпечує доступ до супутникових даних спостереження за Землею для широкого кола користувачів, зокрема:

- неекспертів у сфері Earth Observation (EO);
- малих і середніх підприємств (МСП);
- фахівців, які потребують простих та зручних рішень для роботи з великими даними.

Проект має на меті зробити дані й сервіси програми Copernicus (зокрема з супутників Sentinel) доступними та корисними для застосування в різноманітних галузях, де потрібна обробка Big Data, зокрема для:

- аналітики на основі супутникових даних (EO-аналітика);
- підтримки прийняття рішень;
- інфраструктури для повного циклу роботи з великими даними — від збору до інтерпретації результатів.

Одним із головних завдань EOPEN є поєднання супутникових даних Sentinel із великими гетерогенними джерелами, зокрема:

- метеоданими;
- екологічною інформацією;
- даними з соціальних мереж.

Це поєднання виконується не лише на рівні даних, а й на семантичному рівні — із використанням технологій семантичного пов'язування та інтеоперабельності, що дозволяє будувати розумні системи ухвалення рішень.

Обробка великих обсягів даних здійснюється з використанням:

- масштабованих алгоритмів з відкритим кодом;
- інструментів для виявлення змін, кластеризації подій, аналізу ризиків;
- високопродуктивних обчислювальних платформ (HPC).

ЕОРЕН також інтегрує елементи візуальної аналітики в реальному часі, зокрема у вигляді інтерактивних панелей, попереджень, карт і графіків, що дозволяють краще інтерпретувати отримані результати.

Система активно використовує зворотний зв'язок від користувачів, функції тегування, аналізу взаємодії між користувачами та інших засобів покращення інтерфейсу і релевантності даних.

ЕОРЕН буде продемонстровано в реальних сценаріях, зокрема для:

- моніторингу ризиків паводків;
- оцінки продовольчої безпеки;
- спостереження за зміною клімату.

Цей проєкт є прикладом того, як супутникові технології та великі дані можуть бути адаптовані для широкого спектра користувачів у різних сферах діяльності, включно з агросектором. Якщо потрібно, можемо коротко структурувати його для слайда або методичного розділу.

J. ESCAPE — новий навігаційний рушій для системи EGNSS

У сучасному автомобільному секторі зростає попит на підключені та автономні транспортні засоби, що вимагають надточної, надійної та безпечної навігації — особливо для систем критичного значення, де йдеться про безпеку людей, транспорту та довкілля. Це стосується, зокрема, автономного водіння, розширених систем допомоги водієві (ADAS) та перевезення небезпечних вантажів.

Для забезпечення точного позиціонування зазвичай використовується комбінація різних сенсорних систем: лідари, камери, радіолокаційне обладнання тощо. Однак такий підхід:

- є дорогим і складним у реалізації;
- використовує обладнання, що не оптимізоване для серійного використання в автомобілях;
- не завжди забезпечує необхідну надійність позиціонування.

Вирішення: проєкт ESCAPE

Європейський проєкт ESCAPE (European Safety Critical Applications Positioning Engine) був започаткований для розробки нового навігаційного рушія, спеціально орієнтованого на автомобільні системи підвищеної безпеки.

Ключові особливості рушія:

- підтримка багаточастотного та багатосистемного прийому GNSS-сигналів;

- можливість обробки нових аутентифікованих сигналів системи Galileo OS — важливої складової європейської глобальної супутникової навігаційної системи (E-GNSS);
- забезпечення високої точності позиціювання без залежності від надскладних сенсорних систем.

Проект ESCAPE фінансується в рамках програми розвитку ключових компонентів навігації E-GNSS для критичних сфер, з акцентом на автомобільний транспорт.

Тривалість: 2016–2019 роки, загальний бюджет — 5,4 млн євро.

Проект координується іспанською компанією FICOSA, у співпраці з провідними європейськими організаціями:

- GMV (Іспанія)
- Renault та IFSSTAR (Франція)
- STMicroelectronics та Istituto Superiore Mario Boella (Італія)

Консорціум охоплює повний виробничий ланцюг автомобільної галузі, об'єднуючи технічні, дослідницькі та виробничі ресурси.

До кінця проєкту у 2019 році було створено перший багаточастотний GNSS-чипсет, адаптований спеціально для автомобільних застосувань, включаючи автономні транспортні засоби.

Проект ESCAPE відкриває нову еру у сфері точного, безпечного і доступного позиціювання, ставлячи в центр уваги безпеку дорожнього руху та надійність автоматизованих систем керування (рис. 5.4.6).

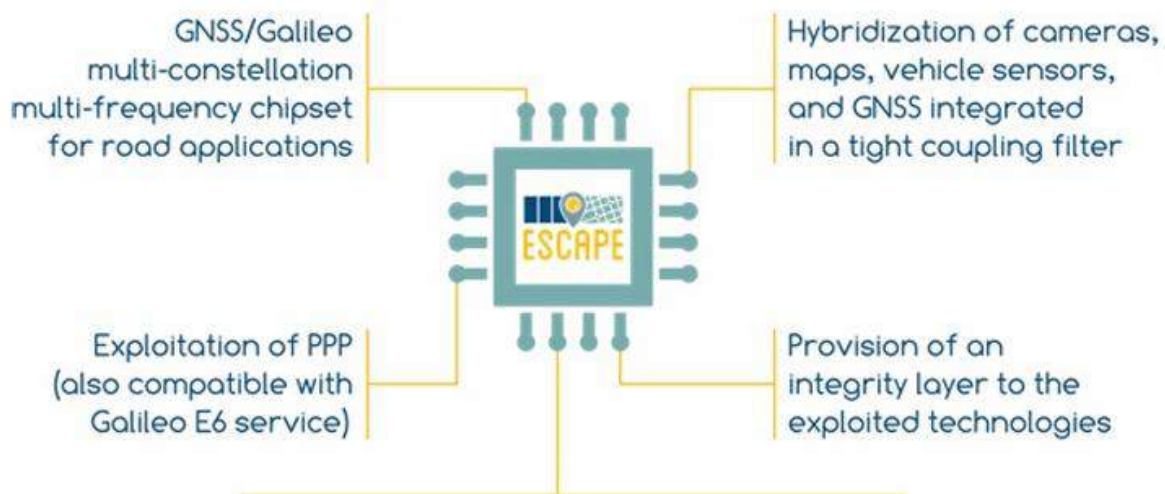


Рис.5.4.6 Функції базового елемента - нового «двигуна» для EGNSS

У Європейському Союзі вважають, що європейські глобальні супутникові навігаційні системи (EGNSS), зокрема Galileo та EGNOS, можуть відігравати ключову роль у розвитку точного землеробства вже сьогодні. Вони здатні:

- забезпечити високу точність, доступність і надійність супутникової навігації для аграрного сектору;
- зменшити надлишкове внесення добрив і гербіцидів, мінімізуючи витрати та шкідливий вплив на довкілля;
- економити час і ресурси, сприяючи підвищенню прибутковості;

- продовжити строк служби сільськогосподарської техніки за рахунок її точного та ефективного використання;
- оптимізувати врожайність і загальну продуктивність агровиробництва;
- знизити екологічне навантаження сільського господарства.

Таким чином, EGNSS є важливим каталізатором переходу до Агрокультури 4.0, формуючи цифрову аграрну екосистему в ЄС.

У наземній частині екосистеми важливу роль відіграють такі ініціативи як:

- IoF2020 (Internet of Food & Farm 2020) – проєкт, що демонструє практичне застосування Інтернету речей у сільському господарстві;
- проєкти з розробки аграрних онтологій, які забезпечують уніфіковане цифрове представлення знань, що дозволяє інтегрувати різні технології у рамках єдиної концепції Agri 4.0.

Переваги використання EGNOS у сільському господарстві:

- EGNOS є безкоштовним – не потребує плати за підписку чи додаткового обладнання на фермах. Усі розробки в рамках науково-практичних проєктів ЄС ґрунтуються на відкритих стандартах та ПЗ, без прив'язки до окремих постачальників.
- Сигнали EGNOS транслюються в реальному часі з геостаціонарних супутників. Вони можуть бути доповнені наземними сервісами, що розробляються у європейських проєктах.
- EGNOS уже інтегровано в аграрну техніку: кожен десятий трактор, що продається в Європі, має GNSS-приймач, сумісний з EGNOS.
- Не потрібно встановлювати додаткове обладнання для отримання корекційних сигналів – підтримка EGNOS уже вбудована у більшість сумісних приймачів.

Потенціал для інших країн

Досвід Європейського Союзу з упровадження EGNSS у цифрову трансформацію аграрного сектора може бути цінним прикладом і для інших країн, які прагнуть реалізувати стратегії прецизійного, ефективного та екологічно збалансованого сільського господарства.

5.5 ІНДУСТРІЯ 5.0: ПОЄДНАННЯ ІОТ, БЛОКЧЕЙНУ ТА ШТУЧНОГО ІНТЕЛЕКТУ

Індустрія 5.0 означає новий етап розвитку промисловості, що базується на поєднанні передових цифрових технологій і орієнтації на людину. На відміну від попередніх етапів, де ключовим фактором була автоматизація, нині пріоритет надається взаємодії між людиною та машиною, розширенню можливостей через штучний інтелект, Інтернет речей (IoT) та блокчейн.

Інтернет речей виступає рушієм змін, забезпечуючи злагоджену взаємодію між інтелектуальними пристроями, сенсорами та системами керування. Він дозволяє збирати та обробляти великі обсяги даних у режимі реального часу, що сприяє підвищенню точності, швидкості та адаптивності виробничих процесів.

Блокчейн, у свою чергу, забезпечує захист даних, їхню прозорість і незмінність. Завдяки розподіленому зберіганню інформації та використанню смарт-контрактів, блокчейн дозволяє оптимізувати управління ланцюгами постачання, контролювати якість продукції, підвищувати рівень довіри між усіма учасниками процесу.

Штучний інтелект доповнює цю екосистему, забезпечуючи аналітику, прогнозування, адаптивне керування та когнітивні функції в автоматизованих системах. Поєднання IoT, блокчейну та ШІ створює основу для інтелектуального виробництва, що є гнучким, стійким до зовнішніх змін і водночас ефективним.

Взаємодія цих технологій дає змогу створювати так звані «розумні» фабрики, де всі компоненти виробництва інтегровані у єдину цифрову мережу. Це відкриває нові можливості для автоматизованого контролю, точного моніторингу стану обладнання, прогнозного обслуговування та енергоефективного управління ресурсами.

Сьогодні такі підходи стають надзвичайно актуальними в умовах урбанізації, зростання складності глобальних ланцюгів постачання та необхідності дотримання принципів сталого розвитку. Архітектура IoT продовжує еволюціонувати — від простих мереж сенсорів до складних систем, здатних адаптуватися до змін і працювати в тісній інтеграції з іншими цифровими технологіями (рис. 5.5.1).

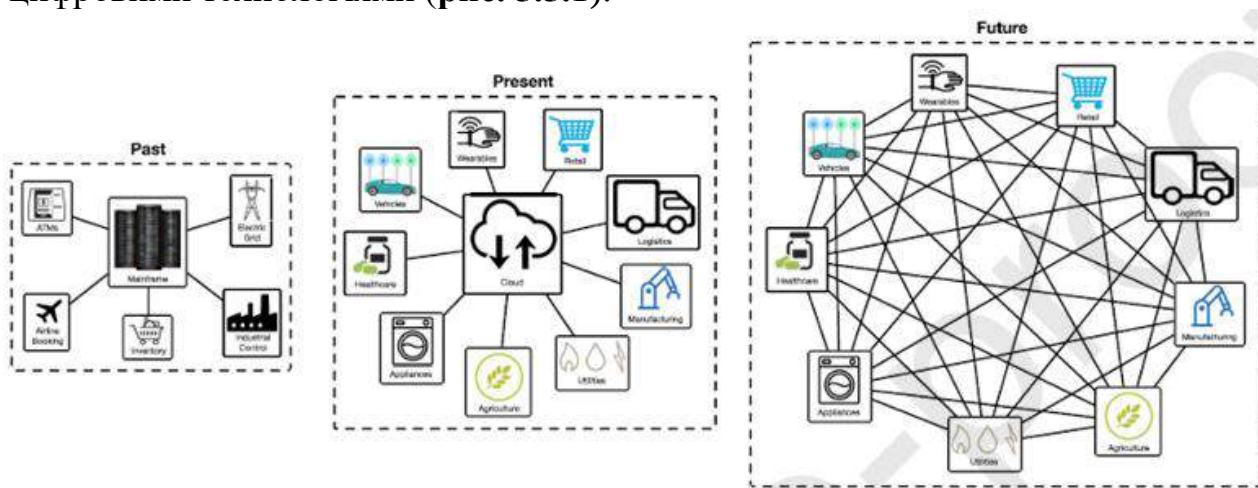


Рис. 5.5.1 Минуле, сьогодення та майбутнє архітектури Інтернету речей

Інтернет речей (Internet of Things, IoT) являє собою мережу фізичних об'єктів, оснащених сенсорами, програмним забезпеченням та іншими цифровими технологіями, що дозволяють здійснювати збір, обмін і обробку даних. Це забезпечує можливість моніторингу, керування та автоматизації різноманітних пристроїв і систем. Масштаби розгортання IoT зростають стрімко — прогнозується, що кількість підключених пристроїв досягне 29 мільярдів у найближчі роки, а до середини століття може перевищити 75 мільярдів. Це зростання пояснюється зниженням вартості сенсорів, розвитком бездротових мереж і високим попитом на інтелектуальні пристрої у різних галузях.

Поширення IoT є надзвичайно широким. У середньостатистичному домогосподарстві США вже використовується близько 10 підключених

пристроїв. Найпоширенішими прикладами впровадження IoT є «розумні» будинки, міста та системи охорони здоров'я. Промислове застосування охоплює логістику, енергетику, сільське господарство, безпеку тощо.

У свою чергу, блокчейн — це децентралізована технологія розподіленого реєстру, яка забезпечує надійність, прозорість та незмінність транзакцій. Спочатку вона асоціювалася переважно з криптовалютами, проте її застосування значно ширше — від управління активами до побудови безпечних цифрових екосистем. Основна цінність блокчейну полягає у здатності формувати довіру між учасниками цифрових процесів без потреби в централізованих посередниках. Смарт-контракти, як елемент блокчейну, дозволяють автоматизувати взаємодію між сторонами, виконуючи певні умови без зовнішнього втручання.

У логістиці та управлінні ланцюгами постачання Індустрії 5.0 смарт-контракти відіграють ключову роль, забезпечуючи контроль доступу, автентифікацію, автоматизацію обліку та обслуговування. У поєднанні з цифровими ідентичностями вони дозволяють керувати активами, продуктами, обладнанням і сервісами.

Інтенсивні дослідження останніх років показують широкі можливості застосування блокчейну в різних сегментах IoT. Розроблено архітектури, орієнтовані на пристрої з обмеженими ресурсами, зокрема для управління аграрними ланцюгами постачання. В аграрному секторі пропонуються рішення, які використовують глибоке навчання і смарт-контракти для безпечного обміну даними, виявлення втручань і зберігання інформації у хмарному середовищі.

Інші підходи поєднують IoT, блокчейн і граничні обчислення для створення захищених систем підтримки прийняття рішень у сільському господарстві. Окремі рішення передбачають стимулювання IoT-пристроїв до участі в майнінгу, що дозволяє посилити безпеку мережі. Запропоновано моделі подвійного зберігання даних («база даних + блокчейн») із шифруванням для простежування аграрної продукції.

У сфері енергоменеджменту впроваджується концепція Інтернету енергії (IoE), що базується на блокчейн-смартконтрактах для автоматизованого обміну даними, енергетичних транзакцій і безпечної торгівлі енергією у форматі «peer-to-peer».

Таким чином, блокчейн відіграє дедалі важливішу роль у цифрових рішеннях, які охоплюють «розумні» будинки, міста, транспортні системи, агропромисловість й енергетику. Його інтеграція з IoT-технологіями дозволяє створювати стійкі, прозорі, захищені та автоматизовані системи, що відповідають викликам сучасної цифрової епохи.

Постановка проблеми

Зародження Індустрії 5.0, що базується на поєднанні передових цифрових технологій та людиноцентричних підходів, створює як нові можливості, так і суттєві виклики для впровадження Інтернету речей (IoT). Швидке зростання кількості взаємопов'язаних пристроїв і систем відкриває перспективи для

підвищення ефективності, продуктивності та формування рішень на основі даних. Водночас для повноцінної реалізації потенціалу Індустрії 5.0 необхідно вирішити низку критичних завдань.

1. Безпека даних і довіра. Децентралізований характер IoT вимагає надійних механізмів захисту інформації та формування довіри. В умовах масштабної мережі підключених пристроїв особливої важливості набуває забезпечення конфіденційності, цілісності та достовірності даних. Це питання стає ще більш актуальним у контексті Індустрії 5.0, де обмін даними відбувається між численними зацікавленими сторонами — виробниками, постачальниками, споживачами, сервісними компаніями тощо.

2. Фрагментація даних і інформаційні «сховища». Переважання хмароорієнтованих архітектур в IoT призводить до виникнення ізольованих сховищ даних (data silos), що обмежує можливості комплексного аналізу та прийняття рішень. Для Індустрії 5.0, яка передбачає тісну інтеграцію технологій і співпрацю між секторами, подолання фрагментації даних є необхідною умовою забезпечення їхньої повної доступності та ефективного використання.

3. Інтеграція блокчейну як потенційного рішення. Блокчейн-технологія має значний потенціал для вирішення проблем безпеки даних і формування довіри в IoT-середовищі. Крім того, вона сприяє ефективному управлінню даними між розподіленими системами. Проте інтеграція блокчейну у сферу IoT супроводжується рядом технічних та організаційних викликів. Важливо враховувати сумісність обраної блокчейн-платформи з наявною інфраструктурою, здатність системи до масштабування, а також відповідність обраних механізмів консенсусу вимогам до швидкодії та енергоефективності.

Метою даної роботи є дослідження можливостей інтеграції блокчейн-технологій в екосистему Інтернету речей (IoT) у контексті розвитку Індустрії 5.0. У межах цієї мети передбачено досягнення таких завдань:

1. Комплексний аналіз. Провести системний аналіз існуючих типів застосування IoT та особливостей їхньої архітектури з урахуванням того, яким чином блокчейн-технологія може підвищити ефективність управління даними, забезпечити безпеку та сформувати довіру в межах IoT-середовища.

2. Огляд наукових праць. Здійснити критичний аналіз сучасної літератури, присвяченої інтеграції блокчейну та IoT, з метою виявлення переваг і недоліків такого поєднання. Особлива увага приділяється оцінці основних викликів і проблем, пов'язаних із практичною реалізацією інтеграції цих технологій.

3. Напрями майбутніх досліджень. На основі проведеного аналізу визначити перспективні напрями подальших досліджень у сфері блокчейн-орієнтованих IoT-рішень для потреб Індустрії 5.0. Запропонувати рекомендації щодо вибору відповідних блокчейн-платформ з урахуванням конкретних критеріїв, таких як масштабованість, енергоефективність, швидкість обробки транзакцій, рівень безпеки тощо.

Загальною метою даного дослідження є формування цілісного уявлення про можливості використання блокчейн-технологій для створення безпечних,

сталих та ефективних IoT-рішень, особливо в умовах трансформації промисловості відповідно до концепції Індустрії 5.0. Робота спрямована на окреслення викликів, пов'язаних з інтеграцією блокчейну в IoT-системи, а також на формування рекомендацій для подальших досліджень у цій сфері.

Індустрія 4.0 та Індустрія 5.0

Індустрія 4.0 — це четверта промислова революція, яка характеризується впровадженням передових технологій у виробничі процеси. Вона ґрунтується на використанні Інтернету речей, штучного інтелекту, великих даних, кіберфізичних систем і цифрових двійників. Основні характеристики Індустрії 4.0 включають:

- Автоматизація – розширене застосування робототехніки та інтелектуальних систем для автономної роботи виробничих ліній.
- Зв'язність – інтеграція пристроїв і систем для забезпечення обміну даними в реальному часі.
- Аналітика даних – використання великих даних для оптимізації процесів і підвищення якості продукції.
- Індивідуалізація – можливість адаптації виробництва під потреби конкретного споживача завдяки гнучким виробничим системам.

Індустрія 5.0, на відміну від попередньої, не лише продовжує використання досягнень цифрових технологій, а й переосмислює роль людини у виробничому процесі. Вона орієнтується на сталий розвиток, соціальну відповідальність та інтелектуальну взаємодію між людьми й машинами. Її ключові риси:

- Співпраця людини й машини – поєднання творчості та інтуїції людини з точністю і швидкодією технологій.
- Сталий розвиток – запровадження практик, що знижують негативний вплив на довкілля та сприяють раціональному використанню ресурсів.
- Персоналізація – орієнтація на створення індивідуалізованої продукції та послуг.
- Стійкість – здатність адаптувати виробничі та логістичні системи до змін попиту, кризи чи глобальних збоїв.

Головна відмінність між Індустрією 4.0 та 5.0 полягає у фокусі: перша зосереджена на автоматизації й ефективності, тоді як друга – на людському факторі, сталості та гнучкості. Еволюція від Індустрії 4.0 до 5.0 символізує перехід від технологічно-орієнтованого підходу до більш збалансованої моделі, яка враховує потреби суспільства, екології та людського добробуту.

Інтернет речей (IoT)

Інтернет речей (IoT) — це мережа фізичних об'єктів, оснащених сенсорами, програмним забезпеченням та засобами зв'язку, що дозволяє здійснювати збір, обмін і аналіз даних у реальному часі. Ці технології мають потенціал кардинально змінити низку галузей, зокрема промисловість, охорону здоров'я, транспорт та роздрібну торгівлю.

IoT-пристрої відіграють ключову роль у відстеженні ресурсів, моніторингу технологічних процесів і підтримці прийняття обґрунтованих рішень.

Наприклад, у виробництві вони можуть контролювати температуру та вологість приміщень, забезпечуючи стабільні умови для випуску продукції. Крім того, вони дають змогу ефективніше управляти логістикою та обліком обладнання — наприклад, відстежувати місцеперебування транспортних засобів або машин.

У професійному середовищі Інтернет речей відкриває нові можливості завдяки доступу до даних у режимі реального часу, застосуванню аналітики та алгоритмів машинного навчання. Підприємства можуть використовувати ці інструменти для оптимізації процесів, підвищення ефективності, зниження витрат і покращення взаємодії з клієнтами.

IoT базується на кількох ключових складових: підключенні пристроїв, зборі даних, аналітиці та управлінні (рис. 5.3.2). Автоматизація й ефективність стають можливими завдяки передачі й обробці інформації, що дає змогу виявляти ризики, підвищувати безпеку та прогнозувати технічне обслуговування. Зокрема, впровадження обчислень на периферії (edge computing) дає змогу обробляти дані ближче до джерела їх виникнення, зменшуючи затримки та підвищуючи швидкість реакції системи.

Водночас важливими залишаються питання конфіденційності, захисту даних, масштабованості та сумісності між різними IoT-платформами. Успішна інтеграція Інтернету речей потребує ретельного опрацювання архітектури, стандартів обміну даними та механізмів управління безпекою.

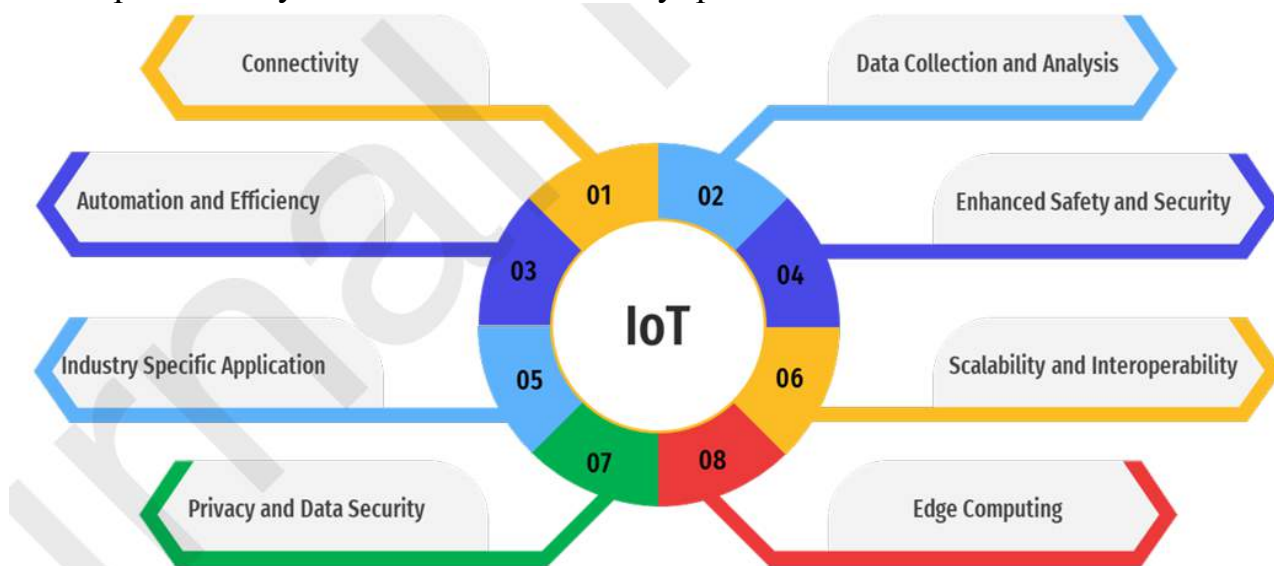


Рис. 5.3.2 Ключові аспекти Інтернету речей.

Простежуваність у ланцюгах постачання з підтримкою IoT

Управління ланцюгами постачання зазнало істотних змін завдяки застосуванню технологій Інтернету речей (IoT), що забезпечують оперативну видимість процесів, підвищують ефективність і сприяють прийняттю обґрунтованих рішень у режимі реального часу. Сьогодні підприємства можуть відслідковувати запаси, транспортування та логістичні операції на всіх етапах ланцюга постачання за допомогою сенсорів, RFID-міток і підключених транспортних засобів.

Дані, які збираються в реальному часі та передаються на централізовану платформу, забезпечують учасникам доступ до актуальної інформації про кількість, місцезнаходження й стан товарів. Завдяки IoT також можливе прогнозування попиту та аналітика, що дозволяє компаніям зменшувати надлишки, оптимізувати рівень запасів і підвищувати точність виконання замовлень.

IoT сприяє безперервній взаємодії та обміну інформацією між постачальниками, виробниками й дистриб'юторами, що дозволяє краще координувати дії та зменшувати затримки. Інтеграція Інтернету речей у процеси управління ланцюгами постачання спрощує логістику, знижує витрати та забезпечує більш оперативну доставку продукції, що підвищує рівень задоволеності клієнтів.

IoT-технології підтримують ключові етапи ланцюга постачання, зокрема:

- Транспортування та митне оформлення — пристрої забезпечують оновлення щодо місцезнаходження вантажів і можливих затримок.
- Виробництво — сенсори контролюють перебіг процесів і стан складських запасів.
- Відстеження замовлень і відвантажень — інформація в реальному часі дозволяє оптимізувати логістичні маршрути.
- Координація з партнерами — забезпечується через комунікаційні платформи на базі IoT.
- Складування та зберігання — сенсори фіксують умови зберігання й кількість наявної продукції.
- Прогнозування попиту — дані IoT використовуються для аналітики, що допомагає уникнути збоїв у поставках та підвищує загальну адаптивність системи.

Таким чином, IoT забезпечує високу прозорість, керованість і надійність у ланцюгах постачання, трансформуючи підходи до логістики в напрямі інтелектуальної автоматизації.

Розумні міста та інфраструктура IoT

Розвиток концепції розумних міст ґрунтується на інтеграції інфраструктури Інтернету речей (IoT), яка слугує основою для створення інтелектуального міського середовища. У міру зростання урбанізованих територій технології IoT відіграють ключову роль у підвищенні якості міських послуг завдяки збору, обробці та автоматичному аналізу даних у режимі реального часу.

Пристрої, оснащені IoT-технологіями — зокрема сенсори, камери та смарт-лічильники — об'єднуються в єдину мережу для ефективного управління транспортом, енергорозподілом, поведінням із відходами й забезпеченням громадської безпеки. Такий підхід сприяє створенню адаптивного й чутливого до змін середовища, де:

- інтелектуальні транспортні системи зменшують затори;

- «розумні» електромережі (smart grids) підвищують ефективність використання енергії, інтегруючи відновлювані джерела та відстежуючи споживчі навантаження;
- цифрові інструменти покращують надання муніципальних послуг.

Сучасне «розумне місто» — це складна екосистема, що поєднує житлові будинки, промисловість, органи влади, заклади охорони здоров'я, транспорт, енергетику, служби безпеки, управління відходами й водопостачання, а також дрони, автономні машини та цифрову інфраструктуру. Взаємодія цих елементів сприяє раціональному використанню ресурсів, покращенню якості життя громадян і підвищенню стійкості міського середовища до викликів майбутнього.

Прикордонні обчислення (Edge Computing) в системах IoT

Прикордонні обчислення (Edge Computing) — це підхід до обробки даних в інфраструктурі IoT, що передбачає перенесення обчислювальних процесів ближче до джерел даних — тобто безпосередньо на пристрої або локальні вузли. Замість того щоб передавати великі обсяги інформації до централізованих хмарних серверів, дані обробляються безпосередньо на місці їхнього виникнення.

Це дозволяє:

- скоротити затримки в передачі даних;
- забезпечити оперативне реагування на події;
- зменшити навантаження на мережу та споживання пропускну здатності.

Такий підхід особливо ефективний для застосувань, що вимагають негайного аналізу даних — зокрема, для автономного транспорту, розумних енергомереж, промислових систем контролю тощо.

Локальна обробка інформації забезпечує швидке ухвалення рішень і підвищує надійність функціонування систем IoT, особливо в критично важливих умовах, де час реакції має вирішальне значення.

Рис. 5.5.3 ілюструє концепцію прикордонних обчислень (Edge Computing) у контексті Інтернету речей (IoT).

Прикордонні обчислення полягають у обробці даних ближче до їхнього джерела — на «краю» мережі, замість повної залежності від централізованих дата-центрів чи хмарних сервісів. Такий підхід дозволяє суттєво знизити затримки, підвищити швидкість реагування системи та оптимізувати обробку інформації.

Завдяки Edge Computing стають можливими:

- аналіз даних у режимі реального часу;
- кешування інформації безпосередньо на пристроях;
- безпосередній зв'язок між IoT-пристроями без необхідності передавати всі дані в хмару.

Це забезпечує більш ефективну, гнучку та надійну роботу IoT-систем, особливо у випадках, коли критично важливо оперативно реагувати на події.

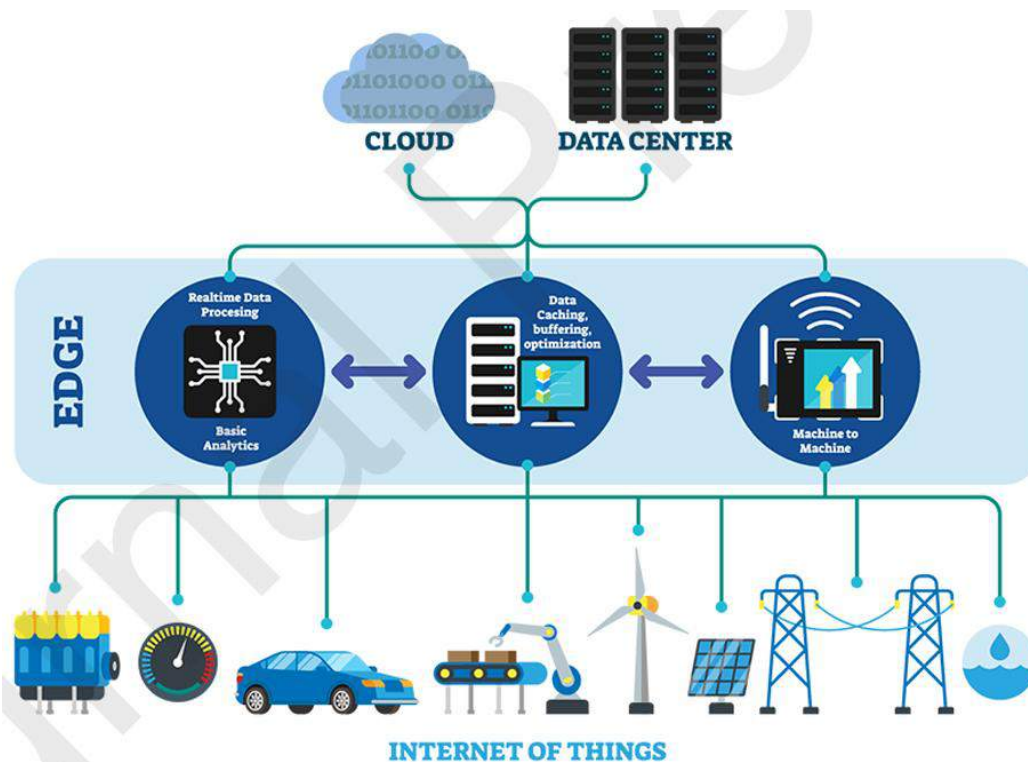


Рис. 5.5.3 Міський ландшафт з підтримкою Інтернету речей

IoT для аутентифікації ідентичності

Інтеграція Інтернету речей (IoT) у системи аутентифікації ідентичності підвищує рівень безпеки за рахунок автоматизації і спрощення процесів перевірки користувачів і пристроїв у мережі. Системи аутентифікації на основі IoT використовують сенсори, біометричні дані та розумні пристрої для перевірки особистості в режимі реального часу, що забезпечує додатковий рівень захисту.

Такі рішення широко застосовуються у різних сферах — від безпеки розумних будинків та автомобілів до захисту критично важливої інфраструктури та фінансових систем. Наприклад, носимі пристрої, оснащені біометричними сенсорами, можуть ідентифікувати користувачів за унікальними фізіологічними ознаками, такими як відбитки пальців або розпізнавання обличчя, значно ускладнюючи несанкціонований доступ.

Рис. 5.5.4 ілюструє концепцію аутентифікації пристроїв та ідентичності речей (Identity of Things) — процес перевірки автентичності й ідентичності пристроїв, підключених до мережі.

Центральне зображення замка символізує процес аутентифікації, а навколишні іконки відображають різні пристрої, які потребують підтвердження дозволу на підключення та взаємодію в межах IoT-екосистеми. Це гарантує, що лише авторизовані пристрої мають доступ до чутливої інформації та можуть виконувати дії в мережі.

Завдяки таким технологіям забезпечується підвищений рівень безпеки, запобігається несанкціонований доступ і зловмисні дії у розподілених IoT-системах.



Рис. 5.5.4 Міський ландшафт з підтримкою Інтернету речей

Управління енергетичною мережею та IoT

Інтернет речей (IoT) суттєво підвищує сталість, надійність та ефективність управління енергетичною мережею. Завдяки IoT стає можливим збір даних у режимі реального часу, проведення профілактичного технічного обслуговування та інтеграція відновлюваних джерел енергії.

Системи реагування на попит використовують дані зі смарт-лічильників, що дозволяє оптимізувати споживання енергії завдяки автоматизації, динамічному ціноутворенню та керуванню зі сторони споживача. Це сприяє підвищенню гнучкості, стійкості та точності прогнозування роботи мережі.

Загалом IoT робить енергетичну мережу розумнішою, більш ефективною та екологічно безпечною системою.

Вітрові турбіни та сонячні панелі символізують відновлювані джерела енергії, які постачають чисту електроенергію в мережу, тоді як електростанції представляють традиційні генератори. Лінії передачі зображують інфраструктуру для доставки електроенергії до споживачів — комерційних і житлових будівель.

Смарт-лічильники здійснюють моніторинг споживання в реальному часі, а контрольний центр (представлений ноутбуком) управляє роботою мережі. Електромобіль символізує як споживача, так і потенційного учасника мережі через технологію «vehicle-to-grid» (V2G), що дозволяє повертати енергію до мережі.

Зображення підкреслює роль IoT у підвищенні ефективності, сталості та надійності енергетичних систем завдяки використанню даних у реальному часі та інтеграції відновлюваних джерел енергії.

Управління медичними даними

Інтернет речей (IoT) трансформує сферу охорони здоров'я, забезпечуючи збір даних у режимі реального часу з пристроїв, які контролюють життєві показники пацієнтів, рівень їх активності та дотримання режиму прийому ліків. Ця інформація безпечно зберігається та обробляється з використанням хмарних технологій, що підтримують своєчасне прийняття рішень і віддалений моніторинг пацієнтів.

Впровадження IoT дозволяє автоматизувати введення даних, інтегруватися з електронними медичними картками та оптимізувати робочі процеси в закладах охорони здоров'я. Це підвищує якість медичної допомоги, забезпечує індивідуалізацію лікування, захищає дані пацієнтів та підвищує стійкість системи до перебоїв.

Серед ключових переваг IoT у медицині — гнучкість у проектуванні рішень, можливість працювати з різноманітними пристроями, зменшення ризиків у ланцюгах постачання медичного обладнання, спрощення процесів закупівель та підвищення довіри завдяки покращеній безпеці даних і захисту конфіденційності пацієнтів. Також важливою є відповідність нормам і стандартам, що допомагає запобігти юридичним ризикам і забезпечити безперервність медичного обслуговування.

В цілому, IoT сприяє більш оперативному і персоналізованому догляду за пацієнтами, підвищує якість сервісу та надійність роботи медичних установ.

Сільське господарство та розумне фермерство

Технології Інтернету речей (IoT) революціонізують сільське господарство, забезпечуючи збір даних у режимі реального часу про вологість ґрунту, температуру та стан посівів за допомогою сенсорів, дронів і розумних систем зрошення. Ця інформація дає змогу фермерам оптимізувати полив, контроль шкідників і використання добрив, покращуючи управління ресурсами та зменшуючи негативний вплив на довкілля.

IoT сприяє розвитку точного землеробства, використовуючи аналітику даних і машинне навчання для підвищення ефективності прийняття рішень щодо росту, збору та захисту врожаю. Завдяки впровадженню сталих практик, зниженню втрат і підвищенню продовольчої безпеки, IoT допомагає збільшувати врожайність та адаптуватися до кліматичних змін.

Рис. 5.5.5 ілюструє ключові застосування IoT у сільському господарстві, такі як використання безпілотних літальних апаратів для моніторингу посівів і боротьби зі шкідниками, датчики для контролю стану ґрунту і рослин, а також системи точного землеробства для цілеспрямованого внесення добрив і поливу.

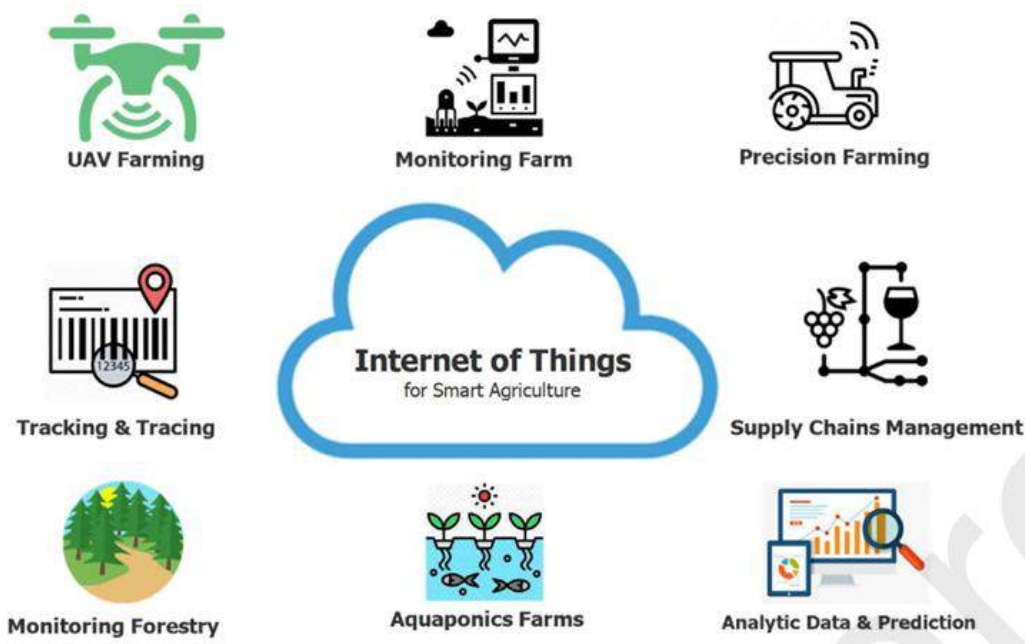


Рис. 5.5.5 Сільське господарство та продовольча безпека на основі Інтернету речей

Крім того, IoT забезпечує відстеження і контроль безпеки харчових продуктів у ланцюгах постачання, моніторинг лісових масивів для виявлення пожеж та контролю стану, підтримку систем аквапоніки та застосування аналітики для оптимізації аграрних практик. Загалом це демонструє потенціал IoT у трансформації сільського господарства шляхом підвищення ефективності та сталості.

IoT у моніторингу навколишнього середовища

IoT відіграє важливу роль у моніторингу навколишнього середовища, забезпечуючи збір і аналіз даних у режимі реального часу щодо параметрів якості повітря та води, температури, вологості та рівнів забруднення. Використання сенсорів, метеостанцій і супутникових знімків дозволяє своєчасно виявляти екологічні загрози, такі як природні катастрофи, забруднення водних ресурсів і повітря, що сприяє оперативному реагуванню.

Такий підхід, оснований на даних, покращує розуміння стану довкілля, підтримує стале управління ресурсами та сприяє збереженню екосистем.

Система виконує такі ключові функції:

- моніторинг частинок у повітрі, що впливають на дихальні шляхи;
- виявлення шкідливих мікроорганізмів у повітрі;
- оцінка забруднення поверхонь, що може сприяти поширенню хвороб;
- контроль присутності мікроорганізмів у медичних установах;
- вимірювання температури і вологості для оцінки якості повітря у приміщеннях;
- аналіз різниць тиску для оцінки ефективності вентиляції.

Загалом ця система надає необхідні дані для підтримання безпечного і здорового середовища шляхом ідентифікації потенційних загроз.

Огляд технології блокчейн

Блокчейн — це революційна технологія, що забезпечує безпечні та прозорі цифрові транзакції без необхідності посередників. Вона функціонує на основі децентралізованої мережі, де численні користувачі спільно підтримують загальний реєстр транзакцій. Кожна транзакція криптографічно пов'язана з попередньою, утворюючи ланцюг блоків — звідси й назва «блокчейн».

Ця технологія гарантує, що дані, збережені в блокчейні, є захищеними від підробок і надзвичайно стійкими до змін після їх фіксації. Прозорість, незмінність та децентралізований механізм досягнення консенсусу — ключові характеристики блокчейну, що підвищують ефективність, безпеку та довіру в різних галузях.

Виключаючи посередників, спрощуючи процеси та відкриваючи можливості для впровадження передових застосувань, таких як смарт-контракти та управління цифровими активами, блокчейн має потенціал радикально змінити фінанси, управління ланцюгами постачання, охорону здоров'я та інші сфери.

Рис. 5.5.6 демонструє базову архітектуру блокчейн-системи, наочно відображаючи ключові компоненти та процеси, що зазвичай використовуються у впровадженні блокчейн-технологій.

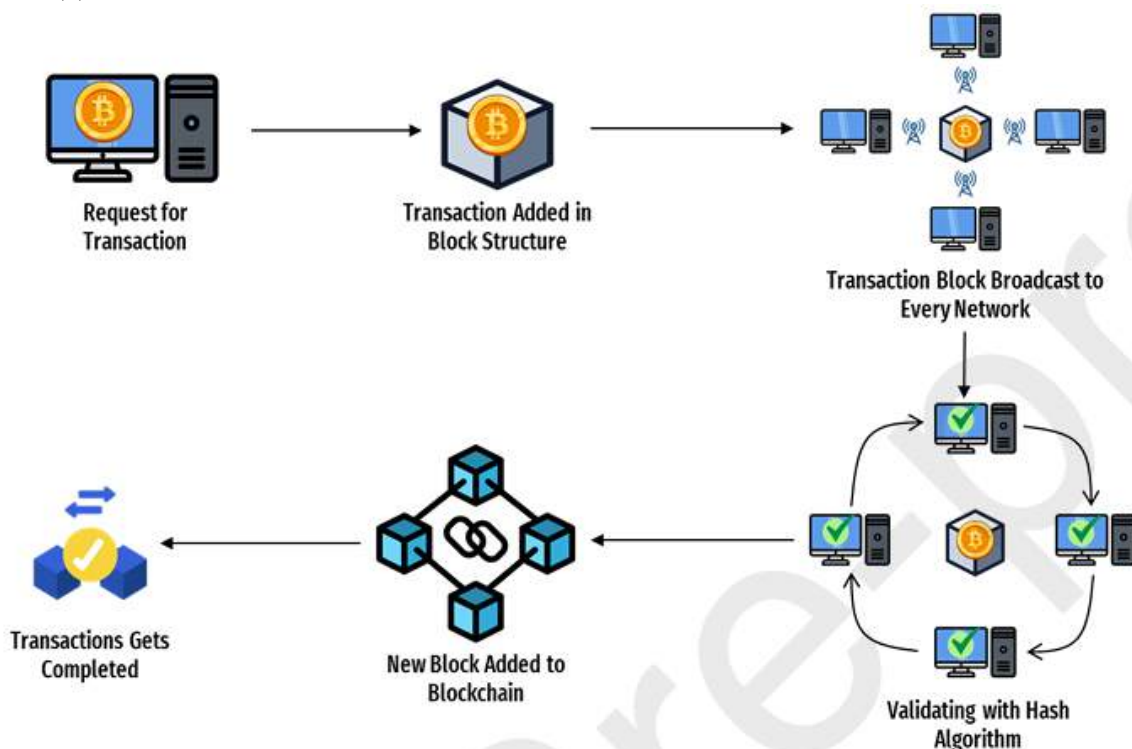


Рис. 5.5.6 Базова архітектура блокчейну

Моделі блокчейну

Блокчейн — це система розподіленого реєстру, яка забезпечує безпечні, прозорі та незмінні транзакції. Існує три основні моделі блокчейну:

Публічні блокчейни, на прикладі Ethereum або Bitcoin, функціонують як децентралізовані відкриті мережі, до яких може долучитися будь-хто. Кожен учасник має змогу виступати в ролі вузла мережі, брати участь у процесі досягнення консенсусу та зберігати повну копію блокчейну. Зазвичай для

забезпечення консенсусу використовуються алгоритми proof-of-work (доказ роботи) або proof-of-stake (доказ володіння часткою). Публічні блокчейни відзначаються високим рівнем прозорості, безпеки та незмінності, оскільки перевірка транзакцій здійснюється великою кількістю незалежних учасників.

Приватний (або дозволений) блокчейн — це мережа, у якій участь та доступ обмежені лише для визначених користувачів. У такій системі лише уповноважені вузли мають змогу бачити дані блокчейну та брати участь у процесі досягнення консенсусу. Приватні блокчейни часто використовуються організаціями або об'єднаннями для збереження контролю над мережею й конфіденційністю даних. У таких мережах можуть застосовуватись різні алгоритми консенсусу, наприклад делегований доказ частки (DPoS) або практична візантійська стійкість до збоїв (PBFT).

Консорціумний блокчейн поєднує риси як приватних, так і публічних систем, що робить його придатним для спільної роботи кількох організацій. Як і приватний, він є дозволеним, тобто участь обмежується попередньо визначеним колом учасників. Проте, на відміну від централізованого управління, функції перевірки транзакцій та досягнення консенсусу розподіляються між кількома незалежними сторонами. Це сприяє більшій децентралізації та довірі. Такий підхід особливо ефективний у сферах, де кілька організацій взаємодіють між собою, наприклад у фінансових послугах чи ланцюгах постачання. Учасники консорціуму можуть мати визначені ролі — верифікація транзакцій, ведення реєстру чи забезпечення безпеки — для підтримки цілісності системи.

Основи технології блокчейн

Основи блокчейн-технології охоплюють ключові концепції, які забезпечують її функціонування. Серед них:

1. Розподілений реєстр. Блокчейн — це децентралізований цифровий реєстр, який фіксує транзакції одночасно на багатьох комп'ютерах (вузлах). Кожен учасник мережі має копію повного реєстру, що гарантує прозорість і незмінність збережених даних.
2. Незмінність записів. Після додавання транзакції до блокчейну її надзвичайно складно змінити або видалити. Дані зв'язуються з попередніми записами та захищаються криптографічними методами, що унеможливорює їхнє підроблення.
3. Механізм досягнення консенсусу. Для узгодження між учасниками щодо дійсності транзакцій та їх порядку у блокчейні використовуються спеціальні алгоритми консенсусу. Серед них — доказ роботи (Proof of Work), доказ частки (Proof of Stake), доказ авторитету (Proof of Authority) та делегований доказ частки (Delegated Proof of Stake). Ці алгоритми забезпечують підтвердження транзакцій без потреби у центральному органі шляхом розв'язання складних криптографічних задач або через механізми стейкінгу.
4. Криптографія. Для захисту транзакцій і забезпечення достовірності даних у блокчейні застосовуються різні криптографічні методи. Хеш-функції та цифрові

підписи підтверджують автентичність операцій, а технологія відкритих ключів забезпечує цілісність інформації.

5. **Смарт-контракти.** Смарт-контракти — це програмовані алгоритми, які виконуються автоматично при виконанні визначених умов. Вони поєднують умовну логіку (if-then) з криптографічними методами, що дозволяє забезпечити прозорість, незмінність і автоматичне виконання угод без посередників. Це створює ефективну й довірену модель для різноманітних сфер застосування.

6. **Децентралізація.** Відсутність централізованого управління означає, що всі учасники можуть брати участь у підтримці та верифікації блокчейн-мережі. Це сприяє підвищенню прозорості, безпеки й довіри між сторонами.

7. **Прозорість і конфіденційність.** Блокчейн одночасно забезпечує публічний доступ до записів транзакцій (що сприяє прозорості) і захист персональної інформації завдяки криптографічному маскуванню даних. У різних блокчейн-системах реалізовано різний рівень конфіденційності.

8. **Токенізація.** Блокчейн дозволяє створювати цифрові активи або токени, що забезпечують захищене право власності та передачу різноманітних фізичних чи цифрових об'єктів: криптовалюти, цифрового мистецтва, нерухомості, товарів у ланцюгу постачання тощо.

Платформи блокчейн

Платформа блокчейн — це програмне середовище або екосистема, що забезпечує створення, розгортання та керування блокчейн-мережами й додатками. Такі платформи надають необхідні інструменти, протоколи й сервіси для розробки децентралізованих застосунків (DApps), смарт-контрактів і блокчейн-систем. Існує низка блокчейн-платформ, деякі з яких добре підходять для застосування в Інтернеті речей (IoT).

Типові компоненти блокчейн-платформи включають:

- **Блокчейн-протокол.** Визначає правила, структуру та принципи роботи блокчейну, зокрема валідацію транзакцій і формування блоків.
- **Інструменти розробки та API.** Містять комплекти для розробки програмного забезпечення (SDK), прикладні програмні інтерфейси (API) та бібліотеки для створення децентралізованих додатків і реалізації функціональності блокчейну.
- **Функціональність смарт-контрактів.** Дозволяє автоматизовано виконувати самозобов'язувальні угоди без участі посередників.
- **Механізм консенсусу.** Спосіб, за допомогою якого вузли досягають згоди щодо стану блокчейну й перевіряють транзакції (наприклад, Proof of Work або Proof of Stake).
- **Управління мережею та механізми прийняття рішень.** Забезпечують інструменти для адміністрування вузлів, контролю доступу та організації процесів ухвалення рішень у мережі.
- **Інтеграція та взаємодія з іншими системами.** Забезпечують сумісність із іншими блокчейн-системами та можливість інтеграції з існуючими або застарілими технологіями.

- Безпека та керування ідентичністю. Включають протоколи шифрування, автентифікації та верифікації особистості для захисту учасників і даних у системі.
- Масштабованість і продуктивність. Передбачають методи або рішення, що дозволяють ефективно обробляти велику кількість транзакцій і зберігати високу швидкість роботи системи.
- Інтерфейс користувача та зручність використання. Пропонують інструменти для створення зрозумілих інтерфейсів, що полегшують взаємодію з блокчейн-технологією як для розробників, так і для кінцевих користувачів.

Ethereum

Ethereum — це децентралізована блокчейн-платформа, що забезпечує однорангову (peer-to-peer) мережу для безпечного виконання та верифікації коду смарт-контрактів. Смарт-контракти дозволяють учасникам проводити транзакції без потреби в довіреному центральному посереднику. Записи про транзакції є незмінними, підтверджуваними та надійно розподіленими по всій мережі, що забезпечує повну прозорість і контроль над даними для всіх учасників.

Облікові записи користувачів Ethereum можуть як надсилати, так і приймати транзакції. Для виконання транзакції відправник має підписати її та сплатити комісію в криптовалюті Ether — внутрішній монеті мережі Ethereum.

На **рис. 5.5.7** зображена архітектура блокчейну Ethereum, яка візуально відображає основні компоненти та рівні функціонування мережі.

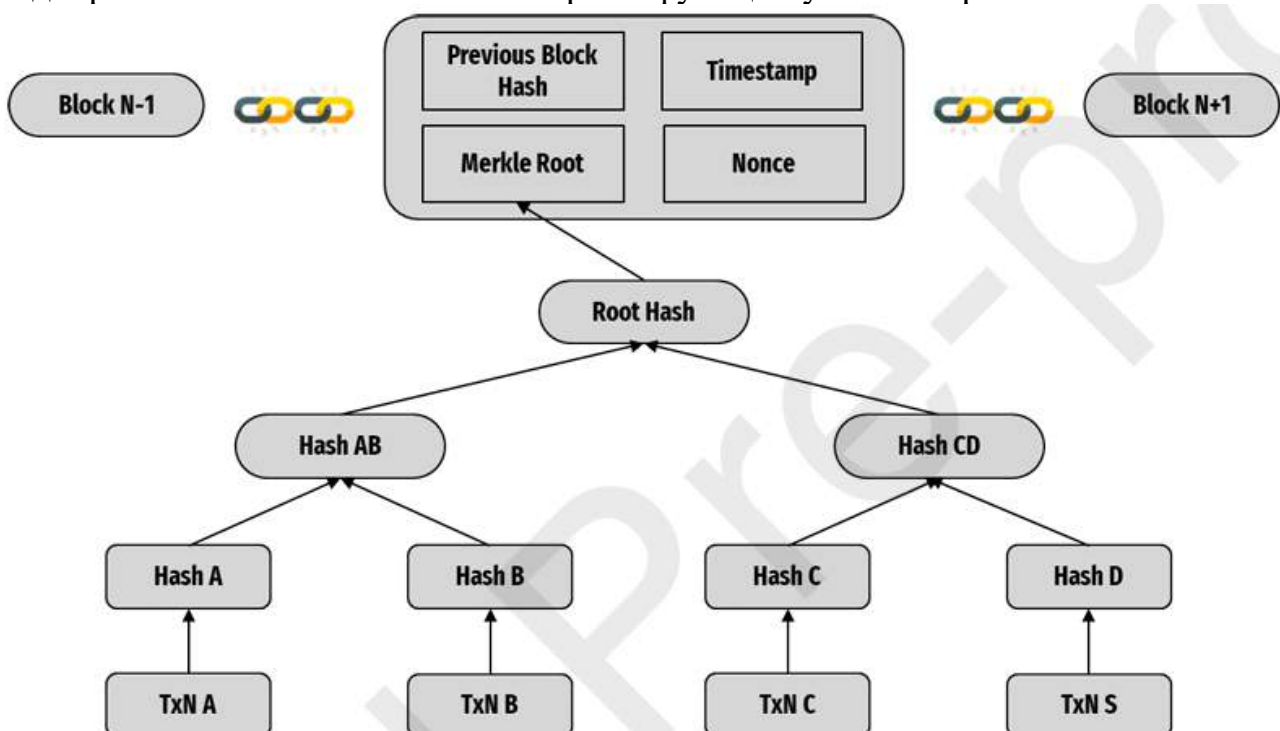


Рис. 5.5.7. Архітектура Ethereum

Основні переваги платформи Ethereum:

- Функціональність смарт-контрактів. Ethereum підтримує потужну систему смарт-контрактів, що дозволяє автоматизувати процеси та створювати децентралізовані застосунки, зокрема для IoT-сценаріїв.
- Спільнота розробників. Ethereum має велику й активну спільноту розробників, яка забезпечує документацію, навчальні ресурси та технічну підтримку.
- Розвинена екосистема та широке впровадження DApp. Завдяки масштабній екосистемі та великій кількості вже створених децентралізованих застосунків, платформа відкриває широкі можливості для інтеграції та виходу на вже сформовані ринки.
- Інтероперабельність і стандартизація. Підтримка стандартів ERC-20 (токени) та ERC-721 (NFT) забезпечує сумісність токенів і зручну інтеграцію з іншими системами.
- Безпека та можливість аудиту. Завдяки прозорості, відкритому коду та багаторічному досвіду функціонування, Ethereum є безпечною платформою для запуску смарт-контрактів.
- Ефект мережі та ліквідність. Широка база користувачів і висока ліквідність платформи сприяють ефективному токенизації активів і залученню коштів через механізми на кшталт ICO.

ІОТА

ІОТА — це програмна платформа для реалізації смартконтрактів, розроблена для забезпечення обміну даними та здійснення платежів між пристроями, підключеними до Інтернету (**рис. 5.5.8**). Усі транзакції в системі здійснюються за допомогою токена МІОТА, що використовується в обчисленнях та обміні інформацією між пристроями.

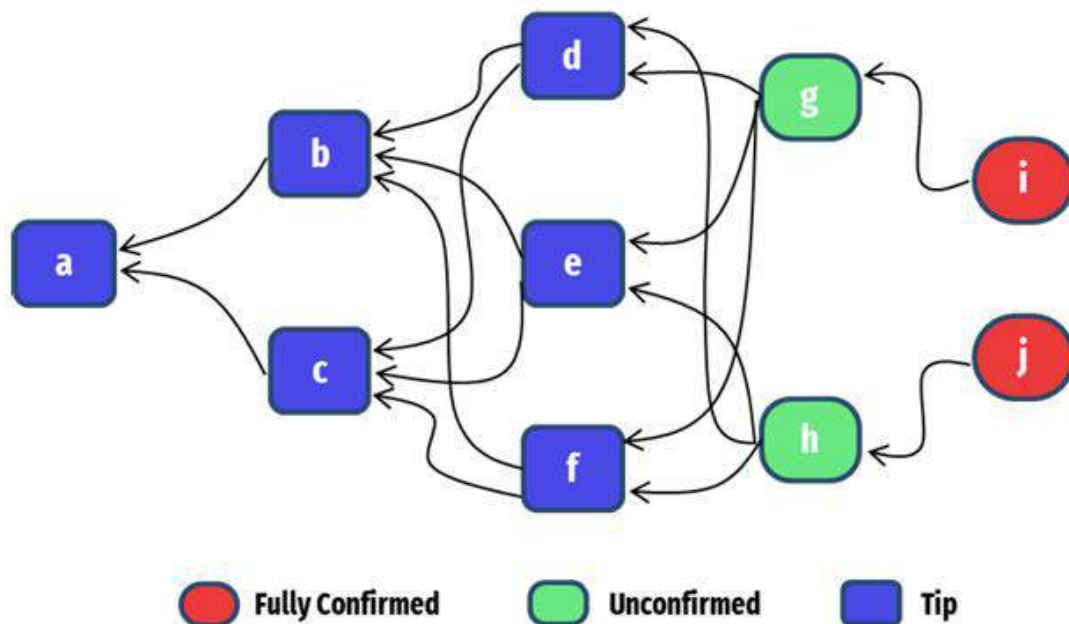


Рис. 5.5.8 IOTA Tangle архітектура

Ключовою особливістю IOTA є використання технології Tangle — структури спрямованого ациклічного графа (DAG), яка, на відміну від традиційного блокчейну, забезпечує високу масштабованість, можливість паралельної обробки транзакцій та відсутність комісій за перекази. Це робить платформу особливо придатною для обробки мікротранзакцій у середовищі Інтернету речей.

Основні переваги IOTA:

- Масштабованість і фокус на IoT. Архітектура платформи орієнтована на застосування в інфраструктурах Інтернету речей, де потрібні швидкі та безкоштовні обміни інформацією та платежами між численними пристроями.
- Технологія Tangle. Замість блоків і ланцюгів використовується графова структура, що дозволяє обробляти транзакції одночасно, без обмежень на швидкість і обсяг.
- Підтримка розробників. Навколо платформи сформована активна спільнота, що створює інструменти для впровадження IoT-рішень і машинної взаємодії.
- Інтєроперабельність. Платформа дозволяє легко поєднувати пристрої та сервіси в єдину систему, забезпечуючи сумісність із різними протоколами та стандартами.
- Безпека та надійність. Технологія забезпечує криптографічний захист переданих даних і надійний аудит дій учасників без централізованого контролю.

Hyperledger Fabric

Hyperledger Fabric — це відкритий, дозволений (permissioned) блокчейн, розроблений під егідою Linux Foundation як модульна та масштабована платформа для корпоративного використання. Завдяки вбудованим засобам керування ідентифікацією та контролю доступу, ця система набула поширення у фінансовій сфері, логістиці, торгівлі та інших галузях, де важлива прозорість, довіра та безпека (рис. 5.5.9).

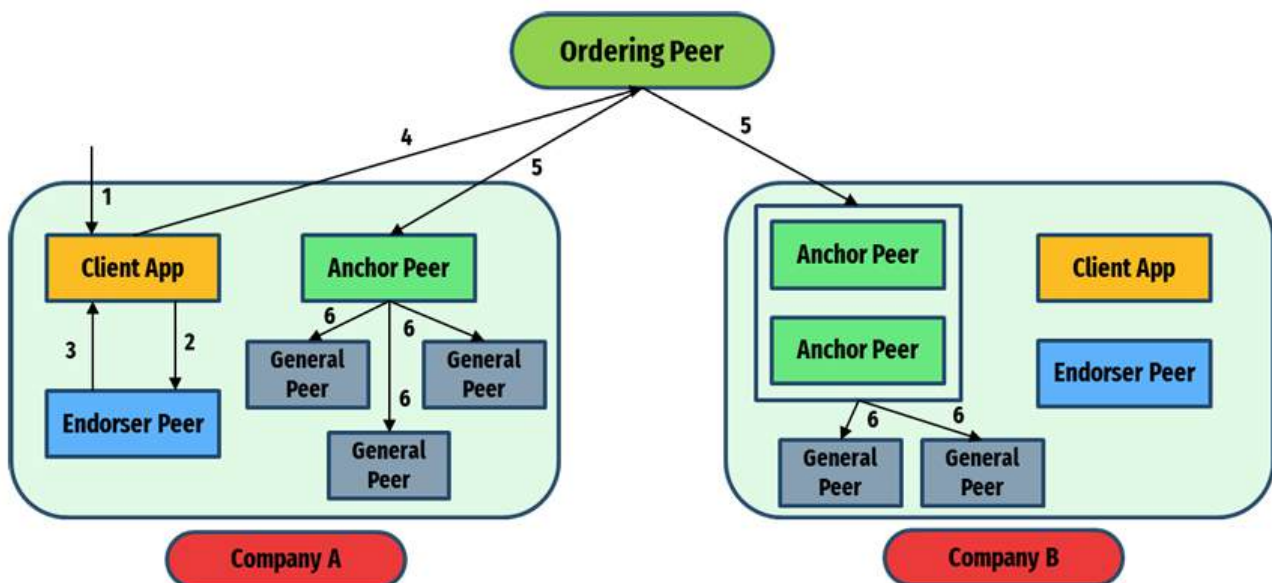


Рис. 5.5.9 Архітектура Hyperledger Fabric

Основні характеристики Hyperledger Fabric:

- Орієнтація на корпоративне використання. Платформа створена спеціально для бізнес-середовища, де критичними є конфіденційність, контроль доступу, відповідність нормам і масштабованість.
- Модульна архітектура. Гнучка структура дозволяє налаштовувати мережу відповідно до конкретних завдань, що особливо важливо в складних IoT-сценаріях.
- Механізми управління та відповідності. Система підтримує побудову політик управління, що відповідають вимогам законодавства, та забезпечує контроль над усіма процесами обміну даними.
- Інтеграція та взаємодія. Fabric легко інтегрується з наявними інформаційними системами підприємств, а також здатен взаємодіяти з іншими блокчейн-мережами.
- Безпека та конфіденційність. Архітектура забезпечує високий рівень захисту інформації, що особливо важливо у випадках передачі критичних IoT-даних або співпраці між кількома сторонами.
- Придатність до IoT-застосувань. Завдяки підтримці приватних каналів обміну, високій продуктивності та можливості контролю доступу, платформа ефективно використовується в корпоративних IoT-рішеннях — зокрема в логістиці, розумних контрактах, обліку ресурсів і керуванні ланцюгами постачання.

5.3.4. Corda

Corda — це блокчейн-платформа з відкритим кодом, орієнтована на корпоративне застосування. Вона призначена для управління, синхронізації та фіксації угод, а також для обміну цінностями між сторонами у безпечному та конфіденційному середовищі. Corda поєднує переваги децентралізованих технологій з можливістю точного контролю доступу до даних, що є критично важливим у фінансовому та промисловому секторах (рис. 5.5.10).

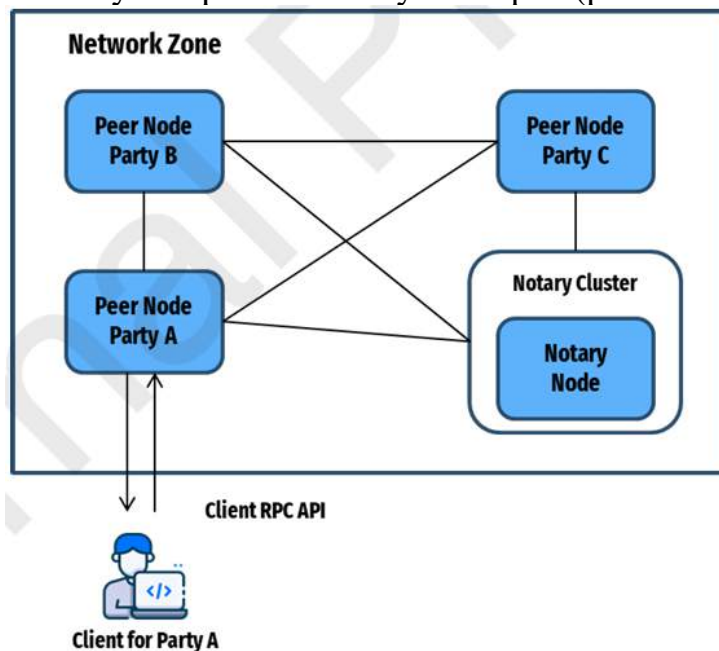


Рис. 5.5.10 Мережева архітектура Corda.

Ключові особливості Corda:

- Орієнтація на корпоративний та фінансовий сектор. Платформа спеціально розроблена для ведення ділових транзакцій із підвищеними вимогами до конфіденційності. Вона дозволяє здійснювати безпосередні угоди між сторонами без необхідності відкритого публічного ланцюга блоків.
- Безпечний обмін даними. Завдяки вбудованим механізмам контролю доступу та конфіденційності Corda забезпечує захист чутливої інформації. Це робить її придатною для використання з IoT-пристроями, які генерують великі обсяги критично важливих даних.
- Інтєроперабельність та інтеграція. Платформа забезпечує сумісність як з іншими блокчейн-системами, так і з традиційними інформаційними структурами підприємств, що спрощує впровадження в існуючу інфраструктуру.
- Активна спільнота розробників. Розвинене середовище підтримки сприяє створенню нових рішень на базі Corda, орієнтованих на потреби бізнесу.
- Гнучкі механізми консенсусу та управління. Corda пропонує варіативні моделі прийняття рішень, що відповідають вимогам корпоративного управління — від централізованих до гібридних сценаріїв взаємодії між учасниками мережі.

Критерії вибору блокчейн-платформи

Ефективне впровадження технології блокчейн у складну архітектуру Інтернету речей (IoT) вимагає ретельного аналізу низки ключових параметрів. Вибір відповідної платформи дозволяє забезпечити масштабованість, продуктивність, безпеку, конфіденційність, сумісність і економічну доцільність IoT-рішень. Окрім технічних характеристик, важливими є також підтримка з боку спільноти розробників, наявність інструментів для кастомізації, а також гнучкість адаптації до конкретних задач.

Основні критерії вибору:

- Масштабованість. Платформа має бути здатна ефективно обробляти велику кількість пристроїв і транзакцій. Урахування майбутнього зростання кількості IoT-пристроїв є ключовим для забезпечення довготривалої ефективності.
- Продуктивність. Швидкість обробки даних у реальному часі, пропускна здатність і затримки в роботі системи визначають її придатність до використання в критичних додатках IoT.
- Безпека. Захист даних є обов'язковим. Платформа повинна мати вбудовані механізми шифрування, автентифікації та запобігання несанкціонованому доступу.
- Конфіденційність даних. Здатність платформи забезпечувати захист персональної або чутливої інформації та відповідність вимогам законодавства про захист даних має велике значення, особливо в медичних, фінансових та промислових додатках.

- Інтероперабельність. Платформа повинна легко взаємодіяти з різними IoT-пристроями, протоколами та вже наявними інформаційними системами, забезпечуючи цілісність екосистеми.
- Механізм досягнення консенсусу. Важливо оцінити, наскільки ефективно та енергоощадно платформа досягає згоди між учасниками. Для IoT-середовища бажані легкі алгоритми консенсусу, сумісні з обмеженими обчислювальними ресурсами пристроїв.
- Інструменти та підтримка розробників. Наявність повного набору засобів розробки, документації та активної спільноти значно полегшує впровадження та супровід IoT-додатків на обраній платформі.
- Вартість впровадження та супроводу. Економічна ефективність рішення включає вартість ліцензій, інфраструктури, технічної підтримки та оновлень. Ретельна оцінка загальної вартості володіння є необхідною.
- Спільнота та поширеність використання. Рівень залучення спільноти, кількість впроваджень та динаміка розвитку платформи є важливими показниками її життєздатності та перспектив.
- Гнучкість і можливість адаптації. Платформа повинна дозволяти налаштування під специфіку конкретних IoT-сценаріїв, що забезпечує універсальність її використання у різних галузях.

Блокчейн в аграрному секторі та розумному фермерстві

Останнім часом з'явилося багато досліджень, присвячених поєднанню IoT-мереж із хмарними технологіями та блокчейном в аграрній галузі. Для пристроїв з обмеженими ресурсами запропоновано оптимізовану архітектуру на основі блокчейн-технологій, яка використовує адаптивні алгоритми консенсусу, враховуючи розмір мережі. Такий підхід дозволяє ефективніше керувати аграрними ланцюгами постачання, зокрема у виробництві й торгівлі шафраном.

Ще одна робота описує інтелектуальну аграрну архітектуру, яка забезпечує захищений обмін даними між різними організаціями. У рішенні поєднано технології глибокого навчання та смарт-контракти для виявлення вторгнень у хмарному середовищі й захисту передачі інформації.

Також запропоновано хмароорієнтовану архітектуру для моніторингу безпеки в «розумних» господарствах. Її мета — виявлення та запобігання атакам за допомогою блокчейну і смарт-контрактів. Для побудови прототипу використовувались Arduino, ESP32, хмарна платформа AWS і тестова блокчейн-мережа. Аналізувалися затримки в мережі для оцінки ефективності реагування на загрози.

Ще одна система спрямована на підвищення врожайності та збереження ресурсів завдяки поєднанню IoT, блокчейну та обчислень на краю мережі. Вона забезпечує надійне зберігання даних, аналітику та підтримку прийняття рішень через зручний інтерфейс і відкриту блокчейн-платформу, до якої фермери можуть приєднатися без додаткових дозволів.

Окрему увагу приділено мотиваційним стимулам для участі IoT-пристроїв у процесі майнінгу. Запропоновано двоетапну гру типу Стакельберга, що описує

взаємодію між платформою та пристроями, які купують обчислювальні ресурси на периферійних серверах. Ефективність цієї моделі підтверджено чисельним моделюванням.

Запропоновано блокчейн-систему для відстеження аграрної продукції, яка використовує змішане зберігання даних: у базі даних і в блокчейні. Шифрування гарантує безпечну передачу чутливої інформації, а смарт-контракти із системою репутаційного стимулювання заохочують користувачів до внесення достовірної інформації.

Інший підхід полягає у використанні активного гібридного блокчейну для мобільних сільськогосподарських тракторів із мінімальними вимогами до обчислювальних ресурсів. Система довела свою стійкість до низки кібератак, зокрема перехоплення, підміни, повторного використання даних тощо.

Запропоновано також швидкий і надійний блокчейн-засіб для зберігання даних з IoT-сенсорів. Алгоритм передбачає шифрування на рівні сенсора, формування транзакцій на шлюзі і побудову дерева Меркла для перевірки цілісності даних перед записом у блокчейн.

Інше дослідження описує стратегію управління агропродовольчим ланцюгом постачання з використанням глибокого навчання та блокчейн-платформи для простежуваності продуктів. Для прийняття рішень застосовується нейромережевий підхід на основі підкріплення.

Ще одна робота демонструє використання великих даних у сільському господарстві на прикладі аналізу зміни цін на яйця на оптовому ринку. Модель векторної авторегресії дозволяє дослідити фактори впливу, зокрема імпульсні реакції та розклад дисперсій.

Запропоновано також вдосконалений хмарний реляційний блокчейн-орієнтований підхід (BC over cloud-RDB), що дозволяє виявляти й запобігати спробам неправомірного втручання в бази даних. Дані розміщуються у хмарах з використанням алгоритму SHA-256 і механізму верифікації.

Ще один підхід включає використання Raspberry Pi із підключеними сенсорами температури, вологості, рН тощо. Зібрані дані записуються до блокчейну, а смарт-контракти на Ethereum автоматизують угоди між продавцями та покупцями.

І, нарешті, описано систему, що використовує низку сенсорів для збору даних про стан довкілля та поля в режимі реального часу. Безпеку забезпечують блокчейн і нечітка логіка, яка допомагає приймати рішення щодо зрошення. Доступ до системи мають лише перевірені пристрої.

Блокчейн у розумних містах та периферійних обчисленнях

У межах розумного сільського господарства запропоновано використання обчислювальної моделі туману для збору, фільтрації, зберігання та передачі даних. Застосування методу найближчих сусідів (kNN) дозволяє зменшити обсяг збережених даних і підвищити пропускну здатність каналів зв'язку між туманом і хмарою.

Щоб подолати проблеми конфіденційності та безпеки, розроблено концепцію інтеграції блокчейн-технологій у периферійні IoT-сценарії. Запропонована архітектура містить смартконтракт, який за допомогою машинного навчання розподіляє ресурси обчислень на краю мережі та визначає послідовність транзакцій між IoT-пристроєм і вузлом обробки.

Інша реалізація стосується побудови периферійно-хмарної IoT-системи для розумного землеробства із використанням методів глибокого навчання з підкріпленням. Система приймає рішення щодо оптимізації умов розвитку рослин. Описано приклади моделей, що використовуються для такого прийняття рішень.

У рамках хмарної агроплатформи реалізовано збір і аналіз великомасштабних даних. Платформа забезпечує автоматизований моніторинг сільськогосподарських процесів, зокрема ідентифікацію шкідників на основі аналізу зображень, що дозволяє реалізувати автоматизацію на великих територіях із обмеженим мережевим покриттям.

Запропоновано унікальну архітектуру IoT із використанням хаотичного шифрування у поєднанні з блокчейном. Проведено тестування ефективності цієї моделі на наборах зображень із розрахунком інтенсивності змін, коефіцієнтів кореляції, ентропії тощо, що доводить стійкість системи до атак.

Ще один підхід передбачає реалізацію децентралізованої архітектури безпеки в розумному місті. В основі цієї системи — програмно-визначувані мережі (SDN), туманні та мобільні периферійні обчислення, а також блокчейн. Модель базується на стратегії «знизу вгору»: дані з сенсорів потрапляють до вузлів туману, де аналізуються контролерами SDN для виявлення підозрілих потоків даних.

У системах розумного дому запропоновано використання периферійних обчислень для локальної обробки даних. Це дозволяє знизити затримки, підвищити оперативність реагування й зменшити навантаження на центральні сервери. Таке рішення також покращує масштабованість, ефективність зберігання й обробки даних та оптимізує енергоспоживання.

В іншому рішенні запропоновано об'єднати блокчейн з периферійними обчисленнями для підвищення надійності передачі даних в IoT-середовищах. Завдяки децентралізованій моделі передавання повідомлень забезпечується збереження цілісності інформації, захист від перевантаження та зниження ризиків порушення безпеки. Ключовими етапами процесу є реєстрація, передача даних, вибір вузла-реєстратора та розподіл винагород. Отримані результати свідчать про підвищення надійності передачі даних у таких системах.

Blockchain і автентифікація в IoT

Для забезпечення автентифікації пристроїв в Інтернеті речей (IoT) та підвищення довіри до обчислювального середовища активно досліджуються блокчейн-технології. Окрім загальновідомих хеш-функцій, в окремому дослідженні було проаналізовано типові полегшені хеш-функції (SPONGENT, PHOTON, QUARK), що застосовуються у блокчейн-орієнтованих IoT-

пристроях. Тестування на FPGA-платформах дало змогу оцінити такі показники, як енергоспоживання, швидкодія, площа чипа та рівень безпеки. З'ясовано, що SPONGENT забезпечує найкращий баланс між пропускнуою здатністю та безпекою.

З метою вирішення проблем з виявленням накладення зображень сільськогосподарських культур запропоновано підхід на основі edge-обчислень із використанням хеш-функцій. Запропонований метод виявлення даних базується на коротких цифрових підписах і поєднує переваги блокчейну для покращення точності та ефективності алгоритму.

У сфері управління обліковими журналами для хмарних сервісів розроблено безпечну систему зберігання логів на основі блокчейну. Вона вирізняється високою продуктивністю та розширеним функціоналом у порівнянні з традиційними рішеннями, забезпечуючи незмінність та прозорість журналів.

Окрема розробка присвячена апаратному прискорювачу для алгоритму SHA-256. Вона дає змогу адаптувати обчислення під потреби різних IoT-додатків, досягаючи при цьому високої енергоефективності.

Для захисту даних у хмарних середовищах запропоновано архітектуру «cloud blockchain». Вона реалізує нові механізми анонімного обміну файлами та виявлення несанкціонованого розповсюдження. Поєднання кешування з гібридною блокчейн-моделлю продемонструвало кращу ефективність порівняно з класичними блокчейнами та централізованими БД.

У багатосенсорному середовищі представлено систему взаємної автентифікації IoT-вузлів з використанням гібридної блокчейн-архітектури. Це забезпечує гнучку перевірку між пристроями в умовах різних каналів зв'язку.

Ще один підхід передбачає розподілену модель управління доступом, що повертає контроль над даними власникам IoT-пристроїв. Власники отримують можливість безпечно обмінюватися інформацією, задавати правила доступу й управляти дозволами без участі третіх сторін.

У контексті ідентифікації пристроїв було запропоновано метод генерації ґешованих ідентифікаторів на основі властивостей, таких як MAC-адреса, конфігураційні файли, версія прошивки тощо. Всі ідентифікатори зберігаються у захищеній блокчейн-структурі на основі дерева Меркла, що гарантує цілісність та унеможливорює підробку. Автентифікація відбувається без участі централізованих серверів, що забезпечує масштабованість і зниження навантаження.

Інша система побудована на інтеграції шлюзів VCoT, які приєднуються до блокчейн-мережі та розгортають смарт-контракти для реєстрації пристроїв. Під час автентифікації аналізується трафік IoT-пристроїв, і відповідні характеристики передаються до смарт-контрактів для перевірки достовірності. Запропонована модель пристроєвої ідентифікації на основі трафіку дозволяє ефективно виявляти нові пристрої та оновлювати базу даних автентифікації.

Покращення IOTA Tangle та розподілених реєстрів

Одним із перспективних напрямів у поєднанні розподілених реєстрів і Інтернету речей (IoT) є впровадження комунікаційних систем нового покоління для економіки машинного взаєморозрахунку (Machine-to-Machine, M2M), зокрема з використанням технології IOTA та концепції DLT. Такий підхід забезпечує ефективний обмін даними між пристроями без участі центральних посередників.

Інша ініціатива пропонує децентралізовану систему аутентифікації та контролю доступу для малопотужних IoT-пристроїв, яка поєднує публічний блокчейн з обчисленнями на рівні туману (fog computing). Зазначена система демонструє кращі результати порівняно з сучасними блокчейн-методами аутентифікації.

У дослідженнях архітектури IOTA акцент зроблено на новому підході до реалізації розподіленого реєстру — Tangle, що базується на ациклічному графі (DAG). Ця технологія обіцяє високу масштабованість, відсутність комісій та майже миттєві транзакції, що особливо важливо для застосування в IoT-середовищі. Створено цілісну екосистему навколо цієї концепції, яка дедалі активніше розвивається у спільноті.

З метою захисту даних у хмарних середовищах було запропоновано систему контролю доступу на основі блокчейну, яка ідентифікує користувачів за адресами облікових записів у мережі, шифрує дозволи на доступ і зберігає їх у розподіленому реєстрі. Такий підхід дозволяє запобігати несанкціонованому доступу й одночасно зберігати конфіденційність.

Окрему увагу приділено аналізу слабких місць традиційних блокчейн-систем у сфері IoT. У відповідь на ці виклики було запропоновано використання IOTA як альтернативної розподіленої технології, що базується не на блоках, а на Directed Acyclic Graph. Такий підхід дозволяє вирішити проблеми масштабованості, енергоспоживання та продуктивності.

Для зміцнення стійкості IOTA до атак розділення було розроблено новий механізм вибору транзакцій — G-IOTA. Цей підхід спрямований на захист залишених «підказок» (tips) та забезпечення чесного підтвердження всіх добросовісних транзакцій, що дозволяє уникнути дискримінації при виборі послідовності підтверджень. Запроваджено поняття "справедливості довіри", що підвищує рівень безпеки алгоритмів вибору у Tangle.

Висновки та обговорення

Наочно представлена у відповідній діаграмі структура охоплює три ключові рівні: прикладний шар, дослідження, пов'язані зі смарт-контрактами, а також підходи до алгоритмів консенсусу (**рис. 5.5.11**). Такий поділ дозволяє сформулювати цілісне уявлення про екосистему блокчейн-технологій.

Прикладний рівень відображає практичні сценарії застосування блокчейну в різних галузях – від фінансів до логістики та промисловості. Рівень досліджень смарт-контрактів висвітлює останні наукові розробки в галузі автоматизованих транзакцій і нових моделей взаємодії в цифровому середовищі. Третій рівень

зосереджений на вивченні алгоритмів консенсусу, які забезпечують надійність і підтвердження транзакцій у блокчейн-мережах.

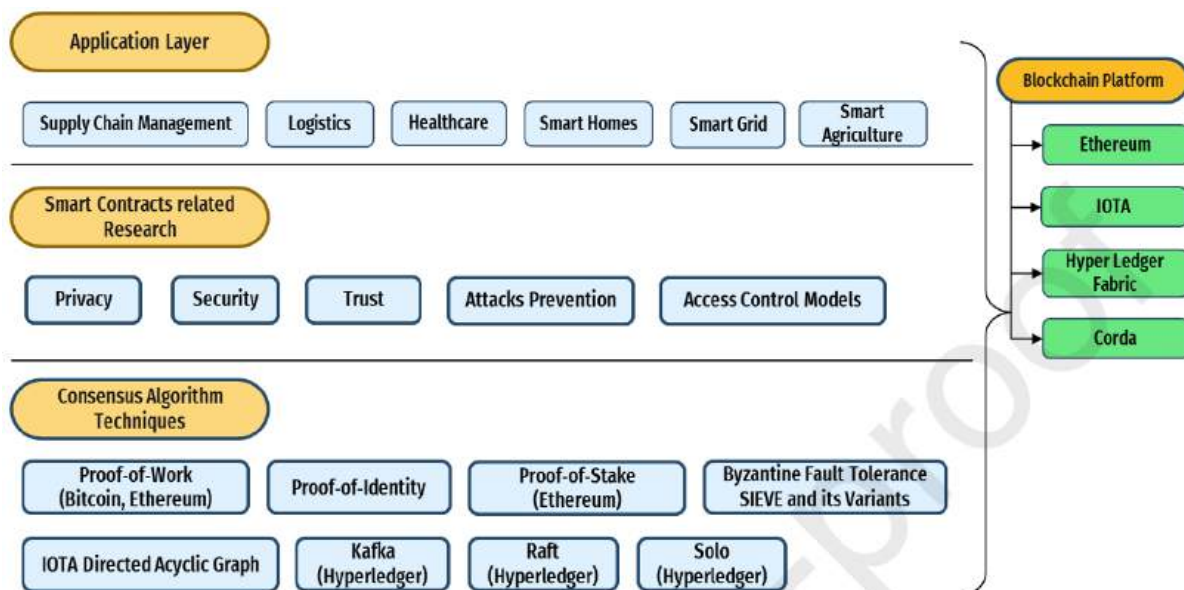


Рис. 11 Короткий огляд екосистеми блокчейну

Завдяки стислому й водночас змістовному узагальненню основних елементів, ця структура є корисним інструментом для розуміння динаміки розвитку блокчейн-систем.

На рис. 5.5.12 показано розподіл використання блокчейн-платформ у контексті IoT. Ілюстрація відображає відсоткову частку застосування різних блокчейн-систем у межах прикладних рішень IoT. Представлені дані дають змогу оцінити рівень впровадження та популярності окремих платформ, що використовуються для інтеграції технології блокчейн в інфраструктуру Інтернету речей.

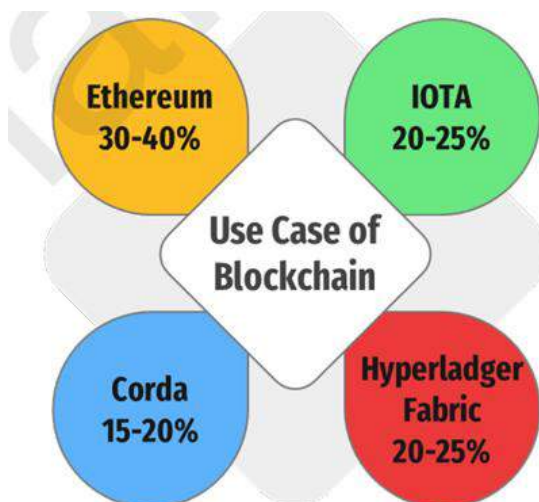


Рис. 5.5.12 Розподіл блокчейн-платформ у випадках використання Інтернету речей

Виклики

Системи Інтернету речей (IoT), що базуються на блокчейн-технологіях, забезпечують ряд переваг, зокрема підвищену безпеку, цілісність даних і

децентралізовану довіру. Водночас вони стикаються з рядом серйозних викликів, які необхідно подолати для досягнення успішної та масштабованої реалізації.

1. Масштабованість:

Одна з основних проблем — обмежена масштабованість, особливо в поширених блокчейн-мережах, таких як Ethereum, де низька пропускна здатність і висока затримка транзакцій ускладнюють інтеграцію з IoT-системами. Зі зростанням обсягів даних, які генерують пристрої IoT, виникає загроза перевантаження блокчейну. Серед перспективних рішень активно досліджуються технології шардингу (розподіл мережі на дрібніші сегменти для паралельної обробки), а також позаланцюгові транзакції та рішення другого рівня (state channels, сайдчейни), що дозволяють розвантажити основну мережу без втрати безпеки.

2. Високі обчислювальні та енергетичні витрати:

Консенсусні алгоритми, зокрема Proof of Work (PoW), потребують значних обчислювальних потужностей і споживають багато енергії, що є неприйнятним для більшості IoT-пристроїв із обмеженими ресурсами та автономним живленням. Для подолання цієї проблеми розробляються полегшені механізми консенсусу. Наприклад, технологія IOTA Tangle, побудована на основі направленого ациклічного графа (DAG), дозволяє суттєво знизити вимоги до обчислень і енергоспоживання, що робить її більш придатною для IoT-мереж.

3. Конфіденційність і безпека даних:

Незважаючи на високий рівень безпеки, який забезпечується криптографічними методами блокчейну, питання конфіденційності залишаються критичними, особливо під час обробки персональних або чутливих IoT-даних. Необхідна інтеграція технологій, що зберігають приватність, таких як шифрування та докази з нульовим розголошенням (ZKP). ZKP дає змогу перевіряти достовірність даних без розкриття їхнього змісту, зберігаючи довіру та забезпечуючи конфіденційність.

4. Сумісність (інтероперабельність):

IoT-пристрої використовують різні платформи, протоколи та стандарти зв'язку, що ускладнює їхню інтеграцію з блокчейн-системами. Для ефективного обміну даними між такими різнорідними компонентами необхідно розробити стандартизовані протоколи взаємодії. Відсутність уніфікованих рішень може призводити до вузьких місць у системах і знижувати ефективність. Важливу роль у цьому відіграє діяльність міжнародних організацій, таких як IEEE та ISO, які працюють над створенням загальноприйнятих стандартів.

5. Незмінність даних і управління пристроями:

Одна з ключових характеристик блокчейну — незмінність записів — може створювати труднощі в умовах динамічних IoT-середовищ, де необхідно часто оновлювати налаштування пристроїв, змінювати конфігурації або виводити їх з експлуатації. Жорсткість блокчейн-реєстрів ускладнює ці процеси. Для адаптації блокчейн-систем до потреб IoT необхідно впроваджувати гнучкі системи управління, включно з можливістю оновлення смартконтрактів без втрати основних переваг блокчейну.

Рекомендована література (Перспективні напрями)

- Deniz Uztürk, Gülçin Büyükožkan (2024) "Industry 4.0 technologies in Smart Agriculture: A review and a Technology Assessment Model proposition", *Technological Forecasting and Social Change*, Vol. 208, 123640, <https://doi.org/10.1016/j.techfore.2024.123640>.
- Hang Thanh Bui, Hamed Aboutorab, Arash Mahboubi, Yansong Gao, Nazatul Haque Sultan, Aufeef Chauhan, Mohammad Zavid Parvez, Michael Bewong, Rafiqul Islam, Zahid Islam, Seyit A. Camtepe, Praveen Gauravaram, Dineshkumar Singh, M. Ali Babar, Shihao Yan (2024) "Agriculture 4.0 and beyond: Evaluating cyber threat intelligence sources and techniques in smart farming ecosystems", *Computers & Security*, Vol. 140, 103754, <https://doi.org/10.1016/j.cose.2024.103754>.
- Najmus Sakib Sizan, Diganta Dey, Md. Abu Layek, Md Ashraf Uddin, Eui-Nam Huh (2025) "Evaluating Blockchain Platforms for IoT Applications in Industry 5.0: A Comprehensive Review", *Blockchain: Research and Applications*, <https://doi.org/10.1016/j.bcra.2025.100276>.
- Michele Ruta, Floriano Scioscia, Saverio Ieva, Giuseppe Loseto, Agnese Pinto, Arnaldo Tomasino (2025) "Blockchain and Knowledge Representation for Service-oriented Smart Mobility Platforms" *Blockchain: Research and Applications*, 100335, <https://doi.org/10.1016/j.bcra.2025.100335>.

Питання для самоперевірки (Перспективні напрями)

- Що таке технологічний уклад і які його характерні риси в агропромисловому комплексі?
- Які етапи розвитку технологічних укладів можна виокремити в сільському господарстві?
- Які ключові особливості п'ятого технологічного укладу в аграрному секторі?
- Назвіть основні елементи п'ятого технологічного укладу в сільському господарстві.
- У чому полягає сутність концепції «цифрового тваринництва»?
- Які напрями розвитку цифрових технологій у тваринництві можна виділити?
- Які перспективи відкриває цифрове тваринництво для підвищення ефективності галузі?
- Як поняття «Агрокультура 4.0» пов'язане з Індустрією 4.0?
- Яку роль відіграє Інтернет речей у реалізації концепції «Агрокультура 4.0»?
- Які можливості відкриває використання космічних технологій у сучасному сільському господарстві?
- У чому полягає відмінність Індустрії 5.0 від попереднього етапу?
- Яким чином інтегруються IoT, блокчейн та штучний інтелект у межах Індустрії 5.0?
- Які перспективи може надати Індустрія 5.0 аграрному виробництву?

ТЕМА 6 ПЕРСПЕКТИВНІ НАПРЯМИ ЗАСТОСУВАННЯ ІНТЕРНЕТУ РЕЧЕЙ В АГРОПРОМИСЛОВОМУ СЕКТОРІ

6.1 ТЕХНОЛОГІЯ ІНТЕРНЕТУ РЕЧЕЙ ТА ПЕРСПЕКТИВИ ЇЇ ВПРОВАДЖЕННЯ В РОСЛИННИЦТВІ

Сучасне рослинництво стикається з рядом викликів, серед яких — зниження якості ґрунтів, несвоєчасне виявлення бур'янів, шкідників і хвороб, а також нераціональне використання добрив, засобів захисту рослин і водних ресурсів. Усе це призводить до зростання витрат на виробництво через перевитрати ресурсів і до зниження врожайності внаслідок прийняття неефективних рішень в умовах обмеженої інформації.

Ситуація, що склалася, актуалізує необхідність впровадження інноваційних та інтелектуальних підходів до управління процесами вирощування сільськогосподарських культур.

Одним із перспективних рішень є технологія Інтернету речей (IoT, Internet of Things), яка має великий потенціал для подолання зазначених проблем. Ці технології дозволяють:

- у режимі реального часу здійснювати моніторинг природно-кліматичних умов, параметрів ґрунту, стану вирощуваних культур;
- виявляти появу бур'янів, шкідників і хвороб на ранніх етапах;
- автоматично обробляти і аналізувати дані;
- приймати обґрунтовані рішення щодо застосування добрив, поливів, пестицидів та інших технологічних операцій.

У результаті це забезпечує раціональне використання ресурсів, знижує рівень невизначеності в управлінні та підвищує ефективність виробництва.

Разом з тим, попри очевидні переваги, технології IoT поки не набули широкого поширення, навіть у країнах із високим рівнем розвитку інформаційно-комунікаційних систем. Причинами цього є як технічні, так і організаційно-економічні бар'єри.

Метою цього розділу є визначення основних чинників, які стримують розвиток IoT у рослинництві, та окреслення можливих шляхів подолання цих обмежень.

Структура технології Інтернету речей

Типова архітектура IoT включає три ключові рівні:

- Рівень пристроїв — сенсори, виконавчі механізми (актуатори), вбудовані системи;
- Мережевий рівень — канали зв'язку, які забезпечують передачу даних від пристроїв до обчислювальних систем;
- Прикладний рівень — програмне забезпечення, аналітичні модулі та інтерфейси користувача, які обробляють, інтерпретують і візуалізують отримані дані для прийняття управлінських рішень.

Вбудовані системи Інтернету речей зазвичай включають програмовані логічні матриці або мікропроцесори, модулі зв'язку, пам'ять та інтерфейси вводу-виводу, які потребують електроживлення. Датчики використовують для моніторингу та вимірювання різних змінних і факторів, що впливають на аграрне виробництво, а виконавчі пристрої, або актуатори, призначені для зміни стану керованих об'єктів відповідно до команд системи.

До ключових характеристик таких IoT-пристроїв належать енергоефективність, обсяг пам'яті, обчислювальна потужність, мобільність, довговічність, зона покриття, надійність і вартість. У більшості випадків пристрої проектують компактними та зручними для монтажу, прагнучи забезпечити максимально тривалий час автономної роботи, оскільки саме цей параметр суттєво впливає на ефективність роботи всієї системи.

Передача даних, отриманих від пристроїв, здійснюється через проміжну платформу — інтернет-шлюз, що об'єднує сенсори, виконавчі механізми та хмарні сервіси. Звідти інформація передається у хмару для подальшої обробки і аналізу. Зв'язок між пристроями і шлюзом відбувається за допомогою бездротових технологій, які можуть охоплювати як близькі відстані — до сотні метрів, так і великі простори, що вимірюються тисячами кілометрів. Для коротких відстаней використовують технології безконтактної комунікації NFC, бездротові сенсорні мережі з протоколами ZigBee, Bluetooth, а також радіочастотну ідентифікацію (RFID). Для довгих відстаней застосовують такі технології, як LoRa, Sigfox або NB-IoT, що відомі під загальною назвою low power wide area (LPWA), що означає низьке енергоспоживання та широку зону покриття.

Безпроводні сенсорні мережі формують просторову мережу, що складається з сенсорних вузлів, які об'єднують датчики й актуатори, що обмінюються інформацією. Вибір конкретної технології зв'язку визначається метою мережі, архітектурою вузлів, швидкістю передачі даних, зоною покриття та підтримуваними стандартами. У сільському господарстві найчастіше застосовують бездротові мережі на базі Bluetooth, ZigBee, LoRa, Wi-Fi та Sigfox.

На прикладному рівні IoT-систем через інтерфейси прикладного програмування (API) або користувацькі додатки забезпечується доступ до даних, їх збереження та аналіз. Це дозволяє інтегрувати IoT-рішення у системи підтримки прийняття рішень, візуалізувати інформацію і формувати рекомендації для управління.

Інформація в базах даних може зберігатися як на локальному рівні, так і в хмарі, залежно від конкретного застосування та архітектури системи. Аналіз даних здійснюється із застосуванням хмарних обчислень або розподілених обчислень на межі мережі, відомих як граничні та туманні обчислення. Хмарні обчислення охоплюють управління користувацьким інтерфейсом і сервісами, організацію і координацію мережеских вузлів, а також виконання обчислень і обробку даних.

Для забезпечення зв'язку між різнорідними системами та пристроями через Інтернет розробляється спеціальне проміжне програмне забезпечення та

протоколи підключення. До прикладів такого програмного забезпечення належать сервіс-орієнтована архітектура (SOA), хмарне проміжне програмне забезпечення для IoT та інші рішення. У рамках граничних і туманних обчислень пристрої IoT та шлюзи виконують обчислювальні функції і аналіз даних безпосередньо на межі мережі, що дозволяє зменшити затримки, критичні для певних застосунків, знизити витрати та підвищити якість обслуговування.

Прикладний рівень IoT може включати проміжні платформи, які беруть участь у обробці хмарних даних. Серед таких платформ є різноманітні рішення, що зосереджують увагу на контекстно-залежній функціональності та надають інструменти для збору, зберігання та аналізу інформації.

Складні зв'язки між різнорідними пристроями, комунікаційними каналами і мережами IoT значно спрощуються завдяки використанню API-інтерфейсів. Вони забезпечують сумісність між платформами та пристроями, а також передачу інформації між ними. Завдяки API дані стають доступними для таких застосувань у сільському господарстві, як моніторинг, управління подіями, прогнозування або оптимізація діяльності.

Існують різноманітні інформаційні системи управління сільським господарством, які базуються на рішеннях Інтернету речей і надають широкий спектр сервісів. Наприклад, система OnFarm дозволяє відображати та аналізувати дані з великої кількості різних джерел, що дає змогу отримувати комплексну інформацію про стан агропідприємства. Платформа Phyttech спеціалізується на безпосередньому моніторингу стану рослин, зборі та аналізі даних з метою формування рекомендацій для агровиробників. Система Semios приділяє основну увагу покриттю мережі та контролю шкідників, заморозків, хвороб і зрошення садів.

Проект EZfarm компанії IBM орієнтований на управління водними ресурсами, моніторинг ґрунту та здоров'я рослин, допомагаючи оптимізувати ці процеси. Система КАА забезпечує віддалений моніторинг врожаю, картографування ресурсів, прогнозну аналітику врожайності, а також статистику за продукцією, що дає можливість реалізувати інтелектуальні логістичні рішення і організувати зберігання продукції.

Платформа MbeguChoice допомагає фермерам отримувати доступ до якісних насіннєвих матеріалів від різних постачальників, сприяючи підвищенню ефективності виробництва. Система Farmlogs автоматизує реєстрацію агротехнічних операцій і забезпечує отримання візуальної інформації про стан посівів. Нарешті, програмне забезпечення Sgorx надає послуги адаптивного зрошення, що сприяють підвищенню врожайності сільськогосподарських культур і водночас забезпечують економію води та енергії.

Наразі вже існують і використовуються різні інформаційні системи управління сільським господарством, які забезпечують зберігання, обробку та аналіз даних. Однак технології IoT і подібні обчислювальні рішення продовжують розвиватися й удосконалюватися для більшої ефективності та адаптації до потреб аграрного сектору.

По-перше, поля характеризуються значною внутрішньополівою змінністю як у просторі, так і в часі. Це визначає необхідність встановлення достатньої кількості IoT-пристроїв на полях. Крім того, залежність технологічного процесу виробництва сільськогосподарських культур від великої кількості різних факторів обумовлює потребу у встановленні великої кількості різномірних датчиків. Всі вони потребують своєчасного обслуговування та забезпечення безперебійного живлення, що в окремі періоди, через погодні умови, організувати досить складно.

По-друге, поля зазвичай розташовані на значній відстані від розвиненої інфраструктури, часто відсутній доступ до Інтернету чи мобільного зв'язку, що створює певні труднощі, а в деяких випадках і унеможлиблює організацію ефективної передачі даних від датчиків до платформ для зберігання, обробки та аналізу, а також передачі команд у зворотному напрямку на виконавчі пристрої. Це ставить під загрозу функціонування IoT-систем в цілому.

Аналіз інновацій у сфері рослинництва показав, що безпілотні літальні апарати (БПЛА) можуть стати хорошою альтернативою стаціонарним IoT-пристроєм. Головною перевагою БПЛА є оперативність і якість отримуваних даних при відносно низьких витратах. Це зумовлено високою роздільною здатністю знімальної апаратури, що використовується на БПЛА, а також можливістю здійснювати зйомку об'єктів на невеликих висотах. БПЛА працює повністю в автоматичному режимі, виконує зйомку в запрограмованих точках за GPS-координатами та повертається для приземлення у точку зльоту.

Застосування БПЛА дає змогу вирішувати у рослинництві низку завдань, пов'язаних із супроводом технологічних процесів у точному землеробстві. Зокрема, це визначення потреби вирощуваних культур у воді та мінеральних елементах, проведення контрольованого зрошення та внесення добрив, виявлення осередків зараження хворобами та шкідниками, а також фіксація загибелі рослин. Крім того, за допомогою БПЛА можна визначати обсяги необхідних засобів захисту рослин, а також здійснювати контроль і оцінку ефективності їх внесення.

Крім того, за допомогою БПЛА можливо складання контуру посівних площ, здійснення моніторингу меліоративних систем, оцінка всхожості посівів, а також проведення обробки посівів інсектицидами чи гербіцидами. Безпілотні літальні апарати здатні виконувати різноманітні операції, зокрема детальну аерофотозйомку та відеозйомку високої якості. Вони також можуть здійснювати мульти- та гіперспектральну зйомку, що дає змогу розраховувати вегетаційні індекси для створення карт, за допомогою яких оцінюють такі показники розвитку рослин, як об'єм і приріст біомаси, вміст хлорофілу в листках та інші. Тепловізійна зйомка в різних діапазонах інфрачервоного випромінювання дозволяє оцінювати строки диференціювання точок росту, які є важливими для визначення продуктивності культур. Лазерне сканування забезпечує побудову карт із детальним відображенням рельєфу навіть у умовах щільної рослинності.

Для роботи БПЛА у сільському господарстві застосовуються різні програмні додатки, які вибираються залежно від цілей і специфіки умов. Серед

найпоширеніших – Pix4Dcapture, DroneDeploy, Atlas Flight, GeoScan Planner та інші. Мобільний додаток Pix4Dcapture оптимізує план польоту з прив'язкою до визначеної території і дозволяє обирати тип польоту залежно від поставлених задач. Програмне забезпечення DroneDeploy автоматизує політ дрона, забезпечуючи аерофотозйомку в потрібних точках і під необхідним кутом. Серед переваг цієї програми – можливість створення фотопланів і 3D-моделей, а також перегляд результатів через мобільний додаток чи браузер з підтримкою роботи в хмарі.

Програма Atlas Flight автоматизує планування польоту з можливістю задання координат зйомки, а також підтримує завантаження аерофотознімків у режимі реального часу на веб-сервіс MicaSense Atlas, де створюється ортофотоплан. GeoScan Planner від компанії «Геоскан» дозволяє будувати польотні завдання автоматично, достатньо лише виділити область зйомки на карті або завантажити її з файлу. Програма контролює якість польоту БПЛА, забезпечує управління без використання пульта та спеціальних навичок пілотування, підтримує завантаження kml- та kmz-файлів і різні картографічні підкладки.

Для налаштування і керування дронами компанії DJI використовуються програми DJI GO 4 і DJI Pilot, які дають змогу не лише управляти дроном, а й змінювати налаштування камери і сенсорів, відслідковувати статус систем, редагувати отриманий матеріал та інше.

Безпілотні літальні апарати вже успішно використовуються в сільському господарстві таких країн, як Італія, США, Бразилія, Японія і Китай. В Україні також спостерігається тенденція до зростання застосування БПЛА в агросекторі, що свідчить про перспективність цієї технології для розвитку точного землеробства.

Отже, використання БПЛА дозволяє з високою ефективністю отримувати необхідні дані та передавати їх для обробки, а також виконувати роль актуатора — виконавця прийнятих рішень, забезпечуючи проведення раціональної обробки ґрунту добривами, боротьбу з бур'янами та шкідниками за допомогою пестицидів. Водночас варто зазначити, що повністю відмовитися від використання стаціонарних IoT-пристроїв неможливо, оскільки вони є найбільш ефективними для моніторингу змін погодних умов, що теж суттєво впливає на продуктивність виробництва. Проте кількість таких пристроїв може бути суттєво зменшена при застосуванні БПЛА.

Іншим напрямком застосування БПЛА у системі IoT є їх використання як бездротових літаючих сенсорних мереж, що дозволяють автоматизовано збирати дані з віддалених сенсорних вузлів, які накопичують інформацію під час автономної роботи. За допомогою таких мереж можна відстежувати і збирати інформацію з встановлених датчиків і оперативно передавати її в Інтернет. Здатність забезпечувати зв'язок у режимі реального часу без потреби у будь-якій інфраструктурі є значною перевагою літаючих сенсорних мереж для рослинництва.

Таким чином, технології IoT мають великий потенціал для підвищення ефективності виробництва сільськогосподарських культур. Відносно повільне впровадження цих технологій у рослинництво зумовлене особливостями галузі, яка вимагає встановлення великої кількості різноманітних датчиків, складності їх обслуговування та забезпечення безперервного живлення, а також низької ефективності роботи мережевого взаємодії IoT. Як рішення зазначених проблем пропонується використання БПЛА у якості IoT-пристроїв та засобів комунікації в технологіях Інтернету речей.

6.2 ЦИФРОВА ТРАНСФОРМАЦІЯ ІНФОРМАЦІЙНОЇ ІНФРАСТРУКТУРИ АПК ЯК ІННОВАЦІЙНИЙ ЧИННИК ПЕРЕХОДУ ДО «РОЗУМНОГО» СІЛЬСЬКОГО ГОСПОДАРСТВА

В сучасних економічних умовах інформаційна інфраструктура постає як один із ключових чинників забезпечення ефективного функціонування суспільного виробництва. У XXI столітті її роль суттєво зростає, адже саме інформаційна інфраструктура є основою безпечної та інноваційної діяльності підприємств агропромислового комплексу.

На сьогодні цифрова трансформація стала невід'ємною складовою розвитку більшості галузей економіки, включно з агросектором. Вона передбачає активне впровадження інформаційно-комунікаційних технологій та роботу з великими масивами даних, які генеруються в межах сучасних інформаційно-телекомунікаційних систем і мереж. Основна мета цього процесу — вилучення корисної інформації для ухвалення обґрунтованих управлінських рішень та підвищення ефективності виробничих процесів.

У розрізі розвитку агропромислового виробництва цифрова трансформація тісно пов'язана з концепцією зміни технологічних укладів, що передбачає перехід до нових рівнів організації виробництва через інтеграцію цифрових технологій.

Цифрова економіка нині розглядається як така форма господарювання, у якій ключовим ресурсом є дані в цифровому вигляді. Обробка великих обсягів інформації та використання результатів їхнього аналізу дозволяє не лише суттєво підвищити ефективність виробництва, а й модернізувати технології, обладнання, логістику, зберігання, збут продукції та надання послуг.

У процесі цифрової трансформації агросектору посилюється значення інформації та знань як вирішальних факторів сучасного виробництва. З'являється можливість у режимі реального часу відстежувати переміщення продукції від її вирощування до реалізації кінцевому споживачеві, що відкриває шлях до нових моделей взаємодії у форматі «24/7».

Кінець XX століття ознаменувався переходом від «індустріального» до «інформаційного суспільства», яке базується на автоматизованому створенні та обробці цифрових ресурсів. Цей перехід зумовив формування цілісного інформаційного простору, в якому виробництво, поширення та споживання

інформації стали основними чинниками економічного зростання. У країнах із високим рівнем технологічного розвитку цифрова трансформація сприяла становленню інформаційного сектору як стратегічного ресурсу національного розвитку.

Розвиток цифрового сегмента неможливий без належного рівня інформаційної інфраструктури (ІТ-інфраструктури). До її складу зазвичай відносять об'єкти інформатизації (економічні суб'єкти, їхні структурні підрозділи, інші керовані об'єкти), інформаційні системи, вебресурси, а також канали зв'язку та телекомунікаційні мережі. З одного боку, впровадження такої інфраструктури забезпечує нові можливості для ефективного управління, аналізу, прогнозування та прийняття рішень у межах аграрного виробництва. З іншого боку, це супроводжується зростанням загроз, пов'язаних із захистом цифрової та аналогової інформації.

У цьому контексті створення інформаційної інфраструктури агропромислового комплексу повинно охоплювати не лише технічні рішення, а й програмні засоби та цифрові платформи, які використовуються на всіх рівнях управління для підтримки прийняття рішень, включаючи вебсайти, інформаційно-аналітичні системи, автоматизовані бази даних тощо.

Забезпечення кіберзахисту та стійкості ІТ-систем як окремих аграрних підприємств, так і галузі в цілому, набуває вирішального значення. Особливо вразливими є складні інституційні утворення мезорівня, які охоплюють мережеву взаємодію суб'єктів господарювання. Нині спостерігається збільшення кількості кібератак на інфраструктурні об'єкти, що може призводити до несанкціонованого доступу, викрадення або спотворення важливої бізнес-інформації, зокрема щодо технологій, логістики, організації виробництва та ноу-хау.

Згідно з міжнародним стандартом ISO/IEC 27032:2012 «Інформаційні технології — методи захисту — настанови з кібербезпеки», під кібербезпекою розуміють «збереження конфіденційності, цілісності та доступності інформації в кіберпросторі». Це визначення близьке до класичного поняття інформаційної безпеки, але охоплює ширший контекст — безпеку додатків, мережеву та інтернет-безпеку, а також захист критичних інформаційних інфраструктур. Варто зазначити, що кібербезпека не є синонімом жодного з цих понять, хоча й тісно з ними пов'язана.

У сучасних умовах інформаційна інфраструктура стала ключовим чинником розвитку сільськогосподарського виробництва. В XXI столітті її значення дедалі зростає, адже цифрові платформи, автоматизовані системи управління та аналітичні інструменти формують підґрунтя для впровадження інновацій в агропромисловому комплексі України.

Процеси цифрової трансформації, які активно відбуваються в нашій державі, передбачають глибоку інтеграцію інформаційно-комунікаційних технологій у всі ланки агровиробництва — від управління земельними ресурсами до логістики та збуту продукції. Йдеться не лише про автоматизацію операцій, а

насамперед — про формування нової системи управління, що базується на великих масивах даних, штучному інтелекті та Інтернеті речей (IoT).

На тлі впровадження цифрової економіки, яка охоплює всі сфери господарської діяльності, аграрний сектор України потребує розбудови сучасної інформаційної інфраструктури. Йдеться про створення єдиного цифрового простору, в межах якого здійснюється збір, передача, обробка та аналітика даних, що стосуються стану ґрунтів, мікроклімату, технологічних процесів, логістичних операцій тощо.

Цифрова трансформація в агросекторі України передбачає інтеграцію рішень на основі відкритих ІТ-систем, зокрема в межах концепцій «розумне поле», «розумна ферма», «розумна теплиця», які вже впроваджуються окремими аграрними компаніями за підтримки держави та міжнародних партнерів. Такий підхід дозволяє здійснювати моніторинг та управління технологічними процесами в режимі реального часу, знижує виробничі ризики та підвищує ефективність використання ресурсів.

В Україні цифровізація аграрного виробництва також пов'язана з розробкою цифрових моделей основних процесів у сільському господарстві. Такі моделі дозволяють здійснювати точне планування, прогнозування врожайності, оптимізацію внесення добрив, контроль за зрошенням та аналіз впливу змін клімату. Для цього потрібна інтеграція рішень штучного інтелекту, машинного навчання та сенсорних технологій.

Особливої уваги потребує безпека ІТ-систем, адже зростає кількість кіберзагроз. Захист цифрової інфраструктури агропідприємств має здійснюватися з урахуванням міжнародних стандартів інформаційної безпеки, а також вимог національного законодавства щодо захисту критичної інфраструктури.

Сьогодні перед агросектором України стоїть завдання переходу до нового рівня організації виробництва — на основі цифрових даних, автоматизації рутинних процесів та прийняття управлінських рішень у реальному часі. Одним із ключових напрямів такої трансформації є створення галузевих цифрових платформ, які поєднують фермерів, агрономів, постачальників ресурсів, переробників та державні структури в єдину систему оперативного управління.

Цифрова трансформація сільського господарства України — не лише технологічний виклик, але й стратегічна можливість для побудови сталого, високопродуктивного та конкурентоспроможного агропромислового комплексу в умовах глобальної конкуренції.

Для створення сучасної автоматизованої системи управління підприємством агропромислового комплексу в Україні важливим завданням є захист ключових об'єктів: інформації (включаючи первинні, аналітичні, сервісні дані) та інформаційної інфраструктури разом із процесами її обробки. Функціонування цієї інфраструктури забезпечують цифрові платформи, зокрема рішення на базі Інтернету речей (IoT), які дозволяють вибудовувати гнучку сервісну взаємодію між усіма учасниками аграрного виробництва.

Цифрова платформа у сучасному розумінні — це алгоритмізоване середовище взаємодії великої кількості незалежних учасників певного сектору економіки, в межах якого знижуються транзакційні витрати завдяки використанню цифрових технологій та трансформації традиційної системи розподілу праці. Такі платформи відкриті до управління різними елементами агровиробництва: землеробством (зокрема точним та «програмованим»), рослинництвом, тваринництвом, логістикою, зберіганням, доставкою продукції та забезпеченням її простежуваності.

У технологічному сенсі цифрові платформи підтримують створення рішень для управління генетичними фондами культур і порід, системами диференційованого внесення добрив і ЗЗР з урахуванням даних про стан ґрунту, метеоумов і розвитку культур. Також вони інтегрують механізми управління знаннями персоналу, що формує попит на фахівців з цифрових технологій, здатних створювати інноваційне програмне забезпечення та надавати агровиробникам нові ІТ-рішення задля підвищення доданої вартості та конкурентоздатності аграрного бізнесу України.

Цифровізація в аграрному секторі України, як і у провідних країнах, розвивається за багаторівневою моделлю. Для агрохолдингів цей процес умовно поділяється на три етапи, для малих і середніх виробників — здебільшого на два.

Перший рівень — це агропідприємство з налаштованими бізнес-процесами, інтегрованою системою обліку та єдиним цифровим бек-офісом. У такій структурі формується централізована база даних, яка дозволяє оперативно управляти всіма процесами, використовуються інформаційні панелі (дашборди) для візуалізації ключових показників у реальному часі, здійснюється накопичення аналітичної інформації про діяльність господарства.

Другий рівень — це цифрове технологічне підприємство. Тут впроваджуються інновації: технології точного землеробства, штучного інтелекту (AI), супутникового моніторингу, комп'ютерного зору (CV), машинного навчання (ML), віртуальної реальності (VR). Усі ланки виробничого ланцюга інтегруються онлайн, налагоджується омніканальна бізнес-модель. Компанія постійно удосконалює свій підхід до управління та генерує нові компетенції на основі накопиченого досвіду.

Третій рівень — це побудова аграрної цифрової екосистеми. Йдеться про створення інноваційної інфраструктури на мезорівні, де цифрові платформи виступають інтеграторами усіх учасників агросфери в межах єдиного інформаційного середовища. Програмні рішення, розроблені в рамках таких екосистем, можуть ставати самостійним напрямом бізнесу.

В Україні вже діють і розвиваються низка цифрових ініціатив, що демонструють успішні приклади впровадження цифровізації в АПК:

- SmartFarming — українська компанія, яка впроваджує системи точного землеробства, агромоніторинг, картування врожайності, NDVI-аналіз, керування сівоzmінами, логістикою та агротехнічними роботами.

- API Agrohub — відкрита платформа даних для аграріїв, яка дозволяє будувати моделі прогнозування, проводити аналітику на основі метеоданих, супутникових знімків, ґрунтових даних тощо.
- МетеоФарм — надає локальні агрометеодані та інструменти для агрономічного планування, які інтегруються з сільгосптехнікою, мобільними додатками і GPS-трекерами.
- OneSoil — онлайн-сервіс для супутникового моніторингу полів, який дозволяє аграріям безкоштовно відстежувати стан культур і будувати карти-завдання на внесення добрив.
- Agrosem DataHub — цифрова платформа для обліку виробничих даних, агрономічного планування, контролю витрат і логістики.
- eFarmer — українське рішення для управління технікою, картування полів, складання агропланів і обліку робіт, орієнтоване на малі та середні господарства.

Інформація сьогодні виступає не просто ресурсом, а особливим фактором виробництва, що має низку унікальних властивостей. Вона зберігає свою корисність навіть при багаторазовому використанні: передача частини знань іншому споживачеві не зменшує її обсягу в того, хто її надає. Це означає, що інформація не втрачає цінності через розповсюдження — на відміну від матеріальних ресурсів.

Інформація також є вибірковою за своєю природою — вона відображає лише ту частину дійсності, яка запитується користувачем. Саме запит визначає, яка інформація буде корисною та релевантною, що підкреслює значення ефективного відбору даних із загального інформаційного потоку.

Важливим аспектом є і складність ідентифікації споживача: зазвичай інформація створюється для широкого кола користувачів, які не визначаються заздалегідь. Водночас існують захищені інформаційні потоки, орієнтовані лише на визначених отримувачів.

Інформація має специфічну властивість "старіння", що залежить від її змісту та контексту використання. Наприклад, відомості про майбутні події можуть бути цінними лише до їх настання, після чого втрачають актуальність. Натомість архівні дані можуть отримувати нову цінність у рамках історичного або наукового аналізу. Таким чином, цінність інформації визначається не лише її змістом, але й тим, хто, коли і як її використовує.

Оцінити вартість інформації однозначно складно — її значення визначається не витратами на створення, а корисністю для конкретного завдання. У цифровій економіці вартість даних часто базується на їх потенціалі змінити прийняті рішення, скоротити витрати або збільшити прибутки, а не на тому, скільки коштів витрачено на їх отримання.

Цілеспрямований пошук, аналіз і відбір інформації стають критичними етапами в роботі з даними. Тому особливу роль відіграють інструменти аналітики, штучного інтелекту, цифрових платформ, які забезпечують перехід від «даних заради даних» до реального управлінського або виробничого ефекту.

У сучасних умовах інформація стала визначальним атрибутом прогресивного виробництва і ключовим елементом цифрової економіки. В аграрному секторі вона не просто доповнює технологічні процеси — вона їх трансформує. Система інформаційної інфраструктури, що формується навколо цифрових платформ, дає змогу організовувати ефективну взаємодію електронних пристроїв, поширення даних, обмін між користувачами й аналітичними системами.

Реалізація концепції «розумного сільського господарства» ґрунтується на поєднанні двох взаємозалежних аспектів — інноваційної технологічної та інформаційної інфраструктури. Ці складові нерозривно пов'язані: застосування цифрових технологій має сенс лише за наявності високотехнологічного виробничого середовища, здатного сприймати, обробляти і реагувати на інформацію в режимі реального часу.

Українські аграрні підприємства, впроваджуючи цифровізацію, повинні також враховувати нові виклики, пов'язані з безпекою автоматизованих систем управління. Умова сталого розвитку — це створення захищених ІТ-систем, здатних не лише ефективно обробляти дані, а й протистояти загрозам кібербезпеки, зберігаючи конфіденційність і цілісність критично важливої інформації.

Таким чином, в умовах трансформації агропромислового комплексу України інформація виступає не тільки ресурсом, а й інструментом управління, що формує нову економічну і технологічну реальність, де пріоритетом є знання, швидкість аналізу і здатність до оперативного прийняття рішень на основі цифрових даних.

6.3 ІНТЕЛЕКТУАЛЬНЕ ЗЕМЛЕРОБСТВО НА ОСНОВІ ТЕХНОЛОГІЙ ІНТЕРНЕТУ РЕЧЕЙ (ІОТ)

Технології, засновані на аналізі даних, стрімко розвиваються разом із впровадженням концепції Інтернету речей (IoT) і вже у найближчому майбутньому стануть ключовим елементом цифрової трансформації аграрної галузі. Сучасне інтелектуальне землеробство (Smart farming) базується на поєднанні передових інформаційних технологій: дистанційного зондування, обробки великих обсягів даних, хмарних обчислень, бездротових сенсорних мереж (WSN), систем управління агровиробництвом, а також автономних мобільних платформ і сільськогосподарських машин. Ці компоненти інтегруються з мобільними пристроями, що дозволяє суттєво підвищити ефективність моніторингу, контролю та прийняття рішень.

Інтелектуальне землеробство передбачає використання інформаційно-комунікаційних технологій (ІКТ) для забезпечення взаємодії в межах всієї агропродовольчої ланки — від вирощування до постачання — з акцентом на безпеку продукції та оперативний контроль якості. В основі таких систем лежить технологія Інтернету речей, яка забезпечує обмін даними між сенсорами,

виконавчими пристроями та керуючими блоками в режимі реального часу, що дає змогу оптимізувати ресурси та підвищити точність управління.

Завдяки IoT у сільському господарстві можна:

- виявляти бур'яни, шкідників, захворювання на ранніх стадіях;
- контролювати погодні умови та параметри ґрунту;
- оптимізувати витрати на добрива та засоби захисту рослин;
- проводити точний облік спожитих ресурсів.

Концепція IoT, вперше запропонована Кевіном Ештоном у 1999 році, передбачає підключення будь-яких «речей» (об'єктів) до мережі Інтернет для їх віддаленого керування й передачі даних у реальному часі. Важливою віхою розвитку стала поява технології радіочастотної ідентифікації (RFID), яка забезпечила можливість прямого обміну інформацією між об'єктами. У контексті сільського господарства «речами» можуть бути сенсори вологості, температури, рН ґрунту, погодні станції, дрони, розумні зрошувальні системи тощо. Їх об'єднання в єдину мережу забезпечує інтероперабельність, масштабованість і відкритість цифрової платформи управління агровиробництвом.

У результаті впровадження IoT сільське господарство стає керованим на основі даних: рішення приймаються вчасно, з урахуванням поточних умов, що дозволяє зменшити невизначеність, підвищити ефективність та мінімізувати шкоду довкіллю.

Мета даної глави — охарактеризувати поточний стан технологій IoT у землеробстві, проаналізувати сучасні підходи до створення та розвитку інформаційно-вимірювальних систем на основі бездротових сенсорних мереж (WSN). Особливу увагу приділено підґрунтовим сенсорним мережам (БПСС), які призначені для визначення ключових характеристик ґрунтів та деталізації їх просторово-часового розподілу. Для цього запропоновано загальну структуру такої мережі, принципи розміщення сенсорних вузлів під поверхнею землі, а також технічні вимоги до компонентів системи.

Впровадження IoT у сільське господарство: сучасний стан та виклики

Технології Інтернету речей (IoT) стрімко привертають увагу науковців у галузі сільського господарства. У країнах Європи реалізується низка масштабних міжнародних ініціатив, спрямованих на впровадження цифрових рішень у аграрний сектор. В Австралії також ведеться активна робота в цьому напрямку в межах ініціативи, метою якої є перехід від концепції «точного землеробства» до «прийняття рішень на основі даних» із залученням масштабних інвестицій.

Наукові публікації, присвячені застосуванню IoT у агросекторі, зазвичай зосереджуються на таких аспектах, як обробка великих масивів даних (Big Data), моделювання агропроцесів, використання бездротових сенсорних мереж (WSN), а також створення інформаційних систем управління агропідприємствами.

Водночас, досліджень, які безпосередньо стосуються землеробства, залишається відносно небагато. Це пояснюється низкою характерних викликів, що виникають під час впровадження IoT саме в галузі рослинництва:

- Великі площі полів суттєво ускладнюють проектування топології мережі датчиків, а також потребують ефективних алгоритмів обробки та екстраполяції даних з обмеженого числа стаціонарних точок вимірювання.
- Просторові дані, що мають вирішальне значення через виражену внутрішньопольову варіативність ґрунтових та мікрокліматичних умов, потребують високої точності та детального аналізу.
- Широке використання сенсорів на мобільній техніці (трактори, обприскувачі, комбайни) породжує виклики у створенні стійкої мережевої інфраструктури. Наприклад, необхідно забезпечити надійний зв'язок із хмарними сервісами в умовах руху та різної швидкості техніки, а також сумісність обладнання від різних виробників у реальному часі.
- Різноманітність і великий обсяг даних, які надходять із різною частотою і з різних джерел — стаціонарних датчиків, мобільної техніки, навісного обладнання, супутників, веб-сервісів тощо. Ці джерела генерують просторово-неоднорідну інформацію, яка повинна бути інтелектуально об'єднана в єдину систему.
- Змінність та непередбачуваність умов довкілля — погодні коливання, вологість ґрунту, стресові впливи на рослини — вимагають не лише оперативного збору даних, але й аналізу просторово-часових залежностей, що підвищує складність моделей прийняття рішень.
- Багатоваріантність польових операцій упродовж усього вегетаційного періоду — від підготовки ґрунту та посіву, до внесення добрив, догляду за посівами, моніторингу та збирання врожаю. Усе це створює додаткові труднощі для створення універсальних рішень IoT, підвищує ризики невдач і ускладнює адаптацію систем.

З часом, за оцінками фахівців, технології Інтернету речей (IoT) набуватимуть дедалі більшого значення у виробництві сільськогосподарської продукції. Це зумовлено їхньою здатністю задовольняти нагальні потреби в оперативній сумісності між різними виробниками техніки й обладнання, забезпечувати масштабованість рішень та здійснювати постійний контроль і відстеження подій, попри існуючі труднощі в інтеграції технологій у галузі землеробства.

Різноманітні IoT-технології інтенсивно розвиваються, адаптуючись до широкого кола прикладних задач. Для кращого розуміння усього спектра рішень, які входять до поняття IoT, а також для систематизації відповідних технічних засобів, протоколів та стандартів, в останні роки в науковій та прикладній літературі прийнято описувати архітектуру IoT як трирівневу структуру. Вона включає:

- Рівень пристроїв (рівень збору даних) — охоплює різні сенсори, виконавчі пристрої (актуатори), GPS-модулі, RFID-мітки, контролери, в тому числі встановлені на стаціонарних платформах чи мобільній сільськогосподарській техніці. Саме на цьому рівні відбувається первинний збір інформації про стан ґрунту, кліматичні умови, рівень вологості, кількість добрив тощо.

- Рівень мережі (рівень передачі даних) – забезпечує зв'язок між фізичними пристроями і хмарними або локальними обчислювальними платформами. Тут застосовуються протоколи бездротового зв'язку (наприклад, Wi-Fi, LoRa, Zigbee, NB-IoT, 4G/5G), а також шлюзи, що дозволяють поєднувати локальні сенсорні мережі з Інтернетом.
- Рівень застосувань (рівень обробки і управління) – охоплює програмне забезпечення для аналізу, візуалізації, прийняття рішень, автоматичного керування. На цьому рівні реалізуються інформаційно-керуючі системи: від локальних систем точкового поливу до складних комплексів управління агровиробництвом у режимі реального часу.

У межах досліджень, проведених в аграрних наукових установах, розроблено структурну модель IoT-системи для інформаційного забезпечення «розумного землеробства», що базується саме на цій трирівневій архітектурі. Далі розглянемо особливості кожного з рівнів детальніше.

Рівень пристроїв

Рівень пристроїв включає фізичні об'єкти (так звані «речі»), які здатні до автоматичної ідентифікації, вимірювання або виконання дій, а також до підключення до Інтернету. Сенсорні пристрої автоматично вимірюють та збирають інформацію про один або кілька параметрів і передають ці дані бездротовим каналом у хмарне середовище.

Типове IoT-пристрої складається з трансивера, мікроконтролера, інтерфейсних схем та одного або кількох сенсорів або виконавчих елементів (актуаторів). Датчик вимірює фізичний параметр, наприклад температуру ґрунту, який потім інтерпретується і перетворюється в еквівалентний аналоговий сигнал — напругу або струм. Цей сигнал у схемі інтерфейсу (аналогово-цифровому перетворювачі) переводиться у цифровий формат.

Далі мікроконтролер (іноді у вигляді мікропроцесора або одноплатного комп'ютера) збирає цифрові дані з одного або кількох датчиків через АЦП і передає їх до трансивера — модуля бездротового зв'язку, який відправляє інформацію на міжмережевий інтерфейс (шлюз). У разі граничних (edge) обчислень мікроконтролер або одноплатний комп'ютер може обробляти дані ще до їх надсилання — з метою зменшення обсягів інформації та прискорення її подальшої обробки.

Для туманних (fog) обчислень обробка виконується вже не на самих пристроях, а на рівні локальної мережі — у відповідному вузлі або шлюзі IoT. Якщо використовується виконавчий механізм (актуатор), то сигнал приймається трансивером, обробляється мікроконтролером (перетворюється в аналоговий або цифровий сигнал) і передається до актуатора, який виконує дію відповідно до цього сигналу.

Дані з сенсорів і пристроїв, встановлених на сільськогосподарській техніці, зазвичай збираються через систему локальної мережі контролерів (CAN). В окремих випадках доступ здійснюється через інші порти, наприклад багаторозрядні входи/виходи. Також через CAN можна отримати інформацію

про роботу техніки та оператора, зокрема дані з глобальних навігаційних супутникових систем (наприклад, RTK-GPS), що дозволяє відстежувати рух машин та оптимізувати їхні маршрути.

Очікується, що кількість IoT-пристроїв на аграрних підприємствах у світі суттєво зросте — з 30 мільйонів у 2015 році до 75 мільйонів у 2020 році. Водночас обсяг даних, які генеруються такими системами щодня, також постійно збільшується. Проте значна частина цих даних або не використовується зовсім, або використовується недостатньо. Наприклад, у Данії — країні з високим рівнем впровадження ІКТ у сільське господарство — у 2016 році лише 2–5 % фермерів активно аналізували отримані дані.

Мережевий рівень (рівень мережевої взаємодії).

На мережевому рівні дані спочатку передаються на проміжну платформу, а далі — до Інтернету (хмари), звідки, наприклад, можуть надходити сигнали до виконавчих механізмів (актуаторів). Для зв'язку з проміжною платформою зазвичай використовуються бездротові технології, такі як RFID (радіочастотна ідентифікація), бездротові сенсорні мережі (ZigBee), LoRa (довготривалий зв'язок з великим радіусом дії), а також новітні протоколи на кшталт NFC (технологія ближнього безконтактного зв'язку).

Проміжна платформа, як правило, є шлюзом до Інтернету, що розміщується поруч із підключеними пристроями. В деяких випадках дані передаються спочатку на проміжний сервер, де вони збираються, періодично обробляються та надсилаються кінцевому користувачеві через Інтернет з використанням таких стандартів, як MQTT, HTML або XMPP.

В агросекторі дедалі популярнішими стають інтелектуальні пристрої на базі Android або інших операційних систем, оскільки вони можуть виступати шлюзами для 3G- та 4G-мереж. Такі пристрої також підтримують інші бездротові технології зв'язку — Bluetooth, Wi-Fi, GPRS, NFC — що забезпечує оперативну сумісність із різними типами обладнання. Крім того, ці пристрої можуть мати вбудовані датчики GNSS, камери, зручний графічний інтерфейс користувача (GUI) і здатність до локальної обробки даних або оновлення ПЗ.

Завдяки цим властивостям інтелектуальні пристрої можуть застосовуватись на всіх трьох рівнях IoT: для збору даних на рівні пристроїв, для передавання даних на мережевому рівні, а також для обробки та візуалізації інформації на прикладному рівні.

У сільському господарстві використовуються різноманітні бездротові технології залежно від економічної доцільності, доступності й технічних можливостей. Велике розмаїття стандартів і частотних діапазонів призводить до проблем із сумісністю, що ускладнює впровадження IoT у польових умовах. Наприклад, через великі площі господарств зменшується радіус дії передавачів, а сенсорні вузли потребують частого обслуговування або заміни батарей.

Основу IoT-мереж у сільському господарстві складають бездротові сенсорні мережі (БСС), які формуються з базових пристроїв — сенсорних вузлів, що містять сенсори й актуатори та обмінюються даними у вигляді просторової

мережі. Базові станції БСС виступають шлюзами, які пересилають дані у хмару. Залежно від завдання використовуються різні технології бездротового зв'язку, зокрема ZigBee, LoRa, Bluetooth/BLE, Wi-Fi та SigFox. Кожна з них має свої особливості щодо архітектури вузлів, швидкості передачі, стандартів та енергоспоживання.

Останнє покоління мобільного зв'язку — 5G — відкриває нові можливості завдяки високій швидкості передачі даних, широкому покриттю та мінімальній затримці сигналу. Це дозволяє створювати інфраструктуру IoT навіть у віддалених регіонах, де раніше доступ до Інтернету був обмежений. 5G також сприяє ефективнішій взаємодії між транспортними засобами, наприклад, для ухвалення логістичних рішень у реальному часі. Водночас впровадження 5G ставить нові виклики, зокрема потребу у великій кількості пристроїв, що підтримують новий стандарт, коли Інтернет речей стане типовим рішенням не лише для агросектору, а й у повсякденному житті.

Рівень застосування

Рівень застосування має вирішальне значення в контексті технології IoT, оскільки саме він фактично підвищує цінність вимірюваних і переданих даних через пряме управління пристроями, підтримку процесів прийняття рішень тощо. На цьому рівні виконуються такі важливі сервісні функції, як зберігання і аналіз інформації, доступ до даних через відповідний інтерфейс прикладного програмування (API), а також можливе програмне забезпечення з користувацьким інтерфейсом.

Рівень застосування також може включати проміжні платформи, які беруть участь в обробці різномірних хмарних даних, покращуючи здатність до взаємодії.

Збереження інформації можливе у хмарі, тобто на кількох серверах, або на локальному рівні, коли вона зберігається у різних базах даних — залежно від типу застосування та архітектури. Аналіз даних може виконуватися із застосуванням хмарних обчислень, коли відбувається віддалене керування ресурсами комп'ютера, або шляхом розподілених обчислень, наприклад, на рівнях граничних (edge) і туманних (fog) обчислень.

Перевага хмарних обчислень полягає в тому, що вони забезпечують високоякісні функціональні можливості, які дозволяють незалежно запускати кілька додатків, ніби вони ізольовані, навіть якщо розміщені на одній платформі, наприклад у дата-центрах. Це особливо важливо при роботі з великими обсягами даних.

Для вирішення різних проблем, що виникають при застосуванні IoT, особливо пов'язаних з оперативною взаємодією, зростає інтерес до використання проміжних платформ. На їх основі здійснюються спроби спростити складні комунікації через хмару, які з'являються через використання різномірних пристроїв, мереж і протоколів, за допомогою таких інструментів, як стандартизовані API та протоколи.

Прикладами таких платформ є HYDRA, UBIWARE, UBIROAD, UBIDOTS, SMEPP, SIXTH, ThinkSpeak, SensorCloud, Amazon IoT та IBM IoT, орієнтовані на

контекстно-залежний функціонал; а також Aneka, WSO2, PubNub, SmartFarmNet і FIWARE з більш широким сервісно-орієнтованим підходом.

Хоча на ринку існує багато таких рішень для IoT, інтелектуальні проміжні рішення, спеціально адаптовані для сільського господарства, поки що реалізовані не повністю. Проте, наприклад, FIWARE і SmartFarmNet вже впроваджені у застосунках для точного та інтелектуального землеробства.

Для передачі інформації між платформами і IoT-пристроями, а також забезпечення сумісності, велике значення мають API-інтерфейси. Вони повинні адаптуватися до активного розвитку або нових стандартів, щоб гарантувати тривалість служби та функціональність системи. Відсутність оновлень API може обмежувати їх можливості.

Саме через API-інтерфейси дані стають доступними для таких IoT-застосунків, як моніторинг, управління подіями, прогнозування або оптимізація сільськогосподарської діяльності.

Досвід застосування Інтернету речей (IoT) та інформаційних систем управління (ІСУ) у землеробстві

Застосування технологій IoT у землеробстві відкриває широкі можливості для таких завдань, як моніторинг, документування, прогнозування та управління. Моніторинг — це своєчасне вимірювання різноманітних параметрів і, зазвичай, основна початкова точка для виконання інших завдань. Документування включає збереження експериментальних даних для подальшого використання, наприклад, у процесах управління господарством. Прогнозування базується на різних джерелах даних з застосуванням аналітичних методів і математичних моделей для передбачення конкретних подій. Управління — це результат активного моніторингу, коли оброблену інформацію застосовують для керування актуаторами через автоматичне включення.

Для цього використовують інформаційні системи управління (ІСУ) у процесах формування та підтримки прийняття рішень, а також удосконалення технологічних операцій і виробничих процесів, включаючи аналіз позиціонування транспортних засобів, оптимізацію виробництва і логістику.

У технологіях IoT вимірювані показники автоматично коригуються, наприклад, до попередньо визначених порогових значень. Прогнозування також відіграє важливу роль у процесі управління. Наприклад, в інтелектуальних іригаційних системах полив може здійснюватися до виявлення пошкоджених посухою ділянок рослинного покриву. Як приклад можна використовувати оперативні вимірювання вологості та температури ґрунту разом із метеоданими для управління повністю автономною схемою зрошення.

Датчики, встановлені на рухомих об'єктах, таких як трактори і робочі органи, можуть використовуватися для контролю, наприклад, диференційованого внесення добрив, у прецизійних технологіях боротьби з бур'янами або точного висіву. Контроль має вирішальне значення в інтелектуальному землеробстві, оскільки дозволяє автоматизувати системи, особливо роботу автономних транспортних засобів, де точні дії керованих

об'єктів та інформаційно-вимірювальні комплекси на основі датчиків відіграють важливу роль, наприклад, у виявленні перешкод на полі для автономних транспортних засобів.

ІСУ використовують інформаційно-вимірювальні комплекси для збору, збереження та подальшої обробки інформації, пов'язаної із сільськогосподарськими полями, а також для прийняття рішень щодо управління виробництвом. Це полегшує виконання завдань, документування господарської діяльності, її оцінку та оптимізацію, а також стратегічне, тактичне і оперативне планування. Таким чином, ІСУ являють собою системи, які можуть об'єднувати всі актуальні застосування і є життєво важливими елементами управління «розумним» господарством.

Однак впровадження ІСУ, орієнтованих на новітні IoT-технології, відбувається повільно. Більшість нинішніх архітектур ІСУ були розроблені у 1980-х роках, що може пояснити, чому сьогодні структура і архітектура більшості ІСУ не підходять для розподілених і сервіс-орієнтованих систем підтримки прийняття рішень, необхідних для точного і розумного землеробства. Наприклад, 75 % ІСУ досі базуються на ПК, а функціональні можливості для оцінки сучасних агротехнологій та контролю якості продукції ще відсутні або знаходяться на початкових стадіях розробки.

Існуючі системи підтримки прийняття рішень (СППР) важливі для роботи з великими даними та допомоги керівникам господарств у прийнятті рішень в інтелектуальному землеробстві. Розроблена в Агрофізичному інституті ІСУ дозволяє керівникам господарств чи агрономам приймати обґрунтовані рішення на різних часових рівнях, використовуючи експертні знання та власний досвід.

Теоретично, одного датчика недостатньо для вимірювання кількох параметрів ґрунту в реальному часі. Для оперативного визначення просторової неоднорідності фізичних і хімічних властивостей ґрунту на різній глибині (поверхневий, орний і підорний шари) на різних масштабах поля зазвичай застосовують мультисенсорні мобільні комплекси з різними датчиками, адаптованими до вимірювань у русі. Такі системи використовують різні типи датчиків: електропровідності, оптичні, датчики горизонтальної penetraції тощо.

Технології IoT відкривають можливості для створення базової інфраструктури, яка забезпечує підключення різноманітних інтелектуальних об'єктів — датчиків у складі бездротових сенсорних мереж, мобільних систем, транспортних засобів, локального або віддаленого збору даних, хмарного аналізу інформації та прийняття рішень, взаємодії користувачів і автоматизації технологічних операцій.

Розробка швидких, надійних, економічних і екологічно безпечних методів розпізнавання неоднорідності ґрунту є першочерговим завданням для впровадження технологій розумного землеробства. Одним із перспективних підходів до суцільної (площинної) оцінки стану й варіабельності властивостей ґрунту є використання комплексу інформаційно-вимірювальних систем і методів дистанційного зондування.

Прототип комплексної інформаційно-вимірювальної системи для моніторингу просторової неоднорідності основних характеристик ґрунту в режимі реального часу включає:

- сенсорні вузли бездротової сенсорної мережі (БСС), що складаються з датчиків температури і вологості, мікропроцесорного блоку, трансивера і антени;
- автоматичну семиканальну метеорологічну станцію з інтернет-каналом передачі даних на сервер, що слугує базовою для сенсорних вузлів БСС;
- сервер для збору й первинної обробки даних, що надходять із базової станції;
- прилади для маршрутного обстеження дослідних полів;
- безпілотний літальний апарат для отримання аерофотознімків.

Апробація прототипу на дослідних полях дозволила сформувати базу різнорідних комплексних просторово-атрибутивних даних, що суттєво покращило інформаційне забезпечення експериментів із внесення добрив.

Для оперативного збору даних датчики мають розміщуватися на полі протягом усього вегетаційного періоду, функціонуючи автономно в складі сенсорних вузлів, об'єднаних у бездротову мережу. Імовірність пошкодження обладнання сільськогосподарською технікою під час технологічних операцій стала приводом для ідеї розміщення сенсорних вузлів під землею у вигляді бездротової підземної сенсорної мережі (БПСС).

БПСС — перспективний напрям досліджень через унікальні умови підземного середовища. Складність передачі сигналу під землею вимагає розв'язання практичних задач, таких як розмір кожного пристрою, розташованого під землею, і здатність передавати показники датчиків до головного вузла прийому в реальному часі.

На основі оцінки технічних можливостей сучасних БСС у сільському господарстві, а також переваг і недоліків різних датчиків температурно-вологісного режиму в польових умовах із урахуванням впливу рослинного покриву, кліматичних умов, сільськогосподарської техніки й інших факторів сформовано основні вимоги до сенсорного вузла БПСС:

- надійність конструкції;
- повністю підземне розміщення;
- можливість вимірювань на різних глибинах;
- оперативність отримання даних.

На основі цих вимог створено прототип сенсорного вузла БПСС, який включає свердловинний влагомір для оперативного моніторингу вологості та температури ґрунту на сільськогосподарському полі в реальному часі. Прототип забезпечує послідовне розв'язання задач вимірювання і передачі даних із застосуванням висувної антени (рис. 6.3.1).

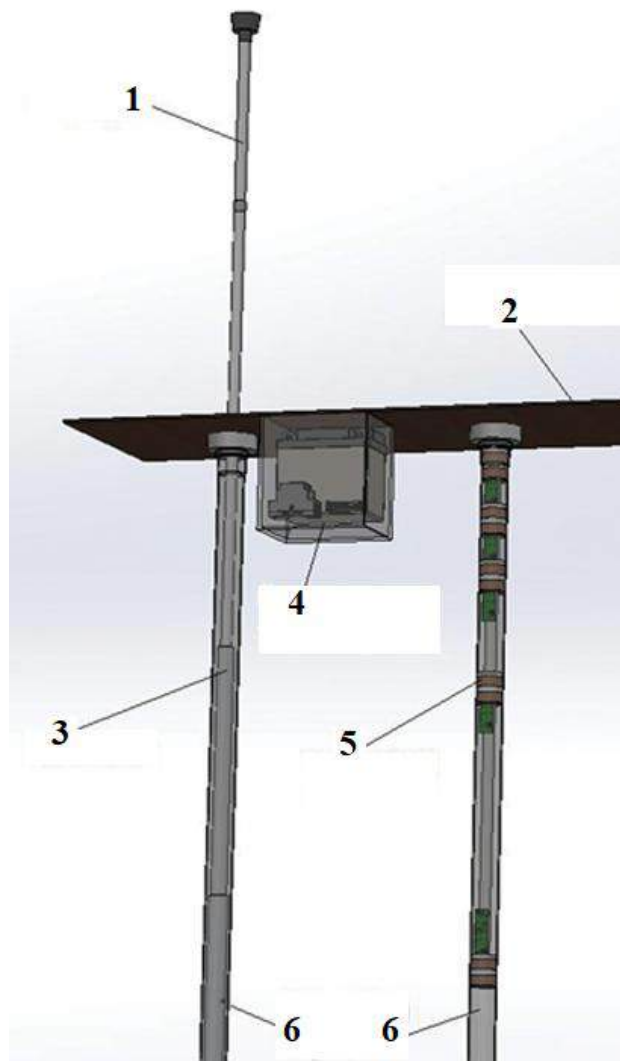


Рис. 6.3.1 Схема розташування сенсорного вузла під поверхнею ґрунту, де: 1 – антена, 2 – поверхня ґрунту, 3 – актуатор, 4 – блок електроніки, 5 – вологомір ґрунту, 6 – обсадна труба

Зв'язок між сенсорними вузлами та координатором БПСС, розташованим на відстані від поля, здійснюється також за допомогою висувної антени без ретрансляторів по протоколу ZigBee. Координатор мережі надсилає отримані дані на інтернет-сервер через 4G-модем.

Доступ до даних, які збираються за допомогою датчиків у режимі реального часу, здійснюється через централізовану архітектуру передачі даних бездротової сенсорної мережі (БСС) (**рис. 6.3.2**). Основна структура мережі включає п'ять елементів: 1. сенсорні вузли (з датчиками), 2. маршрутизатори (роутери), 3. координатор (або шлюз) для збору та передачі даних, 4. реєстратор даних або персональний комп'ютер, 5. інтернет-сервер із веб-інтерфейсом (**рис. 6.3.2**).

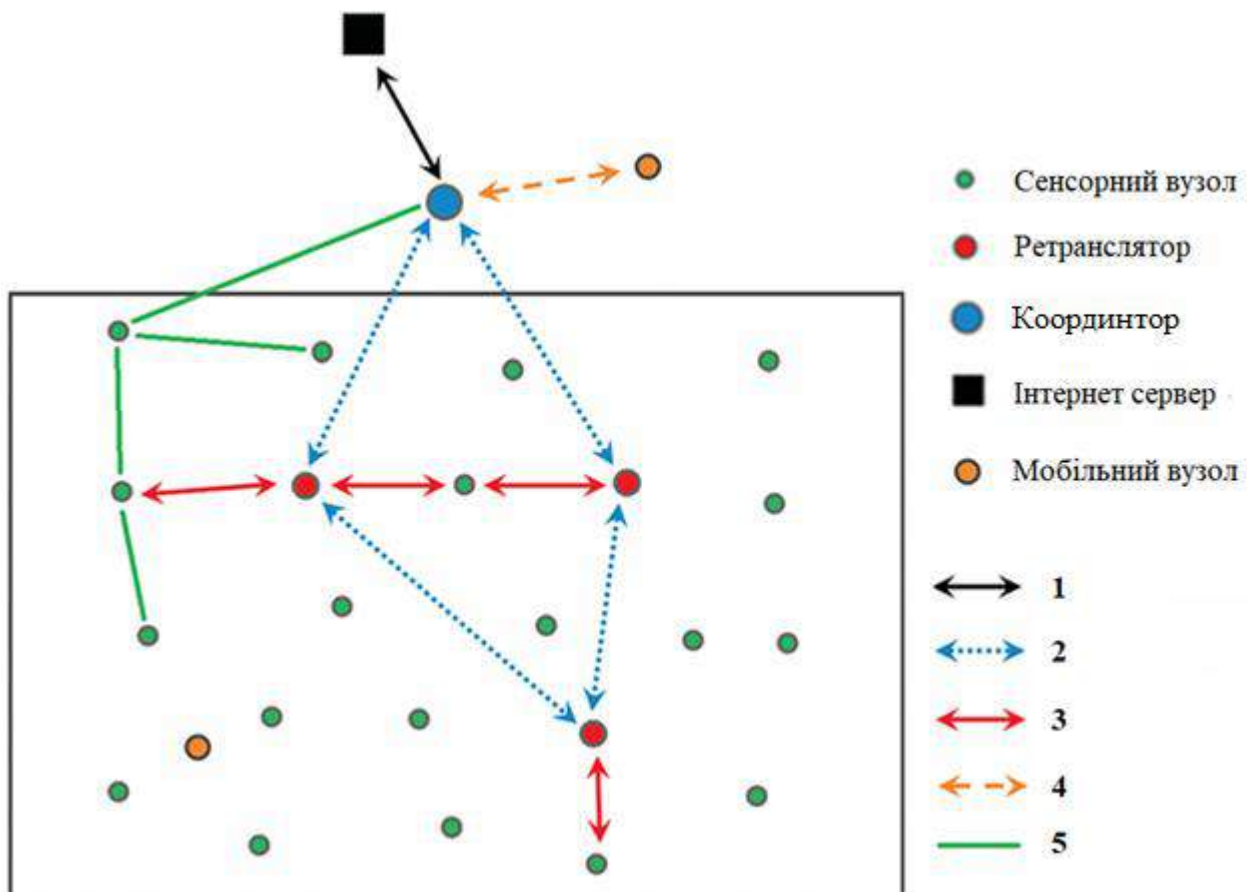


Рис. 6.3.2 Архітектура передачі даних в сенсорній мережі.

Де передача даних: 1 – через інтернет, 2 – між ретранслятором і координатором, 3 – між сенсорними вузлами і ретрансляторами, 4 – з мобільного сенсорного вузла, 5 – між сенсорними вузлами

У підземній топології всі датчикові блоки розміщені нижче поверхні ґрунту, крім кінцевого вузла (координатора). У гібридній топології розглядається поєднання підземних, надземних та мобільних пристроїв. Гібридна топологія, яка складається з підземних датчиків і надземних маршрутизаторів, є більш доцільною для передачі даних на великі відстані.

Оскільки сенсорні вузли в БСС зазвичай живляться від батарей, одним із важливих обмежень є їх енергоспоживання.

Кожен сенсорний вузол оснащений електронним блоком, який містить акумулятор, системи управління живленням, стабілізації напруги та контролю розряду батареї. Після виходу з режиму очікування головна плата керування вузла за допомогою реле подає живлення на вологомір і актуатор, послідовно опитує мікроконтролери вологоміра, перетворює отримані дані у значення вологості та температури і за допомогою маршрутизатора ZigBee передає пакети даних координатору БПСС.

Первинний вимірювальний перетворювач (ППП) п'ятиканального свердловинного діелектричного вологоміра для використання у складі вузла БПСС (рис. 6.3.3) має достатньо точну зону охоплення досліджуваного матеріалу електромагнітним полем датчика. Ємнісні циліндричні датчики з коаксіальними кільцевими електродами розміщені на одній осі стержня

вологоміра на глибинах 10, 20, 30, 50 і 100 см від поверхні ґрунту. Діаметр датчиків для щільного прилягання до внутрішніх стінок свердловини становить 46 мм.

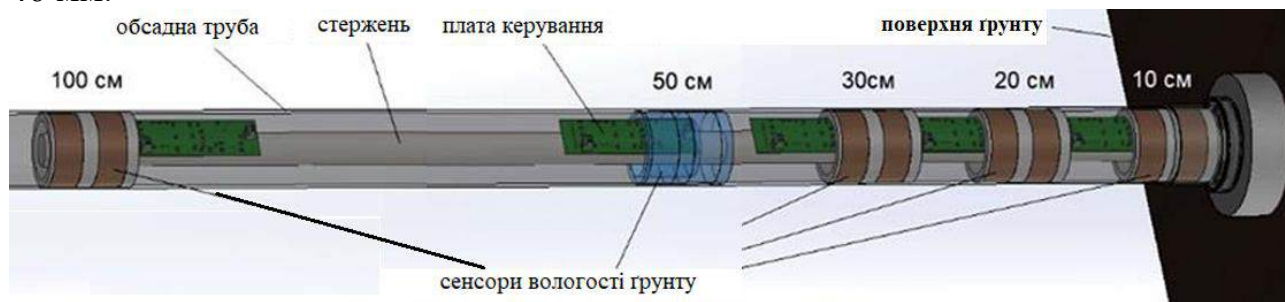


Рис. 6.3.3 П'ятиканальний свердловинний вологомір

Корпус вологоміра виготовлений із конструкційних полімерів, які оптимально поєднують механічну міцність, твердість, жорсткість, властивості демпфування та зносостійкість, а також мають хороші електричні ізоляційні властивості та хімічну стійкість.

Запропонована архітектура IoT для інформаційного забезпечення розумного землеробства забезпечує інтелектуальний, автоматизований збір і комплексування гетерогенних даних, що надходять із датчиків та різних систем, а також високий рівень інтерпретації та масштабованості процесу оцінки агрофізичних властивостей сільськогосподарських земель.

Розроблений прототип інформаційно-вимірювальної системи з використанням бездротової сенсорної мережі дозволяє здійснювати моніторинг просторової неоднорідності основних характеристик ґрунтів у режимі реального часу, передавати дані між сенсорними вузлами за допомогою висувної антени по протоколу ZigBee та відправляти дані на інтернет-сервер через 4G-модем.

Отже, незважаючи на існуючі бар'єри впровадження технологій IoT (нерівномірна якість мобільного зв'язку у сільській місцевості, дефіцит кадрів, відсутність єдиної програмної платформи для обміну інформацією та обмежені інвестиції у цифрові технології в багатьох господарствах), у найближчі роки впровадження цифрових технологій у сільськогосподарському секторі (за даними аналітиків є неминучим).

Перспективні напрямки включають диференційований полив, посів, внесення добрив, прогнозування врожайності та дистанційне зондування. Для отримання корисної інформації з величезних обсягів даних, зібраних пристроями IoT, необхідний інтелектуальний аналіз у межах M2M-платформ.

6.4 АРХІТЕКТУРА ІНФОРМАЦІЙНОЇ СИСТЕМИ ТА ПІДПРИЄМСТВА З РОСЛИННИЦТВА НА ОСНОВІ ТЕХНОЛОГІЙ ІНТЕРНЕТУ РЕЧЕЙ (IOT)

Сьогодні агропромисловий комплекс, який донедавна мав суттєве відставання в сфері інформатизації, перетворився на одного з основних споживачів цифрових рішень. Зокрема, розвиток цифрових технологій у

сільському господарстві демонструє один із найвищих темпів серед галузей економіки.

З точки зору системного підходу сучасне сільськогосподарське підприємство розглядається як складна відкрита система. У ній актуалізується багатофакторне завдання ефективного управління виробничими ресурсами для досягнення високої врожайності. Однією з головних прихованих проблем є низький рівень цифровізації. Водночас на практиці вже чітко виявлено переваги впровадження інформаційно-комунікаційних технологій (ІКТ) у сільське господарство. Серед них:

- скорочення часу виконання агротехнічних операцій;
- підвищення ефективності підтримки управлінських рішень завдяки автоматизації збору, обробки, передачі й аналітики даних;
- зменшення витрат за рахунок точнішого контролю за виробничими процесами та раціонального використання ресурсів.

Поступово формується усвідомлення того, що лише узгодження вимог агробізнесу з можливостями сучасних цифрових рішень дозволяє досягти ефективного управління підприємством.

Водночас багато аграрних менеджерів обережно ставляться до цифрових інновацій. Вони потребують часу, щоб розібратись у функціонуванні технологій, зрозуміти, яка інформація допоможе в ухваленні рішень, і як об'єднання різнорідних процесів в єдине цифрове середовище дозволить збалансувати ІТ-ефективність та інноваційність.

Для візуалізації та осмислення діяльності аграрного підприємства в цифровому середовищі необхідно представляти його архітектуру у вигляді формалізованої багаторівневої моделі, яка відображає діяльність підприємства як цілісну систему з достатнім рівнем деталізації.

При проєктуванні складних програмно-керованих систем важливо мати архітектурне уявлення про систему, яке дає змогу аналізувати її як єдине ціле, а також допомагає користувачам і розробникам краще розуміти взаємозв'язки між програмним забезпеченням і бізнес-процесами.

Архітектура програмного забезпечення описує високорівневу структуру системи — абстрактну модель взаємодії її компонентів та зв'язків, які підтримують виконання поставлених завдань.

Загалом, архітектура систем на основі Інтернету речей (IoT) не повинна принципово відрізнятися від традиційних ІТ-архітектур, але вона обов'язково має включати об'єкти, що забезпечують можливість віддаленої ідентифікації, моніторингу та керування за допомогою сенсорів і виконавчих механізмів.

На сьогодні вже розроблено референтні моделі, які описують високорівневі можливості інфраструктури Інтернету речей, зокрема моделі семантичної взаємодії IoT-систем, стандартизовані підходи на основі архітектури OPC. Проте такі моделі здебільшого орієнтовані на технічну сторону й не охоплюють повністю бізнес-аспекти або процес моделювання інформації — від бізнес-моделі до реалізації на рівні конкретних функціональних компонентів.

Метою цієї роботи є розроблення архітектури інформаційної системи підприємства з рослинництва, побудованої з урахуванням концепцій Інтернету речей, яка комплексно відображає як бізнес-архітектуру, так і детальні моделі управління об'єктами через сенсорну мережу та виконавчі пристрої.

У стандартах побудови корпоративних архітектур, зокрема згідно з ISO 15704, визначаються типові процеси, необхідні для опису, планування, управління, супроводу та виведення з експлуатації будь-якої складової підприємства. Згідно з цим стандартом, існує два типи архітектур:

- архітектура системи, що описує структуру прикладної інформаційної системи;
- архітектура підприємства, що охоплює інтеграцію всіх підсистем та процесів підприємства в цілому.

Архітектура підприємства — це системна модель, яка дозволяє об'єднати розрізнені процеси в інтегрованому цифровому середовищі, забезпечуючи цілісне бачення діяльності господарства та можливість управління складністю в умовах змін. Вона дозволяє ухвалювати стратегічні рішення щодо розвитку ІТ-інфраструктури, реалізації змін, мінімізації ризиків і досягнення балансу між ефективністю ІТ-рішень і бізнес-інноваціями.

Архітектура дозволяє формалізувати вимоги бізнесу до інформаційних технологій, показує, яким чином вирішуються конкретні задачі та як ці вимоги реалізуються в рамках цифрових систем — що й становить головний інтерес даного дослідження.

Матеріали та методи дослідження

Архітектура підприємства, подібно до архітектури інформаційної системи, є складною системою, що складається з підсистем, які взаємодіють між собою. Тому під час дослідження було застосовано методи системного аналізу та системної інженерії, які дозволяють розглядати архітектуру як сукупність взаємопов'язаних компонентів із урахуванням їх функціональних взаємодій та зв'язків із зовнішнім середовищем.

Обґрунтування підходу базується на міжнародних стандартах:

- ISO/IEC 15288:2008 — процеси життєвого циклу систем,
- ISO 15704:2000 — вимоги до архітектур підприємств,
- ISO 14258 — орієнтири щодо гнучкості та інтеграції,
- ANSI/IEEE Std 1471-2000 — стандарт опису архітектури систем.

Також використовувалися референтні моделі, зокрема:

- модель високорівневого представлення інфраструктури Інтернету речей (IoT),
- модель семантичної взаємодії IoT-систем,
- уніфікована архітектура OPC,
- інші загальноприйняті концептуальні моделі для опису ІТ-архітектур.

Методологічна база дослідження включала:

- функціональний та логічний аналіз архітектурних рішень,
- підходи до управління організаційними структурами через архітектуру підприємства,

- вивчення, аналіз і узагальнення вітчизняного та зарубіжного досвіду побудови інформаційних систем і архітектур підприємств, а також огляд публікацій провідних світових експертів у цій галузі.

Для формалізації структури інформаційної системи, опису її топології та маршрутів передачі даних між апаратними вузлами було використано уніфіковану мову моделювання UML (Unified Modeling Language).

Розроблення архітектури підприємства здійснювалося з використанням:

- платформи TOGAF (The Open Group Architecture Framework),
- мови ArchiMate, що дає змогу формалізовано описати взаємозв'язки між бізнес-процесами, застосунками та інфраструктурою.

Результати та обговорення

Згідно з методологією TOGAF (The Open Group Architecture Framework), архітектура підприємства зазвичай подається у вигляді інтегрованої діаграми, яка включає кілька взаємопов'язаних рівнів. У рамках цього дослідження була розроблена модель архітектури підприємства з рослинництва з використанням технологій Інтернету речей (IoT), що подана на **рис. 6.4.1**.

Модель архітектури охоплює три основні рівні:

- Бізнес-рівень описує основні бізнес-елементи підприємства та взаємозв'язки між ними в межах загальної бізнес-архітектури.
- Рівень застосунків підтримує бізнес-рівень, визначаючи архітектуру програмного забезпечення та логіку взаємодії між окремими модулями.
- Інфраструктурний рівень відображає компоненти ІТ-інфраструктури підприємства та зв'язки між програмними засобами й апаратним забезпеченням.

Для наповнення бізнес-рівня на рівні бізнес-функцій і процесів було проведено ґрунтовне вивчення діяльності підприємств рослинницького профілю. Здійснено формалізацію та аналіз основних бізнес-процесів, що відбуваються в аграрному виробництві.

У результаті дослідження були виділені ключові функціональні блоки:

- управління цифровими сервісами підприємства,
- проведення маркетингових досліджень,
- планування та проектні роботи,
- виробництво продукції та послуг,
- зберігання і збут продукції,
- взаємодія з клієнтами.

Запропонована архітектура дає змогу розглядати підприємство як єдину цілісну систему, відслідковувати, як стратегічні ініціативи впливають на функціонування сервісів і бізнес-процесів, а також оцінювати залежність цих процесів від інформаційних систем.

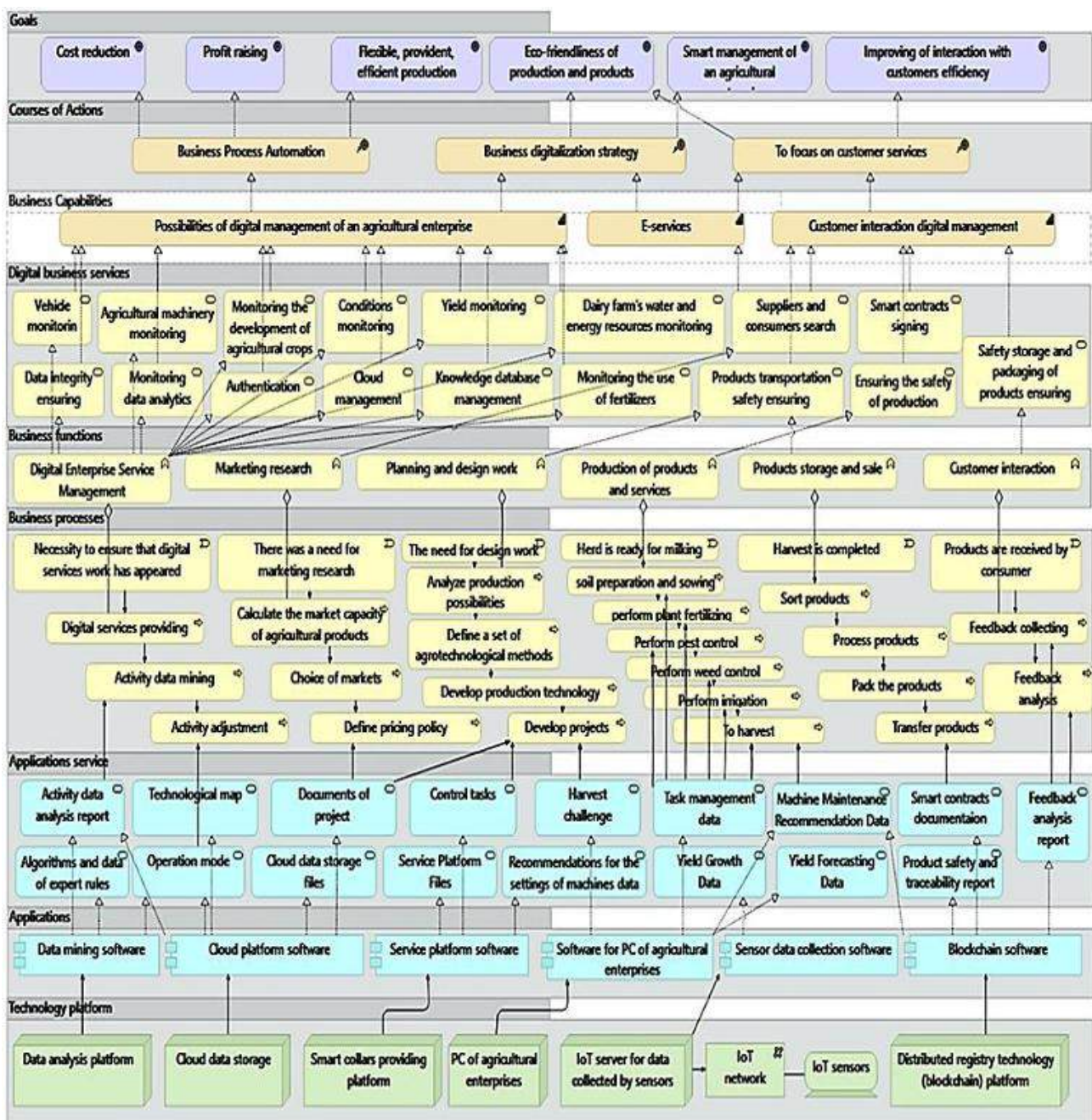


Рис. 6.4.1 Архітектура сільськогосподарського рослинництва з використанням цифрових технологій

Ця модель сприяє узгодженню всіх об'єктів цифрової екосистеми підприємства, забезпечує єдність ІТ-інфраструктури та бізнес-цілей, а також надає основу для збору, узгодження, аналітики та використання достовірних даних для підтримки управлінських рішень.

Інформаційна архітектура моделі базується на технологіях Інтернету речей та розподілених реєстрів (зокрема, блокчейн). Такі рішення дозволяють реалізувати цифрові сервіси моніторингу, безпеки, простежуваності та аналітики.

Використання блокчейн-технологій дозволяє суттєво знизити витрати на супровід ІТ-інфраструктури та зменшити ризики, пов'язані з безпекою даних. Блокчейн підвищує ефективність управлінських і виробничих процесів, оскільки

замінює складні моделі погодження даних, що дає змогу значно прискорити обробку інформації та реалізацію ключових операцій.

Попри очевидні переваги архітектурного підходу для моделювання діяльності агропідприємств, слід зауважити, що для підприємств, які активно використовують інформаційні та програмні рішення, залишається складним завданням детально відобразити механізми сприйняття та управління об'єктами за допомогою технологій Інтернету речей на різних технічних рівнях — від фізичних пристроїв до прикладних сервісів.

У межах проведеного дослідження ставилася мета розробити архітектуру інформаційної системи для підприємства з рослинництва, яка б не лише охоплювала бізнес-архітектуру, а й відображала детальні аспекти реалізації управлінських функцій через сенсори та виконавчі пристрої в рамках IoT-технологій.

Використання стандарту ANSI/IEEE Std 1471-2000 надало змогу розглядати архітектуру системи з позицій різних зацікавлених сторін, дозволяючи формувати кілька архітектурних подань залежно від цілей аналізу. Стандарт не встановлює жорстко структуру або перелік поглядів, проте передбачає варіативність їх визначення в залежності від типу системи. У цьому контексті особливу цінність становить архітектура програмних IoT-систем, яка дозволяє отримати уявлення про технічну організацію системи з урахуванням особливостей функціонування IoT-рішень на кожному з рівнів — від пристроїв до прикладного рівня.

Для представлення архітектури програмних систем Інтернету речей було використано референтну модель ITU-T Y.2060, що забезпечує структуроване відображення функцій на різних технічних рівнях. Архітектура інформаційної системи підприємства формувалась як багаторівнева структура, де кожен рівень об'єднує функціональні модулі з єдиною логікою сервісів (рис. 6.4.2).

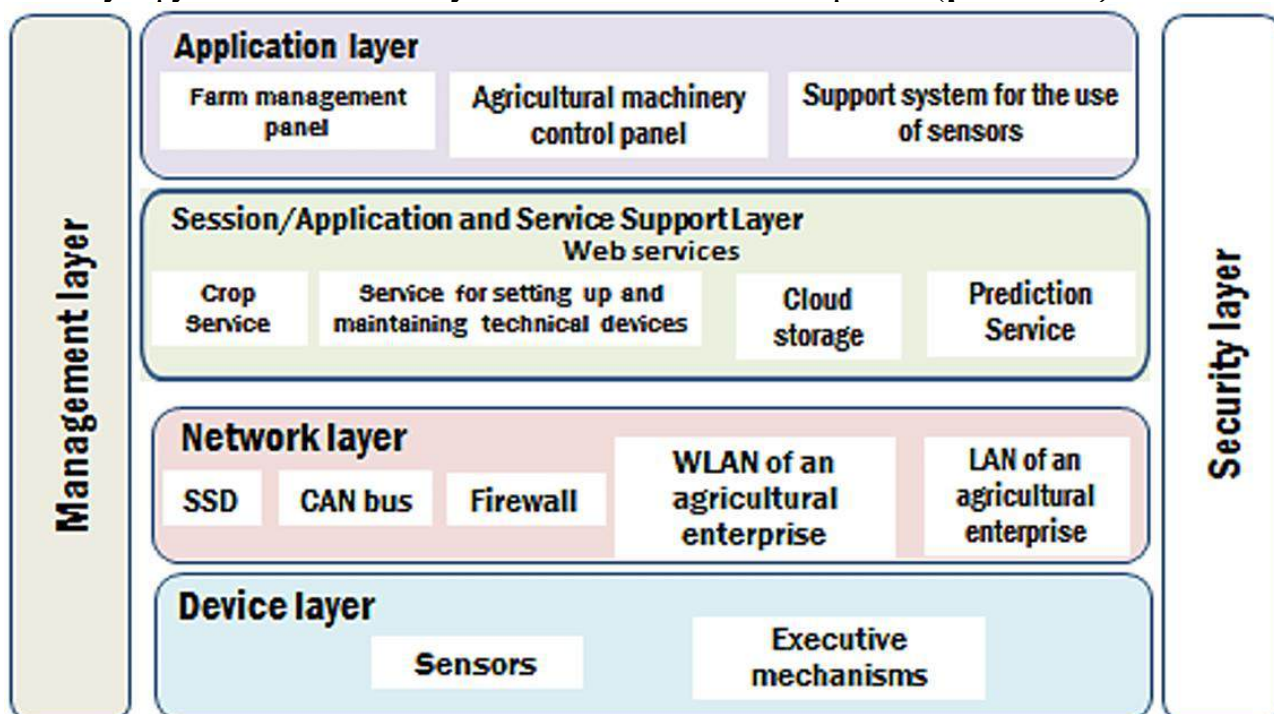


Рис. 6.4.2 Еталонна архітектура інтернету речей

Серед ключових архітектурних рівнів моделі виокремлено рівень пристроїв, мережевий, сеансовий, прикладний, бізнес-рівень, рівень управління та рівень безпеки. Фізичний (або рівень пристроїв) об'єднує компоненти, що виконують функції збору інформації за допомогою сенсорів та виконання команд через виконавчі механізми. Специфікою сенсорів, які застосовуються в агровиробництві, є їх робота в незахищеному середовищі — на відкритій місцевості, при впливі дощу, вітру, температурних коливань, а також у віддалених регіонах, де відсутня інфраструктура або спостерігається слабе покриття. У зв'язку з цим, до таких сенсорів висуваються високі вимоги щодо стійкості до погодних умов, енергоефективності та забезпечення стабільного підключення до мережі Інтернет.

Виконавчі механізми у рішеннях на основі Інтернету речей забезпечують активацію двигунів, селсинів, а також регулювання подачі води, освітлення та температури. Основне завдання цього рівня — отримання інформації з навколишнього середовища та передача її на наступні рівні системи.

Мережева підсистема виступає інтерфейсом між рівнем пристроїв та рівнем прикладного програмного забезпечення і сервісної підтримки. У пристроях IoT мережевий рівень реалізується за допомогою різноманітних технологій бездротового зв'язку, таких як 4G, Wi-Fi, LPWAN, LoRa, RFID та інших. Оскільки в сільській місцевості дротові мережі не здатні забезпечити повне покриття, а стабільність інтернет-з'єднання часто залишає бажати кращого, доцільно використовувати технології передавання даних радіосигналами без фізичного підключення. Зокрема, бездротові локальні мережі (WLAN) забезпечують прийом стабільного сигналу навіть у русі, що стає можливим завдяки наявності відповідних модулів у смартфонах та комп'ютерах користувачів.

Для організації зв'язку між сенсорами, виконавчими пристроями та інтелектуальними системами введення/виведення застосовується шина CAN (Control Area Network). Цей підхід базується на протоколі, що забезпечує надійні, недорогі канали зв'язку в розподілених системах керування. Особливістю CAN є підтримка кількох головних пристроїв на одній шині, що дозволяє передавати дані в режимі реального часу з високою точністю, забезпечуючи при цьому корекцію помилок і стійкість до завад.

Прикладний рівень — це те, з чим взаємодіє кінцевий користувач. Цей рівень обробляє дані, отримані з нижчих рівнів, і керує виконанням прикладних процесів. Він також відповідає за надання сервісів, які можуть варіюватися залежно від призначення конкретного застосунку. У сільськогосподарському підприємстві цей рівень може бути представлений у вигляді панелей керування, інтерфейсів для транспортних засобів чи сільгосптехніки.

Бізнес-рівень визначає логіку доменної області підприємства, пов'язану з пошуком, обробкою, перетворенням і управлінням даними. Він формалізує застосування бізнес-правил, політики діяльності, гарантує цілісність і надійність інформації. На цьому рівні формується розуміння того, як використання IoT-рішень сприяє досягненню стратегічних цілей агропідприємства. Бізнес-рівень

керує всією системою, включаючи прикладні сервіси, бізнес-моделі, механізми отримання прибутку, а також політики збереження конфіденційності користувачів.

Для глибшого розуміння архітектури доцільно аналізувати її на прикладах впровадження IoT-технологій у конкретні процеси. Одним із таких прикладів є використання технологій Інтернету речей для оцінки якості зерна у бункері комбайна. Зокрема, компанія John Deere розробила серію комбайнів X Series, які оснащено запатентованою технологією Active Vision, що дозволяє здійснювати візуальний контроль за станом зерна в бункері, автоматично визначати його якість і, відповідно до результату, викликати транспортний засіб для доставки зерна до елеватора або складу господарства.

Для моделювання бізнес-рівня доцільно застосовувати підхід, запропонований у міжнародному стандарті ANSI/ISA-95, що визначає архітектуру взаємодії між виробничими та управлінськими системами. Цей стандарт є універсальним і може бути адаптований до агровиробництва.

Модель ISA-95 передбачає п'ятирівневу структуру, яка включає як вертикальні, так і горизонтальні взаємозв'язки між виробничими та бізнес-процесами. Нульовий рівень описує фізичні процеси, перший — дії, пов'язані з безпосереднім сприйняттям і керуванням цими процесами. Другий рівень охоплює операції моніторингу й автоматичного керування. Третій рівень включає виконання виробничих завдань, а четвертий описує бізнес-діяльність, пов'язану з плануванням виробництва, використанням матеріалів, логістикою та управлінням запасами.

Таким чином, використовуючи структуру стандарту ANSI/ISA-95, можна відобразити бізнес-рівень у вигляді чотирьох взаємопов'язаних рівнів бізнес-процесів. Це дозволяє структурувати діяльність підприємства в межах ієрархії управління, показати основні об'єкти, а також простежити рух матеріальних потоків — від початкової сировини до готової продукції (рис. 6.4.3).

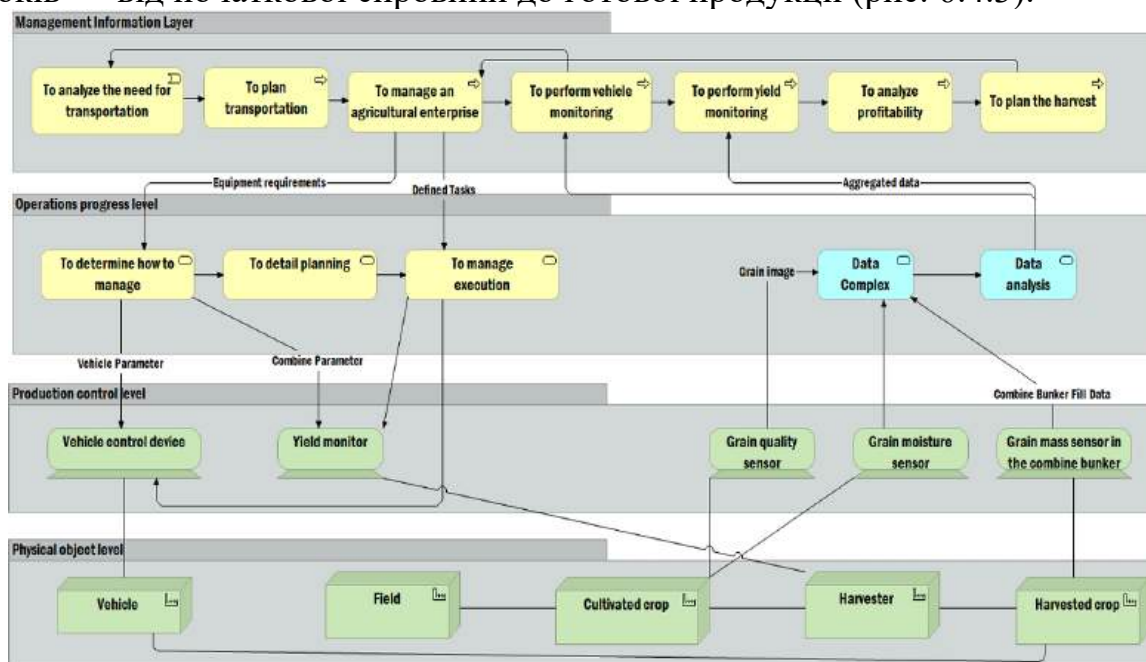


Рис. 6.4.3 Модель бізнес-шару архітектури

Розглядаючи модель бізнес-рівня знизу вгору, на рівні фізичних об'єктів представлені поле з зерновими культурами, комбайн, зібраний урожай і транспортний засіб, який, залежно від оцінки якості, доставляє зерно до складу або елеватора. На рівні керування виробництвом розміщено сенсори вологості, якості та маси зерна, монітор врожайності та контролер транспортного засобу. На рівні виконання операцій знаходяться процеси, що реалізують поставлені задачі, їх формулювання та реалізацію на підставі управлінських даних. Найвищий рівень — інформаційно-управлінський — відображає стратегічні довготривалі управлінські процеси, характерні для функціонування всього аграрного підприємства, зокрема планування виробництва, контроль за технікою та аналіз продуктивності.

Складні інформаційні системи, що інтегровані з Інтернетом, можуть використовувати різні технології доступу до баз даних і функціонувати на різноманітному апаратному забезпеченні. Для розуміння загальної конфігурації та топології розподіленої інформаційної системи, а також для виявлення «вузьких» місць і побудови ефективної топології, яка забезпечуватиме необхідну продуктивність, доцільно застосовувати графічне відображення розподілу компонентів системи за фізичними вузлами та демонстрацію фізичних зв'язків між ними.

Рішення цього завдання забезпечується за допомогою діаграм розгортання (deployment diagrams), які є традиційною формою представлення архітектури фізичного розміщення програмного забезпечення. Такі діаграми відображають фізичну конфігурацію системи: визначають, на якому саме обладнанні розгорнуті ті чи інші програмні компоненти, їхню прив'язку до конкретних хостів, типи пристроїв і середовищу, в якій працює система.

Основними елементами діаграми розгортання є вузли (nodes), компоненти та зв'язки між ними. Вузол означає фізично існуючий елемент системи, наприклад сенсор, обчислювальний пристрій, цифрову камеру. Лінії між вузлами вказують на фізичні канали передачі інформації — такі як супутникові з'єднання, волоконно-оптичні лінії або інші бездротові канали зв'язку. У діаграмі ці зв'язки зображаються як прості лінії без стрілок, що означає двосторонній характер взаємодії. Таким чином, відображається необхідність у створенні каналу обміну інформацією між відповідними фізичними вузлами системи.

Хоча діаграма розгортання не передбачає детального опису апаратної частини інтегральних компонентів, вона дозволяє моделювати апаратні рішення на середньому та високому рівні абстракції, достатньому для проєктування і впровадження IoT-систем у реальних умовах.

У межах цього дослідження розроблено діаграму розгортання, яка акцентує увагу на прикладі функціонування комбайна з сенсорами в зерновому бункері для оцінювання якості зерна та вирішення задачі його подальшого транспортування. В діаграмі (рис. 6.4.4) представлено лише ті компоненти, що є суттєвими для розуміння цього конкретного аспекту функціонування аграрної IoT-системи.

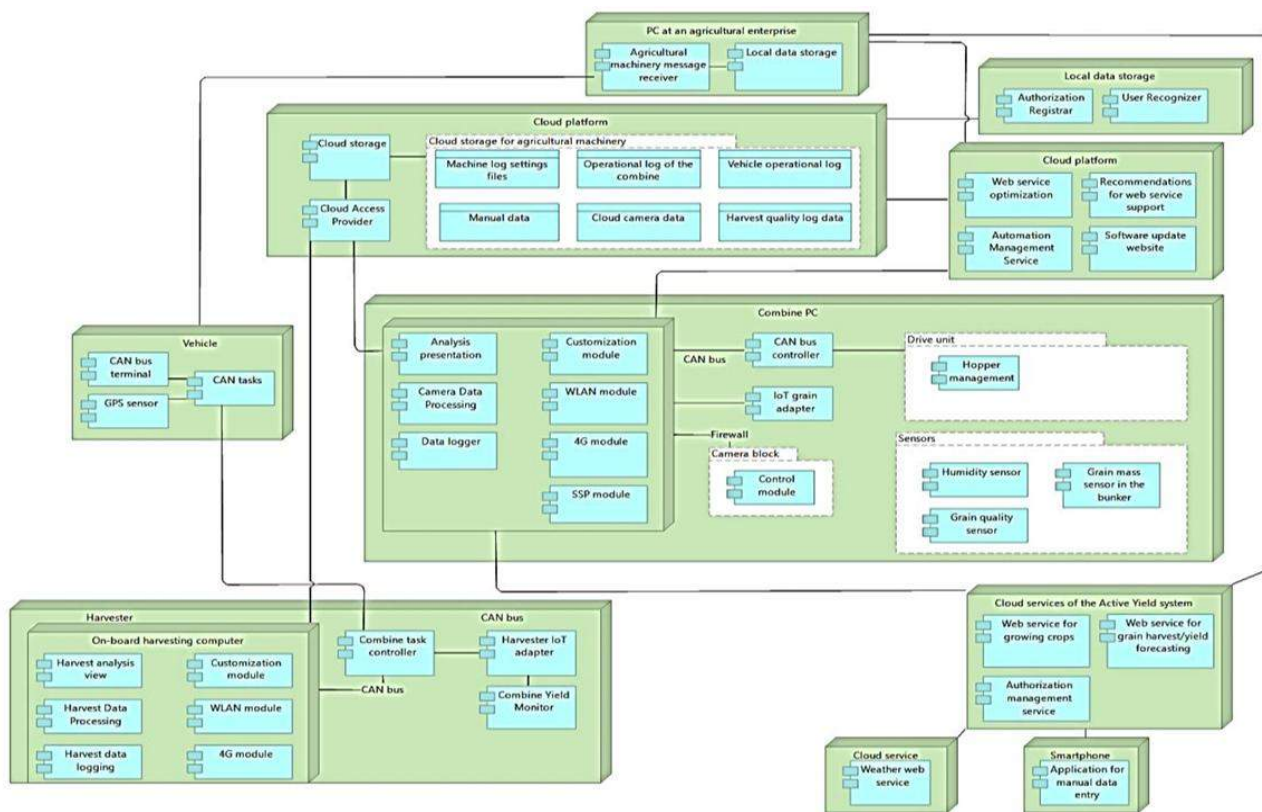


Рис. 6.4.4 Діаграма розгортання

У сучасних високотехнологічних сільськогосподарських підприємствах інформація розглядається як стратегічний ресурс, що забезпечує ефективне управління виробничими та логістичними процесами. Для повноцінного аналізу ефективності використання ресурсів та прийняття управлінських рішень необхідна наявність графічної інформаційної моделі, яка чітко відображає інформаційні потреби структурних підрозділів підприємства і бізнес-процеси, що в них відбуваються.

Інформаційна модель визначає ключові інформаційні активи, пов'язані з різними типами даних, які використовуються в роботі підприємства. Сюди належать як оперативні потоки даних, алгоритми, експертні правила, так і повідомлення про події, прогнози та керуюча інформація. Така модель забезпечує структурування інформації та її узгоджене використання на всіх рівнях управління підприємством.

Основна роль інформаційної моделі полягає у виявленні доступних даних, визначенні їх джерел і процедур використання. Завдяки цьому створюється не лише видимість інформаційних потоків, але й забезпечується можливість їх глибокого аналітичного опрацювання. Це дозволяє усунути неоднозначність у трактуванні інформації, впорядкувати її логіку зберігання та скоротити кількість технологій, які використовуються для доступу та збереження даних. У результаті досягається підвищення ефективності управління інформаційними ресурсами підприємства.

У принципі, для відображення інформаційних процесів на рівні бізнес-функцій може бути побудовано довільну кількість графічних схем. У цьому

дослідженні запропоновано інформаційну модель, розроблену для конкретного прикладу — автоматизованої оцінки якості зібраного врожаю в бункері комбайна з використанням сенсорів та технологій Інтернету речей.

Під час створення інформаційної моделі (рис. 6.4.5) були ідентифіковані ключові інформаційні елементи, що беруть участь у бізнес-процесах підприємства. Модель побудована у відповідності до ієрархічної структури бізнес-процесів, а також узгоджена з попередньо сформованою діаграмою розгортання. Таким чином, інформаційна модель відіграє роль зв'язувальної ланки між логікою бізнесу та технічним рівнем реалізації IoT-систем, забезпечуючи цілісність цифрової архітектури агропідприємства.

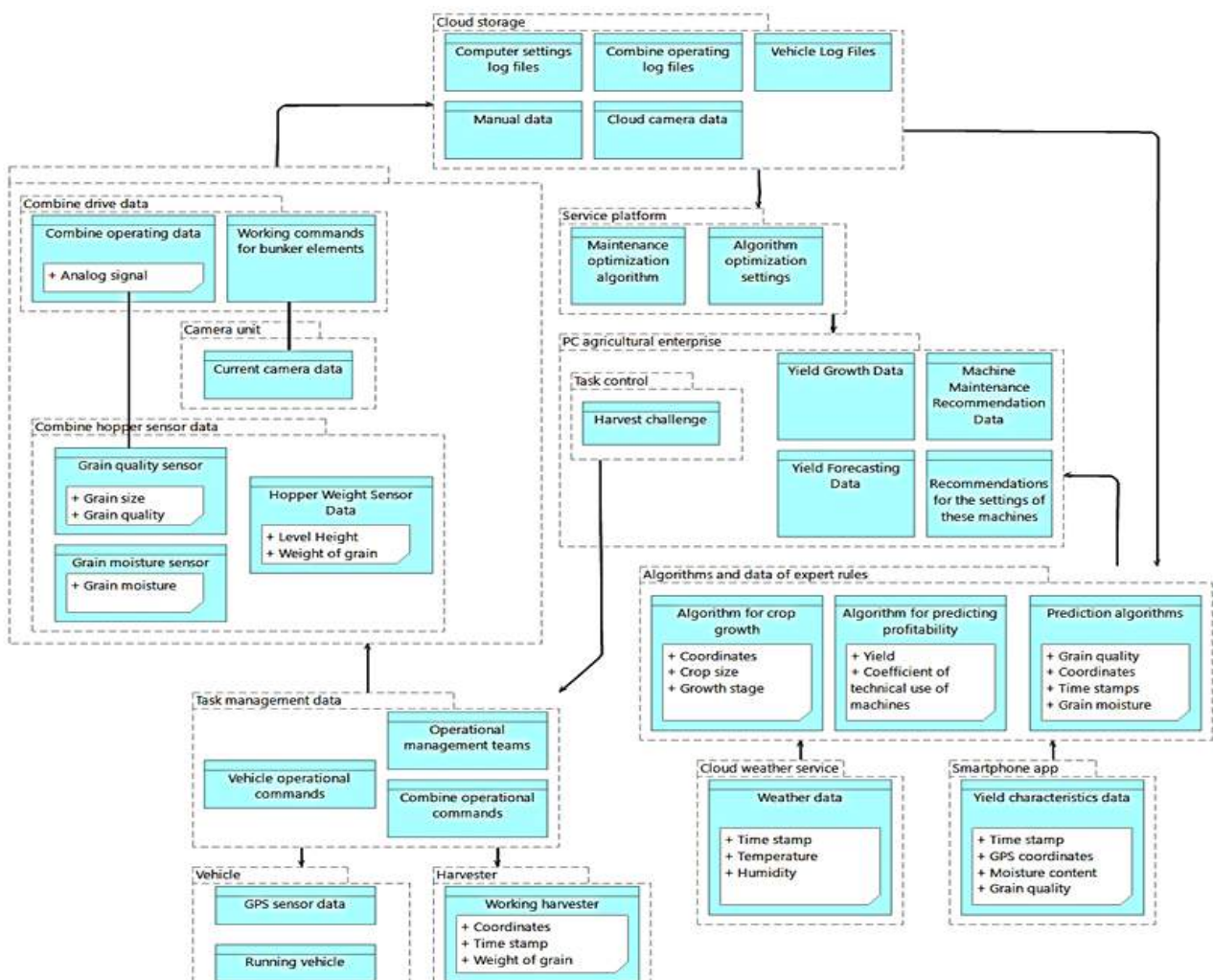


Рис. 6.4.5 Інформаційна модель

Основою запропонованої IT-архітектури є технології Інтернету речей та розподілених реєстрів (зокрема, блокчейн), які забезпечують цифрові сервіси з моніторингу, безпеки, відстежуваності та аналітики. Архітектура рослинницького підприємства, представлена у дослідженні, забезпечує цілісність збору, аналізу та узгодженості даних, що використовуються для підтримки управлінських рішень.

6.5 СВЯЗЬ ИНТЕРНЕТА ВЕЩЕЙ И АКВАКУЛЬТУРЫ

Интернет вещей (IoT) відкриває нові можливості для вирішення актуальних проблем, з якими стикається сучасна аквакультура. Ця технологія вже продемонструвала значні досягнення в сільському господарстві та інших ресурсомістких галузях, сприяючи підвищенню продуктивності, вдосконаленню систем моніторингу та впровадженню прийняття рішень на основі даних.

У сфері аквакультури технології IoT дедалі активніше впроваджуються для забезпечення оперативного, детального контролю за виробничими процесами. Це дозволяє здійснювати моніторинг та автоматизацію на рівні, який раніше був недосяжним. За оцінками, обсяг інвестицій у технології IoT для аквакультури до 2030 року перевищить 1,5 мільярда доларів США, що свідчить про широке визнання їхнього потенціалу у вирішенні складних галузевих викликів. У результаті такого впровадження підвищуються ефективність, стійкість і здатність аквакультурних господарств адаптуватися до зовнішніх загроз.

Концепція IoT базується на мережі фізичних пристроїв, датчиків і систем, які збирають, передають і аналізують дані в різних сферах і географічних локаціях. Завдяки мережевій взаємодії IoT відкриває доступ до великого обсягу інформації, забезпечуючи точний моніторинг, прогнозування та регулювання ключових параметрів для ефективного управління ресурсами.

У практиці аквакультури використовуються датчики якості води, автоматичні годівниці, підводні камери та автономні дрони. Вони збирають дані про температуру, рівень розчиненого кисню, кислотність (pH), солоність та вміст аміаку. Отримання таких даних у режимі реального часу дозволяє оперативно приймати управлінські рішення, мінімізуючи ризики, раціонально використовуючи ресурси та підвищуючи продуктивність. Постійний моніторинг водного середовища дозволяє вчасно виявляти і нейтралізувати шкідливі зміни ще до того, як вони вплинуть на здоров'я риб, що знижує рівень смертності та покращує загальні виробничі результати.

Переваги використання IoT в аквакультурі є значними. По-перше, це покращення екологічного моніторингу, що має вирішальне значення для збереження якості води — ключового чинника для здоров'я і росту водних організмів. Незадовільна якість води викликає стрес у риб, підвищуючи їхню вразливість до хвороб і знижуючи темпи розвитку. IoT-сенсори забезпечують безперервне спостереження за параметрами води, надсилаючи повідомлення у разі виявлення загрозливих змін, що дозволяє вжити превентивних заходів, наприклад, провести аерацію або циркуляцію води.

По-друге, технології IoT сприяють ефективнішому управлінню годівлею, що є критично важливим для сталого розвитку аквакультури. Оскільки витрати на корм становлять від 50 до 70% усіх операційних витрат, нераціональні стратегії годівлі призводять до значних фінансових втрат і забруднення довкілля. Автоматизовані системи годівлі, керовані на основі даних про поведінку риб, температуру води та інші параметри, оптимізують графіки та об'єми годування, зменшуючи втрати корму та сприяючи інтенсивнішому росту. Це водночас

підтримує екологічну рівновагу та підвищує економічну ефективність господарства.

По-третє, IoT відіграє важливу роль у контролі захворювань та біобезпеці. Спалахи хвороб можуть завдати серйозних економічних збитків, оскільки потребують дорогого лікування та можуть спричинити масову загибель поголів'я. Використання систем моніторингу здоров'я на основі IoT дає змогу на ранньому етапі виявляти симптоми захворювань шляхом аналізу поведінкових та екологічних показників. У деяких випадках пристрої можуть відслідковувати стан окремих особин, дозволяючи вчасно ізолювати вразливі групи й запобігати поширенню хвороб.

Окрім того, IoT підвищує продуктивність праці шляхом автоматизації рутинних процесів моніторингу. Традиційно контроль за станом ферми, якістю води та здоров'ям риб здійснювався вручну, шляхом періодичних оглядів і забору проб. Такий підхід є трудомістким і потребує багато часу, а також залежить від погодних умов і доступності персоналу. Крім того, інтервали між перевірками можуть сприяти запізненому виявленню проблем — зміни якості води, спалахи захворювань або неефективну годівлю. До того ж, людський фактор часто зумовлює похибки в оцінках, що негативно впливає на точність рішень і ефективність виробництва.

Ситуацію ускладнюють також дефіцит кадрів і зростання витрат на оплату праці, що знижує життєздатність традиційних аквакультурних практик. Автоматизація на основі IoT оптимізує ці процеси, зменшуючи залежність від людського ресурсу та дозволяючи фермерам зосередитися на стратегічному управлінні. Водночас такі рішення роблять галузь доступнішою в регіонах із кадровим дефіцитом або високими витратами на робочу силу.

Останні публікації засвідчують зростаючий інтерес до ролі Інтернету речей у підвищенні ефективності аквакультурних практик. Увага дослідників зосереджена на застосуваннях, викликах та подальших напрямках розвитку технологій. Розглядаються окремі аспекти впливу IoT на аквакультуру, а також його трансформаційний потенціал.

Зокрема, дослідники звертають увагу на можливості моніторингу якості води, управління годівлею та перевірки здоров'я водних організмів у реальному часі. Такий підхід забезпечує прийняття обґрунтованих рішень, що сприяє зростанню продуктивності. Поряд із перевагами, виділяються і певні проблеми: обмежений термін служби сенсорів, труднощі передавання даних у водному середовищі та складнощі з інтеграцією інформації.

Окремі дослідження класифікують проблеми, пов'язані з IoT в аквакультурі, на три категорії: інфраструктурні, пов'язані з даними та пов'язані зі сприйняттям. До інфраструктурних викликів належать висока вартість сенсорів, енергозалежність та обмежена мережева доступність у віддалених регіонах. Дані викликають проблеми з обслуговуванням сенсорів, втратою інформації та труднощами її об'єднання для аналітики. До психологічних бар'єрів належить небажання фермерів впроваджувати IoT через високі

початкові витрати, брак технічної підготовки та низьку обізнаність щодо довгострокових переваг.

У відповідь на ці виклики дослідники акцентують на важливості поєднання хмарних технологій, штучного інтелекту та IoT (CIA-модель) для вирішення проблем хвороб, моніторингу навколишнього середовища та оптимізації ресурсів. Наголошується на необхідності подальших досліджень для вдосконалення систем управління кормами, підвищення рівня простежуваності та сталості аквакультури. Особливу увагу приділяють сенсорам нового покоління, розвитку AI-аналітики для автоматизованого прийняття рішень, а також забезпеченню сумісності між різними IoT-платформами.

Інша важлива розробка – модель інтелектуального виявлення несправностей, що базується на методі дерев відмов і нейронних мережах. Вона дозволяє ефективно діагностувати декілька типів збоїв, однак потребує вдосконалення в контексті складних збоїв із множинними джерелами. Майбутні дослідження повинні зосередитись на адаптивних механізмах виявлення помилок для зниження простоїв у системах IoT.

Незважаючи на значну кількість робіт, залишається недостатньо чітким уявлення про актуальні тенденції, тематику та структуру досліджень у сфері IoT в аквакультурі. Це ускладнює визначення пріоритетних напрямів, пошук недосліджених аспектів і прийняття стратегічних рішень для подальшого впровадження технологій.

Для подолання цього розриву було запропоновано застосування бібліометричного аналізу – кількісного підходу до систематичної оцінки наукових публікацій. Цей метод дозволяє виявити впливові дослідження, визначити наукові мережі та тематичні тренди, простежити еволюцію знань, оцінити науковий вплив і запропонувати напрямки подальших досліджень.

У дослідженні застосовано методи аналізу спільної зустрічності ключових слів і аналізу співавторства для формування уявлення про наукове поле. Аналіз ключових слів допомагає виявити основні теми, що найчастіше фігурують у публікаціях, а також зв'язки між ними. Аналіз співавторства дозволяє визначити фундаментальні роботи та формувати карту знань у сфері IoT в аквакультурі.

Для візуалізації даних використовувалося програмне забезпечення VOSviewer, що дозволяє створювати графічні карти спільної зустрічності понять і мереж цитування. Цей інструмент виявляє ключові наукові теми, провідних авторів і тематичні кластери. Його застосування допомагає сформувати уявлення про інтелектуальну структуру галузі, що, у свою чергу, сприяє розробці технологій, політик і сталому розвитку аквакультури.

У межах цього дослідження було поставлено три ключові питання:

- Як змінюється академічний інтерес до IoT в аквакультурі (з точки зору динаміки публікацій, географії авторів і наукових журналів)?
- Які ключові теми й зв'язки між поняттями найчастіше з'являються у публікаціях?
- Які основні інтелектуальні кластери існують у сфері IoT-аквакультури, і як цитування показує взаємозв'язки між темами?

На відміну від традиційного огляду літератури, який ґрунтується на якісному аналізі обмеженої кількості джерел, бібліометрія дає змогу охопити великий масив публікацій і отримати структуровану картину наукового ландшафту. Вона допомагає виявити провідних дослідників, ключові теми та тенденції, що дозволяє науковцям формувати дослідницькі напрями з орієнтацією на наявні прогалини знань.

З погляду індустрії, отримані результати дають уявлення про стан технологічного розвитку IoT в аквакультурі та дозволяють бізнесу, технологічним розробникам і політикам краще адаптувати свої стратегії до сучасних наукових здобутків. Зрештою, системне вивчення IoT в аквакультурі сприяє прийняттю обґрунтованих рішень, інноваціям, підвищенню ефективності виробництва та забезпеченню сталості в галузі.

Метод дослідження

Збір літератури

У цьому дослідженні було проведено бібліометричний аналіз літератури, що вивчає взаємозв'язок між Інтернетом речей (IoT) та аквакультурою. Такий підхід дозволив систематизувати наявні наукові результати та окреслити подальші напрями досліджень. Бібліометричні огляди є важливим інструментом для класифікації та аналізу документів у певній галузі, оскільки вони дозволяють виявити наукові тренди та забезпечують об'єктивний і комплексний погляд на літературу, відкриваючи інтелектуальні межі досліджуваної теми.

Першим кроком стало обрання бази даних Scopus, яка відзначається широким охопленням рецензованих наукових журналів, матеріалів конференцій та книжкових видань. Порівняно з Web of Science, Scopus включає більше джерел, що робить її придатнішою для аналізу нових технологічних напрямів, зокрема IoT. Завдяки широкій базі даних та розгалуженій індексації, Scopus є надійною платформою для вивчення наукових тенденцій у галузі технологій та аквакультури.

Дослідницький підхід був зосереджений на пошуку публікацій, що стосуються застосування IoT в аквакультурі. Для цього використовувався запит за такими параметрами: назва, анотація та ключові слова. У пошуковому рядку було застосовано наступне формулювання: TITLE-ABS-KEY(("Internet of thing*" OR "iot*") AND "aquacultur*"). Така стратегія дозволила охопити весь спектр релевантних досліджень, що стосуються взаємозв'язку між IoT і аквакультурою, включаючи наукові статті, матеріали конференцій та інші академічні праці. Включення різних типів джерел надало змогу отримати більш повне уявлення про поточні тенденції та інноваційні підходи в цій динамічній галузі.

Щоб розширити обсяг аналізу, було зібрано статті, опубліковані англійською мовою, що дозволило сформувати початкову вибірку з 608 документів із бази Scopus. На відміну від досліджень, що фокусуються лише на окремих підтемах, ця методологія не передбачала таких обмежень. Вибір публікацій англійською мовою пояснюється її статусом як основної мови наукової комунікації у сферах IoT і аквакультури, а також тим, що більшість

бібліометричних інструментів та індексуючих платформ орієнтуються саме на англomовний контент. Водночас варто зазначити, що такий підхід міг призвести до виключення деяких важливих досліджень, опублікованих іншими мовами.

Для забезпечення релевантності кожна публікація була перевірена за назвою, анотацією та ключовими словами, щоб переконатися в її відповідності темі IoT в аквакультури. Після етапу скринінгу до остаточного аналізу було відібрано 428 документів. Цей відібраний масив став надійною основою для подальшого бібліометричного дослідження, дозволивши проаналізувати різноманітні напрями впровадження IoT у сфері аквакультури, а також пов'язані з цим виклики.

Бібліометричні методи

Після описового аналізу відібраних публікацій було проведено детальне контентне дослідження з акцентом на ключових словах та зв'язках між статтями для глибшого розуміння застосування IoT в аквакультури. У дослідженні застосовано мережевий аналіз на основі бібліометричних даних з метою візуалізації дослідницького ландшафту в цій галузі. Було обрано програмне забезпечення VOSviewer завдяки його високим можливостям з візуалізації мереж, кластеризації та зручній роботі з великими обсягами даних. На відміну від CiteSpace, який спеціалізується на виявленні сплесків цитувань і аналізі часових тенденцій, VOSviewer краще підходить для побудови та аналізу бібліометричних мереж, особливо для дослідження спільного використання ключових слів та ко-цитування. Порівняно з Biblioshiny, який потребує знання мови програмування R, VOSviewer забезпечує інтуїтивно зрозумілий інтерфейс і зручність у візуалізації зв'язків між дослідницькими темами та ключовими публікаціями.

VOSviewer також надає розширені можливості контролю параметрів побудови мереж, що робить його оптимальним інструментом для картування структури знань у сфері IoT в аквакультури. Для виявлення змістовних зв'язків між темами було використано аналіз спільного вживання ключових слів. Цей підхід дозволив ідентифікувати взаємозв'язки між різними дослідницькими напрями та сформувати окремі знаннєві кластери.

Аналіз спільного вживання ключових слів зосереджений на виявленні того, як часто певні терміни зустрічаються разом у публікаціях. Цей метод контрастує з аналізом ко-цитування, який класифікує публікації за силою їхнього спільного цитування. Часте співвживання двох термінів у статтях свідчить про сильний зв'язок між відповідними тематиками. Це дозволяє чітко окреслити основні дослідницькі напрями в галузі застосування IoT в аквакультури.

Для побудови мереж спільного вживання ключових слів та ко-цитування використовувалась сумісність VOSviewer з програмою Bibexcel. Було застосовано метод нормалізації LinLog/modularity, що дозволяє зменшити відстані між взаємопов'язаними вузлами та згрупувати теми, які мають тісні зв'язки. Завдяки цьому методі було ефективно представлено ключові теми, напрями досліджень та потенційні вектори подальших наукових розвідок.

Метод ко-цитування, який уперше був запроваджений Генрі Смоллом, дозволив виявити та проаналізувати нові тенденції в дослідженнях IoT в аквакультурі. Він аналізує зв'язки між публікаціями, які часто цитуються разом, що дозволяє виявити впливові роботи та об'єднані дослідницькі напрями. Частота ко-цитування вказує на міцність тематичних зв'язків між роботами, що дозволяє виділити спільні знаннєві області.

Було побудовано мережу ко-цитування у VOSviewer після попередньої обробки бібліометричних даних у Bibexcel. Для включення публікацій до мережі встановлено поріг принаймні одного ко-цитування, що дозволило уникнути надмірної фільтрації та водночас зберегти інформативність аналізу. У створеній мережі товщина зв'язків між вузлами відображає силу ко-цитування, вказуючи на фундаментальні праці, що мають вагомий вплив на формування дослідницького поля IoT в аквакультурі. Цей аналіз надав ґрунтовне уявлення про ключову літературу, сучасні тенденції та визначив основні дослідження, які формують подальші напрями розвитку цієї галузі.

Результати

Щорічна динаміка публікацій

Дослідження щодо застосування Інтернету речей (IoT) в аквакультурі було проведено 16 вересня 2024 року. З 2012 року спостерігається зростання кількості наукових праць у цій галузі. На початковому етапі було лише кілька публікацій щороку, але вже у 2018 році їхня кількість зросла до 22, а у 2019 — до 34. Така динаміка вказує на зростання зацікавленості у вирішенні проблем аквакультури за допомогою IoT, зокрема моніторингу якості води та автоматизації годівлі.

У 2021 році кількість публікацій зросла до 61, що свідчить про стрімкий розвиток галузі. На це вплинули інновації в IoT та актуальна потреба у сталих підходах до вирощування водних біоресурсів. Подальше зростання було зафіксоване у 2023 році, коли опубліковано 111 наукових робіт. У 2024 році цей показник становив 81 публікацію. Серед ключових чинників такого інтересу — технологічні прориви, екологічні виклики та необхідність забезпечення стійкості продовольчих систем, загострені пандемією COVID-19.

Особливої уваги набуває інтеграція IoT із штучним інтелектом та хмарними технологіями для підвищення ефективності та екологічної збалансованості аквакультурного виробництва. Тенденція зростання вказує на сталий інтерес наукової спільноти, а подальші дослідження, ймовірно, будуть зосереджені на більш складних і автоматизованих рішеннях у цій сфері.

3.2. Географічний розподіл публікацій

Географічний аналіз досліджень, присвячених IoT у сфері аквакультури, був здійснений шляхом вивчення афіліацій авторів. Найбільшу кількість публікацій представлено Індією (112), що свідчить про активну державну підтримку цифрових технологій у сфері сільського господарства та рибництва. За Індією йдуть Індонезія (52) та Китай (48), які також демонструють стратегічну зацікавленість у використанні IoT для забезпечення продовольчої безпеки.

Малайзія (36) та Тайвань (30) виділяються регіональними ініціативами з цифровізації аквакультури. Значний внесок також зробили Бангладеш (23), США (16), Японія (15) і Філіппіни (15). Хоча Сполучені Штати мають порівняно невелику кількість публікацій, їхня участь свідчить про зростаючий інтерес до побудови стійких систем харчового виробництва на базі IoT.

Загальний розподіл досліджень свідчить про активну участь як розвинених, так і країн, що розвиваються, у вирішенні проблем ефективності та стійкості аквакультури. Це підкреслює глобальну зацікавленість у застосуванні цифрових технологій у галузі вирощування водних організмів.

Аналіз співавторства дозволяє оцінити тенденції міжнародної наукової співпраці. Найактивнішими країнами за кількістю публікацій і цитувань виступають Індія, Китай та Індонезія. Китай лідирує за кількістю цитувань, далі йдуть Індія та Тайвань. Це свідчить про вагомий роль цих країн як центрів розвитку цифрових технологій в аквакультурі.

Високий рівень міжнародної співпраці з боку Індії та Китаю вказує на їхнє лідерство у світовій дослідницькій мережі. Хоча країни, як-от США, Велика Британія та Канада, мають менше публікацій, вони відіграють важливу роль через участь у міжнародних проєктах. Тим часом, Малайзія і Бангладеш демонструють значну наукову активність на регіональному рівні.

Порівняння активності розвинених країн і країн, що розвиваються, підтверджує високу зацікавленість останніх у застосуванні IoT в аквакультурі. Такі держави, як Індонезія, Бангладеш і Філіппіни, активно долучаються до досліджень, прагнучи вирішити проблеми у сфері вирощування водних біоресурсів за допомогою інноваційних технологій.

Географічна різноманітність авторів та дослідницьких установ свідчить про зростання інтересу до IoT в аквакультурі на глобальному рівні, сприяючи подоланню технологічного розриву та розвитку міжнародного наукового партнерства.

Розподіл публікацій за джерелами

Публікації, присвячені застосуванню IoT у сфері аквакультури, були представлені у широкому спектрі наукових журналів і матеріалів конференцій, що відображає міждисциплінарний характер досліджуваної тематики. Найбільше статей (12) вийшло у Lecture Notes in Networks and Systems. По шість публікацій надруковано у AIP Conference Proceedings, Proceedings of SPIE: The International Society for Optical Engineering і журналі Sensors. По п'ять статей з'явилися у ACM International Conference Proceeding Series, Advances in Intelligent Systems and Computing, Journal of Physics Conference Series і Lecture Notes in Electrical Engineering.

До спеціалізованих джерел належать журнали Aquacultural Engineering та Computers and Electronics in Agriculture, які опублікували по чотири статті. Також по чотири матеріали опубліковано в Indonesian Journal of Electrical Engineering and Computer Science, IOP Conference Series: Earth and Environmental Science, Journal of Theoretical and Applied Information Technology та Smart Agricultural Technology.

Такий розподіл свідчить про широку зацікавленість у дослідженнях IoT у сфері аквакультури з боку різних галузей — від інженерії та комп'ютерних наук до сільського господарства й екології. Зокрема, видання *Sensors* та *Computers and Electronics in Agriculture* зосереджуються на технологічних аспектах IoT, як-от сенсорика, автоматизація та обробка даних, тоді як журнал *Aquacultural Engineering* демонструє практичне застосування рішень на основі IoT у виробничих умовах.

Попри різноманіття наукових джерел, основна частина досліджень усе ще публікується переважно в технічних виданнях. Це відкриває перспективи для подальших досліджень у галузях управління, соціальних наук і економіки, особливо в контексті вивчення соціально-економічних і нормативно-управлінських аспектів використання IoT у сфері аквакультури.

Аналіз цитувань і співавторства провідних дослідників

Аналіз мережі цитувань дав змогу визначити ключові публікації та авторів, які формують дослідницький ландшафт у сфері IoT для аквакультури. Значний вплив на розвиток напряму мають роботи Ullah I. та Kim D., які є авторами фундаментальних досліджень. Автор Hang L., попри наявність однієї публікації, зробив помітний внесок, який став важливою точкою відліку для наступних дослідників. Також відзначено активну наукову діяльність таких авторів, як Martinez P. та Ahmad R., чиї праці суттєво вплинули на формування уявлень про IoT-рішення для аквакультури.

Значущість цих авторів свідчить про необхідність міждисциплінарного підходу, де поєднуються технології Інтернету речей, автоматизація, аналітика даних та практичне управління аквакультурними процесами. Водночас обмежена кількість провідних дослідників свідчить про відносно молоді стадії розвитку напряму, що відкриває можливості для нових наукових і міжінституційних співпраць.

Мережевий аналіз співавторства підтверджує існування активних наукових кластерів. Один із них об'єднує Martinez P., Ahmad R. і Yanes AR, які, ймовірно, працюють у напрямі сенсорного моніторингу чи розумних аквакультурних систем. Інший кластер сформували Kim D., Hang L. та Ullah I., які можуть досліджувати застосування блокчейну або штучного інтелекту для оптимізації процесів. Співпраця між Li D. і Zhang X. свідчить про спільну роботу в галузі автоматизації, тоді як група Li H., Wu F., Cao W. і Huan J. зосереджена на поєднанні IoT, моніторингу якості води й предиктивної аналітики.

Ці співавторські мережі ще раз підкреслюють міждисциплінарність досліджень, де інженерія, екологія й цифрові технології об'єднуються для розв'язання нагальних проблем аквакультури. Подальше зміцнення таких дослідницьких мереж і залучення нових науковців сприятимуть поглибленню знань, пришвидшенню технологічних новацій та підвищенню стійкості галузі.

Бібліометричний аналіз

Мережева взаємодія ключових слів

Аналіз співзв'язків ключових слів, що стосуються застосування технологій Інтернету речей (IoT) в аквакультури, дає змогу виокремити основні тематичні напрями у цій галузі. Такий підхід дозволяє візуалізувати взаємозв'язки між найбільш уживаними термінами, що, у свою чергу, допомагає визначити домінантні напрямки, використовувані методології та поточні тенденції досліджень.

З метою забезпечення точності та узгодженості в роботі, на попередньому етапі було проведено стандартизацію термінів, шляхом об'єднання схожих понять (наприклад, "Internet of Things" та "IoT"), що дозволило уникнути дублювання та покращити якість аналізу.

У результаті побудовано мережу, що складається зі 105 вузлів (ключових слів), які були системно згруповані у чотири кластери. Для відсікання незначних зв'язків встановлено мінімальний поріг спільної зустрічальності на рівні трьох, що дозволило зосередитися лише на ключових термінах, які мають достатню частоту використання в наукових джерелах.

Для візуалізації результатів було використано програмне забезпечення VOSviewer. У створеній мапі розмір кожного вузла відповідає частоті зустрічальності відповідного ключового слова: чим більше вузол — тим частіше воно зустрічається у публікаціях. Ключові слова, розташовані близько одне до одного, демонструють високу частоту спільної присутності, що вказує на тематичну близькість та взаємозв'язок між ними.

Отримане групування дозволяє виявити чотири основні кластери, які відображають змістовні напрями сучасних досліджень у сфері IoT в аквакультури. Кожен з них репрезентує окремий аспект: від моніторингу та автоматизації до питань сталого розвитку та ефективного використання ресурсів. Такий аналіз сприяє кращому розумінню структури наукової галузі, її пріоритетів і потенційних шляхів подальшого розвитку.

Розумні та точні системи аквакультури

Цей напрям відображає сучасні тенденції впровадження Інтернету речей (IoT) в галузі аквакультури. Він охоплює поняття, що відображають технологічний прогрес, принципи точного землеробства та прагнення до екологічної сталості. Основна увага зосереджена на термінах «розумна аквакультура», «моніторинг якості води» (WQM) та інтеграції IoT із передовими технологіями для покращення рибництва.

Важливе місце посідає використання штучного інтелекту, машинного навчання, хмарних обчислень і аналізу великих даних. Ці цифрові інструменти дають змогу здійснювати точний моніторинг, аналітику в реальному часі та ухвалення обґрунтованих рішень, що особливо важливо для підвищення ефективності та сталості аквакультурних систем. Наприклад, застосування цифрових двійників дає змогу моделювати умови в аквакультури в реальному часі, передбачати зміни у довкіллі та оперативно адаптуватися до них.

Застосування технологій LoRa та LoRaWAN, які забезпечують енергоефективну передачу даних на великі відстані, особливо актуальне для безперервного моніторингу віддалених водойм. Це сприяє зменшенню впливу на

довкілля, оптимізації ресурсів і забезпеченню сталих практик у вирощуванні риби. У системах використовуються також розумні аквапоніки, автоматизовані системи годування та дистанційне зондування — це свідчить про синергію IoT з технологіями автоматизації та контролю. Автоматизація є ключовою для точного управління годівлею, підтримання якості води та регулювання параметрів в реальному часі.

Окремо варто відзначити зростання інтересу до використання блокчейн-технологій і штучного інтелекту речей (AIoT), що дозволяє досягти високого рівня простежуваності та прозорості у виробництві. Блокчейн відкриває можливості для контролю за повним життєвим циклом водних продуктів — від вирощування до споживання. Інтеграція AI з IoT дозволяє проводити прогностичне обслуговування обладнання та адаптивне управління, що особливо важливо для довгострокової стійкості галузі.

Додатково згадуються поняття сонячної енергії та «розумного міста», що вказує на ширші процеси синхронізації аквакультури з відновлюваними джерелами енергії та міськими інфраструктурами майбутнього. Таким чином, сучасна аквакультура демонструє значний зсув у бік цифровізації, сталого управління та інтелектуального виробництва.

Інтегровані технології аквапоніки та розумного фермерства

Цей напрям зосереджений на поєднанні інноваційних методів вирощування та технологічних досягнень у сільському господарстві й аквакультурі. Центральними поняттями є аквапоніка, гідропоніка, розумне фермерство та системи замкненого водообігу (RAS), що ілюструють синергію між екологічно чистими агротехнологіями та системами з підтримкою IoT.

Важливу роль відіграють технології хмарних і периферійних обчислень, а також сенсорні мережі. Хмарні сервіси надають можливості для масштабованого зберігання та віддаленого аналізу даних, тоді як обробка на периферії дозволяє оперативно реагувати на зміни, обробляючи інформацію поблизу джерела її збору. Сенсорні мережі забезпечують безперервний контроль таких важливих параметрів, як якість води, рівень поживних речовин та мікрокліматичні умови, що є критичними для отримання стабільних і сталих урожаїв.

Провідними темами залишаються автоматизація, контроль і моніторинг. Активне впровадження автоматизованих систем у аквапоніці та гідропоніці дозволяє значно підвищити точність обробітку, мінімізувати потребу у ручній праці та оптимізувати використання ресурсів. Все більшої актуальності набувають питання інтеграції систем та прийняття рішень на основі даних. Забезпечення сумісності між різними пристроями є необхідною умовою ефективного функціонування комплексних розумних ферм.

Впровадження штучного інтелекту і систем аналітики даних відкриває нові можливості для прогнозування змін середовища та управління ризиками, зокрема в умовах кліматичної нестабільності або дефіциту ресурсів. Серед цікавих прикладів — концепція інтегрованої багатотрофічної аквакультури (IMTA), яка базується на вирощуванні кількох видів організмів на різних

трофічних рівнях. Такий підхід дозволяє краще утилізувати поживні речовини, зменшувати кількість відходів і підтримувати екологічну рівновагу.

Застосування технологій обробки зображень і візуального моніторингу дає змогу контролювати вплив виробництва на довкілля. Загалом цей кластер ілюструє тенденцію до об'єднання сільськогосподарських технологій, автоматизації, аналітики та IoT у єдині гнучкі та стійкі системи. Таке поєднання особливо важливе для забезпечення ефективного виробництва харчової продукції в умовах обмежених ресурсів.

Моніторинг якості води та здоров'я в аквакультурі

Третій кластер присвячено нагальній потребі моніторингу та підтримці параметрів якості води, які є критично важливими для здоров'я та продуктивності систем аквакультури. У цьому кластері зустрічаються такі ключові терміни, як сенсори, розчинений кисень, температура і pH, що підкреслює важливість моніторингу якості води в реальному часі. Часте використання цих термінів свідчить про зосередженість на впровадженні сенсорних технологій для контролю ключових індикаторів якості води, необхідної для підтримки оптимальних умов у вирощуванні риби та креветок.

Згадки про Arduino, Raspberry Pi і мікроконтролери вказують на активне використання платформ для збору даних і автоматизації. Ці доступні й програмовані пристрої дозволяють легко інтегрувати різноманітні сенсори та забезпечують безперервний контроль параметрів, таких як розчинений кисень, температура і каламутність. Впровадження відкритих платформ, таких як Arduino та Raspberry Pi, сприяє створенню недорогих і адаптованих систем моніторингу, що є особливо вигідним для малих і середніх господарств.

Крім того, такі поняття, як здоров'я риби, забруднення води та нітрати, відображають важливість якості води для росту й здоров'я аквакультурних організмів. Контроль рівня забруднювачів, поживних речовин та інших потенційно шкідливих компонентів є необхідним для запобігання захворюванням і підвищення добробуту популяцій риби й креветок. Акцент на здоров'ї риби підкреслює потребу галузі у надійних індикаторах для запобігання спалахам хвороб і підтримці стабільного середовища, що знижує рівень смертності та підвищує продуктивність.

Терміни ThingSpeak, WiFi-модуль і WiFi вказують на застосування бездротового зв'язку та платформ Інтернету речей (IoT) для передачі даних у реальному часі. Так, ThingSpeak — це хмарна IoT-платформа, яка дозволяє реєструвати, аналізувати та візуалізувати дані, забезпечуючи керівникам аквакультури віддалений доступ до інформації про якість води. Така підключеність дає змогу швидко приймати рішення й вчасно реагувати на зміни якості води, запобігаючи загрозам для здоров'я тварин.

Цей кластер також охоплює терміни, пов'язані з видами та методами вирощування, зокрема креветкове господарство та сом, що демонструє впровадження таких систем у різних практиках аквакультури. Гнучкість систем моніторингу якості води на основі IoT є корисною для різних умов — від прісноводного до солоного середовища. Загалом, кластер підкреслює важливість

сенсорних систем і цифрових технологій у забезпеченні здоров'я та ефективності аквакультурних господарств, особливо в контексті зростаючої потреби в сталому рибництві.

Інтелектуальні системи моніторингу та прогнозування в аквакультурі

Четвертий кластер присвячено застосуванню передових технологій Інтернету речей (IoT) і методів машинного навчання для моніторингу в реальному часі та прогнозування в аквакультурі. До основних термінів належать якість води, IoT-сенсори, реальний час і системи моніторингу, що свідчить про важливу роль цифрових рішень у спостереженні за ключовими параметрами для підтримки здоров'я водних екосистем.

Використання IoT-сенсорів дає змогу безперервно відстежувати критичні показники, зокрема розчинений кисень, температуру та pH. Це забезпечує своєчасне реагування на зміни та сприяє оптимізації умов для таких видів, як тилапія. Часті згадки про методи машинного навчання, зокрема глибоке навчання, згорткові нейронні мережі (CNN) та моделі GRU (Gated Recurrent Unit), вказують на перехід до стратегій, заснованих на великих даних, для прогнозування якості води та здоров'я риби.

Ці методи дозволяють аналізувати великі масиви даних, отриманих із сенсорів, виявляти закономірності та прогнозувати майбутні умови у водних системах. Наприклад, CNN ефективно використовуються для моніторингу зображень — спостереження за поведінкою або станом риби, тоді як GRU добре підходять для аналізу часових рядів, що є критичним для прогнозування змін якості води з часом.

Терміни хмарне зберігання та вбудовані системи відображають технологічну основу, яка забезпечує роботу інтелектуальних систем. Хмарне зберігання дозволяє накопичувати, обробляти та аналізувати великі обсяги даних із різних локацій, а вбудовані системи — здійснювати обробку даних безпосередньо на місці, зменшуючи затримки в ухваленні рішень.

Інфраструктура відіграє вирішальну роль у масштабованості таких систем і дає змогу ефективно працювати навіть у віддалених чи ресурсно обмежених умовах. Вживання понять розумна система та інтелектуальна аквакультура вказує на прагнення створити автоматизовані системи, які зменшують потребу у втручанні людини, одночасно підвищуючи ефективність господарств. Такі системи можуть самостійно регулювати подачу кисню, годівлю або обробку води на основі актуальних даних.

Ключовий термін прогнозування якості води відображає застосування аналітики для передбачення змін параметрів, що є важливим для проактивного управління. Завдяки прогнозуванню, наприклад, зниження рівня кисню або зростання концентрації аміаку, керівники господарств можуть вжити заходів завчасно й знизити рівень смертності серед риби.

Загалом, цей кластер демонструє роль IoT, машинного навчання та хмарних технологій у створенні інтелектуальних систем управління аквакультурою. Поєднання аналітичних підходів і технічної інфраструктури

забезпечує новий рівень ефективності, гнучкості та стійкості у веденні сучасного рибного господарства.

Аналіз мережі співавторства у цитуванні

Мережа співавторства у цитуванні є важливим інструментом бібліометричних досліджень, особливо корисним для вивчення інтелектуального каркасу таких наукових сфер, як застосування Інтернету речей (IoT) в аквакультурі. Цей метод ґрунтується на аналізі мереж, утворених спільно цитованими джерелами, де статті розглядаються як основні одиниці аналізу. Кластери співавторства у цитуванні репрезентують базові знання, що лежать в основі певної наукової галузі.

У цьому дослідженні аналіз мережі співавторства у цитуванні використано для визначення найбільш вагомих наукових внесків у сферу IoT-застосувань в аквакультурі. Візуалізація такої мережі дозволяє відстежити зв'язки між статтями, які часто цитуються разом, що дає змогу виявити ключові теми та сформулювати уявлення про інтелектуальну структуру досліджуваної області. Відстань між вузлами та товщина дуг між ними відображають частоту спільного цитування, демонструючи тісні наукові взаємозв'язки та тематичну близькість.

Мережа складається з 387 вузлів, об'єднаних у шість кластерів, кожен з яких окреслює окрему тему в контексті IoT для аквакультури. Перший кластер зосереджений на дослідженнях, присвячених моніторингу якості води та її точному керуванню за допомогою IoT. У цьому кластері виділяються роботи, які пропонують впровадження бездротових сенсорних мереж і хмарних платформ для безперервного збору та передавання даних. Такі технології дають змогу операторам аквакультурних господарств своєчасно реагувати на зміну параметрів довкілля, оптимізуючи керування ресурсами та зменшуючи ризики.

Особливої уваги заслуговують дослідження, в яких IoT-технології поєднуються з прогнозними моделями на базі штучного інтелекту. Вони дозволяють передбачати тенденції зміни параметрів якості води й автономно регулювати їх, що підвищує ефективність управління господарствами. Водночас, залишається відкритим питання забезпечення сумісності таких систем між різними господарствами, проблеми захисту даних та точності прогнозування в різних екологічних умовах.

У межах першого кластера також висвітлюються перспективи розширення застосування IoT у дрібних аквакультурних господарствах, впровадження блокчейн-технологій для прозорого обліку даних і створення адаптивних гібридних AI-IoT-систем. Інші роботи зосереджуються на концепції «точної аквакультури» та підкреслюють важливість цифрових двійників, сенсорних мереж і автоматизації для вдосконалення технологій у галузі.

Другий кластер присвячений розвитку стійких аквакультурних систем шляхом впровадження IoT і автоматизації. Основна увага зосереджена на використанні відновлюваних джерел енергії для живлення сенсорних пристроїв у віддалених умовах, розробці мобільних застосунків для передачі даних у реальному часі та застосуванню роботизованих систем для зменшення потреби в ручній праці. Важливими напрямками є розробка інструментів виявлення хвороб

риб, систем візуалізації даних для прийняття рішень та автоматизованого управління аерацією, що підвищує виживання та продуктивність.

У третьому кластері розглядається роль цифрових та інноваційних технологій, таких як хмарні обчислення, штучний інтелект, безпілотні платформи, у підтримці стійких практик аквакультури. Особливу увагу приділено питанням простежуваності виробництва, зменшення впливу на довкілля, а також автоматизації процесів годування, аерації та виявлення захворювань. Аналізуються переваги застосування блокчейн-платформ, edge computing та машинного навчання для підвищення адаптивності та ефективності управління аквакультурним ланцюгом постачання.

У цьому ж контексті порушуються питання використання цифрових двійників і безпілотних технологій для моніторингу офшорних господарств, а також можливості геномного редагування для вдосконалення рибництва. Значний акцент робиться на використанні систем прогнозування на базі реального часу, які забезпечують більш ефективне управління водними ресурсами та сприяють екологічній стабільності.

Таким чином, аналіз мережі співавторства у цитуванні дозволяє виділити ключові наукові напрями в дослідженні IoT для аквакультури, окреслити фундаментальні ідеї, що формують основу цієї галузі, та визначити перспективи подальшого розвитку.

Попри значні досягнення у впровадженні технологій Інтернету речей в аквакультурі, лишається низка перспективних напрямів для майбутніх досліджень. Одним із них є вивчення біонатхненних IoT-систем, які імітують природні екосистеми для покращення регуляції якості води та добробуту риб. Також інтеграція квантових обчислень з IoT відкриває можливості для революційного прориву в обробці даних у реальному часі та побудові прогностичних моделей в управлінні аквакультурними системами.

Ще одним напрямом є розробка децентралізованих IoT-архітектур з використанням периферійного штучного інтелекту (Edge AI), що дозволяє приймати рішення з мінімальними затримками без необхідності підключення до хмарних сервісів. Не менш важливим є дослідження можливостей адаптивної годівлі риб, яка базується на аналізі поведінкових та метаболічних патернів різних видів, що сприятиме підвищенню продуктивності з одночасним зменшенням негативного впливу на довкілля.

Міждисциплінарні дослідження, які поєднують морську екологію, поведінкові науки та IoT-технології, здатні закласти основу для створення сталих саморегульованих аквакультурних екосистем з мінімальним втручанням людини.

Кластер 4: IoT для автоматизованих систем аквапоніки та гідропоніки

Цей кластер присвячено застосуванню IoT у поєднанні з автоматизованими системами аквапоніки та гідропоніки, що сприяють розвитку сталої аграрної практики. У центрі уваги – значення IoT у поєднанні технологій аквакультури та гідропоніки для створення ефективних і ресурсозберігаючих агросистем. Основні теми охоплюють моніторинг у реальному часі, прогностичну аналітику,

а також використання енергозабезпечення на основі сонячної енергії задля підвищення екологічної ефективності.

Зокрема, в дослідженнях 2020 року розглянуто роль IoT у моніторингу якості води в автоматизованих аквапонічних системах і підвищенні рівня автоматизації для забезпечення масштабованості та надійності. Аналогічно, у 2022 році були вивчені можливості застосування IoT і штучного інтелекту в мікрководоростевому виробництві, зокрема в регулюванні рН і освітленості для підвищення продуктивності біомаси. Ще раніше, у 2017 році, було запропоновано систему моніторингу в реальному часі, що забезпечує безперервний контроль за водними та екологічними параметрами, зменшуючи потребу в ручному втручанні.

Інші розробки, наприклад архітектури з використанням сонячної енергії, спрямовані на підвищення автономності та енергоефективності аквапонічних систем. Таким чином, цей кластер чітко демонструє трансформаційний потенціал IoT у сфері аквапоніки як сталої та масштабованої технології для сільського господарства.

Кластер 5: Сенсорні технології та глибинне навчання для контролю якості води. Цей тематичний кластер охоплює передові сенсорні технології та моделі глибинного навчання, призначені для контролю якості води в системах аквакультури. Важливим є застосування IoT-систем і моделей ШІ для аналізу таких параметрів, як температура, рН, розчинений кисень, що мають критичне значення для здоров'я риб та загальної продуктивності рибницьких господарств.

У дослідженнях 2021 року було представлено прогрес у сенсорних технологіях для моніторингу вищезазначених показників. Також було запропоновано використання згорткової нейронної мережі (CNN) для аналізу даних про якість води, що дозволяє класифікувати водне середовище. У 2024 році було розроблено модель на базі attention-LSTM, яка передбачає гіпоксію на ранніх етапах у ставках, тим самим знижуючи ризик загибелі риби через нестачу кисню. Ще однією новацією стала модель Dilated Spatial-Temporal CNN для точного контролю якості води в режимі реального часу. Зрештою, були запропоновані IoT-системи моніторингу, що поліпшують планування розміщення об'єктів аквакультури (зокрема молюсків), долаючи обмеження традиційних методів.

Кластер 6: Інтеграція блокчейну та IoT для безпечної автоматизованої аквакультури. Цей кластер зосереджено на поєднанні блокчейн-технологій з IoT задля створення безпечних і автоматизованих систем аквакультури. Особливу увагу приділено управлінню даними, дистанційному моніторингу та використанню роботизованих систем.

Було запропоновано платформу на основі блокчейну для забезпечення цілісності даних у рибництві через смартконтракти та децентралізоване зберігання інформації. Інші дослідження представили системи простежуваності для замороженої рибної продукції з метою підвищення прозорості та безпеки в ланцюгах постачання.

У межах інших розробок було розглянуто IoT-системи для автоматизації контролю параметрів середовища, таких як рН, температура та вміст кисню. Запропоновано IoT-хмарні рішення для централізованого управління аквакультурою задля підвищення ефективності використання ресурсів. Особливо цікавою стала розробка гібридної повітряно-підводної роботизованої системи HAUCS, яка поєднує IoT і машинне навчання для покращення моніторингу якості води та передбачуваного управління.

Загалом, цей кластер ілюструє потенціал поєднання блокчейну, IoT та робототехніки для створення безпечних, автономних і високоефективних рішень в аквакультурі.

Висновки

Інтеграція технологій Інтернету речей (IoT) та штучного інтелекту (AI) у сферу аквакультури відкриває нові можливості для підвищення сталості та ефективності сучасних методів вирощування водних організмів. Поєднання цих технологій дозволяє вирішувати важливі завдання з контролю якості води, моніторингу здоров'я риби та автоматизації систем управління завдяки використанню даних у режимі реального часу та аналітики на основі прогнозів. Перехід від традиційних трудомістких практик до підходів, що ґрунтуються на даних, сприяє зростанню продуктивності при одночасному дотриманні принципів екологічної сталості.

Попри зростання зацікавленості, кількість бібліометричних досліджень щодо застосування IoT в аквакультурі залишається обмеженою. Представлене дослідження заповнює цю прогалину, розкриваючи основні теми, технології та географічні тенденції у цій сфері. Аналіз демонструє стрімке зростання кількості публікацій після 2020 року, що свідчить про зростаюче визнання IoT і AI як ефективних засобів вирішення актуальних викликів в аквакультурі.

Найбільший обсяг досліджень припадає на країни з розвинутою аквакультурною галуззю — зокрема, Індію, Індонезію та Китай. Це зумовлено низкою чинників: провідними позиціями цих країн у світовому виробництві продукції аквакультури, значними державними та приватними інвестиціями в дослідження й технології, а також високим попитом на морепродукти на внутрішньому та експортному ринках. Окрім того, у цих країнах функціонують спеціалізовані наукові установи та активно розвивається співпраця між наукою й промисловістю, що сприяє формуванню потужної дослідницької екосистеми в галузі аквакультурних технологій.

Аналіз наукових публікацій виявив домінування технічного напрямку — більшість робіт публікуються в інженерних та технологічних журналах, що вказує на пріоритетність технічних інновацій перед управлінськими або соціальними аспектами у відповідних дослідженнях.

Мережевий аналіз спільного вживання ключових слів дозволив виявити декілька змістовних кластерів у сфері IoT для аквакультури. Перший кластер охоплює тематику розумних і точних систем управління господарствами, акцентуючи на термінах «IoT», «машинне навчання» та «точна аквакультура». Він відображає значущість точного, дано-орієнтованого управління для

моніторингу здоров'я риби та оптимізації використання ресурсів. Другий кластер стосується інтеграції аквапоніки та інтелектуального землеробства, де IoT-технології дозволяють ефективно поєднувати вирощування риби та рослин у замкнених екосистемах, що є відповіддю на глобальні виклики продовольчої безпеки.

Третій кластер фокусується на моніторингу якості води та здоров'я риби — зокрема, за параметрами розчиненого кисню, рН та каламутності — із застосуванням сенсорів і моделей штучного інтелекту. Окрему увагу приділено ранньому виявленню несприятливих умов, що дозволяє запобігати масовій загибелі риби. Четвертий кластер охоплює передові системи моніторингу й прогнозування, які використовують методи глибинного навчання та аналізу даних у реальному часі для прогнозування змін у водному середовищі та своєчасного реагування.

Аналіз мережі співавторства та співцитування виявив кілька важливих наукових напрямів. Перший кластер зосереджений на прогресі у сенсорних технологіях і моделях машинного навчання, які забезпечують точне управління якістю води. Другий кластер висвітлює роль блокчейну та IoT у забезпеченні цілісності даних і простежуваності в ланцюгу постачання аквакультури. Серед обговорюваних питань — запобігання маніпуляціям із даними та забезпечення прозорості. Третій кластер присвячено впровадженню автоматизації в галузі, включно з роботизованими системами та хмарними платформами, які підвищують ефективність операцій і зменшують потребу в ручній праці.

Загалом, дослідження висвітлює сучасний стан наукових робіт у сфері застосування IoT та AI в аквакультурі, окреслюючи провідні напрями, технологічні досягнення та виклики. Це підкреслює необхідність міждисциплінарної інтеграції знань у галузях інженерії, екології та управління для повноцінного використання потенціалу цифрових рішень у сталому виробництві продуктів аквакультури.

Теоретичні висновки та напрями майбутніх досліджень

Отримані результати сприяють глибшому теоретичному розумінню застосування технологій Інтернету речей (IoT) у сфері аквакультури, охоплюючи ключові теми, як-от сталий розвиток, прецизійний моніторинг, автоматизація та інтеграція даних у режимі реального часу. На відміну від традиційних методів, впровадження IoT в аквакультурі забезпечує прийняття обґрунтованих рішень і підвищує рівень автоматизації, що значною мірою оптимізує ефективність функціонування господарств і сприяє екологічній сталості.

Цей перехід акцентує необхідність переосмислення традиційних підходів до управління ресурсами та екосистемами в аквакультурі з урахуванням можливостей IoT і штучного інтелекту — зокрема, для контролю якості води, моніторингу здоров'я риб і комплексного управління господарствами.

У подальших дослідженнях доцільно зосередитися на інтеграції IoT із прогнозною аналітикою, поєднуючи збір даних у реальному часі з аналітичними моделями. Незважаючи на прогрес у впровадженні технологій, залишаються виклики щодо повної автоматизації та дистанційного управління.

Перспективним напрямом досліджень є розробка більш складних моделей машинного навчання для прогнозування змін навколишнього середовища, що дозволить менеджерам аквакультурних господарств діяти на випередження.

Зростаюча популярність IoT вимагає також уваги до етичних аспектів, включаючи конфіденційність даних, право власності на інформацію та вплив автоматизації на зайнятість у секторі. Доцільно розробити механізми врядування, які забезпечать етичне використання даних та прозорість в ухваленні рішень.

Окремий напрям досліджень — посилення стійкості систем аквакультури. Завдяки IoT-датчикам і прогнозній аналітиці можливо створити системи раннього попередження щодо зниження якості води або виникнення хвороб. Це дозволить перейти від реактивного до проактивного управління, що підвищить адаптивність до екологічних змін.

Необхідно також розробити показники сталості, специфічні для систем аквакультури, заснованих на IoT. Наявні індикатори не дозволяють повною мірою оцінити екологічні та соціальні наслідки. Доцільно враховувати споживання енергії, ефективність використання ресурсів і екологічний слід.

Порівняльні дослідження в різних регіонах і щодо різних видів рибиництва допоможуть виявити універсальні та специфічні особливості застосування IoT у прісноводних і морських системах. Також заслуговують на увагу інноваційні технології: блокчейн — для простежуваності постачання, штучний інтелект — для прогнозування захворювань, цифрові двійники — для моделювання впливу на довкілля.

Таким чином, дослідження дає як теоретичні, так і практичні орієнтири для фахівців та управлінців, допомагаючи орієнтуватися у швидко змінюваному середовищі цифрової аквакультури.

Практичні висновки

Практичні результати цього огляду демонструють трансформаційний потенціал застосування IoT в аквакультурі. Поєднання IoT з передовими технологіями — такими як штучний інтелект і блокчейн — надає операторам можливість здійснювати моніторинг у реальному часі. Це сприяє кращому управлінню якістю води, профілактиці захворювань та підвищенню загальної ефективності.

Дистанційний контроль середовища вирощування риби дозволяє зменшити залежність від ручної праці, що особливо актуально в умовах нестачі робочої сили та старіння персоналу. Аналітика в реальному часі дає змогу приймати обґрунтовані рішення щодо годівлі, аерації та очищення води, що веде до покращення здоров'я риби та зростання врожайності.

Фокус на сталих практиках дозволяє досягти балансу між продуктивністю та дбайливим ставленням до довкілля. IoT-системи допомагають зменшити витрати ресурсів і кількість відходів, завдяки постійному моніторингу таких параметрів, як рН, розчинений кисень і рівень аміаку. Це сприяє своєчасному втручанню та мінімізації негативного впливу на природу. Перехід до таких

моделей сприяє відповідності глобальним цілям сталого розвитку, а також підвищує привабливість продукції для екологічно свідомих споживачів.

Впровадження блокчейну підвищує прозорість у ланцюгах постачання, забезпечуючи довіру споживачів до якості та сталості морепродуктів. У результаті, цей огляд надає практичні орієнтири для підприємств, які впроваджують IoT: від оптимізації витрат до задоволення попиту на сталу продукцію.

Системи IoT з функціями прогнозного обслуговування й раннього попередження можуть посилити стійкість господарств до зовнішніх викликів і епізоотій. Для органів управління це означає потребу у створенні стимулів і нормативних умов для розвитку інновацій, враховуючи при цьому етичні питання — зокрема щодо конфіденційності даних і впливу на ринок праці.

Підсумовуючи, впровадження IoT в аквакультурі є інструментом досягнення економічних і екологічних цілей, що забезпечує адаптацію галузі до сучасної цифрової і сталозорієнтованої реальності.

Обмеження дослідження

Основні обмеження цього огляду пов'язані з методологічним підходом. Хоча бібліометричний аналіз дозволяє виявити ключові теми та публікаційні тенденції в застосуванні IoT до аквакультури, він не завжди відображає глибокі якісні аспекти.

Дослідження обмежене лише публікаціями англійською мовою, що зумовлено домінуванням англійської в науковому середовищі та в ключових базах даних, таких як Scopus. Це забезпечує охоплення авторитетних джерел, проте може призводити до втрати цінних досліджень іншими мовами, які можуть містити регіональні особливості впровадження IoT.

Орієнтація на окремі бази даних може призвести до недообліку публікацій у нефахових або регіональних виданнях. Також використання лише ключових слів як критеріїв пошуку може виключити праці з нетиповою термінологією або міждисциплінарні підходи, які не відповідають пошуковим запитам.

Незважаючи на виявлення кількісних закономірностей, якісний аналіз здатен дати глибше розуміння практичних викликів, етичних аспектів і контекстуальних особливостей застосування IoT. У майбутньому доцільно залучати літературу іншими мовами за допомогою перекладацьких інструментів, а також використовувати змішані методи або експертні інтерв'ю для розширення аналітики. Це дозволить отримати більш комплексне уявлення про зміну технологічного ландшафту аквакультури в епоху IoT.

Рекомендована література (IoT)

- Джерело: Abderahman Rejeb, Karim Rejeb, John G. Keogh (2025) "The nexus of IoT and aquaculture: A bibliometric analysis", *Applied Food Research*, Vol. 5, Iss. 1, <https://doi.org/10.1016/j.afres.2025.100838>.
- Nurzaman Ahmed, Nadia Shakoор (2025) "Advancing agriculture through IoT, Big Data, and AI: A review of smart technologies enabling sustainability", *Smart*

- Vijaya Choudhary, Paramita Guha, Giovanni Pau, Sunita Mishra (2025) "An overview of smart agriculture using internet of things (IoT) and web services", *Environmental and Sustainability Indicators*, Vol. 26, 100607, <https://doi.org/10.1016/j.indic.2025.100607>.
- Hammad Shahab, Muhammad Iqbal, Ahmed Sohaib, Farid Ullah Khan, Mohsin Waqas (2024) "IoT-based agriculture management techniques for sustainable farming: A comprehensive review", *Computers and Electronics in Agriculture*, Vol. 220, 108851, <https://doi.org/10.1016/j.compag.2024.108851>.

Питання для самоперевірки (IoT)

- Що являє собою технологія Інтернету речей (IoT) у контексті аграрного виробництва?
- Які приклади застосування IoT у рослинництві можна навести?
- Які перспективи впровадження IoT у цій галузі є найбільш значущими?
- У чому полягає сутність цифрової трансформації в агропромисловому комплексі?
- Яку роль відіграє інформаційна інфраструктура у формуванні «розумного» сільського господарства?
- Які інноваційні чинники сприяють цифровій трансформації АПК?
- Які принципи лежать в основі інтелектуального землеробства?
- Як технології IoT забезпечують функціонування інтелектуального землеробства?
- Які переваги дає застосування інтелектуальних систем для аграрного виробництва?
- З яких основних компонентів складається архітектура інформаційної системи підприємства з рослинництва?
- Яку роль відіграють сенсори, комунікаційні мережі та аналітичні платформи у такій архітектурі?
- Які вимоги висуваються до інформаційної системи на основі IoT у рослинництві?
- Яким чином IoT застосовується в аквакультурі?
- Які параметри можна моніторити за допомогою IoT у системах аквакультури?
- Які переваги надає інтеграція IoT у розвиток аквакультури?

ТЕМА 7. СИСТЕМИ ПРЕЦЕНЗІЙНОГО ПОЗИЦІОНУВАННЯ В АГРАРНОМУ ВИРОБНИЦТВІ

7.1 АКТУАЛЬНІСТЬ ВИКОРИСТАННЯ ВИСОКОТОЧНОГО РЕЖИМУ АБСОЛЮТНОГО ПОЗИЦІОНУВАННЯ ДЛЯ ВИРІШЕННЯ ШИРОКОГО КОЛА ЗАДАЧ СУПУТНИКОВОЇ НАВІГАЦІЇ

Упродовж останніх років глобальні навігаційні супутникові системи (ГНСС) стрімко інтегруються в інфраструктуру різних країн світу, охоплюючи дедалі ширші сфери людської діяльності. Інтеграція супутникових технологій у транспорт, енергетику, телекомунікації, нафтогазову промисловість, геологорозвідку та навіть сільське господарство набула по-справжньому глобального масштабу. Сьогодні системи ГНСС використовуються для визначення координат, напрямку та швидкості руху, синхронізації часу, забезпечення моніторингу, контролю й управління технічними та природними об'єктами.

Сфера застосування супутникової навігації надзвичайно широка. Вона охоплює як класичні напрями — геодезію, картографію, морську навігацію — так і сучасні, зокрема, будівництво, точне землеробство, системи автоматичного управління транспортом і робототехнікою. Водночас на ринку представлений широкий вибір навігаційного обладнання та програмного забезпечення, яке відповідає потребам користувачів різного рівня: від побутового до професійного.

Для забезпечення належної точності та надійності навігаційних вимірювань користувачі обирають режим роботи ГНСС-приймача відповідно до поставленого завдання. Основні режими супутникового позиціонування, що застосовуються на практиці, включають:

- Автономне (абсолютне) позиціонування (англ. Stand Alone) — режим, у якому одиночний приймач визначає свої координати лише за власними вимірюваннями псевдовідстаней до супутників. У цьому випадку точність зазвичай становить кілька метрів.
- Кодовий диференційний режим (англ. Differential GPS, DGPS) — полягає у використанні базової (опорної) станції, яка передає поправки до вимірювань псевдовідстаней. У результаті можна досягти точності позиціонування до одного метра залежно від умов і конфігурації системи.
- Фазовий диференційний режим у реальному часі (англ. Real Time Kinematic, RTK) — заснований на фазових вимірюваннях сигналів супутників. Цей режим забезпечує сантиметрову точність, що задовольняє потреби більшості сучасних прикладних задач у сфері точного позиціонування.

Режими диференціальної навігації дозволяють суттєво зменшити похибки позиціонування, які є спільними для сусідніх приймачів (так звані корельовані похибки), і тим самим підвищити точність визначення координат у порівнянні з автономним режимом позиціонування. Однак реалізація таких режимів вимагає наявності щонайменше двох супутникових приймачів (один — базовий, інший — рухомий), двох антен геодезичного класу, а також каналу зв'язку між ними для передавання поправок у режимі реального часу.

Це створює низку організаційних та фінансових труднощів, особливо для малих агровиробників, дослідницьких груп або освітніх установ. Суттєвою перешкодою до впровадження диференціальних рішень стає вартість подвоєного комплексу обладнання, а також вимога точно знати координати встановлення базової станції (в ідеалі — геодезично визначеної точки).

На цьому тлі високоточний режим абсолютного позиціонування (High Precision PPP — Precise Point Positioning) виступає перспективною альтернативою. Цей режим не потребує базової станції поблизу та забезпечує високу точність визначення координат у будь-якій точці Землі — зазвичай до 10 см.

Цей режим ґрунтується на використанні високоточних ефемеридно-часових даних (ЕЧД) для супутників навігаційних систем. Такі дані формуються спеціалізованими обчислювальними серверами, які збирають телеметричну інформацію з великої кількості глобальних базових станцій. Далі ці вимірювання надходять до фільтра Калмана, де відбувається оцінка поточних координат супутників і корекція похибки їхніх годинників відносно прогнозованих значень.

Затримка оновлення даних становить у середньому 4–6 секунд, що дозволяє вважати режим майже реального часу. Отримані точні координати супутників і часова інформація передаються користувачам через визначений канал зв'язку.

Найпоширеніший спосіб передачі високоточних ЕЧД — це використання геостационарних супутників, які виконують функцію ретрансляторів. Такий підхід забезпечує глобальне покриття і дає змогу користувачам не залежати від географічного розташування базових станцій.

У результаті ГНСС-приймач, що працює у високоточному режимі абсолютного позиціонування, може забезпечувати точність на рівні 10 см — цього цілком достатньо для багатьох практичних задач: від геодезії до точного землеробства, від моніторингу інфраструктурних об'єктів до автономної навігації мобільних роботизованих систем. На **рис. 7.1.1** наведено приклад розподілу похибок позиціонування при роботі навігаційного приймача в режимі високоточного абсолютного позиціонування у режимі реального часу.

Під час оцінювання навігаційного рішення важливим є дотримання вимог до точності та надійності визначених координат. Для цього використовують положення статистичної теорії, відповідно до якої якість навігаційного рішення оцінюється за такими параметрами, як середнє зміщення (математичне сподівання) похибок та дисперсія оцінок.

Серед основних характеристик, що використовуються для кількісної оцінки, є середньоквадратична похибка (RMS). Вона дозволяє чисельно охарактеризувати відхилення реального положення об'єкта від обчисленого навігаційною системою.

Для прикладу, у режимі високоточного абсолютного позиціонування типові значення RMS становили:

- по широті — 0,019 м,
- по довготі — 0,022 м,

- по висоті — 0,030 м.

Планова похибка (у площині) склала 0,029 м, а просторове відхилення (у тривимірному просторі) — 0,041 м.

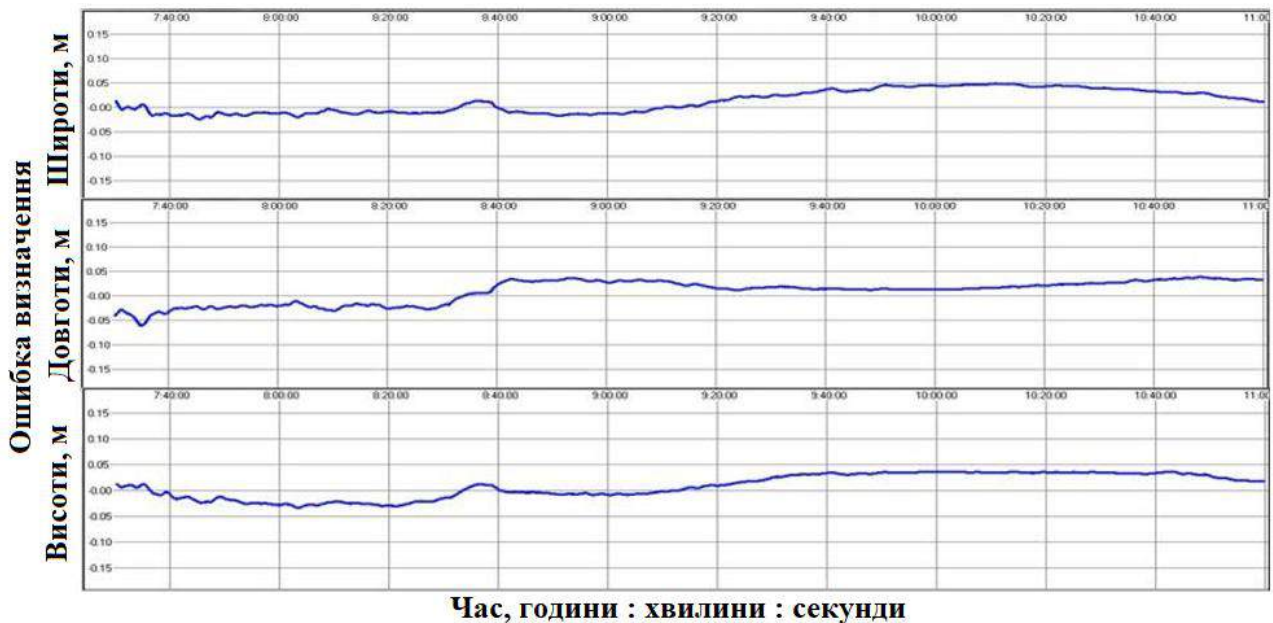


Рис. 7.1.1. Приклади реалізації похибок визначення координат у режимі високоточного позиціонування

На основі результатів, наведених на рис. 1 та в описі RMS-похибок, можна зробити висновок, що точність позиціонування, яку забезпечує навігаційний приймач у режимі високоточного абсолютного позиціонування, цілком відповідає вимогам більшості сучасних прикладних задач. Завдяки своїм особливостям та низці переваг над диференціальними режимами, цей підхід знайшов широке застосування в різних галузях економіки.

Серед основних напрямів використання високоточного абсолютного позиціонування варто відзначити:

- Сільське господарство — автоматизоване та напіваавтоматизоване керування сільськогосподарською технікою (тракторами, комбайнами) під час виконання операцій із поливу, посіву в міжряддя, збирання врожаю тощо.
- Будівельна галузь — навігація та керування будівельною технікою в умовах, де не потрібна надвисока стабільність точності (на рівні 1–2 см), наприклад при розробці кар'єрів, керуванні екскаваторами, буровими установками, переміщенні мас ґрунту.
- Моніторинг морських нафтовидобувних платформ — визначення точного розташування платформ, відстеження швидкості їх дрейфу в умовах відкритого моря. У подібних випадках організувати диференціальний режим часто неможливо через значну віддаленість від наземних базових станцій (яка може сягати сотень і навіть тисяч кілометрів).

Таким чином, високоточне абсолютне позиціонування (PPP) є перспективним та економічно обґрунтованим рішенням для багатьох задач, де

потрібна висока точність, але немає можливості або доцільності використання додаткової апаратури для диференціального позиціонування.

7.2 ДОСЛІДЖЕННЯ МОЖЛИВОСТЕЙ ВПРОВАДЖЕННЯ ТЕХНОЛОГІЇ ВИСОКОТОЧНОГО ПОЗИЦІОНУВАННЯ

Актуальність наукової проблеми дослідження

Використання GPS/GLONASS для трекерів

Супутникові навігаційні системи, зокрема GPS (Global Positioning System), дозволяють вимірювати відстань, час та визначати місцезнаходження в глобальній системі координат WGS 84. Аналогічні системи, такі як російський GLONASS, європейський Galileo та китайський BeiDou, також набувають широкого застосування. Завдяки своїй універсальності, GPS-модулі знаходять застосування у різноманітних трекерах, «розумних» ошийниках, рюкзаках тощо.

У сільському господарстві виробничі процеси мають свою специфіку, що створює численні лазівки для неефективних витрат та небажаних маніпуляцій. Факт віддаленості господарських об'єктів сприяє можливим зловживанням.



Рис. 7.2.1. Приклад застосування GPS-моніторингу у сільському господарстві

Запровадження систем GPS-моніторингу транспорту (рис. 7.2.1) дозволяє вирішити низку важливих завдань:

- Облік та контроль: Постійний контроль за наявними одиницями техніки у режимі реального часу.
- Точне позиціонування: Визначення локацій робочих майданчиків з високою точністю.
- Моніторинг руху: Відстеження швидкості, напрямку та змін у маршруті руху техніки.

- Оцінка ефективності: Аналіз продуктивності виконання завдань та своєчасне виявлення відхилень.
- Запобігання порушенням: Контроль нецільового використання транспортних засобів та можливих махінацій з паливом.

Системи паралельного ведення та польові комп'ютери

У базовій конфігурації системи паралельного ведення функціонують як автоматизовані курсоказувачі (рис. 7.2.2). Перед початком роботи оператор вводить основні параметри – площу і форму поля, а також ширину прицепного пристрою. На основі цих даних система автоматично розбиває поле на паси, точно підлаштовуючи їх під геометрію та розміри агрегацій. Це дозволяє управляти трактором навіть на полях складної форми, без пропусків чи перекриттів, із точністю до 20–40 см, як вдень, так і вночі, незалежно від погодних умов.

До курсоказувачів підключаються автопілоти та системи підрулювання, що значно підвищують ефективність роботи. Слід зазначити, що точність роботи системи залежить від ряду факторів, серед яких – змінні положення супутників залежно від часу доби. Так, із використанням стандартного обладнання точність може досягати ± 50 см, а з високоякісною зовнішньою антеною – до ± 20 см.



Рис. 7.2.2 Курсовказівник Raven і підрулюючий пристрій

Для підвищення точності визначення положення застосовують диференційну корекцію (дифпоправки). Хоча цей метод є досить складним і використовується рідше, він дозволяє досягати точності руху трактора до $\pm 2,5$ см. Одним із способів реалізації такої корекції є технологія RTK (Real Time Kinematic) за участю спеціальних базових станцій. При цьому метод має два основні обмеження:

- Зона дії диференційної корекції не перевищує 15 км.
- Приймач сигналу дифпоправки доступний лише у високотехнологічних системах паралельного ведення.

Як правило, виробники базових станцій для диференційної корекції постачають разом із ними найсучасніші та точніші системи паралельного ведення.

Технологія RTK: високоточне позиціонування в реальному часі

Стандартна точність позиціонування за допомогою GPS/GLONASS зазвичай становить 3–5 метрів, залежно від якості приймача, погодних умов, особливостей рельєфу місцевості та інших факторів. Для завдань, де потрібна більша точність, наприклад у точному землеробстві чи геодезії, використовується технологія RTK (Real Time Kinematic).

Технологія RTK базується на вимірюванні фази несучого сигналу супутникових систем (GPS, GLONASS) і передбачає застосування базової станції, яка у режимі реального часу передає коригуючі поправки до мобільних приймачів (так званих роверів). Завдяки цьому досягається сантиметрова точність визначення координат.

Базова станція RTK — це стаціонарний високоточний супутниковий приймач, що передає поправки мобільним пристроям у полі.

Ровер (мобільний приймач) — навігаційний пристрій, який приймає сигнали супутників і коригуючі дані з базової станції.

Програмне забезпечення — для обробки сирих навігаційних даних застосовується ПЗ RTKLIB з відкритим кодом, розроблене Такесу Томоджі з Токійського океанографічного університету.

RTKLIB дозволяє обробляти фазові вимірювання та псевдовідстані й досягати точності до кількох сантиметрів. Воно активно використовується в геодезії, картографії, а також у дослідницьких і навчальних проєктах.

RTKLIB (версія 2.4.2) сумісний з обмеженою кількістю моделей GNSS-приймачів. Серед найбільш поширених:

- UBLOX NEO-6T — одночастотний приймач (L1), підтримує GPS.
- NV08C-CSM — працює з GPS і GLONASS.
- U-blox NEO-M8T — більш сучасний приймач, який підтримує одночасну роботу з кількома навігаційними системами (GPS/GLONASS), представлений у 2016 році.

Ці пристрої можуть бути доступні за ціною близько \$78,99 (дані на травень 2019 року) при замовленні з Китаю. Усі вони здатні передавати «сирі» навігаційні дані для подальшої обробки.

На відміну від одночастотних, двочастотні GNSS-приймачі (L1/L2) приймають сигнали на двох різних частотах. Їх основна перевага — можливість усунення іоносферних спотворень, що особливо важливо при роботі на великих відстанях або за несприятливих умов. Проте такі пристрої значно дорожчі й найчастіше використовуються у кадастрових та геодезичних роботах.

Можливості RTKLIB

- RTKLIB підтримує роботу з кількома системами GNSS: GPS, GLONASS, Galileo, BeiDou,

- Виконує високоточне позиціювання в реальному часі (RTK) та у режимі постобробки (PPP — Precise Point Positioning),
- Працює через інтерфейси UART, TCP/IP,
- Підтримує основні стандарти: RINEX, RTCM, NTRIP, NMEA,
- Сумісний з власними протоколами виробників (наприклад, u-blox, NovAtel, JAVAD).

Версія для Windows має зручний графічний інтерфейс користувача і не потребує встановлення — достатньо розпакувати архів (див. **рис. 7.2.3**).

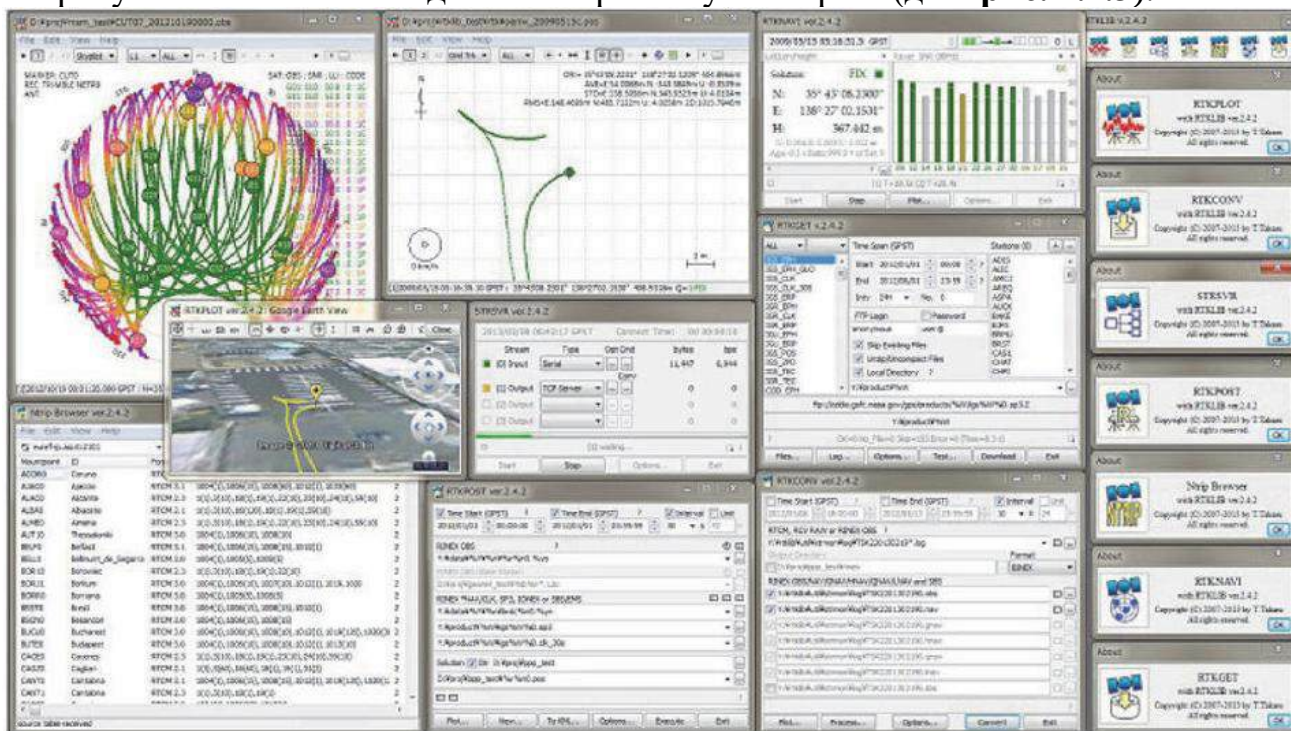


Рис. 7.2.3 Графічний інтерфейс Windows-версії RTKLIB

Навігаційні модулі для високоточного позиціювання

На ринку представлені готові рішення OEM-формату для інтеграції RTK-навігації. Зокрема, компанія «Навтелеком» пропонує такі модулі: UBX-1V0 та NAV-1V0

Ці модулі підключаються до USB-порту персонального комп'ютера або ноутбука, не потребують зовнішнього живлення й побудовані на базі одночастотного приймача NEO-6T від швейцарської компанії u-blox.

Згідно з технічним описом, безпосередньо на самій платі RTK не реалізується, а обчислення координат здійснюється на рівні комп'ютера за допомогою спеціального програмного забезпечення (наприклад, RTKLIB).

За описом, до складу плати навігаційного модуля UBX-1V0 (на базі приймача U-blox NEO-6T) входять такі компоненти:

- батарея резервного живлення типу CR2032,
- EEPROM-пам'ять для збереження поточних налаштувань,
- роз'єм типу SMA для підключення зовнішньої антени.

Модуль забезпечує антену живленням 3,3 В. Передача «сирих» навігаційних даних у бінарному протоколі U-blox (сумісному з RTKLIB) здійснюється через роз'єм miniUSB безпосередньо до комп'ютера. Частота виведення даних становить 1 Гц, що є достатнім для більшості завдань, пов'язаних із позиціонуванням у польових умовах.

Модуль NAV-1V0

Модуль NAV-1V0 (рис. 7.2.4 та 7.2.5) побудований на базі приймача NV08C-CSM, розробленого. На момент створення його перевагою була повноцінна підтримка GLONASS, однак з появою нових моделей від U-blox (наприклад, NEO-M8T), ця перевага частково втратила актуальність (рис. 7.2.6).

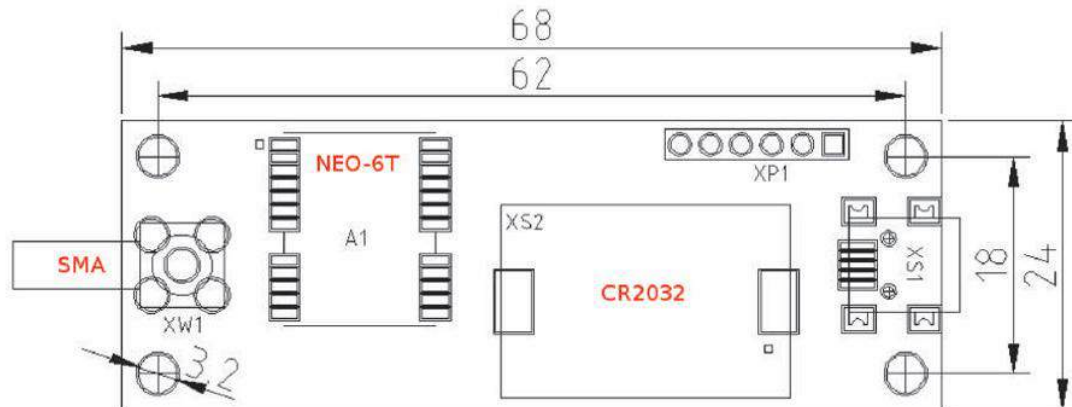


Рис. 7.2.4. Навігаційний модуль UBX-1V0, на базі приймача NEO-6T

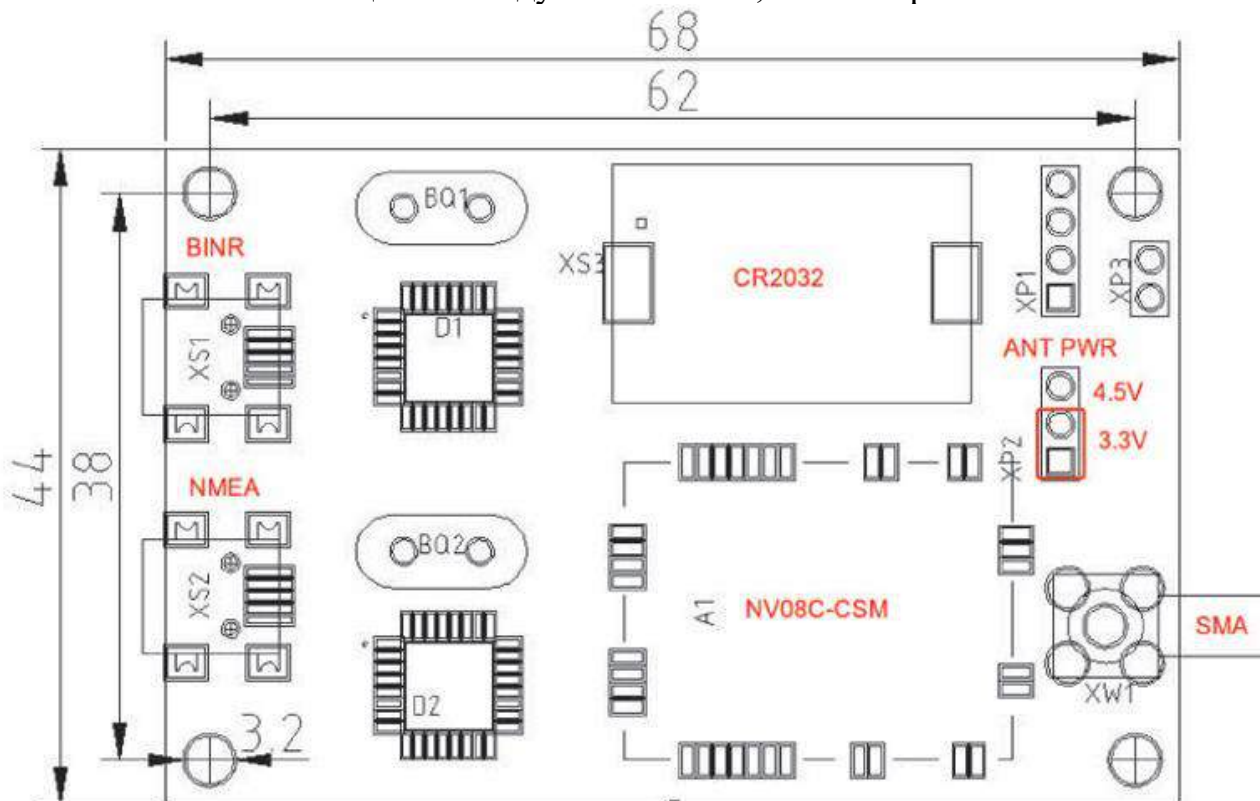


Рис. 7.2.5. Навігаційний модуль NAV-1V0

На китайських торговельних майданчиках модуль NV08C-CSM V5.1 у 2019 році коштував приблизно \$90.

- Апаратна конфігурація аналогічна до модуля UBX-1V0:

-
- The diagram illustrates the internal architecture of the NV08C-CSM module. It features three main power inputs at the top: a 3.0..5.5V RF Supply, a 3.0..5.5V Digital Supply, and a 2.85V VANT supply. The RF Supply feeds an LDO providing 2.8V RF to the RF Front-End. The Digital Supply feeds two LDOs (providing 2.8V RF I/O and a 1.2V BB core supply) and a DC/DC converter. The VANT supply is connected to a SAW Filter and a SAW GLO component. The RF Front-End includes an RF GLONASS section and an RF GPS/GALILEO section, both interfaced with the Baseband (NV08CD) via SPI. The Baseband contains a GPS/GALILEO/GLONASS Engine, SRAM, ROM, ARM7TDMI, OTP, RTC, and Backup RAM. A Power supervisor is connected to the 1.2V BB core supply and provides a RESET signal to the Baseband and SPI FLASH. External interfaces on the right include Ext Reset, 1.8..3.3V User I/O, SPI/GPIO3...7, UART A, UART B, TWI (I2C compatible) PPS & TimeMark, and GPIO0/ANTFLAG. The module is labeled NV08C-CSM and includes a TCXO and RTC XTAL component.

Це автономне рішення значно спрощує розгортання систем RTK, однак має вищу вартість: орієнтовна ціна модуля становить приблизно 1300 доларів США (дані замовлення з Китаю).

а повний набір обладнання — приблизно 900 доларів (станом на момент запуску проєкту).

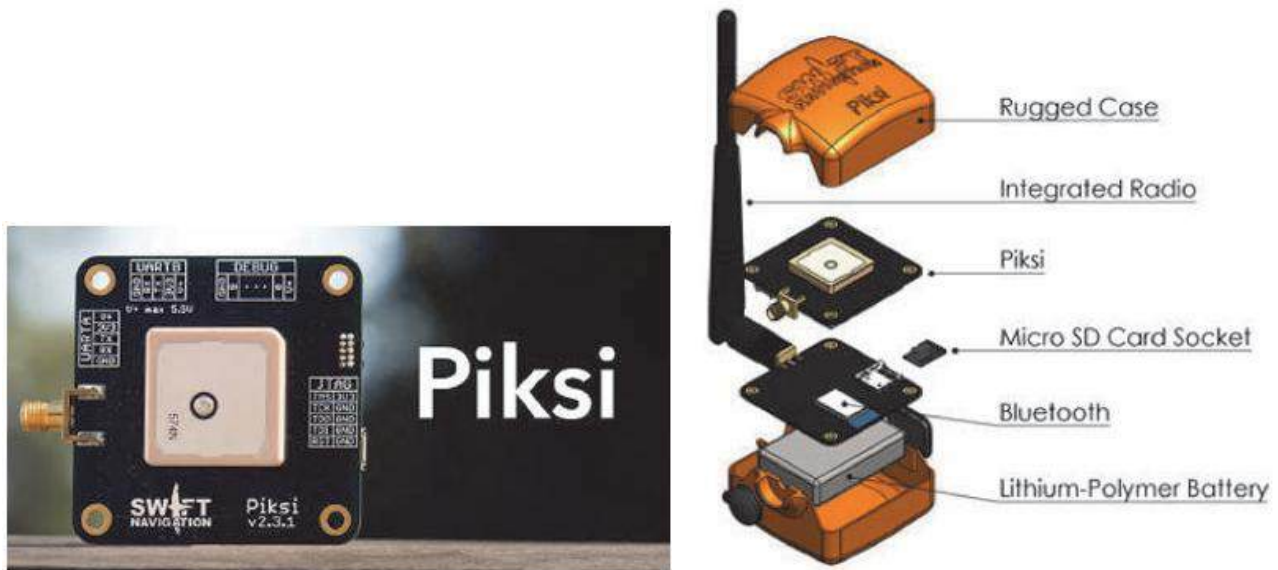


Рис. 7.2.9 Модуль RTK — Piksi

Серед відомих прикладів реалізації високоточного позиціонування для БПЛА вирізняється компактна система Reach RTK, побудована на сучасному навігаційному модулі U-blox NEO-M8T. Розміри плати становлять усього 26×36 мм (рис. 7.2.10), але при цьому вона підтримує одразу кілька супутникових систем: GPS, GLONASS, BeiDou, SBAS (WAAS, EGNOS, MSAS), а також готова до інтеграції з Galileo. Приймач розрахований на 72 канали з частотою оновлення до 18 Гц.

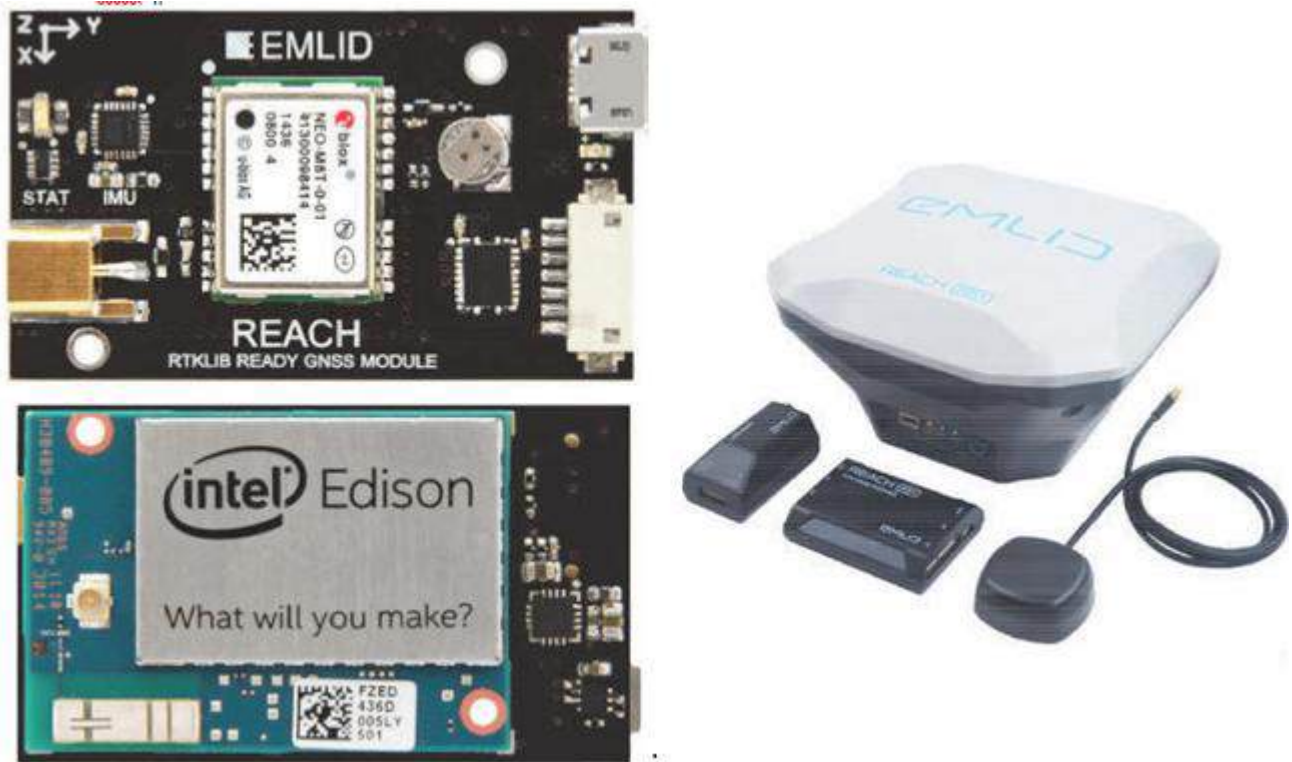


Рис. 7.2.10 Плати та повний комплект системи Reach RTK

Для обробки навігаційної інформації використовується потужний процесор Intel Edison (двоядерний, 500 МГц), що дозволяє реалізовувати RTK-обчислення без необхідності зовнішньої обробки. Передача даних та управління здійснюється через різні інтерфейси: I2C, UART, GPIO, USB OTG, а також бездротові канали Bluetooth і Wi-Fi.

Повна комплектація для застосування на безпілотах — Reach UAV RTK kit — включає базову станцію Reach RS+, рухомий приймач Reach M+, антену Tallysman TW4721 (багатосистемна, високоточна), а також радіомодуль LoRa, що забезпечує передавання поправок між станціями. Орієнтовна вартість комплекту — 1242 долари США.

Запропоновані підходи до реалізації бюджетної RTK-системи

Як свідчить аналіз сучасних рішень, RTK-навігаційні комплекти, доступні на ринку, хоча й ефективні, мають високу вартість, що ускладнює їх широке впровадження у сільськогосподарське виробництво або освітні проєкти. Повнофункціональні системи коштують щонайменше 1200 доларів США, хоча за суттю RTK можна реалізувати на більш доступному обладнанні.

Приймачі, які підтримують передачу «сирих» супутникових даних (наприклад, U-blox NEO-M8T) є значно доступнішими — у 2019 році модуль цього типу коштував близько \$79, а рекомендована антена для RTK-рішень — близько \$75.

У цьому контексті пропонується створити власну бюджетну RTK-систему для високоточного супутникового позиціонування, здатну забезпечити сантиметрову точність визначення координат сільськогосподарської техніки. Така система може бути реалізована із використанням бібліотеки з відкритим кодом RTKLIB, яка підтримує обробку «сирих» супутникових даних.

Суть системи полягає у тому, що два приймачі GPS використовуються як рільник (rover) та базова станція. Один із них встановлюється на рухомому об'єкті (наприклад, тракторі), інший — на стаціонарному пункті (будівля, щогла або опора в полі). Кожен з елементів системи повинен мати:

- Приймач **U-blox NEO-M8T**, що підтримує роботу з GPS/QZSS, GLONASS, BeiDou, SBAS та Galileo (рис. 7.2.11). Він здатен обробляти сигнали з 72 каналів на частоті до 18 Гц і є оптимальним вибором для реалізації RTK.
- Радіомодем для передачі поправок між базовою станцією та рільником у реальному часі.
- GNSS-антену, рекомендовану для RTK — наприклад, Tallysman TW3440, яка забезпечує стабільний прийом сигналу та низький рівень багатопроменевих завад.

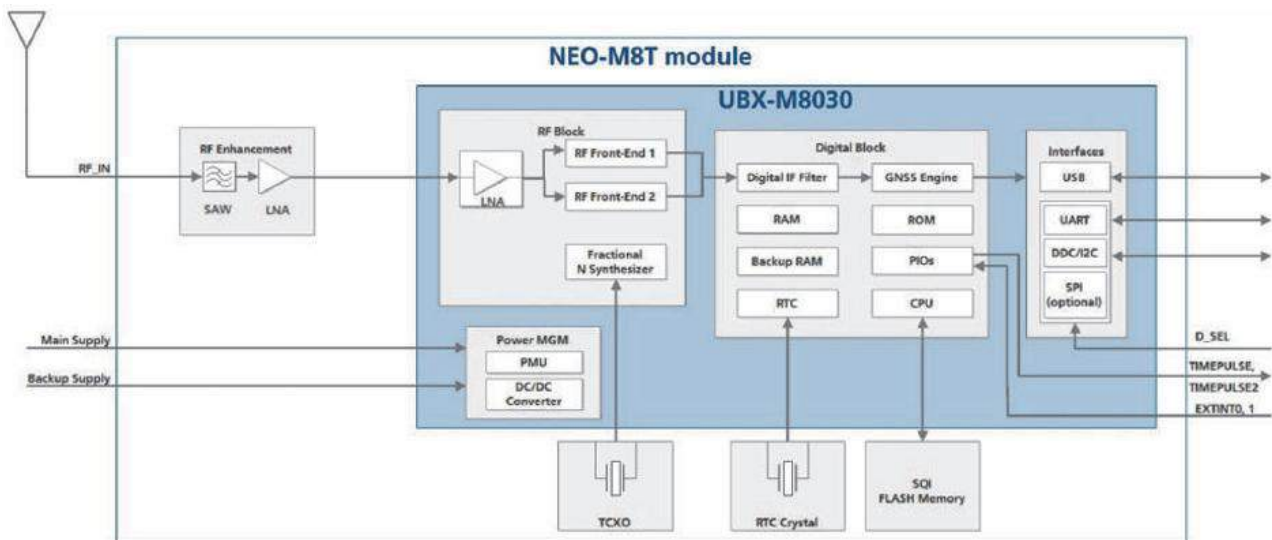


Рис. 7.2.11 Внутрішня структура навігаційного приймача NEO-M8T

Запропонований підхід дозволяє знизити вартість системи у кілька разів порівняно з комерційними наборами, зберігаючи при цьому необхідний рівень точності. Така платформа може бути використана як у реальних умовах агровиробництва, так і в рамках лабораторних занять, курсового проектування або інженерних стартапів.

У межах створення бюджетної системи точного позиціонування пропонується розробити спеціалізовану друковану плату, основою якої стане навігаційний приймач U-blox NEO-M8T. Передбачено, що до складу цієї плати також входять:

- резервна батарея живлення типу CR2032 для збереження налаштувань у разі відключення живлення,
- EEPROM-пам'ять для збереження конфігураційних даних,
- роз'єм SMA для підключення зовнішньої GNSS-антени,
- а також елементи живлення антени (3,3 В) безпосередньо від плати.

Сирі супутникові дані у бінарному протоколі u-blox, сумісному з RTKLIB, передаватимуться на комп'ютер, планшет або смартфон через стандартний інтерфейс, наприклад, miniUSB. Для обробки таких даних можна використовувати безкоштовну Windows-версію RTKLIB, що має зручний графічний інтерфейс (GUI). Це дозволяє в режимі реального часу отримувати сантиметрові координати, які відображаються на екрані користувача.

Якщо використати Windows-планшет, то на його основі можна реалізувати бюджетний навігатор або курсоуказувач для сільськогосподарської техніки — рішення, яке не поступається комерційним аналогам, але в рази дешевше.

Крім передачі даних на комп'ютер, можливе й інше рішення: створення повноцінного автономного GPS/GLONASS-приймача з RTK-обробкою безпосередньо на платі. Це дасть змогу використовувати такий модуль у системах точного позиціонування для безпілотних літальних апаратів, колісних мобільних роботів, або автономних платформ, які повинні рухатись по заданій траєкторії без участі оператора.

Для реалізації цього підходу пропонується доопрацювати електричну схему пристрою, додавши 32-розрядний мікроконтролер серії STM32F4 із вбудованим співпроцесором FPU. Написання програмного забезпечення до такого модуля можливе з використанням бібліотеки RTKLIV, адаптованої для вбудованих систем.

Мікроконтролери STM32 з ядром ARM Cortex-M4, завдяки наявності інструкцій цифрової обробки сигналів (DSP) та апаратного блоку обчислень з плаваючою точкою (FPU), чудово підходять для реалізації RTK-алгоритмів. Крім того, архітектура STM32 дозволяє поєднати високу обчислювальну потужність із низьким енергоспоживанням, що особливо важливо для мобільних або автономних застосувань.

Оптимальною платформою для створення прототипу може стати плата STM32F4DISCOVERY, побудована на мікроконтролері STM32F407VGT6 (ядро Cortex-M4, тактова частота 168 МГц, 1 МБ Flash-пам'яті та 192 КБ RAM). Така плата має достатні ресурси для реалізації всіх обчислень, необхідних для обробки RTK-даних у реальному часі.

Для початкового налаштування та конфігурування мікроконтролера доцільно скористатися програмою CubeMX — офіційним генератором ініціалізаційного коду від компанії STMicroelectronics. CubeMX дозволяє швидко налаштувати периферію, згенерувати шаблон проєкту з підключеними бібліотеками, який можна далі редагувати у середовищі Keil μVision або STM32CubeIDE (на базі Eclipse), яке останнім часом набуває популярності.

7.3 МЕТОДИКА ВИБОРУ СИСТЕМИ ПОЗИЦІОНУВАННЯ ІНТЕЛЕКТУАЛЬНОЮ СИСТЕМОЮ КЕРУВАННЯ МОБІЛЬНОГО СІЛЬСЬКОГОСПОДАРСЬКОГО РОБОТА

Останні десятиліття ознаменувалися стрімким розвитком комп'ютерної техніки, що відкрило нові можливості для створення та впровадження різноманітних інтелектуальних систем управління (ISU). Такі системи можуть базуватись на різних підходах — експертних знаннях, глибинному навчанні нейронних мереж, нечіткій логіці або ж гібридних моделях, що поєднують ці методи. Вони дозволяють імітувати інтелектуальну діяльність людини під час виконання складних завдань, зокрема розпізнавання образів і ситуацій, що створює передумови для автономного керування технікою.

У сільському господарстві безпілотні апарати вже використовуються, наприклад, у теплицях, однак робота у відкритому полі потребує інших підходів до навігації, оскільки прокладення маршруту безпосередньо на ґрунті часто недоцільне або неможливе.

Для реалізації автоматичного керування мобільним роботом (MR) необхідно вирішити низку завдань, з яких одне з ключових — навігація, тобто визначення просторових параметрів: положення, швидкості та орієнтації рухомої платформи.

Останніми роками у сільському господарстві активно впроваджуються роботизовані технічні системи (РТС), зокрема мобільні роботи, які потребують ефективних систем позиціонування (СП). Такі СП мають забезпечувати визначення координат у режимі реального часу з можливістю передачі даних на сервер для побудови карти руху РТС.

Бажаною є також підтримка позиціонування через стільникові мережі мобільного зв'язку, що дозволяє охопити великі площі. Для цього на РТС встановлюються маяки з автономним живленням, які забезпечують точне позиціонування (з точністю не гірше ± 5 см). Крім того, доцільно комплектувати РТС набором сенсорів, що дозволяє формувати просторову картину навколишнього середовища відповідно до завдань автономного управління — забезпечуючи точне переміщення за заданою траєкторією.

Існує кілька основних схем позиціонування автономних пристроїв:

- Глобальна навігація — базується на визначенні абсолютних координат РТС на земній поверхні;
- Локальна навігація — координати визначаються відносно розміщених у полі сигнальних маяків;
- Персональна навігація — використовується для позиціонування окремих частин РТС, наприклад, маніпуляторів відносно навколишніх об'єктів;

Гібридна навігація — поєднує кілька методів та засобів позиціонування.

Зазвичай персональна навігація використовується для невеликих РТС, що працюють у локальному середовищі, тоді як глобальна — для великих машин, що переміщуються на значні відстані.

Глобальні системи позиціонування (GPS, GNSS тощо) особливо ефективні у відкритому просторі. Хоча їх можливо застосовувати й у закритих приміщеннях, практична реалізація ускладнена технічними обмеженнями.

Сучасні аграрні машини — трактори, комбайни, навантажувачі — вже часто оснащуються однією або кількома навігаційними системами. Це дозволяє не лише автоматизувати рух, але й будувати карти посівів для подальшої обробки, наприклад, роботи польових роботів для сівби або прополювання.

Іншим важливим критерієм для класифікації СП є метод отримання координат:

- Пасивна система позиціонування: координати розраховуються на основі зовнішніх сигналів (наприклад, супутникові навігаційні системи або радіомаяки), при цьому сам пристрій не випромінює сигнал;
- Активна система позиціонування: РТС має власні сенсори — акселерометри, гіроскопи, одометри тощо — які генерують сигнали (радіохвилі, ультразвук, оптика), фіксують їх відбиття і на основі цього визначають координати.

На основі аналізу літератури були визначені основні переваги й недоліки різних систем позиціонування (табл. 7.3.1)

Таблиця 7.3.1 Системи позиціонування

№	Тип системи	Переваги	Недоліки
Пасивні			
1	Орієнтація за попередньо розставленими маяками	Надійність при використанні радіочастотного випромінювання – RFID (радіочастотна ідентифікація). Точність – 2 см, зона покриття – до 1000 м ² , дальність зчитування – 4...12 м. Технології Bluetooth і Wi-Fi забезпечують точність до 10 см.	Малий радіус дії. Не враховуються перешкоди. Системи з Bluetooth і Wi-Fi придатні лише для закритих приміщень. Потреба в обслуговуванні маяків. Неможливість локального позиціонування об'єктів.
2	Супутникові	Точність – 1...5 м, радіус покриття – до 2 км. Велика зона покриття. Висока надійність визначення координат. Зручність використання приймачів СНС у складі системи управління МР. Використання режиму RTK (Real Time Kinematic) у системах ГЛОНАСС і GPS дозволяє підвищити точність позиціонування до 10...25 мм.	Низька базова точність без RTK. Залежність від погодних, природних та технічних чинників. Складність обробки даних. Обмеженість зон доступності сигналу.
Активні			
3	Інерціальні навігаційні системи (ІНС) без аналізу зовнішнього середовища	Автономність, помехозахищеність, можливість повної автоматизації процесів навігації. Незначні похибки у визначенні координат та швидкості. Висока швидкість передачі даних.	Платформні ІНС – габаритні, енерговитратні та дорогі. Безплатформні ІНС мають низьку точність, накопичують помилки, неефективні при різких змінах швидкості.
4	ІНС з аналізом зовнішнього середовища (датчики світла, далекоміри, датчики сили)	Збір великої кількості даних. Дальність по Bluetooth – до 100 м. Можливість використання GPS/ГЛОНАСС.	Низька точність (до 1 м).
5	Магнітометрія	Простота та достатня надійність. Точність – 3...10 см.	Потребує попередньої калібровки простору. Точність залежить від наявності магнітів (моторів, динаміків) на роботі.
6	Системи з далекомірами (оптичні – лідари)	Точність – до 10...15 мм, дальність – до 80 м. Швидкість – до 75 сканів/с.	Низька точність у тумані, диму, складному рельєфі. Потребують великих обчислювальних ресурсів.
7	Генератори радіо- або інших сигналів (УЗ, ІК датчики)	Точність ІК лазера – до 4 см. RTLS-системи на базі ультразвукових датчиків працюють за принципом джерело-приймач. У сприятливих умовах точність – до 3,5 см.	Перешкоди від сонячного світла, висока вартість ІК-лазерів. Для визначення 3D-положення потрібні щонайменше 4 приймачі. Потреба в заздалегідь встановлених сенсорах.

№	Тип системи	Переваги	Недоліки
8	Системи на основі відеокамер (1, 2 або більше)	Простота, низька вартість, надійність. Висока точність – 10...20 мм.	Потрібні декілька високоякісних камер при поганому освітленні. Висока вартість HD-камер.
9	Одометрія	Простота та низька вартість. Візуальна одометрія не залежить від ковзання коліс, може працювати в непередбаченому середовищі, пасивна й універсальна. Висока точність і швидкість роботи алгоритму.	Колісна одометрія неточна на пересіченій місцевості через ковзання. Візуальній одометрії потрібен потужний комп'ютер. Об'єкт має бути у прямій видимості. Накопичення похибок.

Системи позиціонування на основі супутникових навігаційних систем (СНС) вважаються надійними за умов ідеального функціонування. Однак на точність позиціонування впливають численні чинники як природного (погодні умови, рельєф), так і технічного характеру (якість прийому сигналу, конструкція антени тощо). Запровадження режиму RTK у СП на базі СНС дозволяє суттєво підвищити точність навігації, проте вимагає підвищених обчислювальних потужностей та вдосконаленого програмного забезпечення в складі системи керування мобільним роботом (МР).

Системи, що здійснюють позиціонування за мітками (маяками) різного типу, мають високий рівень надійності та прийнятну точність при вирішенні навігаційних завдань. Водночас вони суттєво обмежені за площею застосування та схильні до помилок у разі появи несподіваних перешкод на шляху. Використання технологій Bluetooth і Wi-Fi можливе лише у закритих приміщеннях, а тому непридатне для польових умов, у яких переважно працюють сільськогосподарські МР.

Серед активних СП простота конструкції та низька вартість вирізняє одометри. Зокрема, візуальні одометри позбавлені механічних недоліків (наприклад, прослизання коліс на пересіченій місцевості), проте вимагають використання потужних комп'ютерів для обробки зображень, що підвищує вартість системи позиціонування. Крім того, такі системи залишаються чутливими до умов освітлення та потребують прямої видимості об'єкта.

Використання інерціальних навігаційних систем (ІНС) без аналізу зовнішнього середовища в управлінні сільськогосподарськими МР є недоцільним через велику кількість обмежень. Основний недолік полягає в накопиченні помилок під час роботи, що особливо критично для роботів невеликого розміру.

Системи на основі ІНС з аналізом зовнішнього середовища можуть бути застосовані на невеликих площах або в тепличних умовах, однак мають суттєвий недолік — невисоку точність, що обмежує їх використання для точних навігаційних завдань у полі.

Найбільше поширення в сільському господарстві отримали системи позиціонування (СП), які використовують лідари, відеокамери та генератори сигналів (радіо-, ультразвукові, інфрачервоні датчики). Проте ці СП також мають

низку недоліків, зазначених у таблиці: зниження точності в умовах обмеженої видимості, вплив різноманітних перешкод на точність навігації, необхідність використання потужних обчислювальних систем тощо. Перевагою лідарів є можливість їх ефективного застосування у мобільних роботах (МР), що працюють на пересіченій місцевості.

Таким чином, використання лише одного з описаних у таблиці методів у складі СП сільськогосподарського МР не дозволяє в повному обсязі вирішувати навігаційні завдання. Необхідне поєднання кількох методів для забезпечення їх комплексного вирішення.

З метою підвищення точності навігації та якості роботи МР, на нього встановлюють декілька систем позиціонування — іноді їх кількість досягає п'яти. У сучасних умовах жоден із методів вимірювання навігаційних параметрів рухомого об'єкта (координат і просторового положення, лінійної швидкості та прискорення) окремо не здатен забезпечити систему автоматичного керування МР достатньо надійною інформацією. Тому необхідним є одночасне використання різних СП. Таке поєднання фактично формує багатофункціональний вимірювально-навігаційний комплекс, що складається з окремих технічних засобів, які вимірюють одні й ті самі величини різними методами, та інтегрується в систему керування МР, яка здійснює узгоджену обробку отриманої інформації та формує команди на управління комплексом.

Отже, система управління мобільним роботом має визначати, яку саме СП доцільно використовувати в конкретних умовах для обчислення навігаційних параметрів під час руху МР. Складність задачі вибору СП під час виконання сільськогосподарських робіт зумовлена тим, що системи, що входять до складу керування МР, функціонують на основі різних фізичних принципів, а також — складністю, непередбачуваністю та унікальністю умов, в яких виконуються сільськогосподарські операції. Навіть в межах одного великого поля одна і та сама СП може давати різні результати залежно від рельєфу місцевості, стану ґрунту в певний момент, погодних умов тощо. У зв'язку з цим мобільний робот повинен бути оснащений інтелектуальною системою управління (ІСУ).

Метою даної глави є розробка та впровадження методики вибору системи позиціонування ІСУ мобільного сільськогосподарського робота.

Методика вибору сенсорної підсистеми інформаційно-керуючої системи мобільного сільськогосподарського робота

Під час навігації мобільного робота виникає низка задач, які потребують комплексного вирішення. Серед них основними є:

- визначення поточного положення (локальних координат) робота;
- керування рухом відповідно до заданої траєкторії;
- виявлення перешкод та визначення їх локальних координат;
- забезпечення дотримання заданого маршруту;
- сканування навколишнього простору;
- побудова карти місцевості та прив'язка до неї.

Сенсорна підсистема (СП), що входить до складу інформаційно-керуючої системи мобільного робота, має забезпечити високу якість виконання зазначених завдань. У разі наявності кількох СП у складі одного робота, вибір відповідної підсистеми для виконання конкретного завдання покладається на систему управління рухом мобільного робота.

Під час вибору СП, яка повинна забезпечувати навігацію мобільного робота в процесі виконання сільськогосподарських операцій, доцільно використовувати систему критеріїв. Основними серед них є:

- показники, що характеризують здатність до визначення власного положення, виявлення та локалізації перешкод, побудови карти місцевості та орієнтації на ній;
- показники, які визначають ефективність дотримання заданого маршруту руху;
- показники, що враховують роботу в режимі реального часу при локалізації та управлінні переміщенням робота;
- точність визначення координат положення мобільної платформи;
- якісні показники, що характеризують ефективність прийняття рішень при виборі СП для керування в заданих умовах;
- витрати, пов'язані з реалізацією навігаційних задач засобами тієї чи іншої СП.

Необхідний рівень «інтелектуальності» автоматизованої системи управління суттєво залежить від умов, в яких буде експлуатуватись технічний засіб, оснащений цією системою.

Умовно середовища, в яких застосовуються безпілотні роботизовані технічні системи (РТС), можна поділити на три типи.

Перша категорія охоплює добре організовані та стандартизовані середовища — наприклад, машинобудівні чи приладобудівні виробництва. Технологічні процеси в таких умовах зазвичай чітко регламентовані, можливість виникнення нестандартних ситуацій мінімальна, а реакції на них — заздалегідь прописані. Відповідно, автоматизованим системам управління (АСУ) тут не потрібен високий рівень інтелектуальності. До того ж подібні виробничі середовища можуть бути відносно легко трансформовані з мінімальними затратами для підвищення рівня їх структурованості.

Друга категорія включає середовища, які потенційно піддаються організаційним змінам, проте такі трансформації потребують значних ресурсів — фінансових, технічних або кадрових. Прикладами можуть слугувати гірничодобувна й харчова промисловість, будівництво, а також деякі сектори агровиробництва.

До **третьої категорії** належать динамічні, складні для формалізації середовища, де стандартизація процесів або недоцільна, або неможлива в принципі. Це середовища зі змінними, часто непередбачуваними умовами: дослідження морського дна, поверхні інших планет, медицина, лісозаготівля або ж певні галузі сільського господарства. Тут необхідні нестандартні підходи до

прийняття рішень, оснований не на класичних алгоритмах, а на адаптивному інтелектуальному управлінні.

У сільському господарстві, зважаючи на специфіку експлуатаційних умов (великі розрізнені площі, сезонність робіт, варіативність погодних умов, взаємодія з живими організмами), можливості використання технічних засобів із простими керуючими системами обмежені. У таких умовах доцільно застосовувати інформаційно-керуючі системи (ІКС) з інтелектуальними функціями, здатними адаптуватися до непередбачуваних ситуацій і приймати рішення щодо вибору відповідної сенсорної підсистеми (СП) для навігації мобільного робота (МР).

Складність, мінливість і невизначеність умов функціонування аграрних МР унеможливають застосування виключно кількісних критеріїв під час вибору СП. Тому актуальним є використання методів штучного інтелекту (ШІ) та нечітких моделей, зокрема багатокритеріального аналізу альтернатив на основі нечіткого відношення переваг.

Для оцінювання ефективності сенсорних підсистем, які виконують навігаційні функції у складі ІКС МР, пропонується використовувати чотири групи критеріїв:

1. Точність локалізації: визначення власного положення, виявлення та локалізація перешкод, створення карти місцевості та орієнтація на ній.
2. Реальність часу: здатність системи працювати в режимі реального часу при навігації.
3. Якість рішень: надійність і доцільність обраної СП в заданих умовах.
4. Ресурсна ефективність: витрати ресурсів (енергії, обчислювальної потужності, вартості) на реалізацію навігаційних завдань.

Очікується, що раціональна комбінація доступних СП дозволить покрити весь спектр навігаційних завдань і водночас підвищити загальну функціональність ІКС мобільного робота.

У разі коли неможливо точно виміряти ефективність кожної СП, доцільним є використання якісного опису альтернатив у вигляді відношень переваги, що дозволяє врахувати експертні оцінки та контекстні фактори.

Прикладом такої системи є сільськогосподарський робот для знищення бур'янів, типу AVO (Ecorobotix), який оснащений модулями GPS RTK, лідаром, ультразвуковими датчиками та відеокамерами. Його система управління враховує характеристики поля, погодні умови, параметри рослин, визначаючи, до якої категорії належить об'єкт (бур'ян чи культурна рослина). У такому випадку для вибору СП найбільш доцільним є застосування якісних критеріїв оцінки ефективності.

Пропонується алгоритм вибору оптимальної сенсорної підсистеми (СП), який базується на багатокритеріальному виборі альтернатив на основі нечіткого відношення переваг.

Алгоритм оцінювання ефективності та вибору оптимальної СП для розв'язання навігаційних задач під час керування мобільним роботом (МР):

1. Встановлення вхідних даних.

1. Задати множину альтернатив СП для реалізації навігаційної задачі:

$$Y = \{y_p\}, p = \overline{1, P}$$

2. Визначити множину критеріїв (показників) для оцінювання СП:

$$Z = \{z_t\}, t = \overline{1, T}.$$

3. Задати нечітке відношення важливості між

показниками: $\mu: Z \times Z \rightarrow [0,1]$, де $\mu(z_t, z_l)$ — це ступінь, з якою показник z_t вважається не менш важливим, ніж показник z_l , де $z_t, z_l \in Z$.

4. Для кожного показника задати нечітке відношення переваги на множині альтернатив СП Y , тобто функцію:

$\beta: Y \times Y \times Z \rightarrow [0,1]$, значення $\beta(y_p, y_j, z_t)$ — це ступінь переваги альтернативи y_p над альтернативою y_j за показником z_t .

2. Проведення обчислень у такій послідовності:

1. Визначити нечітку підмножину недомінованих альтернатив для фіксованого показника $z_t, p = \overline{1, P}$, для всіх $p, j (p \neq j)$ за формулою:

$$\beta^{HD}(y_p, z_t) = 1 - \sup_{y_j \in Y} [\beta(y_j, y_p, z_t) - \beta(y_p, y_j, z_t)]. \quad (1)$$

2. Знайти нечітке відношення переваги, індуковане на множині Y за функціями $\beta^{HD}(y_p, z_t), \mu(z_t, z_l)$ формулою:

$$\rho(y_p, y_j) = \sup_{z_t, z_l \in Z} \min\{\beta^{HD}(y_p, z_t), \beta^{HD}(y_j, z_l), \mu(z_t, z_l)\}. \quad (2)$$

3. На множині (Y, ρ) для всіх $p, j (p \neq j)$ виділити нечітку підмножину недомінованих альтернатив за формулою:

$$\bar{\rho}^{HD}(y_p) = 1 - \sup_{y_j \in Y} [\rho(y_j, y_p) - \rho(y_p, y_j)] \quad (3)$$

4. Скоригувати підмножину $\bar{\rho}^{HD}(y_p)$ за формулою:

$$\rho^{HD}(y_p) = \min\{\bar{\rho}^{HD}(y_p), \rho(y_p, y_p)\} \quad (4)$$

5. Оптимальною вважається та альтернатива СП, яка має найвищу ступінь недомінованості:

$$\rho^{HD}(y_p) \rightarrow \max$$

Якщо кілька альтернатив мають однакову максимальну ступінь недомінованості, вибір може бути здійснений на основі додаткових міркувань.

Результати

Методичний приклад. Інформаційно-керуючий системі (ІКС) мобільного робота (МР) сільськогосподарського призначення (типу AVO (Ecorobotix)) необхідно обрати оптимальну сенсорну підсистему (СП) для розв'язання навігаційної задачі, пов'язаної з управлінням рухом робота. Робот переміщується по полю зі складним рельєфом та виконує операції з видалення бур'янів. Погодні умови – відсутність опадів, ґрунт має середню вологість.

Умова задачі. Нехай на мобільному роботі встановлено кілька альтернативних СП. Множина альтернатив:

$Y=\{y_1, y_2, y_3, y_4\}$, де: y_1 – супутникова навігаційна система GPS, що працює в режимі RTK; y_2 – відеокамери; y_3 – RFID-мітки; y_4 – лідар.

Оцінювання кожної альтернативи здійснюється за множиною показників:

$Z=\{z_1, z_2, z_3, z_4\}$, де: z_1 – точність; z_2 – швидкість виконання навігаційного завдання; z_3 – витрати ресурсів на розв’язання задачі; z_4 – достовірність (правильність) прийнятого рішення.

Відносна важливість показників задана за допомогою функції належності нечіткого відношення важливості між показниками – $\mu(z_p, z_j)$.

	z_1	z_2	z_3	z_4
z_1	1	0,4	0,6	0
z_2	1	1	0,8	1
z_3	0,2	1	1	1
z_4	0,8	0	1	1

Також задано нечіткі відношення переваги між альтернативами СП для кожного з показників оцінювання.

	y_1	y_2	y_3	y_4		y_1	y_2	y_3	y_4		
z_1 :	y_1	1	0,8	1	0	z_2 :	y_1	1	0,1	0,5	0,3
	y_2	0	1	0,2	1		y_2	0,8	1	0,8	0,8
	y_3	0	0,8	1	0		y_3	0,5	0,3	1	0
	y_4	0	0	1	1		y_4	0,8	0	0	1
	y_1	y_2	y_3	y_4		y_1	y_2	y_3	y_4		
z_3 :	y_1	1	0	0,8	0	z_4 :	y_1	1	1	0,9	0
	y_2	0	1	0	0		y_2	0	1	1	1
	y_3	0,1	0	1	0,4		y_3	0,4	0	1	0
	y_4	0	1	1	1		y_4	0	0	0	1

Розв’язання.

Для розв’язання задачі застосуємо алгоритм, наведений раніше.

Визначаємо нечіткі підмножини невідомінованих альтернатив для різних показників згідно з формулою (1):

	y_1	y_2	y_3	y_4	
z_1	1	0,2	0	0	
$\beta^{\text{нд}}(y_p, z_t)$:	z_2	0,3	1	0,5	0,2
	z_3	0	0	0,3	1
	z_4	1	0	0	0

Обчислюємо індуковані нечіткі відношення переваги згідно з формулою (2):

	y_1	y_2	y_3	y_4	
$\rho(y_p, y_j):$	z_1	1	0,4	0,4	1
	z_2	1	1	0,5	0,8
	z_3	0,5	0,5	0,5	0,5
	z_4	1	1	0,5	1

Згідно з формулою (3) визначаємо нечітку підмножину невідомінованих альтернатив:

	y_1	y_2	y_3	y_4
$\bar{\rho}^{нд}(y_p)$:	0,4	0,8	1	1

За допомогою формули (4) коригуємо цю підмножину

$$\rho^{нд}(y_p): \begin{matrix} y_1 & y_2 & y_3 & y_4 \\ 0,4 & 0,8 & 0,5 & 1 \end{matrix}$$

Альтернатива, що забезпечує максимум функції (4), — це y_4 . Отже, оптимальною сенсорною підсистемою для розв'язання навігаційної задачі управління рухом мобільного робота в заданих умовах є лідар.

Висновок

Було проведено аналіз основних сенсорних підсистем, які застосовуються в мобільних роботах сільськогосподарського призначення, визначено їхні переваги та недоліки. Встановлено, що для підвищення ефективності розв'язання навігаційних задач у мобільних роботах встановлюють кілька різних СП — від 2 до 5. За наявності декількох СП у складі робота, рішення щодо вибору конкретної СП для навігації покладається на інформаційно-керуючу систему (ІКС) рухомого МР.

Складність, непередбачуваність і унікальність умов роботи сільськогосподарських мобільних роботів унеможливають застосування виключно кількісних показників для вибору СП в процесі їх функціонування. Тому для пошуку оптимальної СП ІКС МР, яка максимально підходила б для конкретних умов експлуатації, пропонується використовувати методи штучного інтелекту.

Було сформульовано постановку задачі та запропоновано методику вибору СП ІКС МР, що базується на багатокритеріальному виборі альтернатив із використанням нечіткого відношення переваг. Методика ґрунтується на описі вихідної інформації у вигляді відношень переваг на множині альтернатив та багатокритеріальному виборі альтернатив на основі нечітких відношень.

В якості рішення задачі вибору оптимальної СП приймається альтернатива з найбільшою ступеню невідомості.

Розроблена методика була застосована для вибору оптимальної СП ІКС мобільного робота сільськогосподарського призначення (типу AVO (Ecorobotix)) для керування рухом цього робота.

7.4 УДОСКОНАЛЕННЯ ЕЛЕМЕНТІВ СИСТЕМИ ПАРАЛЕЛЬНОГО ВОДІННЯ ПРИ ВИКОНАННІ СІЛЬСЬКОГОСПОДАРСЬКИХ РОБІТ

Останніми роками вітчизняний ринок аграрної техніки активно поповнюється електричними системами паралельного водіння. Вони є економічно вигіднішою альтернативою гідравлічним аналогам. Перевагою електричних систем є їхня простота інтеграції: монтаж не потребує втручання у штатні механізми або гідросистеми сільськогосподарської машини.

Основне призначення систем паралельного водіння — підвищення швидкості виконання польових робіт, зменшення супутніх витрат і підвищення загальної продуктивності. Як приклад розглянемо автоматизовану систему керування рульовим управлінням Sveaverken F100.

Ця система поєднує в собі GNSS та RTK технології, забезпечуючи високу точність — до 2,5 см між проходами незалежно від рельєфу поля. З початку 2024

року заплановане розширення функціоналу: зокрема, підтримка контролю висіву, внесення рідких і твердих добрив, а також хімікатів. Передбачена сумісність з обладнанням, що підтримує протокол ISOBUS — універсальний стандарт обміну даними між тракторами й причіпними агрегатами різних виробників через єдиний дисплей у кабіні оператора.

Основні функції системи Sveaverken F100:

- Відображення відхилення — реальний показник відхилення від навігаційної лінії;
- Відображення швидкості руху — реальна швидкість з можливістю вибору одиниць виміру;
- Підрахунок обробленої площі — автоматичний або ручний режим;
- Підтягування навігаційної лінії до поточного положення — центроване вирівнювання шляху;
- Зміна напрямку навігаційної лінії — регулювання довжини та кута;
- Корекція відхилень — зсув лінії ліворуч або праворуч для компенсації помилок калібрування;
- Сигнал про завершення лінії — звукове попередження при наближенні до краю гону;
- Режим роботи з однією або кількома лініями — для зручності перемикання між завданнями;
- Режим прямолінійної навігації — рух по прямих;
- Режим криволінійної навігації — рух за кривими або кільцевими лініями;
- Передача навігаційних даних онлайн — можливість віддаленого доступу;
- Компенсація рельєфу місцевості — забезпечення стабільного ходу на ухилах до 35° та нахилах до 30°, включаючи роботу в рисових полях;
- Передача координат за протоколом NMEA — точна передача позиційних і швидкісних даних (за наявності відповідного кабелю).

Серед сумісної техніки — трактори виробництва Мінського тракторного заводу. У базовій комплектації вони оснащені механічними гідравлічними розподільниками (пропорційними, трипозиційними). Для реалізації автономного режиму керування необхідно оновити гідросистему машини, встановивши електронно керовані гідророзподільники та окремий блок керування ними (рис. 7.4.1).

Подібне технічне оновлення доцільно впроваджувати на потужних, енергонасичених машинах, які виконують широкий спектр робіт і потребують високої точності.

Для заміни штатного гідравлічного розподільника необхідно підібрати сумісний аналог, що відповідає конкретній транспортно-технологічній машині. У більшості випадків доцільно застосовувати секційні, трьохпозиційні, гідроелектричні розподільники.

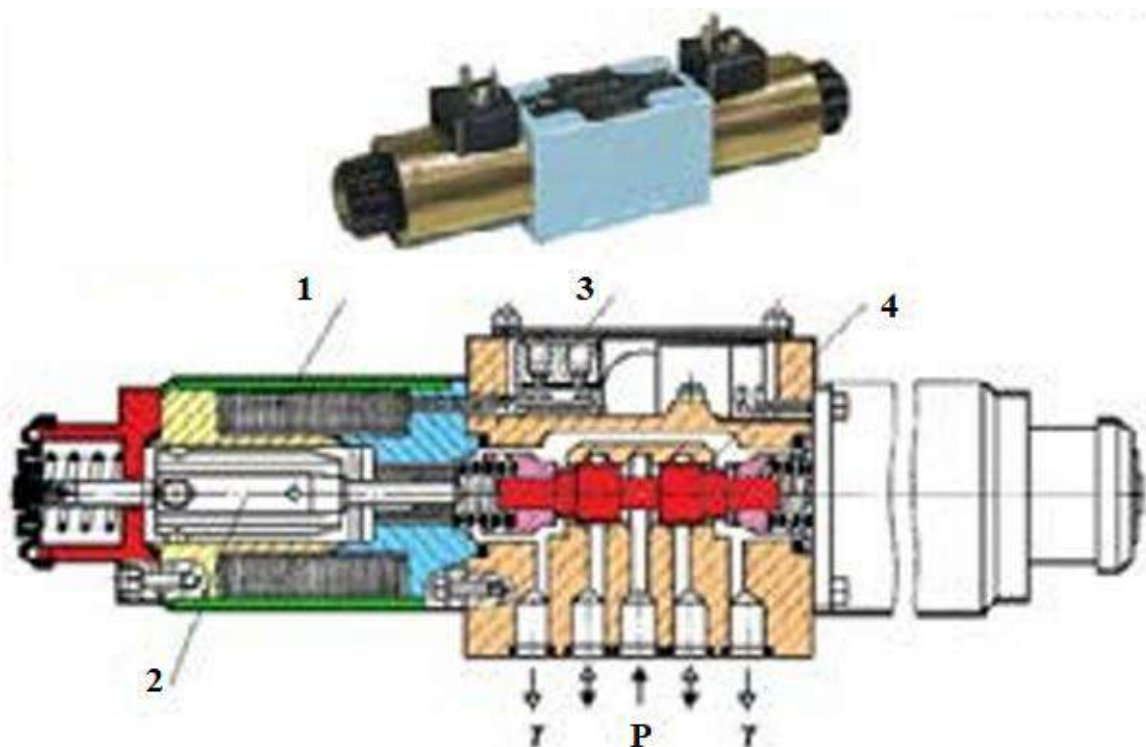


Рис. 1 Гідророзподільник із електромагнітним управлінням.
Де: 1 – котушка, 2 – якір, 3 – клемна коробка, 4 – золотник

Витрата робочої рідини Q_p через золотник розподільника розраховується за формулою:

$$Q_p = \mu_p \cdot S_p \cdot \sqrt{\frac{2 \cdot \Delta p}{\rho}}$$

де: S_p — площа прохідного перерізу робочого отвору;
 μ_p — коефіцієнт витрати;
 Δp — перепад тиску;
 ρ — густина робочої рідини.

Існує кілька конструктивних варіантів виконання гідророзподільників:

- із одним або двома зворотними клапанами;
- без зворотних клапанів;
- у блочному виконанні — кришка та одна або дві робочі секції поєднані в єдиний блок.

Кількість секцій може варіюватися від 1 до 7. Такі розподільники призначені для керування потоком робочої рідини в гідравлічних системах.

Типові технічні характеристики:

- номінальна витрата: 50 л/хв;
- номінальний тиск: 6,3 / 12,5 / 16 МПа;
- робоча рідина: мінеральне масло з кінематичною в'язкістю від 6 до 800 мм²/с.

На ринку також представлені гідророзподільники провідних європейських виробників, таких як Duplomatic, Parker, Caproni, Rexroth. Вони широко

використовуються у різних галузях промисловості та відомі високою надійністю та ресурсом (таблиця 7.4.1).

Таблиця 7.4.1

Приклади гідророзподільників для модернізації сільськогосподарської техніки

№	Виробник	Тип розподільника	Кількість секцій	Номинальна витрата, л/хв	Номинальний тиск, МПа	Особливості
1	Duplomatic (Італія)	Пропорційний, з електронним керуванням	1–6	40–80	до 25	Висока точність, підтримка ISO 4401, інтеграція з PLC та CAN-bus
2	Parker (США)	Секційний гідророзподільник P70	1–7	до 60	21	Надійність у важких умовах, модульність конфігурації
3	Caproni (Болгарія)	Ручний/електричний секційний	1–6	45–55	16	Компактний дизайн, сумісність із середньою та легкою технікою
4	Bosch Rexroth (Німеччина)	Модульний M4-12	1–10	до 100	до 30	Підтримка CAN-шини, діагностика, автоматизоване керування
5	Hydrocontrol (Італія)	Секційний, з електрогідравлічним керуванням	1–8	40–70	25	Сумісність з ISOBUS-системами, можливість точного керування потоком

Примітки:

- Всі моделі розраховані на використання мінеральних масел з в'язкістю від 6 до 800 мм²/с.
- Для інтеграції в автономні та напівавтономні системи керування доцільно обирати моделі з електрогідравлічним або пропорційним керуванням.
- При встановленні важливо враховувати сумісність з електронікою системи паралельного водіння та навісним обладнанням.

Одним із ключових аспектів під час удосконалення гідравлічних систем залишається питання безпеки, надійності та ефективності впроваджених рішень. Встановлений окремо блок керування гідророзподільником повинен отримувати дані з датчиків тиску гідравлічної рідини, які розміщуються на вихідних патрубках розподільника та на зливних магістралях.

Таке технічне рішення необхідне для оперативного перекриття потоку рідини у разі виявлення порушення герметичності або аномального зростання тиску в контурах, що дозволяє запобігти потенційним механічним пошкодженням елементів машини або навісного обладнання.

7.5 ІНФОРМАЦІЙНЕ ТА ІНСТРУМЕНТАЛЬНЕ ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ ТЕХНОЛОГІЙ ДИФЕРЕНЦІЙОВАНОГО ВНЕСЕННЯ АГРОХІМІКАТІВ

У сучасному агропромисловому виробництві значну частку в системі живлення зернових культур займають азотні добрива, поряд із засобами захисту рослин. Проте, попри наявність сучасної агротехніки та передових підходів, практика показує низьку ефективність застосування агрохімікатів через недотримання дозування, помилки при внесенні або неадекватне планування робіт.

Актуальним напрямом досліджень стає розроблення методів та програмно-апаратного забезпечення для автоматизації процесів точного внесення агрохімікатів. Однією з ключових задач є оперативна та точна оцінка забезпечення культур елементами живлення (наприклад, азотом), для чого

ефективно використовуються дані з аерофотозйомки, включаючи дрони з мультиспектральними камерами.

Побудова карт-завдань для диференційованого внесення добрив здійснюється з використанням методів штучного інтелекту: регресійного аналізу, машинного навчання, нейромереж тощо. Ураховуючи, що джерелом таких рішень є великі геопросторові масиви даних, необхідно створювати спеціалізовані бази даних, ГІС-платформи та інтелектуальні системи обробки.

Отримані картограми завантажуються в бортові комп'ютери тракторів, що забезпечує диференційоване внесення агрохімікатів у польових умовах. На цьому етапі особливо важливими є точність маршруту, якість виконання поворотів, зменшення перекриттів та пропусків. Саме тому все частіше впроваджуються автоматизовані системи паралельного водіння, які мінімізують технологічні помилки та дають змогу раціонально використовувати ресурси.

Світовий досвід, зокрема використання рішень компаній Topcon, Amazon Web Services та інших, доводить ефективність комплексного підходу до інформаційно-аналітичного супроводу технологій точного землеробства. Застосування технологій диференційованого внесення агрохімікатів має особливе значення для України, адже дозволяє не лише підвищити ефективність сільськогосподарського виробництва, але й забезпечити його стійкість в умовах постійних викликів. Українські аграрії щороку стикаються з низкою проблем — від зростання вартості ресурсів до кліматичних змін, що ускладнюють планування та ведення господарства. Водночас існує гостра потреба у збереженні родючості ґрунтів, зменшенні екологічного навантаження та підвищенні конкурентоспроможності на світовому ринку.

У таких умовах інформаційне забезпечення агротехнологій, заснованих на точних даних, стає не просто доцільним, а критично необхідним. Інтелектуальні системи дозволяють приймати рішення на основі об'єктивних вимірювань, що значно знижує ризик перевитрати добрив, водночас зберігаючи здоров'я рослин і якість врожаю. Це особливо актуально з огляду на обмеженість ресурсів і потребу в економічному використанні кожного гектара.

Крім того, інтеграція диференційованого внесення з іншими елементами цифрового землеробства сприяє переходу до високопродуктивного, екологічно відповідального виробництва. Такий підхід відповідає європейським підходам до ведення агробізнесу, що є важливим для інтеграції України в агропродовольчі ланцюги ЄС. У довгостроковій перспективі цифровізація агросектора, зокрема завдяки впровадженню саме таких технологій, сприятиме підвищенню експортного потенціалу, продовольчої безпеки та сталого розвитку українського села.

Таким чином, досягнення оптимального рівня внесення добрив на кожній елементарній ділянці поля стає можливим завдяки інтеграції даних дистанційного зондування, агрохімічного аналізу, метеоспостережень та інших джерел інформації, а також шляхом модернізації сільськогосподарської техніки. Удосконалення технічних засобів, зокрема впровадження бортових комп'ютерів, сенсорів і систем паралельного водіння, забезпечує точне виконання

агрооперацій, зменшуючи перевитрати ресурсів та мінімізуючи агротехнологічні помилки.

Метою цього дослідження стало створення комплексу підходів до інформаційного та інструментального забезпечення технологій диференційованого внесення агрохімікатів із залученням вітчизняних рішень, а також використанням відкритих програмних бібліотек і цифрових інструментів. Такий підхід дозволяє сформувати доступну, адаптивну й ефективну систему для точного землеробства, орієнтовану на потреби українських аграріїв.

Об'єктом дослідження виступають кілька дослідних сільськогосподарських полів, що входять до складу багатопрофільного агрокомплексу загальною площею 538 га, який об'єднує 29 окремих ділянок. Значна частина цієї території використовується для експериментальних агротехнологічних досліджень. Для вирішення завдань у межах впровадження технологій точного землеробства було відібрано поля №9 та №26 площею 23,5 га та 39 га відповідно. Основними культурами, що тут вирощуються, є зернові. Наукові дослідження в цьому напрямі проводяться на зазначених полях з 2019 року, хоча перші спроби впровадження технологій точного землеробства тут здійснювались ще у 2006–2012 роках.

Усі експерименти щодо диференційованого внесення агрохімікатів реалізуються на прикладі азотних добрив, які мають визначальне значення у впливі на врожайність зернових культур. Для побудови карт-завдань було обрано метод виділення однорідних технологічних зон за даними аерофотознімання, який є одним із найбільш вивчених і оперативних у практичному застосуванні.

З метою підвищення точності результатів та можливості використання алгоритмів машинного навчання було організовано створення навчальної вибірки. Для цього щороку на дослідних полях закладалися тестові ділянки — невеликі рівні сегменти із заданими, контрольованими дозами азоту. Візуальні та спектральні характеристики рослин на цих ділянках використовувалися як еталонні значення.

Таким чином, критично важливим етапом реалізації технологій диференційованого внесення добрив є якісний збір та підготовка вихідних даних аерофотозйомки. Точність побудови карт-завдань у значній мірі залежить саме від коректності сформованого датасету.

Окрім інформаційного забезпечення, важливою складовою сучасних агротехнологій залишається і інструментальна частина, зокрема використання безпілотних літальних апаратів (БПЛА) для проведення аерофотозйомки, а також систем паралельного водіння, які забезпечують ефективну роботу сільськогосподарської техніки.

У період із 2006 по 2012 рік у межах експериментів із диференційованого внесення агрохімікатів на біополігоні АФІ використовувався радіокерований літак власної збірки. Незважаючи на здатність отримувати зображення у видимому та ближньому інфрачервоному спектрі з високою роздільною здатністю, така система мала низку суттєвих обмежень: потребу у складній

обробці зображень, а також геоприв'язку лише за допомогою наземних реперних точок.

Упродовж останніх десятиліть в Україні, як і в сусідніх країнах, спостерігається активний розвиток і локалізація виробництва БПЛА для цивільного призначення. Завдяки аналізу наявних на ринку рішень, у 2015 році для потреб агровиробництва була придбана безпілотна авіаційна система Геоскан-401. Це дало змогу суттєво підвищити якість отримання вихідних даних для картування та аналітики.

Збір аерофотознімків виконується за чітким алгоритмом: обирається оптимальна дата польоту з урахуванням метеоумов, готується обладнання, формується маршрут польоту та супроводжується сам політ. Первинна обробка отриманих зображень проводиться у спеціалізованому програмному забезпеченні Metashape, що постачається разом із БАС. У результаті формується точний геоприв'язаний ортофотоплан високої якості, який служить основою для побудови карт-завдань диференційованого внесення добрив.

На відміну від безпілотних літальних апаратів, виробництво вітчизняних систем паралельного водіння наразі стикається з низкою викликів. Серед основних проблем — висока вартість, обмежений вибір виробників, а також недостатній рівень сервісного обслуговування. В умовах санкційного тиску та економічної нестабільності ці чинники лише посилюються: агровиробники втратили доступ до імпортованих рішень або можливість їх обслуговування, що ускладнило подальше використання наявної техніки.

Ці обставини зумовили актуальність створення власних рішень, адаптованих до особливостей української сільськогосподарської техніки. Проведений аналіз наявних підходів показав доцільність використання відкритих технологій для створення прототипу системи паралельного водіння. Як базу було обрано технологію AgOpenGPS — програмну платформу з відкритим кодом, яка безкоштовно поширюється і вже зарекомендувала себе як ефективне рішення у фермерських господарствах різних країн. Це дозволяє адаптувати її до конкретних потреб, модернізувати відповідно до технічних умов господарства та значно знизити витрати на впровадження.

Починаючи з 2019 року, для дослідних сільськогосподарських полів було зібрано й оброблено понад 20 000 вихідних знімків, що дозволило створити якісну базу для подальшого використання методів машинного навчання. На основі цих даних сформовано понад 20 багатоваріантних ортофотопланів, з яких більше половини — з розміткою. Кожен елемент навчального датасету включає сім інформаційних шарів: червоний, зелений, синій канали, ближній інфрачервоний спектр, червону крайову зону, карту індексу NDVI (нормалізований диференційний вегетаційний індекс), а також shape-шар із тестовими ділянками, кожна з яких має атрибут із зазначенням відомої дози азотного добрива.

Після попередньої обробки ортофотоплан використовується для виділення однорідних технологічних зон. Завдяки універсальності отриманого датасету для класифікації можуть застосовуватися різні підходи, зокрема на основі штучного

інтелекту. Наприклад, на полі №9 (зйомка від 2 липня 2021 року, культура — яра пшениця) було реалізовано контрольовану класифікацію за допомогою методу мінімальних відстаней.

Результатом такого підходу стає карта-завдання, яку завантажують у бортовий комп'ютер сільськогосподарської техніки. Далі, відповідно до отриманої інформації, виконується диференційоване внесення добрив на кожен елементарну ділянку поля з урахуванням ширини захвату розкидача. Це дозволяє оптимізувати витрати, забезпечити рослини необхідною кількістю поживних речовин та мінімізувати екологічні ризики.

Як уже зазначалося вище, на завершальному етапі реалізації технології диференційованого внесення добрив важливу роль відіграє система паралельного водіння. Вона дозволяє охоплювати всю територію обробки з максимальною точністю, без пропусків і повторного внесення добрив на ті самі ділянки поля. В межах проведеного дослідження однією з ключових задач була розробка та складання прототипу, що може виступати в ролі альтернативи імпортним системам.

Розробка включала кілька основних етапів. Спершу було зібрано блок керування: обрано схему плати, що забезпечує взаємодію з двигуном, сівалкою, розкидачем та датчиками просторової орієнтації — це мінімально необхідна конфігурація для впровадження технологій точного землеробства. Плату виготовили за індивідуальним замовленням у компанії Resonon, після чого виконали монтаж усіх компонентів в єдиний функціональний блок.

Для реалізації функціоналу системи обрано три ключові датчики: датчик кута повороту керма та два просторових датчики орієнтації (дев'ятиосьовий IMU і RTK-роувера). Одночасно було сконструйовано механізм передачі крутного моменту на руль — для цього використано 12-вольтний мотор із редуктором та пластикові шестерні, надруковані на 3D-принтері Flying Bear Ghost 5. Всі деталі адаптовані під встановлення на сільськогосподарську техніку.

Завершальним етапом стала збірка і первинне тестування прототипу в лабораторних умовах. Перевірено реакцію датчиків, герметичність блоку управління, міцність механічних з'єднань, а також працездатність системи на імітаційних маршрутах. Комплекс виконав усі функції коректно. Після успішного проходження польових випробувань і подальшої адаптації під українську сільгосптехніку, цей прототип зможе стати дієвим прикладом вітчизняного рішення для інформаційного та інструментального забезпечення технологій точного землеробства.

Рекомендована література (RTK)

- Henry Alberto Hernández, Iván Fernando Mondragón, Sergio Ramiro González, Luis Fernando Pedraza (2025) " Reconfigurable agricultural robotics: Control strategies, communication, and applications", *Computers and Electronics in Agriculture*, Vol. 234, 110161, <https://doi.org/10.1016/j.compag.2025.110161>.
- Zhihua Diao, Lele Chen, Yuanyuan Yang, Yuchen Liu, Jingyi Yan, Shengxian He, Baohua Zhang (2025) "Localization technologies for smart agriculture and precision

farming: A review", *Computers and Electronics in Agriculture*, Vol. 236, 110464, <https://doi.org/10.1016/j.compag.2025.110464>.

- Binbin Xie, Yucheng Jin, Muhammad Faheem, Wenjie Gao, Jizhan Liu, Houkang Jiang, Lianjiang Cai, Yuanxiang Li (2023) "Research progress of autonomous navigation technology for multi-agricultural scenes", *Computers and Electronics in Agriculture*, Vol. 211, 107963, <https://doi.org/10.1016/j.compag.2023.107963>.

- Giovanni Avola, Miriam Distefano, Antonino Torrisi, Ezio Riggi (2024) "Precision agriculture and patented innovation: State of the art and current trends", *World Patent Information*, Vol. 76, 102262, <https://doi.org/10.1016/j.wpi.2024.102262>.

- Ali Roshanianfard, Noboru Noguchi, Hiroshi Okamoto, Kazunobu Ishii (2020) "A review of autonomous agricultural vehicles (The experience of Hokkaido University)", *Journal of Terramechanics*, Vol. 91, pp. 155-183, <https://doi.org/10.1016/j.jterra.2020.06.006>.

Питання для самоперевірки (RTK)

- Чому високоточне абсолютне позиціонування є важливим для сучасних систем супутникової навігації?
- Які галузі сільського господарства найбільше виграють від його застосування?
- Які обмеження існують при використанні високоточного позиціонування?
- Які технічні та організаційні чинники впливають на впровадження високоточного позиціонування?
- Які приклади практичного застосування цієї технології в аграрному виробництві?
- Які перспективи відкриває подальший розвиток технології високоточного позиціонування?
- Які критерії враховує інтелектуальна система при виборі системи позиціонування?
- Чому вибір системи позиціонування є критичним для мобільних сільськогосподарських роботів?
- Як алгоритми оптимізації допомагають у процесі вибору системи позиціонування?
- Які недоліки існуючих систем паралельного водіння потребують удосконалення?
- Які технологічні рішення дозволяють підвищити точність і ефективність таких систем?
- Що включає в себе інформаційне забезпечення технологій диференційованого внесення агрохімікатів?
- Які інструментальні засоби використовуються для реалізації цих технологій?
- Які переваги та виклики має впровадження диференційованого внесення агрохімікатів у практику?

ТЕМА 8. СУЧАСНИЙ СТАН, ПРОБЛЕМИ І ТЕНДЕНЦІЇ ЗАСТОСУВАННЯ СУЧАСНОГО ТЕХНОЛОГІЧНОГО ОБЛАДНАННЯ В АГРОПРОМИСЛОВОМУ СЕКТОРІ ЕКОНОМІКИ

8.1 ІНТЕРНЕТ РЕЧЕЙ ТА РОЗУМНІ СЕНСОРИ В СІЛЬСЬКОМУ ГОСПОДАРСТВІ: МОЖЛИВОСТІ ТА ВИКЛИКИ

Штучний інтелект (ШІ) є однією з найшвидше зростаючих технологій сучасності. Сьогодні він широко застосовується в різних галузях — від розробки робототехніки до моніторингу екологічних проблем. ШІ має значний потенціал у медичних технологіях, автономному транспорті, супутникових дослідженнях, картографуванні, моніторингу змін клімату та багатьох інших сферах.

Впровадження ШІ у виробничі процеси, включаючи сільське господарство, дає змогу отримувати продукцію високої якості з меншим негативним впливом на довкілля. Використання інтелектуальних сенсорів, які обробляють дані в режимі реального часу з високою точністю, суттєво підвищує ефективність роботи обладнання та точність результатів. Поєднання таких сенсорів з аналітичними можливостями ШІ стало основою для розвитку технології Інтернету речей (IoT).

IoT об'єднує бездротові системи, а ШІ обробляє отримані дані та генерує рішення в режимі реального часу. Ця технологія вже використовується практично в усіх секторах науки та промисловості. У сільському господарстві цифрові IoT-рішення відкривають нові можливості для підвищення ефективності виробництва сільськогосподарської продукції, зокрема шляхом оптимізації використання ресурсів.

Сільське господарство — ключова галузь, без якої неможливе існування людства. Сучасні технології активно впроваджуються для підвищення врожайності, моніторингу росту рослин, боротьби зі шкідниками та хворобами. ШІ та IoT допомагають вирішувати широкий спектр завдань: контроль стану ґрунту, прогнозування погодних умов, виявлення шкідників, визначення оптимального часу збору врожаю.

Системи точного землеробства, що ґрунтуються на IoT, забезпечують безперервний моніторинг температури, вологості, якості повітря та ґрунту, рівня забруднень і вмісту поживних речовин. Смарт-технології сприяють прийняттю своєчасних управлінських рішень, зменшенню витрат ресурсів, оптимізації використання добрив і засобів захисту рослин, зниженню ризику забруднення довкілля.

Використання безпілотних літальних апаратів (БПЛА) дозволяє швидко збирати інформацію про стан ґрунтів, рівень зволоженості та поширення шкідників на великих площах. Інтеграція спектрального аналізу дає змогу отримувати високоточні зображення для подальшої обробки навіть з віддалених територій.

Смарт-теплиці з автоматизованими сенсорами температури, вологості, освітленості та вологості ґрунту мінімізують необхідність ручної праці, забезпечуючи стабільний та високий урожай.

Системи управління фермою (Farm Management Systems, FMS), що поєднують IoT і ШІ, дозволяють комплексно відстежувати фізичні, хімічні та біологічні параметри виробництва, підвищуючи якість і кількість продукції. Обробка даних у режимі реального часу зменшує потребу у великій кількості персоналу та пришвидшує прийняття рішень.

Алгоритми машинного навчання та штучні нейронні мережі успішно застосовуються для виявлення захворювань рослин, прогнозування врожайності, оцінки стану ґрунтів. Наприклад, використання комп'ютерного зору та моделей глибокого навчання дає змогу з високою точністю визначати вологість і органічний вміст ґрунту, а також класифікувати види бур'янів чи хвороб.

Високоточні моделі на основі ШІ можуть автоматично надсилати аграріям рекомендації через мобільні додатки, що дозволяє швидко вживати необхідних заходів.

Інтеграція ШІ та IoT у сільське господарство створює передумови для підвищення ефективності, зменшення екологічних ризиків та оптимізації виробничих процесів. Майбутні розробки зосереджуватимуться на масштабуванні таких технологій, забезпеченні їх доступності для фермерів різного рівня та інтеграції в існуючі виробничі системи.

Дистанційне зондування з використанням «розумних» сенсорів

Стрімкий розвиток комунікаційних технологій, напівпровідникової промисловості та обчислювальних систем сприяв появі нового покоління сенсорів — так званих «розумних» сенсорів. Це передові пристрої, здатні передавати дані бездротовим способом на віддалені від місця вимірювання точки. Вони можуть не лише збирати інформацію, а й здійснювати автоматичну обробку даних, обмінюватися ними з іншими пристроями, утворюючи мережі «розумних» сенсорів.

На відміну від традиційних сенсорних систем, що лише фіксують параметри, сучасні «розумні» сенсори мають вбудовані обчислювальні модулі, які аналізують отримані сигнали, виявляють закономірності та встановлюють причинно-наслідкові зв'язки між різними факторами.

Базова архітектура «розумного» сенсора зазвичай містить:

- один або кілька сенсорних елементів (трансдюсерів),
- мікроконтролер або процесор,
- аналого-цифровий перетворювач (ADC),
- модуль зв'язку,
- елемент пам'яті,
- джерело живлення.

Сенсор перетворює фізичний параметр (наприклад, температуру чи вологість) у електричний сигнал, який проходить через аналого-цифровий

перетворювач і надходить до процесора для обробки. Після локального аналізу інформація передається у мережу.

Поеднання «розумних» сенсорів з технологією Інтернету речей (IoT) відкриває широкі можливості для сільського господарства. Такі сенсори можуть у реальному часі збирати та аналізувати дані, забезпечуючи більш точний моніторинг та прогнозування. Вони застосовуються для:

- прогнозу погоди;
- моніторингу ґрунтів і рельєфу місцевості;
- виявлення шкідників;
- контролю якості ґрунту;
- оцінки стану рослинності та врожайності.

LiDAR-технології дають змогу отримувати високоточні тривимірні моделі місцевості, що корисно для аналізу вологості ґрунту, виявлення захворювань рослин та оцінки загального стану посівів.

Хмарні системи дозволяють об'єднувати безліч сенсорів у спільну мережу, де дані зберігаються та обробляються централізовано, а результати доступні для користувачів у будь-який момент.

Окрему роль відіграє технологія радіочастотної ідентифікації (RFID). Поеднання RFID-міток із сенсорами забезпечує бездротову ідентифікацію та моніторинг важливих параметрів: температури, вологості, забруднення тощо. Це особливо цінно для аграрного виробництва, де потрібен безперервний контроль умов зберігання та транспортування продукції.

Таким чином, дистанційне зондування з використанням «розумних» сенсорів є ключовою технологією сучасного точного землеробства. Воно дозволяє не лише фіксувати стан агросистем, а й оперативно реагувати на зміни, підвищуючи ефективність і стійкість виробництва.

Інтернет речей (IoT) і сільське господарство

Сучасні технології Інтернету речей (IoT), «розумних» сенсорів та штучного інтелекту (AI) відкривають широкі можливості для отримання даних у реальному часі та їхнього аналізу з метою моніторингу стану ґрунту, вмісту вологи, якості врожаю та загальної продуктивності сільськогосподарських культур.

Поеднання IoT із сенсорними технологіями поступово витісняє традиційні методи ведення господарства, створюючи концепцію «розумного» землеробства, що характеризується підвищеною врожайністю та оптимізованим використанням ресурсів. Такі системи дозволяють:

- оцінювати стан ґрунту, його ерозію та родючість;
- визначати потребу у добривах;
- контролювати якість насіння;
- здійснювати оптимальне зрошення;
- спостерігати за ростом і розвитком рослин на різних етапах.

Технології точного землеробства активно використовують дані від сенсорів та дистанційного зондування. Наприклад:

- інфрачервона термографія допомагає збирати топографічну інформацію про поля;
- сенсори вологості ґрунту застосовуються для контролю як до, так і після збору врожаю;
- мікрофлюїдні сенсори здатні виявляти мікроорганізми у продуктах харчування;
- тести експрес-діагностики допомагають виявляти патогени безпосередньо на місці.

Глибинне навчання у поєднанні з IoT дає змогу аналізувати дані від численних сенсорів, отримуючи точну інформацію про температуру, вологість, склад ґрунту та типи культур на полі. Використання Arduino-платформ і технологій ZigBee дозволяє створювати недорогі та ефективні системи моніторингу.

Дрони (UAV), інтегровані в IoT-мережу, забезпечують оперативний збір даних та візуальну оцінку стану рослин, що підвищує ефективність «розумного» землеробства. Це особливо важливо для:

- контролю якості врожаю;
- управління зрошенням;
- оцінки стану ґрунтових вод;
- виявлення ознак посухи.

Для оцінки стану рослинності та планування аграрних робіт використовуються індекси:

- VHI (Vegetation Health Index) — індекс здоров'я рослинності;
- SAI (Standardized Anomaly Index) — стандартизований індекс аномалій;
- ESI (Evaporative Stress Index) — індекс випарювального стресу.

Приклад практичного впровадження. Деякі агрогосподарства впровадили IoT-системи з використанням хмарних обчислень та технології Li-Fi, яка забезпечує високу швидкість передачі даних у межах обмеженого простору. Такі системи автоматизують завдання з обприскування, прополювання, контролю вологості та температури у сховищах.

Раціональне використання води стало критично важливим у сучасному агровиробництві. Для цього створено Систему підтримки рішень для «розумного» зрошення (Smart Irrigation Decision Support System, SIDSS), яка поєднує дані з ґрунтових сенсорів і метеостанцій, точно прогножуючи потребу рослин у воді. Це дозволяє зменшити витрати та підвищити врожайність.

Таким чином, інтеграція IoT, «розумних» сенсорів і штучного інтелекту в сільське господарство створює фундамент для розвитку високоефективного, екологічно стійкого та економічно вигідного землеробства.

IoT у моніторингу сільськогосподарських культур

Впровадження технологій Інтернету речей (IoT) у вимірювання параметрів ґрунту, мікроклімату та стану рослин спричинило перехід від суб'єктивного,

досвідного підходу до об'єктивного, кількісного та даних-орієнтованого моніторингу культур.

IoT надає фермерам змогу точно відстежувати стан і ріст рослин, а також своєчасно виявляти шкідників і хвороби в реальному часі. Дані від IoT-сенсорів обробляються автоматизованими системами та використовуються для оптимізації удобрення, зрошення, контролю навколишнього середовища та планування збору врожаю.

У полі встановлюють сенсори, що вимірюють температуру, вологість, рівень вологості в ґрунті, концентрацію поживних речовин, інтенсивність освітлення, рівень CO₂ та pH.

Дані передаються у хмарну платформу в режимі реального часу, де їх аналізують за допомогою алгоритмів машинного навчання для визначення:

- стану та здоров'я культур;
- швидкості росту;
- потенційної врожайності.

Отримана інформація допомагає приймати обґрунтовані рішення щодо зрошення, захисту від шкідників та строків збору врожаю.

Використання бездротових сенсорних мереж дозволяє:

- сповіщати про несправності обладнання та запускати діагностику;
- автоматично керувати зрошенням та іншими процесами;
- економити енергію за рахунок своєчасного відключення насосів чи інших механізмів.

Наприклад, безпілотні літальні апарати (UAV), підключені до IoT-системи, збирають зображення полів у реальному часі, що спрощує оцінку морфології рослин, мікроклімату, вологості ґрунту та інших показників.

Інтелектуальна система зрошення CC2430 дала змогу знизити вартість впровадження майже наполовину у порівнянні з закордонними аналогами, а ефективність використання води підвищилася на понад 20% у порівнянні з традиційними методами.

Смартфони, смарт-годинники та ноутбуки можуть інтегруватися з такими системами для зручнішого збору та перегляду даних.

У тепличних умовах IoT забезпечує контроль мікроклімату та автоматизовану обробку даних, що особливо ефективно для захисту від шкідників та хвороб. Система може відслідковувати шкідників у режимі реального часу, дозволяючи вжити запобіжних заходів одразу після виявлення загрози.

Використовуються такі сенсори:

- DHT11 — температура та вологість повітря;
- LDR — інтенсивність освітлення;
- DS18B20 — температура;
- Сенсори вологості ґрунту;
- Камери Noir для знімання в умовах слабкого освітлення;

Додаткове обладнання: Одноплатні мікроконтролери та API для обробки та інтеграції даних.

Модель Smart Crop Selection (SCS) використовує алгоритми машинного навчання (Decision Tree, SVM, KNN, Random Forest, Gaussian Naïve Bayes) на основі метеорологічних і ґрунтових даних (азот, фосфор, калій, CO₂, pH, температура, вологість ґрунту, кількість опадів). Така система здатна передбачати рівень опадів із точністю до 97–98%, що дозволяє завчасно планувати заходи для покращення росту культур.

Випробування системи моніторингу та контролю зрошення на IoT-платформі показали, що на суглинкових ґрунтах вона ефективно регулює подачу води, автоматично вимикаючи насос після досягнення оптимальної вологості, що знижує витрати електроенергії та запобігає перевитраті води.

Застосування IoT для моніторингу погодних умов

Інтернет речей (IoT) став популярним інструментом для збору даних про погодні параметри — вологість, температуру повітря та вологість ґрунту.

Поєднання IoT із бездротовими мережами та «розумними» сенсорами дозволяє отримувати дані в реальному часі про стан навколишнього середовища, що дає змогу здійснювати більш точне землеробство, наприклад, у виноградниках та виноробстві.

Якщо певні параметри виходять за встановлені порогові значення, система автоматично надсилає попередження адміністратору для оперативного вжиття заходів. Такі системи можуть відстежувати:

- вміст CO₂;
- рівень освітленості;
- вологість;
- температуру повітря.

Приклад: моніторинг для захисту від заморозків. У вирощуванні огірків IoT-сенсори в режимі реального часу можуть визначати небезпечне зниження температури. При досягненні критичного рівня надсилається сигнал оператору, який може ввімкнути обігрівальні пристрої для запобігання холодовому шоку рослин.

IoT також можна інтегрувати з сервісами прогнозу погоди, що дає змогу заздалегідь готуватися до несприятливих змін клімату.

IoT у теплицях і мікрокліматичному моніторингу. Сенсорні вузли IoT у поєднанні з MATLAB Simulink дозволяють:

- налаштовувати системи під конкретні умови;
- контролювати мікроклімат у теплицях;
- отримувати детальні дані для аналізу умов росту культур.

Власні апаратні рішення з LoRaWAN-передавачами, багатоканальними шлюзами та веб-панелями моніторингу можуть збирати та обробляти мікрокліматичні дані. Аналіз відхилень параметрів дає змогу своєчасно вживати заходів для підтримання оптимальних умов.

Багаторівневі хмарні IoT-платформи з сенсорами, контролерами та виконавчими механізмами дають змогу дистанційно керувати погодними умовами та ростом культур, а також моніторити їх у режимі реального часу.

IoT у моніторингу властивостей ґрунту

Інтернет речей у поєднанні зі «сма́рт»-сенсорами забезпечує комплексний моніторинг параметрів ґрунту, які є критично важливими для росту та розвитку рослин.

IoT-системи можуть визначати:

- вологість ґрунту;
- температуру ґрунту;
- вміст поживних речовин (азот, фосфор, калій тощо);
- рН ґрунту;
- стан ризосфери (зони навколо коренів).

Ці дані доступні фермерам дистанційно та можуть бути використані для:

- прогнозування ризиків захворювань рослин;
- запобігання атакам шкідників;
- коригування режимів поливу та внесення добрив.

IoT дає змогу відстежувати ріст і розвиток рослин у різних типах ґрунтів, адаптуючи агротехнічні заходи для підвищення врожайності та якості продукції.

Розумні IoT-системи постійно оновлюють інформацію про температуру, вологість та інші показники, що дозволяє підтримувати оптимальні умови для вирощування культур.

Датчики для розумного землеробства

У сучасному розумному землеробстві дедалі ширше застосовуються різноманітні датчики, які використовуються для автоматизованого збирання врожаю, моніторингу стану довкілля та вимірювання врожайності. Особливе місце посідають “розумні датчики” – пристрої, інтегровані з мікрочипами, які можуть автоматично фіксувати широкий спектр параметрів навколишнього середовища та іншої важливої інформації з високою точністю і зберігати її на накопичувачах. Зібрані дані обробляються мікропроцесорами для інтерпретації та аналізу.

Розумні датчики є невід’ємною частиною Інтернету речей (IoT) у сільському господарстві, забезпечуючи передавання даних через мережу. Вони працюють у складі бездротових сенсорних та виконавчих систем, що можуть включати від кількох до тисяч вузлів, з’єднаних із сенсорними хабами.

Типовий розумний датчик складається з:

- сенсорного елемента;
- мікропроцесора;
- бездротового модуля зв’язку, який забезпечує віддалений моніторинг.

Для підвищення ефективності такі датчики можуть доповнюватися підсилювачами, перетворювачами, аналого-цифровими перетворювачами та аналоговими фільтрами (рис. 8.1.1).

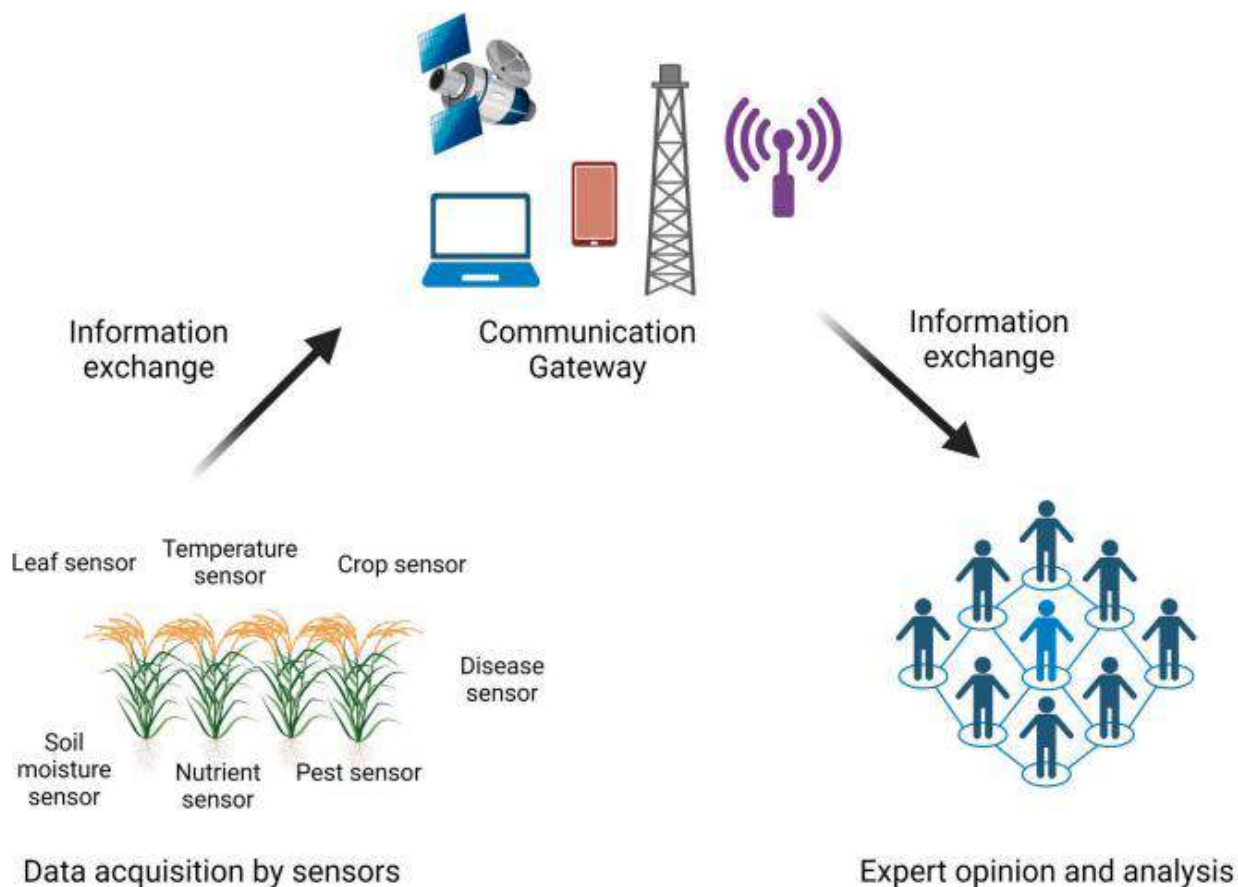


Рис. 8.1.1 IoT-датчики на фермах збирають дані (температура, вологість, поживні речовини) і передають їх на хмарні сервери для аналізу людьми та прийняття оперативних рішень.

4.1. Акустичні датчики

Акустичні датчики – це електронні пристрої, що фіксують зміни у звукових коливаннях. Вони здатні виявляти вібрації, які виникають при русі об'єкта. У сільському господарстві такі датчики можуть розпізнавати звуки, які виробляють комахи під час пересування, живлення чи спарювання. Для цього використовують спеціальні акустичні системи, зокрема портативні акселерометри та мікрофонні модулі.

Зібрані дані можуть бути передані у централізовані бази для подальшого аналізу, що дає змогу удосконалювати технології автоматизованого виявлення шкідників на видовому рівні. Акустичні датчики зберігають свою ефективність навіть при забрудненні пилом чи частинками ґрунту, що робить їх надійними для польових умов.

Переваги акустичних датчиків:

- висока чутливість;
- низькі витрати на обслуговування;
- висока точність.

Основна сфера застосування – виявлення та моніторинг популяцій шкідників. Водночас акустичні технології використовуються й в інших напрямках, наприклад:

- у системах автоматизованого зрошення, де ультразвукові витратоміри замінюють механічні аналоги;
- для підводного ультразвукового сканування, що дає змогу відстежувати ріст водних рослин і визначати оптимальний час збору;
- для оцінювання стиглості плодів, коли генератор та приймач звуку допомагають, наприклад, визначати ступінь зрілості кавунів.

Електромагнітні сенсори

Електромагнітні сенсори застосовуються для виявлення стану ґрунту та забруднень у сільському господарстві, а також для картографування топологічних особливостей земель. Вони фіксують широкий спектр електромагнітних хвиль, які відбиваються від об'єктів, та реєструють електричні імпульси ґрунту. Для збору високоякісної інформації використовують методи електромагнітної індукції, ґрунтового радару (GPR) та гамма-радіометрії, часто за допомогою безпілотних літальних апаратів.

GPR і ЕМІ дозволяють неінвазивно вимірювати вологість ґрунту, рівень нітратів, органічної речовини, швидкість транспірації рослин тощо. Вони забезпечують високу роздільну здатність, широке покриття території та збереження гео-прив'язки даних, економлячи робочу силу. Наприклад, сенсор електромагнітної індукції EM38 успішно корелював електропровідність ґрунту з його фізико-хімічними властивостями, що підтверджує точність цих пристроїв у агрономічних дослідженнях.

Електрохімічні сенсори

Легкі та екологічно безпечні електрохімічні сенсори здатні в реальному часі контролювати ріст рослин, захворювання та забруднення навколишнього середовища. Наприклад, графен-оксидні сенсори вимірюють вологість листя, а сенсори NO₂ на основі срібла та графену реагують на токсичні гази навіть у низьких концентраціях.

Інноваційні пристрої на основі вуглецевих нанотрубок, графіту та наночастинок золота можуть виявляти леткі органічні сполуки в ґрунті. Такі сенсори встановлюють безпосередньо на рослинах для контролю ключових летких сполук з високою точністю (>97%). Окрім цього, існують сенсори для моніторингу соку рослин та вмісту азоту у ґрунті. Завдяки цьому електрохімічні сенсори мають значний потенціал для підвищення ефективності агровиробництва.

Лазерний радар (LIDAR)

Технологія LIDAR базується на вимірюванні часу проходження світлового імпульсу від сенсора до об'єкта та назад. Це дозволяє точно визначити відстань і створити тривимірні моделі навколишнього середовища ("хмара точок").

LIDAR широко використовується у сільському господарстві для моніторингу дозрівання плодів, структури рослинності, ландшафтної топографії, а також для оцінки біомаси та фенотипування культур. Використання LIDAR

даних дозволяє отримувати високоякісні цифрові моделі рельєфу для дослідження аграрних систем. Крім того, LIDAR є ключовим для локалізації, картографування та навігації автономних сільськогосподарських роботів, що відкриває перспективи для автоматизації сільського господарства.

Оптичні сенсори

Оптичні сенсори широко застосовуються в сільському господарстві завдяки здатності виявляти світло різних довжин хвиль. Вони працюють за принципом випромінювання світла, відбитого від об'єкта, що аналізується. Оптичні сенсори, як-от SPAD та GreenSeeker™, використовуються для оцінки поживних речовин у рослинах, прогнозування біомаси та моніторингу росту рослин. Застосування цих сенсорів дозволяє більш точно визначати потребу в добривах і стан посівів. Оптична когерентна томографія також має перспективи у відстеженні проростання насіння. За допомогою оптичних сенсорів можна успішно виявляти бур'яни, що сприяє точному контролю над шкідниками.

Сенсори на базі FPGA (Field Programmable Gate Array)

FPGA — це програмовані інтегральні схеми, які можна багаторазово перепрограмувати для виконання різних завдань. Використання FPGA з нечіткою логікою в сільському господарстві дозволяє створювати інтелектуальні системи підтримки прийняття рішень з високою точністю. FPGA застосовують у системах моніторингу агроекологічних параметрів (температура, вологість, вміст ґрунту), де вони обробляють дані та виводять інформацію. Застосування FPGA в обробці зображень покращує якість і швидкість аналізу. Також FPGA можна використовувати для автоматизованого контролю іригації.

Сенсори на основі методу вихрової коваріації (Eddy Covariance, EC)

ЕС-сенсори вимірюють потоки тепла, водяної пари і парникових газів (CO₂, CH₄, NH₃) для оцінки водоспоживання рослинами та їх продуктивності. Вони дозволяють оцінити баланс парникових газів і ефективність використання води в сільському господарстві. ЕС-технології поєднують з дистанційним зондуванням для кращого розуміння екологічних процесів і підтримки сталого ведення сільського господарства.

Механічні та масовопотокові сенсори

Механічні сенсори вимірюють компактність і опір ґрунту, що впливає на врожайність. Ці дані допомагають оптимізувати іригацію, адаптуючи її під фізичні властивості ґрунту. Прикладом є сенсор Honeywell FSG15N1A, який вимірює силу, з якою корені рослин поглинають воду. Масовопотокові сенсори використовуються для автоматичного моніторингу врожаю, однак їх точність може залежати від нахилу обладнання. Застосування алгоритмів компенсації вібрацій покращує точність цих сенсорів.

Гнучкі та носимі сенсори

Гнучкі сенсори набувають популярності завдяки здатності забезпечувати реальні дані про фізіологічний стан рослин у режимі реального часу. Вони можуть безпосередньо кріпитися на поверхні рослин, враховуючи складну будову листків і плодів, не порушуючи їх дихання чи функції. Наприклад, сенсори на основі графітового порошку та хітозану з гумовим захистом використовуються для вимірювання росту плодів, здатні витримувати розтяг до 60%.

Носимі сенсори, що традиційно застосовуються у медицині, зараз починають впроваджуватись і в агросфері. Вони кріпляться на стебла, листя чи плоди, вимірюючи параметри мікросередовища, такі як температура чи деформації. Так, сенсори з полідиметилсилоксану (PDMS) можуть відстежувати подовження стебел із високою точністю. Існують також сенсори з рідких металів, які мають високу гнучкість і можуть адаптуватись до нерівних поверхонь рослин.

Сенсори без батарейок та з автономним живленням

Сенсори без батарейок мають перевагу над традиційними пристроями, оскільки не потребують регулярної заміни акумуляторів, що спрощує їх довготривале використання. Вони часто працюють за принципом “встановив і забув”, що дуже зручно для фермерів.

Деякі з таких сенсорів оснащені платформами на друкованих платах, які збирають енергію з навколишнього середовища (наприклад, сонячну) і забезпечують зв'язок Bluetooth Low Energy. Прикладом є бездротові сенсори вологості, що за допомогою NFC зчитувача контролюють термін придатності фруктів. Сонячні елементи застосовуються для живлення мережевих бездротових сенсорів у теплицях та виноградниках, що контролюють температуру, вологість та інші параметри. Також розроблено бездротові RFID-сенсори для контролю свіжості продуктів і росту мікроорганізмів з високою чутливістю.

Моніторинг шкідників у розумному землеробстві

Для відлякування шкідників у сільському господарстві застосовують пристрої, що генерують ультразвукові хвилі. Такі електронні відлякувачі є безпечною і екологічною альтернативою хімічним пестицидам, які можуть негативно впливати на корисних організмів і людей. Ультразвук здебільшого впливає на слухові органи шкідників, відганяючи їх.

Для виявлення шкідників ефективними є алгоритми обробки зображень. Використання спектральних камер на безпілотноках дозволяє отримувати високоякісні знімки ділянок для виявлення шкідників і захворювань рослин. Також інтеграція IoT з паралельними розподіленими обчисленнями дає змогу краще обробляти дані і контролювати популяції шкідників.

Автоматизовані пастки з камерами дозволяють в реальному часі ідентифікувати шкідників з високою точністю (>88%). Приклади таких пасток включають системи для контролю яблукової молі, європейської виноградної

вогнівки та плодожерок. Багатоканальні сенсорні системи і бездротові датчики допомагають дослідникам точніше відслідковувати поведінку шкідників.

Виклики та перспективи

Хоча IoT і смарт-сенсори вже успішно впроваджуються на малих сільськогосподарських ділянках, масштабне застосування все ще обмежене. Основні перешкоди — високі фінансові витрати на встановлення і обслуговування систем, а також невизначеність у співвідношенні затрат і прибутку. Важливим є також недостатній рівень цифрової грамотності фермерів, особливо в сільській місцевості, що знижує ефективність використання таких технологій.

Ще однією проблемою є безпека даних: зломи хмарних серверів можуть спричинити збій в автоматизованих процесах і втрату врожаю. Для захисту потрібне впровадження надійного шифрування, криптографії, багатоаспектних систем обробки даних та блокчейну.

Також IoT-пристрої працюють у суворих природних умовах (дощ, пил, вітер, температура), що може спричиняти їхнє пошкодження. Виробники мають використовувати матеріали, які забезпечують довговічність та надійність сенсорів.

Висновки та перспективи

IoT-технології в розумному землеробстві мають великі перспективи. За допомогою сучасних сенсорів можна ефективно контролювати погодні умови, вологість, вміст води і азоту у ґрунті, а також рівень CO₂ для кращого моніторингу стану рослин.

Камери і IoT-пастки допомагають контролювати популяції шкідників без шкоди для навколишнього середовища. Водночас ключові виклики — це висока вартість обладнання, недостатня цифрова підготовка фермерів та загрози кібератак.

Для успішного впровадження смарт-фермерства потрібна підтримка держави у вигляді фінансування, освітніх програм і заходів щодо кібербезпеки.

8.2 НАНОБІОСЕНСОРИ ДЛЯ МОНІТОРИНГУ ПОЖИВНИХ РЕЧОВИН У РЕЖИМІ РЕАЛЬНОГО ЧАСУ

Поживні речовини є основою для росту та розвитку рослин. Їх прийнято поділяти на макро- і мікроелементи залежно від кількості, в якій вони необхідні. До макроелементів належать азот, фосфор, калій, кальцій, магній і сірка — вони потрібні у великих кількостях. Мікроелементи, такі як хлор, бор, залізо, марганець, мідь, цинк, нікель і молібден, засвоюються у малих дозах, однак не менш важливі для збалансованого живлення. У ґрунті поживні речовини наявні у вигляді солей і надходять до рослин в іонній формі.

У сучасних умовах аграрне виробництво має відповідати викликам часу: забезпечувати стабільні врожаї, зберігати родючість ґрунтів і мінімізувати негативний вплив на довкілля. Для цього все ширше впроваджуються біосенсорні технології, зокрема нанобіосенсиори, здатні відстежувати ключові параметри стану ґрунтів і рослин у режимі реального часу.

Надмірне використання добрив і засобів захисту рослин часто призводить до накопичення шкідливих речовин у ґрунтових і поверхневих водах, погіршення стану екосистем і якості ґрунтів. Щоб уникнути цього, дедалі частіше застосовують методи точного землеробства, засновані на даних сенсорного моніторингу. Нанобіосенсиори є складовою таких систем — вони дозволяють виявляти вологість, рівень макро- і мікроелементів, фітопатогени, температуру, а також вплив шкідників і пестицидів.

Завдяки унікальним властивостям наноматеріалів сенсори можуть працювати з надзвичайною чутливістю. Наприклад, електронні носи — сенсорні пристрої, здатні розрізняти запахи — використовуються для виявлення ознак псування продукції чи зараження. В основі їх роботи — масиви газових сенсорів, створених із наночастинок, таких як оксид цинку. Такі пристрої дають змогу виявляти леткі органічні сполуки або домішки у повітрі.

У ризосфері, тобто зоні навколо кореневої системи, відбувається активне засвоєння поживних речовин. У цій зоні біосенсиори можуть використовуватися для оцінювання доступності елементів живлення. Наприклад, застосовують генетично модифіковані мікроорганізми, які змінюють інтенсивність свічення у відповідь на дефіцит вуглецю, азоту або фосфору. Це дозволяє спостерігати за динамікою живлення в ґрунтах різного типу або в процесі розкладання органічної речовини.

Сучасні портативні біосенсиори дають змогу безпосередньо у полі визначати рівень нітратів у рослинному соку. Такі пристрої призначені для зручного використання фермерами, не потребують спеціальної підготовки і можуть інтегруватися з цифровими системами агромоніторингу. Згодом на основі зібраних даних, супутникових знімків і метеоінформації можна прогнозувати потребу в добривах для конкретних ділянок.

У сільському господарстві активно використовуються різні види наноматеріалів — нанотрубки, нанокомпозити, наноплівки, нанопровідники тощо. Вони дозволяють контролювати морфологічні й хімічні показники, моніторити засвоєння поживних речовин, виявляти шкідливі домішки, мікроорганізми й патогени.

Нанобіосенсиори також використовуються для контролю якості води. Наприклад, сенсори, виготовлені за допомогою зеленого синтезу срібних наночастинок, застосовуються для моніторингу параметрів водного середовища. Успішний розвиток біосенсорики має під собою тривалу історію. Перший у світі біосенсор було створено Кларком і Лайонсом у 1962 році. Відтоді з'явилося багато різновидів сенсорів — ферментні, тканинні, імунні, ДНК-сенсори, а також термічні й п'єзоелектричні.

Особливе місце посідають ферментні сенсори, в основі яких — іммобілізовані ферменти, закріплені на поверхні за допомогою фізичних або хімічних зв'язків. Найчастіше використовуються ферменти групи оксидоредуктаз, поліфенолоксидаз, пероксидаз та амінооксидаз. Такі сенсори забезпечують високу специфічність до цільових речовин і можуть стати важливим інструментом у розбудові сталого землеробства.

Так само, як і для моніторингу стану ґрунту, біосенсори можуть застосовуватись для визначення вмісту ключових елементів живлення, необхідних для росту і розвитку сільськогосподарських культур. Насамперед ідеться про азот, фосфор, калій, магній та інші поживні елементи. Отримана з сенсорів інформація дає змогу аграріям ефективніше керувати режимом живлення рослин, своєчасно коригувати дози внесення добрив, підвищувати якість урожаю та зменшувати витрати.

Такі біосенсори можуть застосовуватись не лише у ґрунтовому землеробстві, а й у гідропоніці — безґрунтовій системі вирощування рослин, де надзвичайно важливо підтримувати стабільну концентрацію елементів живлення у поживному розчині.

Окрім того, сенсорні технології використовуються і для виявлення мікотоксинів, що продукуються грибами роду *Aspergillus*, які часто зустрічаються в кукурудзі, арахісі, бавовняному насінні, зерні та спеціях. Для виявлення афлатоксинів створено імунофлуоресцентні біосенсори на основі специфічних антитіл.

Іншим прикладом є створення оптико-амперометричних біосенсорів на основі водоростей, іммобілізованих у гелеву матрицю альгінату кальцію. Такі сенсори застосовуються для вивчення фізіології клітин, зокрема в контексті дослідження фітопігментів, як-от ксантофілів і астаксантину. Встановлено, що астаксантин у клітинах водоростей поєднує антиоксидантну дію з властивістю світлофільтрації, що має перспективу для застосування у фармакології, біомедицині, екологічних і аграрних дослідженнях.

У практиці агромоніторингу також використовуються потенціометричні сенсори для визначення концентрацій іонів у соку рослин та у ґрунтовому розчині. Наприклад, спеціальні твердофазні електроди здатні визначати рівень кальцію чи нітратів. Такі сенсори можуть бути виготовлені з використанням електропровідного аерогелю з графеноподібних матеріалів, що дозволяє підвищити їхню стабільність і точність.

Для точного дозування добрив безпосередньо в прикореневу зону рослин розроблено мікроелектрохімічні системи, які виконують функцію так званих «розумних добрив». Їх основою є наночастинки на базі оксидів металів, які забезпечують контрольоване вивільнення поживних речовин та дозволяють водночас оцінювати стан ґрунту.

Окрім класичних електрохімічних сенсорів, активно розвиваються інші типи біосенсорів — фотохімічні, електрохемілюмінесцентні, сенсори на основі графену та подібних вуглецевих матеріалів. Вони можуть використовуватись для

виявлення фітогормонів і регуляторів росту, що відкриває нові можливості для контролю фізіологічного стану культур.

Нещодавно набули популярності носимі біосенсиори для рослин — гнучкі пристрої, які прикріплюються безпосередньо до листків або стебел і здійснюють безперервний моніторинг стану рослини. Такі сенсори дозволяють відстежувати зміну показників у реальному часі, своєчасно виявляти хвороби або порушення живлення, сприяючи точному догляду та зниженню ризиків втрат урожаю.

У сучасному сільському господарстві біосенсиори відкривають нові можливості для дрібних фермерів, допомагаючи підвищити ефективність, продуктивність та забезпечити сталість виробництва. Завдяки використанню таких сенсорів фермери можуть своєчасно виявляти хвороби рослин, виявляти патогени та дефіцит поживних речовин. Це дозволяє краще контролювати стан посівів і приймати обґрунтовані рішення щодо їх догляду, що зрештою сприяє підвищенню врожайності й прибутків.

Використання біосенсорів у малому фермерстві: ефективність, стійкість і прибутковість

Серед найперспективніших технологій — інтеграція біосенсорів із системами Інтернету речей (ІоТ), хмарними платформами, а також з роботизованими системами й штучним інтелектом. Завдяки цим рішенням реалізуються принципи точного землеробства.

Біосенсиори дозволяють з високою точністю виявляти бактеріальні, вірусні, грибкові та інші патогенні організми, що загрожують здоров'ю рослин. Застосування сенсорів на основі п'єзоелектричних матеріалів забезпечує безміткове визначення збудників хвороб у режимі реального часу. Вони мають перевагу завдяки простоті у використанні, доступності та широкому спектру застосування — від харчової промисловості до біотехнологій та екологічного моніторингу.

Фермери можуть використовувати біосенсиори для оптимізації витрат води, добрив і засобів захисту рослин, оскільки пристрої забезпечують точні дані про вологість ґрунту, вміст поживних речовин та загальний стан рослин. Це сприяє зменшенню витрат і мінімізації впливу на довкілля. Окрім того, сенсори можуть фіксувати наявність шкідливих речовин у ґрунті, воді та повітрі, таких як пестициди, токсини або хімічні забруднювачі.

Існують розробки мікрофлюїдних електрохімічних сенсорів та біоасей на основі ДНК-зондових структур, здатних визначати окремі патогени та віруси рослин. Крім того, сенсори на основі аптамерів можуть бути використані для визначення вмісту важких металів (зокрема свинцю) і агротоксинів, а також для моніторингу якості повітря.

Біосенсиори також можуть допомогти оцінити склад ґрунту, його родючість та рівень мікроелементів. Разом із безпілотниками, супутниковими знімками та мобільними додатками фермери отримують інструменти для оперативного збору та аналізу даних про стан посівів. Згодом ці дані можуть бути використані для прогнозування врожайності та покращення технологій вирощування.

Значну роль відіграє застосування мобільних додатків і смартфонів, що часто є єдиним фінансово доступним інструментом для дрібних фермерів. Вбудовані функції сучасних телефонів дозволяють виконувати моніторинг основних агропараметрів — вологості, температури, стану рослин тощо — без необхідності купівлі додаткового дорогого обладнання.

Сенсори на базі штучного інтелекту та IoT забезпечують отримання даних про поживні речовини в ґрунті в режимі реального часу, що дозволяє швидко приймати рішення щодо підживлення. Це знижує екологічне навантаження, скорочує витрати та підвищує врожайність.

Технології штучного інтелекту також дозволяють виявляти шкідників, хвороби та несприятливі погодні умови за допомогою аналізу зображень і моделей поведінки культур. Оптимізація використання ресурсів, таких як вода й добрива, забезпечує зменшення відходів та покращує екологічну ситуацію.

Системи підтримки прийняття рішень на основі штучного інтелекту можуть пропонувати індивідуальні рекомендації щодо термінів сівби, сівозмін, обробітку ґрунту тощо. Дрони з інфрачервоними сенсорами дозволяють точно визначати дефіцит елементів живлення та сприяти цільовому внесенню добрив.

Хмарні технології забезпечують зберігання, обробку та обмін аграрною інформацією, що сприяє зниженню витрат, покращенню маркетингу продукції та підвищенню ефективності управлінських рішень.

У концепції «Сільського господарства 4.0» поєднуються такі технології, як штучний інтелект, великі дані, хмарні сервіси, дистанційне зондування та Інтернет речей. Це дозволяє створювати доступні технологічні платформи з мінімальним впливом на довкілля та максимальною ефективністю виробництва.

Сучасні сенсорні системи, дрони, автоматичні пастки та сільськогосподарські роботи можуть моніторити стан рослин, виявляти шкідників і прогнозувати розвиток хвороб у реальному часі. Завдяки роботизованим системам з високоточною апаратурою для обприскування і мультиспектральною зйомкою можливе ефективне точкове реагування на загрози врожаю.

Параметри, що контролюються в аграрному секторі за допомогою смарт-біосенсорів

1. Датчик азоту: Азот є ключовим елементом, що сприяє росту рослин та значно підвищує врожайність зеленої маси. Він відіграє важливу роль у ґрунтових та водних екосистемах як основна поживна речовина. Разом з тим, надмірна концентрація азоту в довкіллі викликає занепокоєння, оскільки може спричиняти викиди парникового газу — оксиду азоту — що утворюється під час денітрифікації та сприяє глобальному потеплінню та забрудненню повітря. Органічні форми азоту зустрічаються у білках, амінокислотах, сечовині, відмерлих залишках рослин і живих організмах. Біосенсори дозволяють контролювати неорганічні форми — нітрати, нітроти, аміак і амоній. Дефіцит азоту уповільнює ріст рослин і викликає рівномірне пожовтіння листя. Сучасні

наноматеріальні електрохімічні біосенсиори забезпечують високу чутливість, вибірковість і швидку реакцію порівняно з традиційними аналогами.

2. Датчик фосфору: Фосфор — другий за важливістю макроелемент, необхідний для розвитку рослин. Він входить до складу нуклеїнових кислот, АТФ та фосфоліпідів, бере участь у процесах фотосинтезу, передачі енергії, сигнальних шляхах та ферментативних реакціях.

3. Датчики макро- та мікроелементів: Окрім азоту, фосфору, калію, кальцію, сірки та магнію, рослини також потребують водню, кисню й вуглецю (з води та вуглекислого газу), а також бору, заліза, марганцю, цинку, міді, нікелю та молібдену. Ці елементи беруть участь у важливих метаболічних процесах, зокрема фіксації азоту та синтезі білків. Точний моніторинг поживних речовин дозволяє знизити перевитрати добрив, мінімізувати негативний вплив на довкілля та підвищити економічну ефективність агровиробництва.

4. Датчики рослинних гормонів: Фітогормони регулюють ріст, розвиток та адаптацію рослин до змін навколишнього середовища. До основних регуляторів належать ауксини, брассиностероїди, цитокініни, етилен, гібереліни, жасмонові та саліцилові кислоти, стриголактони й пептиди. Фітогормональні сенсори дають змогу виявляти гормональні коливання у відповідь на стресові фактори (засуха, засолення, шкідники) та своєчасно реагувати на потенційні загрози для врожаю.

5. Датчики важких металів: Важкі метали, такі як свинець, кадмій, миш'як і хром, є небіологічними та токсичними елементами, що накопичуються в довкіллі й харчовому ланцюзі. Їхня токсичність залежить від виду рослин, умов росту, властивостей ґрунту та здатності кореневої системи до поглинання металів. Для виявлення токсичності важких металів були розроблені біосенсиори на основі селенових наночастинок. Наприклад, оптичний сенсор, що змінює колір із червоного на безбарвний при контакті з токсичними металами, дозволяє швидко і точно визначити наявність забруднень у польових умовах.

Різні параметри, такі як виявлення важких металів у ґрунті, можуть допомогти агровиробникам вчасно виявити токсини, що негативно впливають на ріст і врожайність рослин. Біосенсиори здатні вирішити цю проблему. Вони також можуть вимірювати інші корисні показники, включаючи вміст макро- та мікроелементів, кислотність (рН), вологість, температуру, а також виявляти залишки пестицидів і гербіцидів (рис. 8.2.1).

У сільському господарстві використовуються різні типи біосенсорів, що відіграють важливу роль у впровадженні концепції "розумного" землеробства. Біосенсиори дозволяють виявляти навіть незначні концентрації важких металів, патогенів та токсинів у ґрунті й воді завдяки високій чутливості, економічній доцільності та ефективності. Наприклад, ґрунтовий сенсор вологості ECH_2O застосовується для вимірювання температури ґрунту, вмісту вологи (об'ємної водомісткості) та електропровідності. Інші поширені біосенсиори здатні фіксувати рівень рослинних гормонів (наприклад, IAA, IBA), а також такі морфометричні параметри, як висота листка, його площа та ширина. Вони оцінюють не лише стан рослин, а й стан ґрунту, включно з посухою, солонцюватістю та іншими формами стресу.

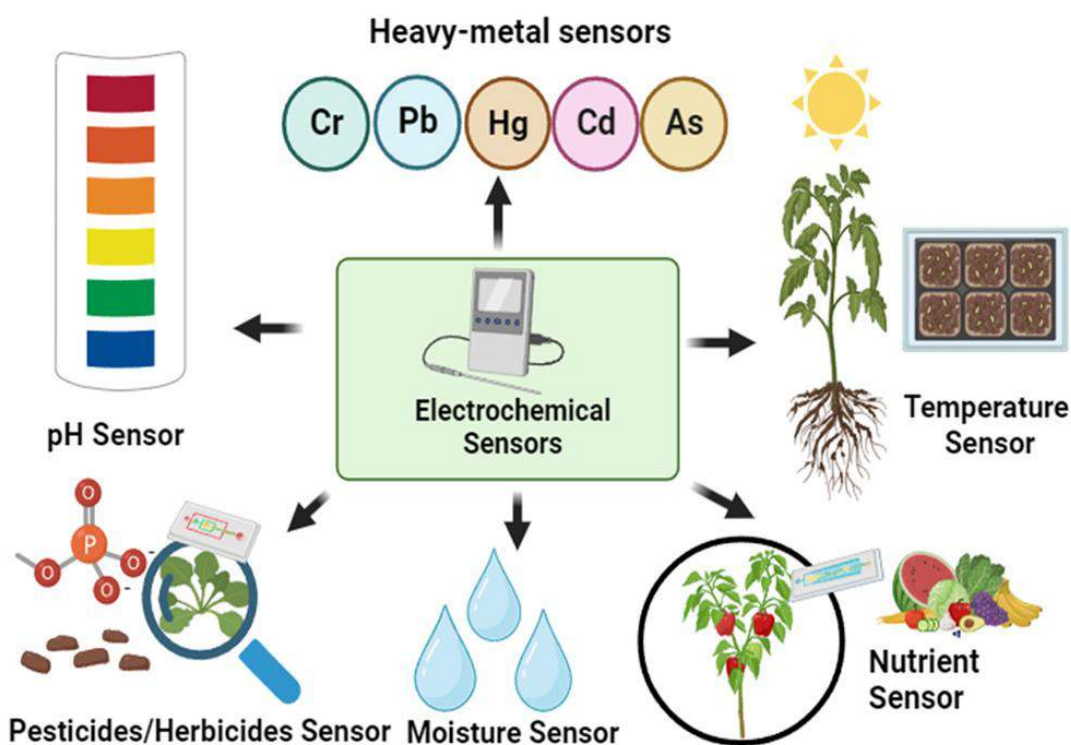


Рис. 8.2.1 Електрохімічні біосенсиори застосовуються для вимірювання різноманітних параметрів у рослин, зокрема кислотності ґрунту (pH), залишків пестицидів та гербіцидів, вологості, температури, а також загального споживання елементів живлення. Їх використання сприяє розвитку технологій точного землеробства, забезпечуючи ефективний моніторинг стану рослин і ґрунту в режимі реального часу.

Одним з найпоширеніших абіотичних стрес-факторів є солонцевий (або сольовий) стрес, який становить значну загрозу для світового агровиробництва. Тому створення біосенсорів є критично важливим для моніторингу стану рослин і визначення ознак стресу завдяки їхній здатності здійснювати точне та оперативне виявлення фізіологічних змін та біомаркерів. Наприклад, біосенсор на основі органічного електрохімічного транзистора (ОЕСТ), створений на основі бавовняної нитки, отримав назву "біористор". Його можна вводити безпосередньо в стебло рослини для безперервного моніторингу концентрації іонів у рослині шляхом використання соку рослини як електроліту. Такий підхід дозволяє виявляти початкові ознаки посухи у томатів, оцінювати дефіцит парціального тиску водяної пари та стежити за проявами сольового стресу у рослин у режимі *in vivo* в реальному часі. Пристрій також використовувався для підключення до ізольованих хлоропластів з метою відстеження переміщення глюкози з органел рослини та контролю концентрації цукрів у деревах протягом 48 годин у реальних умовах.

З метою підвищення продуктивності рослин і забезпечення здоров'я агроценозів було розроблено низку нових сенсорних технологій для ідентифікації шкідливих стрес-факторів. Ці сенсори здатні фіксувати широкий спектр індикаторів, які характеризують загальний стан ґрунту та рослин. Зокрема, для визначення вмісту азоту застосовуються оптичні сенсори

ближнього спектра, а також методи аналізу зображень, отриманих за допомогою смартфонів, які дозволяють автоматично ідентифікувати хвороби рослин.

Сучасні технології електронного моніторингу активно використовуються для відстеження стану рослин, включаючи сенсори нового покоління, такі як носимі біосенсори, електронні "носи", акустичні сенсори, оптичні сенсори та комплексні біосенсорні системи. Дослідження рослин отримало суттєвий поштовх завдяки ґрунтовим та носимим сенсорам, які ефективно працюють як у лабораторних умовах, так і безпосередньо в полі. Можливість безперервного збору даних у режимі реального часу щодо таких параметрів, як рН, температура, вологість, освітленість та концентрація поживних речовин, дозволяє оперативно реагувати на вплив біотичних і абіотичних факторів.

Це сприяє глибшому розумінню умов, у яких зростають рослини. У сфері виявлення стресу на ранніх етапах особливе значення має відстеження таких фізіологічних маркерів, як температура листків, вологість, водний потенціал і флуоресценція хлорофілу. Використання цих даних дозволяє розробляти стратегії підвищення стійкості рослин до несприятливих умов і, як наслідок, забезпечувати вищу врожайність.

Роль біосенсорів у практичному сільському господарстві

Нещодавно було розроблено унікальний мікрофлюїдний чип із молекулярно імпринтованим полімером, здатний виявляти поживні речовини, зокрема фосфати та нітрати, у живильному середовищі. У конструкції було застосовано потенціостат із мікроконтролерним керуванням для реєстрації та збереження даних, які передавалися за допомогою модуля довготривалого радіозв'язку (LoRa). Ефективність пристрою підтверджено на основі пророщування насіння люцерни (Crimson Red) протягом семи днів із паралельним вимірюванням вмісту фосфатів та нітратів. Сенсор, побудований на основі імпринтованих полімерів (MIP), показав точність виявлення нітратів на рівні 99%, а фосфатів — 95% у діапазоні концентрацій від 1 до 1000 мМ. У майбутньому такі доступні за вартістю сенсори можуть використовуватись для моніторингу мікросередовища ґрунту, добору посухостійких сортів, ідентифікації кореневих хвороб або патогенів, а також аналізу ефективності засвоєння елементів живлення.

У місті Бельтсвілл (Меріленд, США) було проведено експеримент із порівняння гіперспектральної аерофотозйомки зображень та простого фотографування з модельного літака для оцінки густоти посівів кукурудзи й інтенсивності поглинання поживних речовин. У дослідженні використовували гіперспектральний сенсор AISA (Airborne Multispectral Sensor System), здатний з високою точністю фіксувати температуру рослин і кількість енергії, яку вони випромінюють у видимому та ближньому інфрачервоному спектральному діапазоні.

Іншим прикладом високочутливого рішення є електрохімічний імуносенсор для виявлення фітогормону індол-3-оцтової кислоти (IAA). У його конструкції використано наночастинки золота на пористому графеновому шарі,

нанесеному на вугільний електрод. Сенсор здатен виявляти гормон у широкому концентраційному діапазоні — від 2×10^{-11} до 2×10^{-8} г/мл, демонструючи високу лінійність ($R^2 = 0.9970$) та низький поріг виявлення — 0.016 нг/мл.

Широкого поширення також набули електронні носи (E-nose), які імітують роботу біологічної нюхової системи. Вони складаються з багатосенсорного масиву та алгоритмів обробки даних і здатні реагувати на леткі органічні сполуки (VOCs), що утворюються в процесах захисту, метаболізму, чи у відповідь на ураження рослин. Такі сполуки можуть слугувати індикаторами захворювань або загального стану рослин. Зокрема, електронний ніс було використано для виявлення грибкової інфекції на полуниці.

Останнім часом усе більшої популярності набувають сенсори, які закріплюються безпосередньо на рослинах — так звані "носимі сенсори". Вони дозволяють відстежувати стан рослин у реальному часі та виявляти хвороби на ранніх етапах. Крім того, завдяки дистанційному зондуванню — з супутників або дронів — стало можливим прогнозувати врожайність, контролювати темпи росту та виявляти забруднення посівів шкідниками або хворобами.

Існує потреба у створенні універсальних сенсорних платформ, здатних забезпечувати багатопараметричний моніторинг навколишнього середовища та розвитку рослин у реальному часі. Висока ефективність, компактність, екологічність і доступність електрохімічних сенсорів відкриває нові можливості для точного землеробства.

Особливо перспективним напрямом є інтеграція біосенсорів зі смартфонами. Завдяки вбудованим камерам, мікрофонам, акселерометрам, гіроскопам, компасам, GPS та іншим датчикам, смартфони можуть слугувати платформами для мобільного збору даних. Смартфон можна використовувати для зйомки, фіксації координат, аналізу параметрів навколишнього середовища (температури, вологості тощо), надсилання інформації через Wi-Fi на віддалений сервер, де вона зберігається у базі даних (наприклад, MongoDB).

Такі системи вже використовують у сільському господарстві для фіксації надзвичайних ситуацій, моніторингу роботи персоналу, контролю за безпекою (наприклад, перевертання тракторів) тощо. Сенсори на базі смартфонів можуть охоплювати параметри навколишнього середовища, положення в просторі та динаміку руху, що робить їх універсальним інструментом у цифровому фермерстві.

Механізм роботи біосенсорів у клітинах рослин для відстеження поживних речовин

Механізм роботи біосенсорів у клітинах рослин для відстеження поживних речовин базується на особливостях ризосфери — зони ґрунту, що оточує корені. Саме в цій зоні відбувається поглинання поживних речовин, а органічні речовини, які виділяють корені, змінюють хімічний та біологічний склад середовища. Взаємодія між рослинами та мікроорганізмами у ризосфері суттєво впливає на доступність поживних речовин і визначає родючість ґрунту і ефективність аграрних процесів. Для моніторингу поживних речовин

використовують, зокрема, генетично модифіковані бактерії *Pseudomonas fluorescens*, що світяться завдяки гену *lux* та змінюють інтенсивність світіння залежно від рівня доступних поживних речовин, таких як вуглець, азот і фосфор. Вимірюючи біolumінесценцію, дослідники оцінюють наявність поживних речовин у ґрунті та ризосфері, а також спостерігають виділення корневих екзудатів у відповідь на зміни в концентрації нітратів і азоту.

Основні етапи роботи біосенсорів включають розпізнавання поживних речовин біологічними рецепторами, трансформацію цього сигналу у вимірювані електричні або оптичні показники, посилення сигналу, звітність і подальший аналіз отриманих даних з урахуванням фізіології рослин для визначення концентрації поживних речовин та їх поглинання. Носимі біосенсиори, які прикріплюються безпосередньо до поверхні рослин, дозволяють у реальному часі перетворювати зовнішні та внутрішні зміни рослини в електричні сигнали, що дає змогу детально вивчати мікросередовище рослини та її фізіологічні процеси під епідермісом. Прилади, як хлорофільні лічильники SPAD, допомагають швидко і безконтактно оцінити рівень азоту в культурах. Оптичні біосенсиори, які базуються на взаємодії між аналітом та біореагентом із подальшим аналізом змін світлових параметрів, широко застосовуються для виявлення рослинних патогенів.

Однак носимі сенсори можуть створювати фізіологічний стрес, наприклад через тиск своєю вагою, обмеження росту рослини, затінення або перекриття продихів, що заважає газообміну і фотосинтезу. Тому сучасні пристрої мають бути прозорими, легкими, еластичними і здатними адаптуватись до росту рослини, що досягається правильним вибором матеріалів і дизайном. Для контролю вологості та освітлення поблизу листя застосовують гнучкі сенсори на основі наночарів ZnIn_2S_4 , які фіксують відкриття і закриття продихів. Електрохімічні сенсори для визначення глюкози важливі для моніторингу врожайності і якості плодів, оскільки рівень глюкози пов'язаний із фотосинтезом. Також розроблено методи відстеження активності β -глюкуронідази в трансгенних рослинах за допомогою мікроелектродів, що дозволяє у реальному часі спостерігати експресію генів.

Для оцінки фотосинтетичної активності та фітотоксичних ефектів у рослин використовують флуоресцентне зображення (РАМ-флуориметрія), яке виявляє зміни у фотосинтезі, а інфрачервоне теплове зображення допомагає прогнозувати температуру листя і виявляти хвороби за змінами у транспірації. Загалом біосенсиори, інтегровані у рослини, відкривають нові можливості для точного контролю поживного стану і здоров'я культур, сприяючи розвитку сучасного точного землеробства, при цьому необхідно враховувати потенційний стресовий вплив таких сенсорів і розробляти їх з мінімальним втручанням у фізіологію рослин.

Типи біосенсорів для визначення живильних речовин

Нанобіосенсиори поєднують фізичний перетворювач сигналу з наночастинками і використовуються як біологічні детектори, які є доступними,

дуже чутливими, портативними, мінімально інвазивними, швидкими і здатними до моніторингу в реальному часі. Існують різні типи біосенсорів для виявлення поживних речовин у рослинах: ферментні, електрохімічні, ДНК-біосенсори, цілі клітинні біосенсори, іонно-селективні електрохімічні, оптичні, наноматеріальні, пізоелектричні, мікробні, а також носимі біосенсори для рослин.

Одним із новаторських розробок став голкоподібний мікросенсор для глюкози, який уперше дозволив в реальному часі відстежувати рівень глюкози в рослинах і отримувати інформацію про їх фізіологічний стан під час стресових умов. Оптичні біосенсори на основі флуоресценції дають змогу вимірювати загальне споживання поживних речовин у культурах і ґрунті. Вони працюють так, що спеціальні флуоресцентні молекули, зв'язуючись із поживними речовинами, випромінюють світло, інтенсивність якого прямо залежить від концентрації цих речовин (рис. 8.2.2).

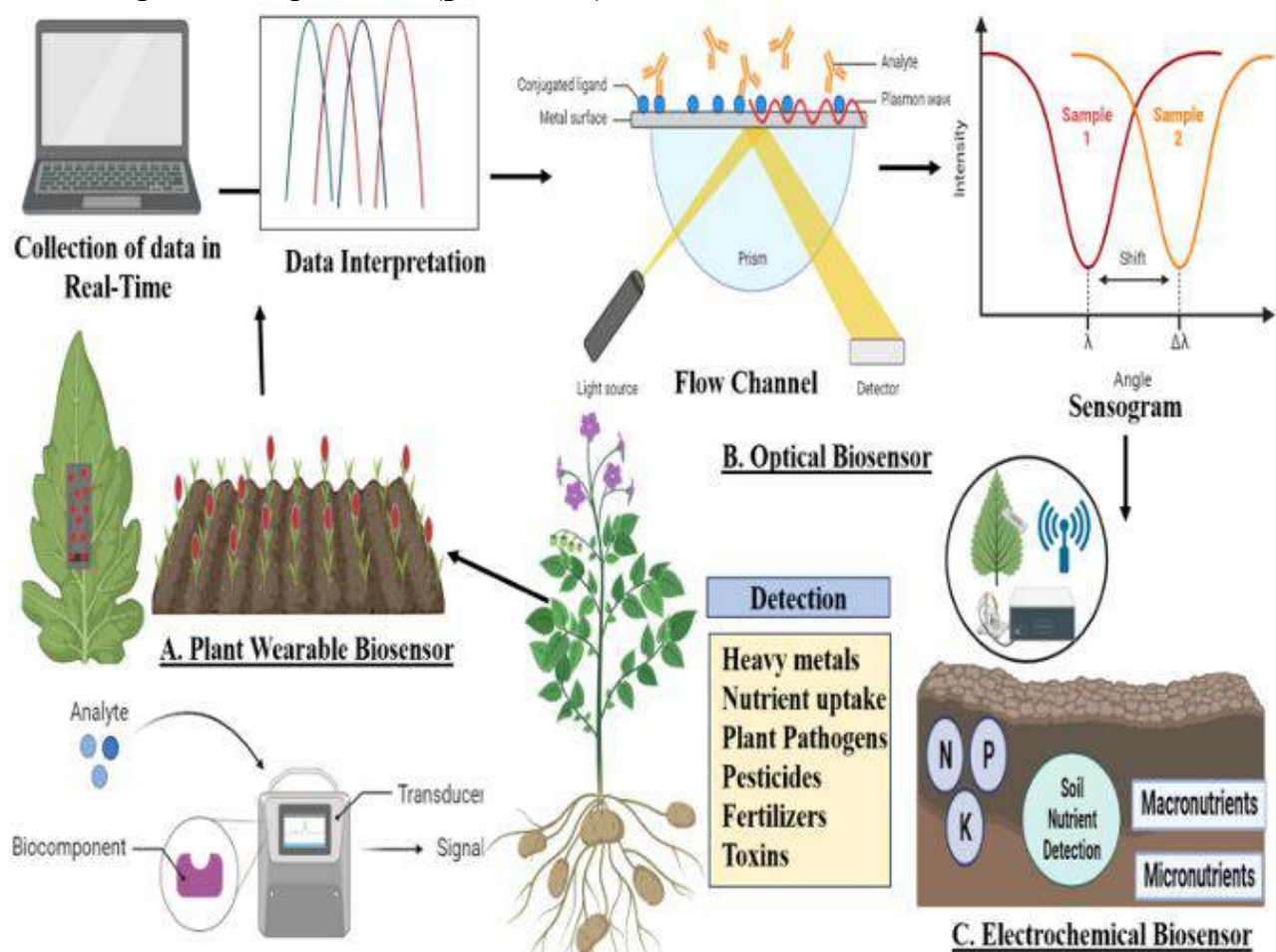


Рис. 8.2.2 розробки в області різних типів біосенсорів, що застосовуються у точному землеробстві, включають: (А) носимі біосенсори для рослин, (В) оптичні біосенсори та (С) електрохімічні біосенсори. Вони допомагають у визначенні поглинання поживних речовин рослинами, виявленні пестицидів, а також виявленні важких металів і токсинів.

Носимі біосенсори дозволяють в режимі реального часу аналізувати пестициди з органофосфорними елементами на поверхні рослин і передавати дані на смартфон для оперативного контролю. Для реалізації принципів точного

землеробства застосовують інтелектуальні наносенсиори, які розподіляють поживні речовини відповідно до потреб рослин. Традиційні сенсори поступово замінюють портативні, високочутливі і точні наносенсиори.

Відомо, що компанія Affymetrix розробила платформу, яка збирає, аналізує і управляє складними генетичними даними, використовуючи ДНК-чипи для ідентифікації мікроорганізмів та виявлення генетично модифікованих продуктів. Для широкого застосування в сільському господарстві важливо підвищувати ефективність, надійність і практичність біосенсорів, особливо для відстеження поживних речовин безпосередньо в полі.

Сьогодні штучний інтелект і аналітика даних, що застосовуються для моніторингу ґрунтових та рослинних параметрів у реальному часі, здатні докорінно змінити аграрний сектор. Це допомагає максимізувати врожайність, зменшувати вплив на довкілля і оптимізувати внесення добрив. Штучний інтелект, як сучасна технологія, підвищує стандарти ведення сільського господарства, постійно контролюючи доступні поживні речовини і порівнюючи їх із історичними даними про найкращі умови вирощування різних культур.

За допомогою великих масивів даних штучний інтелект оцінює вплив різних типів і норм добрив, щоб визначити оптимальні дози для максимального врожаю при мінімальних витратах, що сприяє екологічній сталості. Сучасні технології, такі як дрони, Інтернет речей, супутникові знімки, безпілотні літальні апарати, а також мережі датчиків і актуаторів, допомагають зменшити навантаження на фермерів і підвищити ефективність роботи господарств.

Крім того, машинне навчання у поєднанні з IoT-системами забезпечує безперервне збирання і передачу важливих даних про склад ґрунту, ключові поживні речовини (азот, фосфор, калій), температуру, вологість та вміст води у центральне хмарне сховище, де ці дані аналізуються алгоритмами для формування рекомендацій щодо оптимального управління рослинництвом.

Різні типи наночастинок для наносенсорів

Різні типи наночастинок на основі металів, таких як мідь (Cu), цинк (Zn), алюміній (Al), залізо (Fe), марганець (Mn), кобальт (Co), срібло (Ag) тощо, широко використовуються для створення наноматеріалів, які застосовуються у сільському господарстві. Металеві наночастинок, зокрема цинку, міді та срібла, можуть застосовуватись у вигляді добрив, що покращує засвоєння поживних речовин рослинами. Наносенсиори на основі золота (Au) і срібла (Ag) використовуються для кольориметричного виявлення пестицидів. Наприклад, група вчених розробила швидку та чутливу тестову картку для визначення залишків пестицидів, засновану на зміні інтенсивності кольору, яка виникає через інгібування активності ацетилхолінестерази (AChE) під впливом пестицидів.

Інший приклад — біосенсор поверхневого плазмонного резонансу (SPR) без міток на основі золотих нанорозмірних стрижнів, який розроблено для виявлення двох поширених вірусів орхідей. Нікелеві оксидні наночастинок, отримані гідротермальним методом із середнім розміром 15–20 нм,

використовуються як сенсори з високою чутливістю і широким діапазоном вимірювань.

Дендримери — це глобулярні макромолекули зі структурною однорідністю, високою щільністю функціональних груп і нанорозміром, які сприяють створенню високочутливих біосенсорів (рис. 8.2.3). Різноманітні наноматеріали, включно з вуглецевими наноматеріалами, органічними, неорганічними та металевими наноматеріалами, застосовуються у виготовленні біосенсорів. До них належать липосоми, вуглецеві нанотрубки, фулерени, силіка, нанострижні, полімерні мікелли, дендримери тощо. Завдяки своїм унікальним властивостям ці матеріали успішно використовуються в багатьох наукових сферах. Вони мають широкий спектр застосувань — в електроніці, косметології, фармацевтиці, харчовій промисловості, контролі якості продуктів і медицині.

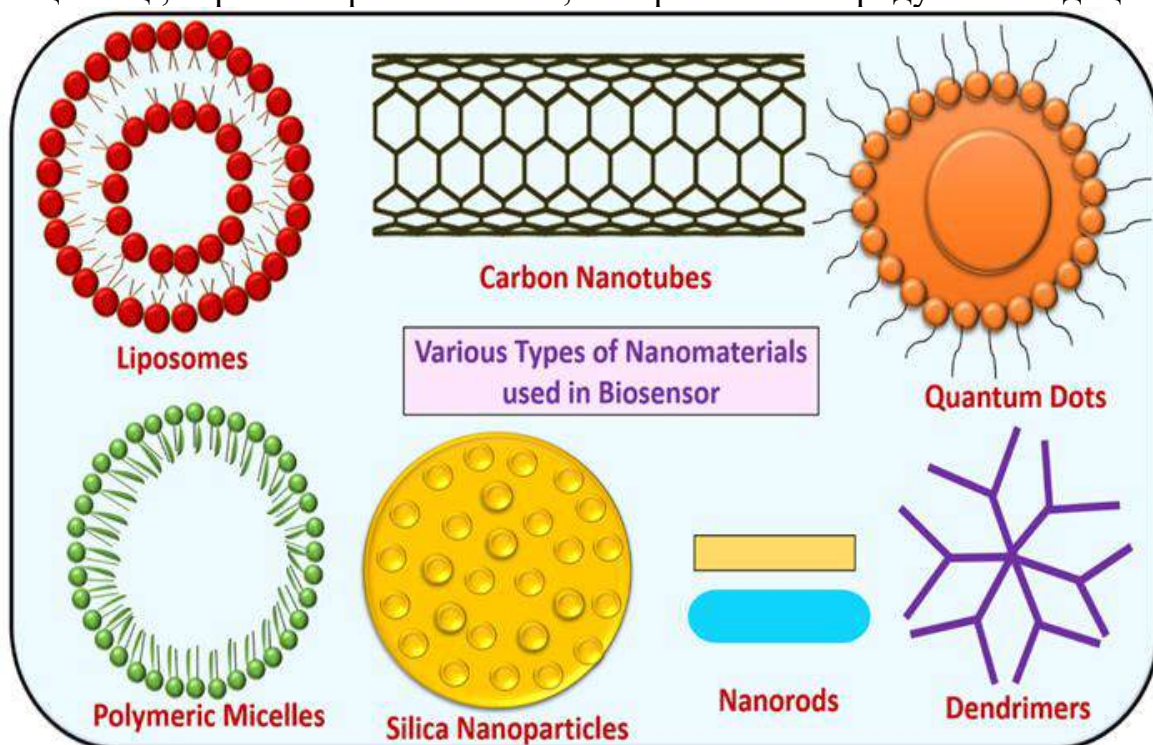


Рис. 8.2.3 Різні типи наноматеріалів, які використовуються як наносенсори.

Особливо великою популярністю серед вуглецевих наноматеріалів у сільському господарстві користуються вуглецеві нанотрубки (CNTs), які можуть проникати через клітинні стінки рослин, впливати на регуляцію росту, виконувати роль середовища для біосенсорів і сприяти доставці речовин у рамках «розумного» землеробства. Фулерен (C₆₀), найпоширеніший представник своєї родини, володіє багатьма цікавими властивостями — високою здатністю адсорбувати органічні молекули, великою питомою площею, біосумісністю, інертністю, стабільною структурою та високою електропровідністю.

Дослідження показали, що фулерен C₆₀ і вуглецеві нанотрубки можуть підвищувати здатність рослин утримувати воду, збільшувати біомасу і врожайність майже на 118%. Це є значним досягненням у нанотехнологіях останніх років. Зокрема, насіння гіркокого дині, оброблене фулереном, містило

значно більшу кількість фітокомпонентів, таких як інсулін (на 91%), кукумбін-В (на 74%), лікопін (на 82%) і чарентин (на 20%). Використання вуглецевих нанотрубок також може збільшити врожайність томатів приблизно вдвічі при концентрації 50 мкг/мл, що свідчить про великий потенціал цих матеріалів для підвищення продуктивності сільського господарства.

Липосоми — ліпідні везикули, широко використовувані у різних сферах, зокрема у створенні біосенсорів, медицині та екологічному моніторингу. Біосенсиори на основі липосом застосовуються для визначення дуже низьких концентрацій органофосфорних пестицидів, таких як діхлоровос і параоксон.

Різноманітні наносенсиори — квантові, пізоелектричні, амперометричні, оптичні — використовуються для аналізу біологічних процесів. Наприклад, електрохімічні наносенсиори можуть виявляти окисно-відновні реакції в рослинах. Оптичні наносенсиори, що базуються на принципі переносу енергії Ферстера (FRET), застосовують для аналізу білкових взаємодій, вмісту клітин і різних біофізичних параметрів. Пізоелектричні біосенсиори використовують для виявлення патогенної бактерії *Staphylococcal enterotoxin B*, наприклад, у яблучному соку.

Перехід від лабораторних досліджень до практичного застосування у польових умовах

Перенесення біосенсорних технологій із лабораторій безпосередньо до сільськогосподарських полів залишається непростим завданням, проте саме цей етап дає змогу повною мірою реалізувати потенціал інновацій для підвищення врожайності, покращення стану ґрунтів та ефективного управління ресурсами. Впровадженню біосенсорів у практику заважає низка чинників, серед яких — вартість, чутливість, вибірковість, забезпечення якості та конструктивні особливості приладів.

Мініатюризація електрохімічних осередків стала важливим кроком у створенні портативних сенсорних пристроїв, що дозволило подолати обмеження, пов'язані з масовим виробництвом. Різні типи електрохімічних біосенсорів використовуються для виявлення широкого спектру аналітів — від поживних речовин до пестицидів, гербіцидів, патогенів, іонів важких металів і біомаркерів рослин. Вони також дають змогу контролювати такі параметри, як рН, вологість, температура, рівень мінерального живлення, а також виявляти шкідників і хвороби.

У сучасних умовах штучний інтелект (ШІ) відіграє ключову роль у вдосконаленні застосування біосенсорів для підтримки сталого сільського господарства. Інтеграція сенсорів, Інтернету речей (IoT), великих даних і хмарних технологій сприяє новій еволюції в аграрній сфері. Електрохімічні біосенсиори можуть бути об'єднані з дистанційним зондуванням та IoT і керуватися за допомогою смартфона, що дозволяє фермерам отримувати доступ до інформації з будь-якої точки. Завдяки ШІ фермери можуть також обирати оптимальний час для висіву культур.

Інтелектуальна система землеробства, побудована на основі IoT, включає чотири складові: збір даних, граничні обчислення, передавання інформації та хмарні обчислення. До цієї системи інтегрують алгоритми глибокого підкріплення, що сприяє підвищенню врожайності та прибутковості агровиробництва.

Для фермерів малого та середнього масштабу важливими факторами є рентабельність, функціональність і простота експлуатації біосенсорів. Це особливо актуально для впровадження таких технологій у різних кліматичних умовах та агросистемах.

Економічна доцільність. Зменшення витрат на виробництво біосенсорів забезпечується застосуванням доступних матеріалів і компонентів. Прикладом є біосенсиори на основі живих клітин, в яких використовуються органели або цілі клітини як біологічні елементи. На відміну від ферментів, такі клітини дешевші, стабільніші за температурних і рН-змін, та мають довший термін активного функціонування. Вони можуть бути генетично модифікованими й містити два функціональні модулі: сенсорний і сигнальний. Основні переваги таких мікробних сенсорів — низька вартість, портативність і адаптивність до різних середовищ.

Зручність у користуванні. Перспективним напрямом є розробка компактних та простих у використанні сенсорів для моніторингу фізіологічного стану ґрунтів і рослин. Наприклад, сенсори для вимірювання кислотності ґрунту є доступними на ринку й широко використовуються для оцінки та корекції рН середовища. Один із прикладів — Veris pH Manager™, що нещодавно вийшов на американський ринок, використовує іон-селективні сурм'яні електроди для визначення рН.

Інтеграція з IoT. Інтеграція штучного інтелекту й IoT у розумне землеробство дозволяє здійснювати моніторинг довкілля в реальному часі — зокрема температури, вологості, забруднення, складу ґрунту, радіаційного фону тощо. Зібрані дані аналізуються алгоритмами ШІ, що дає змогу оптимізувати управління фермою, своєчасно реагувати на зміни й раціонально використовувати ресурси. У таких системах застосовують сенсори на базі IoT, технології ZigBee, плати Arduino, а також методи глибокого навчання, які покращують точність аналізу та прийняття рішень.

Аналіз і обробка даних. Масиви даних, отриманих за допомогою IoT-сенсорів, супутникових знімків, сільськогосподарської техніки та мобільних додатків, дають змогу виявляти закономірності, оцінювати стан полів і прогнозувати врожайність. Такі дані допомагають визначити ділянки, які потребують зрошення, обробки пестицидами чи гербіцидами, а також сприяють моніторингу фітопатогенів у режимі реального часу. Усе це сприяє вирощуванню здоровіших і продуктивніших культур.

Використання біосенсорів у сільському господарстві може принести користь дрібним фермерам, однак існують певні обмеження, пов'язані з вартістю, доступністю, наявністю обладнання та необхідністю спеціальних технічних знань. Через високу ціну біосенсорів і супутнього устаткування

багатом дрібним господарствам із обмеженими фінансовими ресурсами складно дозволити собі ці технології.

У країнах, що розвиваються, більшість фермерів часто не мають достатнього рівня освіти або навичок, а також не виявляють зацікавленості у впровадженні новітніх технологій. Саме це є однією з причин, чому «розумне» землеробство все ще не витіснило традиційні підходи.

Крім того, фермерам може бути складно користуватися біосенсорами через брак технічної підготовки. Складнощі виникають при налаштуванні, калібруванні, інтерпретації даних і вирішенні технічних проблем. Часто фермери не знають, як використовувати дані, що надходять із метеостанцій, або як перетворити їх у зручний для використання формат. Складність самих систем, похибки обчислень і проблеми з прийняттям технологій ускладнюють впровадження інновацій.

У таких випадках допоміжними можуть стати IoT-технології та бездротові сенсорні мережі (WSN), які дозволяють реалізувати мікрокліматичні метеостанції, особливо в сільських районах. Проте без належної підтримки та навчальних програм дрібні фермери можуть не мати достатньої компетенції для ефективного використання біосенсорів. Дані, що генеруються біосенсорами, часто є складними для аналізу, оскільки потребують сучасних аналітичних інструментів. Обробка цих даних з метою оптимізації технологій вирощування культур, управління ресурсами або мінімізації ризиків — це виклик для малих господарств.

Ще однією проблемою є нестача інфраструктури в сільській місцевості, зокрема ненадійний інтернет, що ускладнює передачу й обробку даних у реальному часі. Щоб подолати ці труднощі, необхідні спеціалізовані навчальні програми та постійна підтримка користувачів технологій. Для забезпечення сталого землеробства потрібні доступні, інтерактивні та прості у використанні цифрові платформи, які надають агреговану інформацію щодо традиційних агротехнологій, сільськогосподарських знарядь, шкідників і хвороб рослин. Дані мають бути доступні для користувачів із різних пристроїв, зокрема комп'ютерів і смартфонів.

Оперативне виявлення збудників хвороб рослин — бактерій, грибів, вірусів, нематод, віроїдів, ооміцетів тощо — має вирішальне значення для запобігання економічним втратам. Ці патогени спричиняють прямі та опосередковані збитки, які щорічно сягають близько 40 мільярдів доларів. Надзвичайно важливим аспектом є перевірка можливостей біосенсорів щодо раннього виявлення хвороб, ідентифікації патогенів та визначення нестачі елементів живлення. Це передбачає лабораторні дослідження, тестування в польових умовах та довготривалий моніторинг безпосередньо на місці.

Перед практичним використанням біосенсорів у полі необхідно провести лабораторні випробування для оцінки чутливості, точності, надійності й ефективності сенсорів. У лабораторних умовах сенсори мають виявляти конкретні аналіти або параметри, що пов'язані з агровиробництвом: патогени,

маркери хвороб, вміст поживних речовин, властивості ґрунту та вплив навколишнього середовища.

У минулому для точного визначення речовин застосовували складні лабораторні методи, такі як газова (GC) та високоефективна рідинна хроматографія (HPLC). Водночас вони є дорогими, трудомісткими та вимагають висококваліфікованого персоналу. Альтернативою їм стали біосенсиори, які виявилися економічно вигіднішими та простішими у використанні.

Розвиток нанотехнологій показав високу ефективність у вирішенні зазначених проблем. Легкі, зручні у використанні пристрої вже застосовуються для моніторингу фізіологічного стану рослин і ґрунту — визначення родючості, кислотності, вологості, концентрацій мінералів, а також виявлення шкідливих речовин. Такі сенсори також використовують для завчасного виявлення шкідників і хвороб.

У польових випробуваннях застосовуються різні типи біосенсорів: оптичні, амперометричні, акустичні, електромагнітні, електрохімічні та механічні.

У межах одного з досліджень Лау з колегами розробили високочутливу технологію для виявлення ДНК рослинного патогену із застосуванням колоїдних наночастинок золота як зонда. Цей біосенсор було успішно використано для виявлення *Pseudomonas syringae* в заражених зразках рослин. Метод включав ампліфікацію ДНК за допомогою рекомбіназної полімеризаційної реакції з подальшим гібридуванням із ДНК-мітками на наночастинок золота.

Більшість електрохімічних методів виявлення хвороб рослин ґрунтується на використанні біосенсорів для ідентифікації збудників. До таких методів належать вольтамперометричні, потенціометричні та імпедиметричні вимірювання, що базуються на перенесенні електронів, який виникає в результаті біохімічної реакції між функціоналізованим електродом і аналітом.

Переваги біосенсорів

Використання біосенсорів на основі металевих наночастинок, органічних біополімерів та різноманітних мікроорганізмів у сільському господарстві й екологічному моніторингу сприяє зменшенню застосування токсичних хімікатів, скороченню втрат поживних речовин при удобренні та підвищенню врожайності завдяки зменшенню впливу шкідників і хвороб. Це особливо важливо для розвитку точного землеробства.

Біосенсиори дозволяють контролювати параметри, що впливають на ріст і розмноження мікроорганізмів, зокрема температуру, рівень розчиненого кисню, рН, вміст металів та доступність поживних речовин, що використовується під час моніторингу процесів біоремедіації. Завдяки інтелектуальному моніторингу із застосуванням біосенсорів забезпечується своєчасне виявлення шкідників, патогенів та інших забруднювачів, які можуть вплинути на якість сільськогосподарської продукції під час зберігання, а також гарантується безпека харчових продуктів.

Ще однією важливою функцією біосенсорів є вимірювання концентрацій органічних сполук, таких як кислоти, алкоголь та вуглеводи. Попри існування сучасних методів хроматографії — ВЕРХ, капілярного електрофорезу, газової хроматографії, спектроскопії — що відзначаються високою чутливістю та точністю, їх використання вимагає кваліфікованого персоналу, є затратним за часом та ресурсами. Біосенсиори, у свою чергу, виступають як надійна технологія для швидкого виявлення шкідників і хвороб, що обмежують продуктивність сільського господарства.

Крім того, вони сприяють зниженню негативного впливу пестицидів як на навколишнє середовище, так і на здоров'я фермерів і місцевого населення. Завдяки цільовому моніторингу змін довкілля та адресній дії агротехнічних засобів забезпечується ефективна реалізація концепції точного землеробства. Для цього також активно використовуються комп'ютери, системи супутникового позиціонування, сенсори, смартфони та методи дистанційного зондування.

Застосування біосенсорів

Біосенсиори є потужними аналітичними приладами, здатними перетворювати біологічні сигнали в електричні. Завдяки своїй універсальності, вони знаходять широке застосування в сільському господарстві, біомедицині, судово-медичній експертизі, харчовій промисловості, моніторингу відходів та екології.

У сільському господарстві біосенсиори використовуються для виявлення поживних речовин, патогенів, токсинів, а також для діагностики інфекційних захворювань у рослин і тварин. Крім того, вони ефективні для ідентифікації залишків пестицидів, гербіцидів і трансгенних організмів.

У медицині біосенсиори використовуються для діагностики серцево-судинних та легеневих захворювань, онкологічних патологій, у тому числі для виявлення біомаркерів раку. Особливо перспективними є електрохімічні біосенсиори, які забезпечують високу специфічність і чутливість. Також вони використовуються для виявлення патогенних мікроорганізмів, а також біорецепторів — пептидів, антитіл, ферментів, біомолекул тощо.

У харчовій галузі біосенсиори мають надзвичайно важливе значення для забезпечення якості та безпеки харчових продуктів. Вони дозволяють визначати наявність харчових забруднювачів і залишків пестицидів у зразках. Також за їх допомогою можна контролювати вміст ключових харчових компонентів: вітаміну С, молочної кислоти, глюкози, алкоголю, яблучної, фенольної, оцтової кислот та інших.

Не менш важливе значення біосенсиори мають у сфері моніторингу навколишнього середовища: визначення концентрацій фунгіцидів, важких металів, токсинів, промислових відходів, а також оцінювання якості повітря, ґрунту та води. Зокрема, вони дозволяють оперативно виявляти сполуки, що мають ендокринно-руйнівний ефект.

Висновки

У цьому оглядовому розділі головна увага зосереджена на застосуванні біосенсорів у різних сферах аграрного сектору. Використання біосенсорів дозволяє виявляти широкий спектр параметрів у рослинах: від ранньої діагностики хвороб, оцінки стану ґрунту, ефективності засвоєння поживних речовин і вмісту хлорофілу — до виявлення токсинів та небезпечних патогенів. Можливість моніторингу цих параметрів у режимі реального часу є важливою не лише для стану рослин і мікроорганізмів, а й для здоров'я людини. Біосенсиори на основі нанотехнологій уже активно використовуються у харчовій галузі для виявлення фальсифікацій, у клінічній діагностиці та для моніторингу стану довкілля.

На основі огляду сучасних досліджень можна зробити висновок, що пристрої для моніторингу в реальному часі сприяють впровадженню точної (прецизійної) агрономії, оскільки забезпечують раннє виявлення пестицидів, гербіцидів, важких металів і токсинів. Регулярне відстеження зростання рослин та таких параметрів, як засвоєння поживних речовин, вміст хлорофілу, фотосинтетична активність, рівні макро- і мікроелементів, є надзвичайно важливим для розвитку сталого землеробства. Біосенсиори можуть бути застосовані у масштабному землеробстві як доступні, вибіркові, чутливі, портативні та швидкодіючі пристрої. Особливо перспективними є електрохімічні біосенсиори, які через свою доступність, точність та ефективність, ймовірно, перейдуть із лабораторного застосування безпосередньо до польових умов.

Очікується, що такі сенсори допоможуть аграріям оптимізувати практики управління посівами, вчасно виявляти шкідників, патогени, хвороби та наявність важких металів у ґрунті й воді. Їхня здатність забезпечувати контроль на місці, ефективніше використовувати ресурси, зменшувати екологічний вплив і підвищувати якість врожаю робить біосенсиори вагомим інструментом у досягненні сталого сільського господарства.

Біосенсиори переважно розробляються з урахуванням здатності до виявлення низьких концентрацій речовин, чутливості, специфічності та економічної доцільності. Впровадження цифрових технологій у сільське господарство відкрило нові можливості для досягнення глобальної продовольчої безпеки. Аграрний сектор охоче приймає прості у використанні інновації. Для підтримки малих фермерів, які мають обмежені ресурси, вже розробляються цільові стратегії: створення інструментів для обробки даних, платформи для обміну знаннями, партнерства, фінансова підтримка, розробка доступних рішень і адаптація технологій до конкретних проблем фермерів.

У найближчому майбутньому реальним стане використання польових експрес-тестів для оцінки якості та безпеки безпосередньо у полі, вдома, у бізнесі чи на ринку — навіть зі смартфона. Однак нинішні сенсори покривають лише обмежений спектр завдань, що не дозволяє повною мірою задовольнити потреби аграрного сектору. Потребують покращення параметри точності, чутливості,

специфічності, конструкції електродів, методів виготовлення, вартості та придатності до застосування в полі.

Мета нових ініціатив полягає в тому, щоб фермери могли повною мірою використовувати переваги біосенсорів шляхом зниження бар'єрів для впровадження та підвищення продуктивності й сталості. Для підтвердження користі біосенсорів для малих господарств важливим є впровадження довгострокового моніторингу стану рослин, порівняльного аналізу з традиційними методами, прозорого оприлюднення даних і обмежень, залучення фахової експертизи, врахування зворотного зв'язку від користувачів і активна взаємодія із зацікавленими сторонами. Усі ці кроки сприятимуть підвищенню довіри до новітніх технологій та їх ефективному впровадженню у практику сталого землеробства.

8.3 ВИКОРИСТАННЯ ПАСИВНОГО АКУСТИЧНОГО МОНІТОРИНГУ ДЛЯ АГРОЕКОЛОГІЧНИХ СХЕМ, ОРІЄНТОВАНИХ НА РЕЗУЛЬТАТ: МОЖЛИВОСТІ, ВИКЛИКИ ТА НАСТУПНІ кроки

Вступ

Біорізноманіття сільськогосподарських угідь у Європі переживає значне й широкомасштабне скорочення. Ця тенденція зумовлена як інтенсифікацією аграрного виробництва, так і занепадом традиційно екстенсивного землекористування в малоприсадибних для ведення господарства регіонах.

Для протидії цим процесам у Європі активно впроваджуються агроекологічні схеми (AES), які передбачають фінансову компенсацію для фермерів за надання суспільних благ, зокрема послуг із збереження біорізноманіття. Найбільш поширеною формою AES є так звані діяльнісно-орієнтовані схеми, де фермери отримують виплати за впровадження конкретних заходів — наприклад, висаджування живоплотів, створення квіткових смуг чи застосування екологічно щадних режимів косіння та випасу.

Попри поширеність, такі схеми часто критикують за недостатню екологічну ефективність, ігнорування особливостей навколишнього ландшафту, а також надмірну жорсткість вимог (наприклад, чіткі строки виконання певних дій). Збільшення гнучкості у впровадженні заходів могло б підвищити природоохоронний ефект, зменшити витрати та стимулювати більшу участь фермерів.

Альтернативою є результатно-орієнтовані виплати (RBP), які в Європі поступово набувають поширення. На відміну від діяльнісних схем, тут винагорода надається лише у випадку досягнення конкретних природоохоронних результатів, наприклад появи певних видів рослин чи тварин на угіддях. Цей підхід забезпечує вищу екологічну ефективність, надає фермерам більшу автономію у виборі методів господарювання та стимулює інновації, адже створює фінансові стимули для впровадження більш результативних і економічно доцільних практик.

Однак існують і бар'єри для широкого впровадження RBP. Зокрема, це ризики для фермерів у випадку недосягнення цілей (що вимагає вищих компенсаційних виплат і знижує ефективність схем), а також складність і висока вартість моніторингу біорізноманіття. Особливо проблематичним є спостереження за мобільними або прихованими видами тварин. Тому нині результатні схеми здебільшого орієнтуються на рослинність як на основний індикатор.

Разом з тим, розвиток автоматизованих технологій моніторингу відкриває нові можливості для вдосконалення RBP. Серед таких інновацій особливу увагу привертає пасивний акустичний моніторинг (РАМ) — метод, що широко використовується для спостереження за звуковою активністю птахів, кажанів, комах і амфібій. Ці групи тварин можуть виступати індикаторами стану екосистем, а також безпосередньо реагують на практики агроєкологічного управління.

РАМ має низку переваг у контексті результатно-орієнтованих схем:

- він розширює спектр таксонів, які можуть слугувати об'єктами моніторингу;
- дає змогу одночасно фіксувати кілька видів і груп організмів, формуючи уявлення про структуру біоценозів;
- створює незалежні від спостерігача записи, що можуть бути верифіковані у майбутньому;
- завдяки доступності та автоматизації обладнання дозволяє охоплювати великі просторові й часові масштаби.

Хоча для інтерпретації результатів усе ще потрібна участь експертів (наприклад, у підтвердженні видів та калібруванні даних), сучасні алгоритми машинного навчання вже значно прискорюють і підвищують точність аналізу великих масивів акустичних записів.

У цьому розділі ми розглянемо концептуальний потенціал пасивного акустичного моніторингу для перевірки досягнення природоохоронних результатів у межах RBP. Для цього використаємо структуру аналізу, що включає чотири етапи:

1. вибір цілей біорізноманіття, які може забезпечити РАМ;
2. визначення результатних індикаторів;
3. аналіз витрат і рівнів виплат;
4. оцінку прийнятності технології з боку користувачів.

Вибір цілей біорізноманіття: види та угруповання

Результатно-орієнтовані виплати потребують чіткого визначення цілей біорізноманіття, адже саме від їх досягнення залежить винагорода для фермерів. Традиційно в Європі такі програми зосереджуються переважно на судинних рослинах, які є індикаторами різнотравних луків.

Пасивний акустичний моніторинг (РАМ) розширює можливості, адже дозволяє охоплювати тварин, що продукують звуки. Це особливо важливо для

рухливих, нічних або малопомітних видів, яких складно виявити традиційними методами.

На видовому рівні РАМ дає змогу ідентифікувати більшість європейських птахів та значну кількість видів кажанів. Серед них — як характерні представники агроландшафтів, так і види, що перебувають під загрозою зникнення. Наприклад:

- великі птахи відкритих просторів (кречет, чибіс);
- дрібні співочі птахи, чисельність яких зменшується (жайворонок, садова вівсянка);
- кажани, що активно використовують узлісся та польові межі.

При цьому важливо враховувати просторову поведінку видів: птахи з великими територіями можуть бути менш придатними як індикатори локальних змін, проте їх не варто повністю виключати. Для кажанів РАМ уже є стандартним методом оцінки активності, а для комах і земноводних активно розробляються методики автоматичної ідентифікації.

Зазвичай результатні програми орієнтуються на окремі індикаторні види. Проте ефективнішим підходом може стати використання показників різноманіття угруповань. Взаємодія кількох видів у межах однієї екосистеми краще відображає її стан і стійкість.

Наприклад, збільшення кількості комах-ортоптер може призвести до посилення їхньої звукової активності, що приваблює як хижаків (птахів, кажанів), так і паразитоїдів. Така багаторівнева взаємодія свідчить про зростання трофічного різноманіття й функціональну цінність агроекосистеми.

Окремим напрямом є вивчення саундскейпів — комплексного поєднання природних і штучних звуків у довкіллі. Цей підхід потенційно дозволяє оцінювати загальний стан біорізноманіття на рівні ландшафту. Однак його застосування як критерію для результатних виплат у сільському господарстві ще перебуває на етапі становлення. Потребує додаткових досліджень, які саме індикатори є найбільш придатними, як їх вимірювати та чи підтримають суспільство і фермери фінансування таких заходів.

Визначення результатних індикаторів

Для того щоб програми результатно-орієнтованих виплат (RBP) були ефективними, потрібні чіткі, вимірювані індикатори, за якими оцінюється досягнення цілей біорізноманіття. Такі індикатори мають бути зрозумілими, прозорими та прив'язаними до конкретних порогових значень, що визначають право на виплату.

У більшості діючих програм найчастіше використовують наявність певних індикаторних видів. Це найпростіший і найнадійніший показник, який легко перевірити.

Пасивний акустичний моніторинг (РАМ) відкриває ширший спектр індикаторів, оскільки багато тварин видають звуки у ключові моменти життєвого циклу — під час розмноження, живлення чи територіальної поведінки.

Потенційні індикатори на видовому рівні:

Наявність виду (виявлення співу, крику чи іншої вокалізації).

- Вокальна активність (частота звуків, співвідношення денних і сезонних піків) — може відображати чисельність.
- Ознаки розмноження (співи самців, територіальні крики, моделювання кількості гнізд).
- Ознаки живлення (наприклад, у кажанів — кількість «харчових дзижчань» під час полювання).
- Відсутність небажаних чи інвазійних видів.

РАМ ще має обмеження: важко точно оцінювати кількість особин чи щільність популяцій, адже один мікрофон фіксує звуки з різних відстаней. Розробляються техніки визначення місця джерела звуку, але вони ще не повністю готові до практичного застосування.

РАМ дозволяє аналізувати звукові угруповання, що відображають загальне біорізноманіття на сільськогосподарських землях:

- Багатство видів (кількість видів птахів, кажанів, комах або амфібій).
- Вокальна активність угруповання як показник чисельності та стабільності популяцій.
- Трофічні взаємодії (наприклад, зв'язок комах з рослинними угрупованнями, чи кажанів із чисельністю комах).
- Акустичні індекси — узагальнені показники, що відображають складність або різноманітність звукового середовища.

Витрати та рівні виплат

У рамках результатно-орієнтованих програм (RBP) фермери несуть різні витрати, пов'язані з упровадженням природоохоронних практик:

- Альтернативні витрати — втрата доходу від землі, використаної не під виробництво, а під живопліт чи інші екосистемні елементи.
- Інвестиційні витрати — створення елементів середовища (посадка, облаштування).
- Управлінські витрати — догляд і регулярне утримання.
- Адміністративні витрати — заповнення документів, контакти з органами влади, пошук інформації.
- Моніторинг — якщо його покладають безпосередньо на фермерів.

Фермер братиме участь у програмі лише тоді, коли виплати перевищать суму цих витрат разом із ризиковою надбавкою (компенсацією за можливі втрати чи невизначеність).

Пасивний акустичний моніторинг (РАМ) не змінює витрат на господарські заходи, але впливає на витрати на моніторинг:

- За умов денних спостережень людські спостерігачі часто дешевші.
- Уночі та для важковловимих видів (нічні, рідкісні, потайні, мобільні) РАМ має перевагу.
- Тривалі записи зменшують ризик пропустити вид (знижують “хибні відмови”), отже зменшують ризикову надбавку для фермерів.

Зі зростанням обсягів даних проблемою можуть стати витрати на збереження аудіо, але в майбутньому — після аналізу сирі записи можна буде видаляти. РАМ ще потребує точних алгоритмів для зменшення кількості хибних виявлень (помилкова ідентифікація видів).

Прийнятність для фермерів

Ефективність програм результативного підходу (RBP), які базуються на пасивному акустичному моніторингу (РАМ), значною мірою залежить від готовності фермерів брати участь у таких ініціативах. Їхня прийнятність визначається рівнем поінформованості, ставленням до біорізноманіття та готовністю застосовувати нові технології. Фермери охочіше погоджуються долучатися тоді, коли розуміють значення акустичних спільнот як показників стану екосистеми і бачать, які господарські практики допомагають підтримувати цей баланс. Для частини фермерів біорізноманіття має утилітарне значення, пов'язане з екосистемними послугами, тоді як інші сприймають його як самостійну цінність. У будь-якому випадку саме ці підходи визначають готовність підтримувати RBP у комплексному вигляді.

Досвід свідчить, що більшість фермерів позитивно ставляться до впровадження РАМ. Наприклад, у Німеччині 58 % респондентів висловили готовність брати участь у таких програмах, 31 % розглядають таку можливість, і лише 11 % категорично відмовляються. Основні побоювання пов'язані з тим, як нові технології інтегруються у щоденні робочі процеси, чи не потребуватимуть вони додаткового часу, а також з ризиком посилення бюрократичного навантаження.

Оптимальним вважається варіант, коли фермери відповідають лише за встановлення рекордерів і збір обладнання, а калібрування, технічне обслуговування, обробка й перевірка даних здійснюються незалежними агентствами. Це зменшує навантаження на господарів, але потребує високого рівня довіри до технологій та алгоритмів, що автоматично аналізують записи. При цьому важливо враховувати можливі ризики, зокрема технічні збої чи випадки крадіжки обладнання.

Забезпечення прозорості та надійності системи може підвищити рівень довіри. Для цього важливими є належне зберігання записів і експертних анотацій, а також наявність механізмів, які дозволяють оскаржити результати у випадку сумнівів. Додаткову безпеку можуть забезпечити функції автоматичного видалення людських голосів чи дистанційний контроль працездатності пристроїв.

Водночас РАМ може принести фермерам і певні переваги. Виявлення рідкісних видів на території господарства відкриває можливості для додаткових виплат у межах екологічних програм, а раннє виявлення шкідників дозволяє швидше реагувати на потенційні загрози врожаю. Таким чином, прийнятність РАМ з боку фермерів поєднує як виклики, пов'язані з інтеграцією нових технологій у повсякденну практику, так і нові можливості для господарського розвитку.

Перехід до пілотних схем

Наступним етапом розвитку є створення та випробування пілотних проектів, у яких буде апробовано застосування акустичного моніторингу (РАМ) у системах винагород за досягнуті результати (RBP). Такі дослідження мають бути комплексними й охоплювати не лише питання збереження біорізноманіття, а й оцінку економічної доцільності та рівня сприйняття серед фермерів, громадських природоохоронних організацій та органів влади. Доцільним стартом може бути співпраця на демонстраційних господарствах, де разом із фермерами можна випробувати нові методи. Фермери, які успішно пройдуть цей етап, можуть стати прикладом для інших і поширювати знання за принципом «фермер – фермеру».

Разом з тим РАМ має певні методологічні виклики. На відміну від традиційних обліків рослинності, де межі спостережень є чітко визначеними, акустичні обстеження охоплюють змінний простір чутності, і джерела звуків складно точно локалізувати. Проте саме ця інформація є критичною для правильного віднесення виявлених тварин до конкретної ділянки, особливо коли йдеться про невеликі поля. Розробляються методи акустичної локалізації, які дають змогу визначати точне положення тварин як джерел звуку, і технологічний прогрес робить цей процес більш реалістичним. Однак такі рішення наразі є складними та дорогими для практичного використання в RBP. Тому на сучасному етапі впровадження РАМ доцільне переважно на ділянках, розміри яких перевищують радіус дії обраного пристрою. У підсумку витрати і складність реалізації РАМ-орієнтованого RBP значною мірою залежатимуть від того, який саме індикатор біорізноманіття є цільовим.

Висновки

Сучасні технології біорізноманіття, включаючи збір, зберігання та обробку даних з подальшим отриманням екологічних знань, відкривають нові можливості для удосконалення систем винагород за результати. Акустичний моніторинг може суттєво розширити сферу застосування RBP, дозволяючи охоплювати ширший спектр таксонів — від польових і нічних птахів до рукокрилих, а згодом і інших груп тварин. Його ефективність у спостереженні за рідкісними та малопомітними видами, а також за цілими акустичними спільнотами, підкреслює універсальність у природоохоронних заходах.

РАМ досягнув такого рівня розвитку, коли він стає конкурентним за вартістю з традиційними методами моніторингу, хоча все ще потребує людської участі для калібрування. Для успішного впровадження важливо вирішити завдання з мінімізації хибнопозитивних і хибнонегативних результатів і забезпечити довіру до методу серед користувачів. Перехід від концептуальної моделі до практичної реалізації можливий лише через створення і відпрацювання пілотних схем у тісній співпраці з фермерами та відповідними органами.

8.4 NOISE2WEIGHT: ВИЗНАЧЕННЯ ВАГИ ВАНТАЖУ ДРОНА ЗА АКУСТИЧНИМИ СИГНАЛАМИ

Вступ

За останні роки технологія безпілотних літальних апаратів (БПЛА, або дронів) стрімко поширилася і активно застосовується в багатьох сферах: охорона периметрів, дистанційне спостереження, управління надзвичайними ситуаціями, доставка вантажів, військові операції тощо. Зокрема, у логістиці прогнозують зростання ринку дронів на понад 29 млрд доларів США у період 2022–2027 років. Великі компанії, як Amazon, вже тестують системи доставки товарів дронами.

Водночас дрони є класичною технологією подвійного призначення і можуть бути використані в злочинних цілях — для атак із застосуванням вибухівки або зброї. Це спричиняє побоювання щодо безпеки, а також ризики крадіжок вантажу та самих дронів, що гальмує їх широке впровадження.

Наукова спільнота пропонує різні методи виявлення дронів: радарні системи, розпізнавання за зображеннями, аналіз радіочастот, аналіз трафіку, звуковий аналіз. Також існують рішення для захисту від радіоатаки (глушіння, спуфінг GPS).

Особливу увагу приділяють звуковому аналізу, оскільки акустичний шум від моторів і лопатей дрона є унікальним та дозволяє відрізнити дрони від інших джерел шуму і один від одного. Завдяки цьому можна ідентифікувати присутність дрона, а також його бренд і модель.

Проте досі не вивчено потенціал акустичних сигналів дрона для визначення ваги вантажу, який він несе. Такий безконтактний метод може бути корисним у логістиці — для перевірки відповідності фактичної ваги вантажу очікуваній, що допоможе уникнути спірних ситуацій при доставці. У військовій сфері це може допомогти виявити зміни у вантажі (наприклад, встановлення вибухівки) під час автономних або дистанційних операцій.

В роботі вперше дослідили тісний зв'язок між акустичним шумом дрона і вагою вантажу. Провели експериментальні дослідження на прикладі комерційного дрона 3DR Solo у реальних умовах. Виявлено, що для компенсації різної ваги вантажу двигуни та лопаті регулюють швидкість обертання, що призводить до змін в акустичних характеристиках.

Розглянуто два сценарії:

- Система, що аналізує лише частоту звуку (pitch), може з певною точністю визначати, чи несе дрон вантаж, залежно від тривалості аналізу і ваги вантажу.
- Система, що використовує представлення звуку у вигляді коефіцієнтів мел-частотного кепстра (MFCC), із застосуванням стандартних методів машинного навчання, здатна визначити приблизну вагу вантажу з точністю до 50 г і класифікаційною точністю понад 98%, збираючи звукові дані лише за 0,25 секунди.

Огляд літератури

За останні роки з'явилося кілька досліджень, присвячених можливості виявлення дронів за їхніми акустичними сигналами.

Було розроблено системи машинного навчання, які використовують різні методи вилучення ознак із звуку, зокрема мел-частотні кепстральні коефіцієнти (MFCC) та лінійні предиктивні коефіцієнти, для розпізнавання дронів серед інших звукових джерел, таких як грози, птахи або літаки. Такі системи досягають високої точності виявлення, понад 95%.

Інші роботи застосовували комбінації часових і частотних ознак для формування унікального "відбитка" звуку дрона і досягали схожих показників точності при розпізнаванні на тлі шумів природного середовища чи міських звуків.

Деякі дослідники порівнювали різні моделі машинного навчання, включно з рекурентними та згортковими нейронними мережами, для класифікації звуків дронів. Найкращі результати показують рекурентні мережі, здатні ефективно працювати навіть у присутності фонових шумів.

Також використовували приховані марковські моделі для класифікації звуків, що забезпечує високу точність навіть при низькому співвідношенні сигнал/шум.

Інші підходи побудували системи реального часу для виявлення дронів, які перетворюють звук у спектральне зображення і застосовують візуальне машинне навчання для розпізнавання характерних особливостей.

Гібридні системи, що поєднують аудіо-, відео- та радіочастотні сенсори, також демонструють ефективність, але точність виявлення за акустикою суттєво залежить від відстані до дрона.

Звукові сигнали застосовуються не лише для виявлення, а й для локалізації дронів за допомогою різниці часу приходу звуку до кількох мікрофонів.

У деяких роботах розроблено методи класифікації на основі шумів моторів, які дозволяють "відбиткувати" окремі моделі дронів з дуже високою точністю.

Також існують системи, що комбінують різні техніки вилучення ознак звуку (наприклад, кодування за допомогою LPC і аналіз перетину нуля) для підвищення точності класифікації.

Хоча більшість досліджень зосереджені на виявленні та ідентифікації дронів, питання визначення ваги вантажу, який несе дрон, залишається недостатньо вивченим.

Деякі роботи розглядають оцінку наявності вантажу за допомогою візуальних або радіочастотних сенсорів, але вони не базуються на акустичних даних і тому доповнюють підходи, запропоновані в нашому дослідженні.

Серед комерційних рішень існують системи з великими масивами мікрофонів, що дозволяють у реальному часі визначати напрямок і висоту дрона, а також мультисенсорні платформи для комплексного протидії дронам.

Орієнтовні сценарії

У цій главі розглядаються два основні сценарії, проілюстровані на **рис. 8.4.1** та описані нижче.

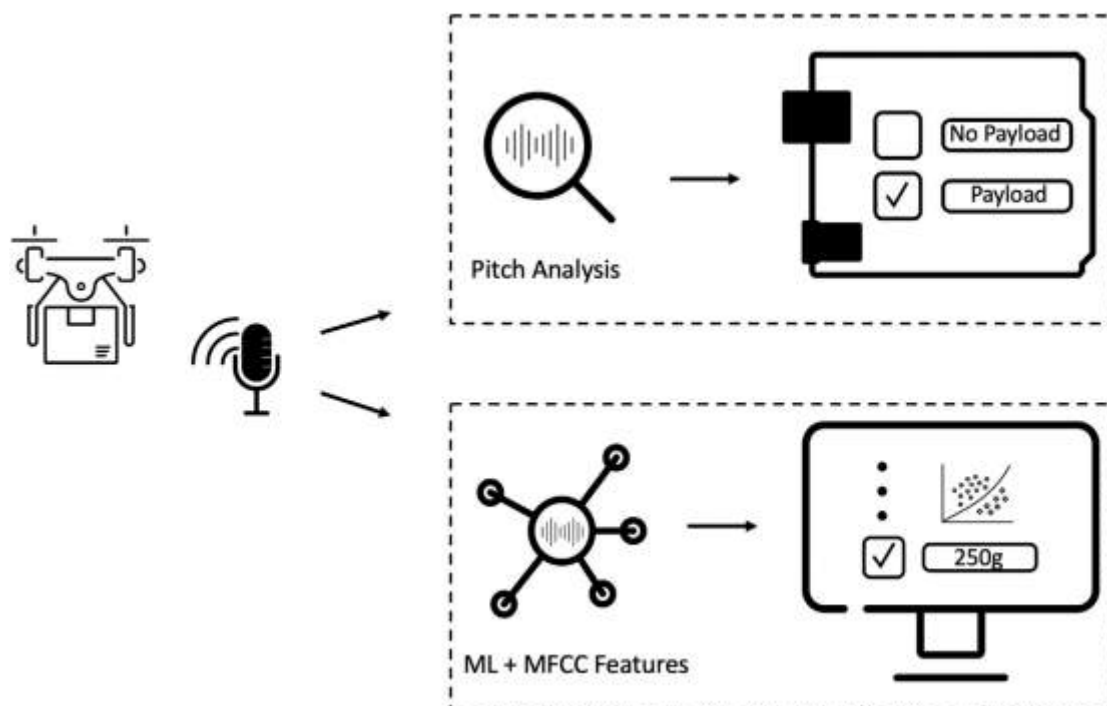


Рис. 8.4.1 Сценарії розглянуті в главі

Сценарій 1. Припускається, що в віддаленому місці (наприклад, пустелі або сільськогосподарському полі) встановлено мікрофон. Через особливості локації недоцільно використовувати бездротову камеру для візуального спостереження за дроном у реальному часі. Мікрофон підключений до обмеженого за потужністю пристрою, наприклад, IoT-пристрою з низькими обчислювальними можливостями. Через обмежені ресурси завдання такого пристрою полягає у простому виявленні факту наявності вантажу на дроні або його відсутності. При цьому припускається, що інші системи, які вже існують, можуть паралельно ідентифікувати тип дрона за акустичними сигналами та визначати, чи дрон зависає на місці, чи рухається. У цьому сценарії пристрій записує звук дрона протягом короткого часу та аналізує лише висоту тону (pitch), щоб встановити, чи є вантаж.

Сценарій 2. У цьому випадку розглядається співпраця користувача, який очікує доставку конкретного вантажу за допомогою дрона від відомої торгової марки. Іноді користувач бажає безконтактно перевірити, чи вага вантажу, який несе дрон, відповідає очікуваній, без відкриття пакунку, що може зашкодити правам на повернення чи заміну товару. Цей сценарій вимагає більш точної оцінки – до 50 грамів різниці. Припускається, що дрон зависає біля будинку користувача, де встановлено мікрофон, підключений до звичайного ноутбука. На ноутбуці працює програмне забезпечення із заздалегідь навченими моделями машинного навчання, яке аналізує звук дрона і порівнює фактичну вагу вантажу

із очікуваною. Модель дрона відома заздалегідь і може бути надана продавцем або довіреною третьою стороною.

Варто зазначити, що наведені сценарії є лише прикладами, а запропонована методика може застосовуватися й у інших випадках. Наприклад, системи спостереження біля важливих об'єктів можуть використовувати цю технологію для оцінки ваги вантажу на дронах із метою вибору оптимальних заходів безпеки. Аналогічно, на військових об'єктах дрон може зависати перед входом для перевірки звукового "відбитка" та підтвердження відсутності небажаного додаткового вантажу.

В усіх наведених випадках розглядали ситуацію, коли дрон зависає на певній відстані від мікрофона. Це пов'язано з тим, що звук, який виробляють двигуни під час руху дрона, має дуже непередбачувані закономірності. З іншого боку, вимога зависання є цілком логічною і реалістичною для багатьох практичних застосувань.

Слід підкреслити, що ця робота є першою, яка досліджує кореляцію між звуком, який виробляє дрон, та вагою вантажу, який він несе. Аналіз звукових змін під час руху дрона залишено як напрямок для майбутніх досліджень.

Нарешті, варто відзначити, що в обох сценаріях дрон вважається кооперативним об'єктом, проте користувач прагне провести безконтактну і надійну перевірку ваги вантажу до того, як дрон наблизиться. Такий підхід дозволяє виявляти випадки зміни вантажу (наприклад, підозрілу заміну або додавання) завчасно. Оскільки безпосередня взаємодія з дроном (на кшталт встановлення спеціального каналу зв'язку) не передбачається, а програмне забезпечення на борту дрона може бути скомпрометоване, отримані безпосередньо від дрона дані не є надійними.

Запропонована система Noise2Weight забезпечує оцінку ваги вантажу на дроні за допомогою акустичного сигналу, що слугує надійним та незалежним "бічним каналом" для підтвердження інформації, наданої дроном.

Експериментальна установка та аналіз компонентів звуку

У цьому розділі описано обладнання, використане для запису та обробки звуків, які видає безпілотний літальний апарат (БПЛА) (підрозділ 4.1), а також методику обробки звуку (підрозділ 4.2).

Експериментальна установка

На **рис. 8.4.2** показано схему експериментальної установки, а деталі обладнання наведені нижче.

Дрон. Для експериментів обрали комерційний дрон середнього розміру 3DR SOLO, вагою близько 1,5 кг разом із акумулятором 14,8 В (приблизно 0,5 кг). Максимальна вантажопідйомність дрона становить 700 г, що включає додаткове обладнання, яке в наших експериментах не використовувалося. Таким чином, було протестовано вантажі масою до 500 г. Дрон використовувався у заводській комплектації без змін апаратного чи програмного забезпечення.

Архітектура дрона є відкритою, з польотним контролером Pixhawk 2.0 та прошивкою ArduCopter 3.3, що застосовується у багатьох комерційних моделях.



Рис. 8.4.2 Експериментальна установка

Мікрофон. Запис звуку дрона здійснювався за допомогою спрямованого мікрофона Rode VideoMic Pro. Цей мікрофон працює від батареї, має вбудовані фільтри та регулятори рівня сигналу. Його робочий частотний діапазон охоплює від 40 Гц до 20 кГц, із можливістю автоматичного відсічення низькочастотних шумів, таких як звуки кондиціонерів чи руху транспорту, завдяки вбудованому фільтру високих частот із порогом 80 Гц. Для запису гучних або близьких джерел звуку використовується вбудований атенюатор рівня на -10 дБ. Підключення здійснюється через стерео-мініджек 3,5 мм.

Ноутбук. Аналіз записаних звуків проводився на ноутбучі MacBook Pro з процесором Intel Core i7 (2,9 ГГц) та 16 ГБ оперативної пам'яті.

Програмне забезпечення Mission Planner. Це інструмент для взаємодії з дроном 3DR SOLO, який використовується для отримання телеметричних даних, таких як швидкість обертання моторів, а також інформації про стабільність польоту.

Збір даних. Запис звуку здійснювався за допомогою аудіоредактора Audacity, що дозволяє налаштувати параметри запису та конфігурацію мікрофона. Записи робились із частотою дискретизації 44,1 кГц для забезпечення високої якості звуку в межах робочого діапазону мікрофона. Експерименти проводились на відкритому повітрі (парк у місті Доха, Катар), при цьому мікрофон розміщувався на відстані 7 метрів від завислого дрона. Тривалість кожного запису становила 170 секунд, під час яких змінювалась вага вантажу на дроні — від 0 до 500 грамів із кроком 50 грамів. Запис починався в момент зависання дрона та завершувався перед посадкою, щоб зафіксувати лише звук дрона, що зависає. Файли у форматі WAV, отримані з Audacity, передавались для аналізу у програмне середовище Matlab 2019b.

Аналіз компонентів звуку

Одним із найпоширеніших показників для аналізу звуку є висота тону (pitch). Висота тону визначається як основна частота аудіосигналу. Наприклад, у

сфері аналізу мовлення висота тону часто використовується для розрізнення чоловічих і жіночих голосів або для ідентифікації конкретного мовця. Втім, визначення висоти тону є складним завданням, оскільки природні звуки утворюються як комбінація різних частотних компонентів, що можуть змінюватися за періодом або амплітудою.

Для звуку, який видає типовий дрон, основними складовими, що визначають висоту тону, є оберти моторів та лопаті гвинтів.

По-перше, швидкість обертання моторів, що вимірюється у обертах за хвилину (RPM), істотно впливає на характер звуку дрона. Дрон постійно контролює та регулює швидкість обертання моторів, щоб підтримувати стабільність польоту та компенсувати зовнішні фактори. Швидкість моторів не є сталою, а коливається в певному інтервалі. У режимі зависання контролер швидкості підтримує сталість обертів для збереження положення дрона. При русі дрона коливання обертів залежать від швидкості руху, погодних умов, а також інших факторів, які впливають на стабільність, наприклад, компенсування певних маневрів.

По-друге, лопаті гвинтів також створюють звукові коливання, які впливають на загальний звук дрона. Вони визначають ефективність та плавність польоту і є ключовими для здібності дрона літати.

На прикладі запису звуку 3DR Solo, зробленого на відстані 7 метрів при зависанні дрона без вантажу, спектрограма показує, що найсильніші частотні компоненти розташовані у низькочастотному діапазоні — нижче 7 кГц. Ці компоненти, як і в інших дослідженнях, пов'язуються із звуком лопатей гвинтів.

Для оцінки середньої швидкості моторів залежно від вантажу було використано телеметричні дані дрона. Аналіз показує, що середня швидкість обертання моторів не є сталою для одного й того ж навантаження, оскільки дрон постійно регулює швидкість, компенсуючи миттєві зміни через вплив зовнішніх факторів, таких як вітер або інерція. Водночас спостерігається чітка залежність: із збільшенням ваги вантажу швидкість обертання моторів зростає, щоб забезпечити зависання та стабільність дрона.

У першому сценарії цього дослідження основна увага приділяється висоті тону, враховуючи як звуки моторів, так і лопатей, при цьому звуки лопатей є домінуючими.

Також спектрограма свідчить про наявність кількох гармонік висоти тону, переважно у діапазоні частот нижче 7 кГц. Для їх врахування застосовується методика Mel Frequency Cepstral Coefficients (MFCC), яка дозволяє краще описати різні частотні компоненти звуку, наближаючи їх до сприйняття людським слухом.

Етапи вилучення ознак за допомогою MFCC включають початкову обробку сигналу для підсилення високочастотної складової та покращення співвідношення сигнал/шум, поділ звукового фрагмента на короткі часові вікна, для яких можна вважати характеристики стабільними, обчислення спектра за допомогою швидкого перетворення Фур'є (FFT), трансформацію частотної осі у нелінійну шкалу Мел (Mel), поділ її на окремі смуги (Mel bands),

логарифмування спектра та обчислення кепстральних коефіцієнтів за допомогою дискретного косинусного перетворення (DCT).

$$Mel(f) = 2595 \cdot \log_{10} \left(1 + \frac{f}{700} \right)$$
$$c_n = \sum_{m=0}^{M-1} D(m) \cos \left[\frac{\pi n(m - 0.5)}{M} \right], (n = 0, \dots, R),$$

Як приклад, на основі MFCC-компонентів аудіозаписів дрона з різними вагами вантажу показано, що значення двох вибраних компонент (28-та та 29-та смуги) утворюють чіткі кластери, які зміщуються пропорційно до збільшення ваги вантажу. Це свідчить про наявність кореляції між вагою вантажу та параметрами звуку, що можна використати для оцінки ваги.

Експериментальний аналіз і результати

У цьому розділі наведено результати дослідження щодо можливості визначення ваги вантажу, який несе дрон, на основі аналізу звуку, що він видає. Зокрема, у підрозділі 5.1 розглядаються результати для Сценарію 1, описаного раніше, а у підрозділі 5.2 — результати для Сценарію 2.

Сценарій 1

Нагадаємо, що у Сценарії 1 використовується обладнання з обмеженими обчислювальними ресурсами, тож воно може виконувати лише легкі обробки. Основним завданням у цьому випадку є визначити, чи несе дрон вантаж.

На основі аналізу, проведеного в розділі 4.2, як основний інструмент для розв'язання цього завдання обрано висоту тону (pitch) звуку дрона.

Відповідно до спостережень і значень, отриманих із телеметрії дрона, висота тону звуку завжди знаходиться в межах [180–235] Гц, хоч іноді на приймальний мікрофон потрапляють додаткові шумові компоненти, які ускладнюють точне визначення. Тому для очищення сигналу ми застосували смуговий фільтр у діапазоні [180–235] Гц, щоб відфільтрувати зайві шуми.

Звук дрона було записано для 11 різних ваг вантажу від 0 до 500 г з кроком 50 г, кожен запис тривав 170 секунд. Потім кожен запис було розділено на коротші часові проміжки по 2,5 секунди, отримавши по 68 часових блоків на кожен запис. Розподіли ймовірностей висоти тону для шести прикладів різних ваг вантажу наведені на **рис. 8.4.3**.

Як і слід було очікувати, із збільшенням ваги вантажу середнє значення висоти тону також зростає. Це пов'язано з тим, що мотори та лопаті дрона частіше регулюють свою швидкість, що створює розсіяну характеристику навколо середнього значення. Варіація розподілів ймовірностей залишається майже однаковою для всіх ваг, окрім максимальної — 500 г. Це можна пояснити тим, що дрон при максимальному навантаженні більш нестабільний і потребує більших зусиль для компенсації коливань.

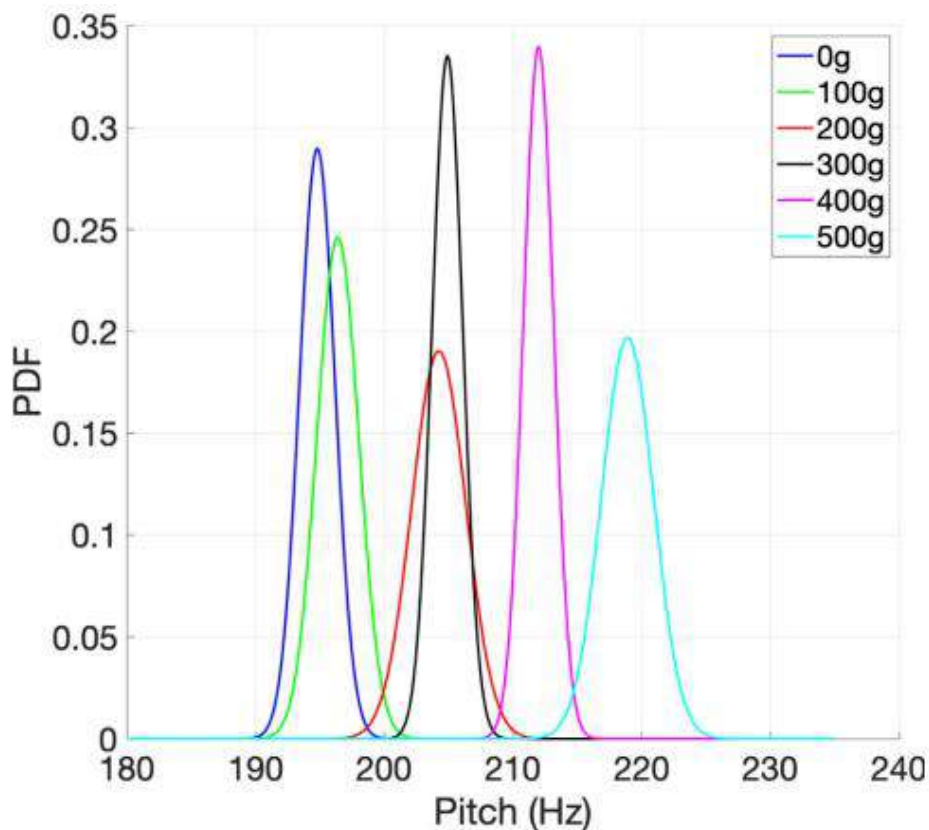


Рис. 8.4.3 Функція розподілу ймовірностей, пов'язана зі значеннями тангажу, записана для різних ваг корисного навантаження та обчислена протягом контрольного часового вікна 2,5 с.

Варто також зазначити, що розподіли ймовірностей для близьких ваг вантажу частково перекриваються, що ускладнює точне визначення конкретної ваги, спираючись лише на висоту тону. Зазначимо, що для записів використовувався простий спрямований мікрофон, який не призначений для високоточної роботи. Використання більш професійного обладнання могло б покращити роздільну здатність і зменшити шум.

Крім того, із зростанням ваги вантажу зменшується ймовірність того, що розподіл висоти тону для цього навантаження буде перекриватися з розподілом для нульового вантажу.

Для оцінки здатності системи розпізнавати наявність вантажу лише за висотою тону було проаналізовано результати для різних ваг, обчислюючи висоту тону за різними тривалістю вікон запису — від 0,25 с до 2,5 с. Потім було оцінено, скільки зразків кожного розподілу потрапляє у розподіл, відповідний до нульового вантажу, що відповідає показнику помилки.

Отримані результати показують, що помилка залежить і від ваги вантажу, і від тривалості часу обробки. Для конкретного вікна часу помилка зменшується зі збільшенням ваги вантажу. Це узгоджується з тим, що розподіли для важчих навантажень менше перекриваються з нульовим.

Водночас збільшення тривалості вікна аналізу знижує випадкові коливання, пов'язані з динамічним регулюванням моторів для стабілізації

польоту. Наприклад, для вантажу 200 г помилка при вікні 0,25 с становить близько 42%, тоді як при вікні 2,5 с помилка зменшується майже до нуля.

Легкі вантажі, такі як 50 або 100 г, характеризуються високою помилкою, яку можна зменшити лише шляхом збільшення часу запису. Проте в реальних застосуваннях, особливо в умовах, коли контроль над дроном обмежений або відсутній, це може бути проблематично.

Сценарій 2

На відміну від Сценарію 1, у цьому випадку передбачається використання пристроїв без обмежень за обчислювальними ресурсами. Завданням є визначення конкретної ваги корисного навантаження, яке переносить дрон. Для цього застосовуються MFCC-компоненти звуку, що створюється дроном.

Постановка системи

Система складається з кількох етапів (рис. 8.4.4).

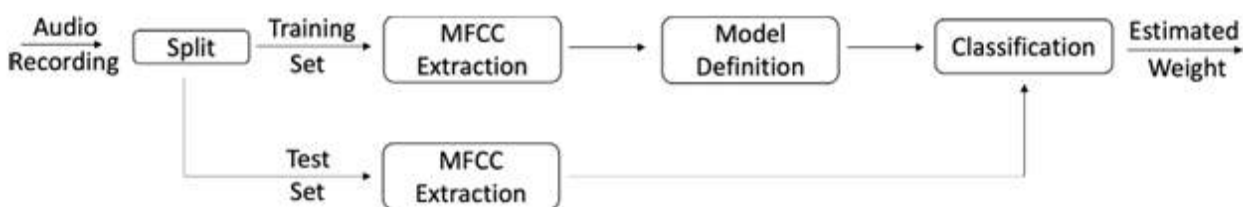


Рис. 8.4.4 Опис системи, налаштованої для визначення ваги, яку переносить дрон, за його акустичним випромінюванням

Для кожного запису звуку сигнал поділяється на тренувальну вибірку (70% даних, близько 120 с) і тестову вибірку (30%, близько 50 с). Для обох множин формується спектральне представлення на основі 40 MFCC-компонентів, що описують енергетичний розподіл звуку в діапазоні мікрофона.

Для аналізу застосовуються два часових вікна:

- коротке – 0,25 с,
- довге – 1 с.

Для класифікації використовується метод опорних векторів (SVM). Його принцип полягає у побудові оптимальної гіперплощини, що розділяє дані з максимальною відстанню між класами. Ключові точки даних, що формують межу, називаються опорними векторами.

Хоча SVM спочатку створювався для бінарної класифікації, він може узагальнюватися на багатокласовий випадок за принципом One-vs-One: для кожної пари класів тренується окремий класифікатор, а фінальне рішення приймається на основі голосування.

Точність підвищується завдяки перенесенню даних у простір більшої розмірності за допомогою ядрових функцій. Наприклад, поліноміальне ядро:

$$K(x_1, x_2) = (x_1^T x_2 + 1)^p,$$

де p – ступінь полінома (лінійне, квадратичне, кубічне SVM тощо). Правильний вибір ступеня дозволяє уникнути перенавчання.

Результати класифікації

Система була реалізована у Matlab. Точність класифікації залежить від довжини часових вікон при розрахунку MFCC.

Для короткого вікна (0,25 с) дані мають більшу розсіяність, що ускладнює відокремлення класів.

Для довшого вікна (1 с) утворюються чіткіші кластери, що дозволяє точніше визначати вагу корисного навантаження.

На **рис. 8.4.5** показано співвідношення двох MFCC-компонентів (28-ї та 29-ї) при вікні 0,25 с. Для порівняння, ті самі компоненти при вікні 1 с наведено на **рис. 8.4.6**.

Аналіз показав чітку кореляцію між вагою корисного навантаження дрона та спектральними ознаками звуку, що відображається у вигляді кластерів на графіках MFCC-компонентів.

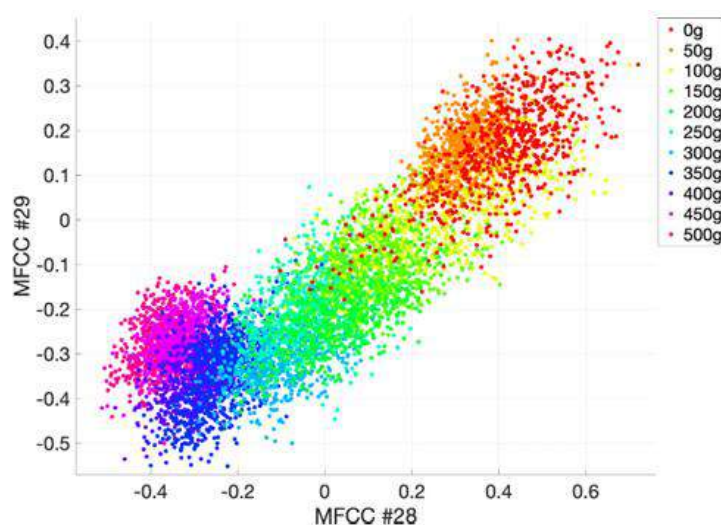


Рис. 8.4.5 Зв'язок між компонентами MFCC 28 та 29, отриманими із записів звуку дрона, що перевозить корисне навантаження різної ваги, від 0 г до 500 г, з урахуванням часового вікна 0,25 с.

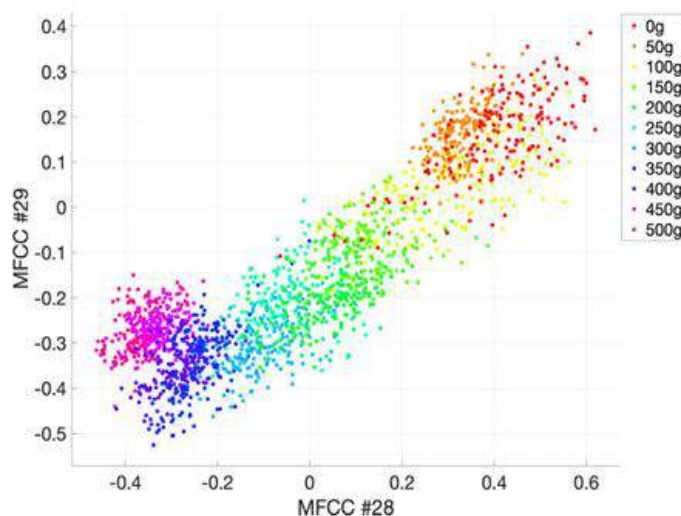


Рис. 8.4.6 Зв'язок між компонентами MFCC 28 та 29, отриманими із записів звуку дрона, що перевозить вантажі різної ваги, від 0 г до 500 г, з урахуванням часового вікна 1 с.

Збільшення ваги на 50 г призводить до зсуву кластера вздовж лінії, майже паралельної бісектрисі, що може бути використано для прогнозування даних навіть для ще не вимірянних ваг. Винятком є навантаження понад 400 г, коли відбуваються аномальні коливання роботи моторів через близькість до максимально допустимого вантажу.

Порівняння часових вікон показало:

- коротке вікно (0,25 с) спричиняє більший наклад сусідніх ваг через вплив шумів і компенсаційних рухів дрона;
- довге вікно (1 с) згладжує ці коливання та значно підвищує точність класифікації.

Для оцінки було застосовано кілька алгоритмів машинного навчання: дискримінантний аналіз, метод опорних векторів (SVM) різних порядків, k-найближчих сусідів, дерева рішень, наївний Байєс тощо. Усі вони продемонстрували точність вище 89%, що підтверджує стабільний зв'язок між акустичними характеристиками й вагою вантажу.

Зі збільшенням часу спостереження до 1 с точність покращується для всіх алгоритмів. Найбільш стабільні результати показав кубічний SVM, із мінімальним падінням точності при зміні параметрів. Це пояснюється ефективністю побудови гіперплощин у багатовимірному просторі для відокремлення кластерів.

Побудовані матриці невірних класифікацій свідчать, що помилки виникають здебільшого між суміжними класами ваг, де швидкість обертання моторів є дуже близькою. Використання довших записів (1 с) практично повністю усуває помилки між віддаленими класами, ще раз підтверджуючи користь довших вікон аналізу.

Як було зазначено раніше, експериментальні записи звуку безпілотного літального апарата (БПЛА) з різними масами корисного навантаження виконувалися в стандартних зовнішніх умовах, характерних для міського середовища. Таке середовище відзначається наявністю типових шумових компонентів: співу птахів, звуків транспорту, шуму вітру та голосів людей. Для мінімізації впливу сторонніх перешкод використовувався спрямований мікрофон, орієнтований безпосередньо на дрон, що дозволяло зробити домінуючим саме його акустичне випромінювання.

Проте у реальних умовах експлуатації ситуація може бути складнішою. Неправильна орієнтація мікрофонів, занадто велика відстань до БПЛА чи наявність додаткових акустичних завад призводять до зниження співвідношення сигнал/шум (SNR). Це, у свою чергу, безпосередньо впливає на точність класифікації за допомогою розроблених методів.

Щоб оцінити вплив шумів на якість роботи системи, було проведено дослідження з моделюванням додаткових перешкод. Для цього звукові сигнали, записані від БПЛА, навмисно зашумлювалися за моделлю адитивного білого гаусового шуму (AWGN). Розглянуто широкий діапазон значень SNR — від 0 до 8,8 дБ, що дозволило простежити залежність точності класифікації від рівня шуму.

Отримані результати показали експоненційний характер зростання точності з підвищенням співвідношення сигнал/шум. Зокрема, для найгіршого випадку (тривалість вікна аналізу 0,25 с) було визначено, що рівень SNR не менше 8 дБ забезпечує досягнення високої точності (понад 98%), що відповідає результатам попереднього аналізу. Якщо ж допустимою є нижча точність, наприклад 95%, то достатнім є SNR від 4,5 дБ.

Додатково виявлено, що збільшення тривалості вікна аналізу (наприклад, до 1 с) сприяє підвищенню стійкості системи до шумів, забезпечуючи поліпшення результатів приблизно на 5% у діапазоні малих значень SNR (1–4,5 дБ). Це пояснюється більшою кількістю інформації, що використовується для обчислення спектральних ознак.

Важливим є також той факт, що акустичні сигнали безпілотників мають унікальний профіль, зумовлений швидкістю обертання двигунів і їхньою конструкцією. Це означає, що, знаючи конкретну модель і тип БПЛА, користувач системи може аналізувати акустичні характеристики його роботи та робити висновки не лише щодо наявності апарата, а й щодо маси корисного навантаження, яку він транспортує.

Таким чином, проведене дослідження підтвердило ефективність акустичного підходу до класифікації навантажень БПЛА, одночасно окресливши межі його надійності в умовах впливу шумових перешкод.

Порівняння та обговорення

Аналіз досліджень показав, що при оцінюванні характеристик акустичних систем для визначення параметрів дрона враховувалися різні класифікатори, набори ознак, апаратне забезпечення та відстань до цілі. Водночас жодна з відомих робіт не досліджувала вплив корисного навантаження на акустичний профіль дрона. Також не розроблено методик для визначення ваги цього навантаження виключно за акустичними даними. Це обмежує можливості практичного застосування та вимагає нових підходів.

Регресійний підхід

Для вирішення завдання оцінки маси корисного навантаження було апробовано регресійні методи. Початкові експерименти з лінійною регресією на основі окремих MFCC-ознак продемонстрували наявність майже лінійної залежності між ними. Подальше застосування багаторфакторної лінійної регресії з використанням усіх доступних акустичних параметрів підтвердило високу точність прогнозування ваги. Значення коефіцієнта детермінації вказує на надійність моделі та правильність вибраного підходу.

Отримані результати свідчать про перспективність використання регресійних методів для визначення ваги корисного навантаження дрона на основі акустичних даних. Це відкриває можливості для подальших досліджень, зокрема пошуку оптимальних моделей та узагальнення підходів для неконтрольованих сценаріїв експлуатації.

Висновки

У даній роботі вперше було показано тісний зв'язок між масою корисного навантаження, яке переносить дрон, та його унікальним акустичним відбитком.

У ході експериментальних досліджень доведено, що зміна тяги, необхідної для утримання дрона в повітрі при різних навантаженнях, призводить до відмінностей у звуковому профілі. Це дозволяє оцінювати вагу, яку транспортує апарат.

Аналіз показав, що за умови використання стандартного ноутбука можна застосовувати коефіцієнти MFCC у поєднанні з методами машинного навчання. Це забезпечує високу точність класифікації ваги. Використання кубічного SVM-класифікатора дозволило досягти точності 98,4% за умови аналізу запису тривалістю лише 0,25 секунди, а при збільшенні часу точність ще зростає. Дослідження також продемонструвало, що подібна ефективність зберігається за умови співвідношення сигнал/шум не нижче ніж 8 дБ.

8.5 ПРІОРИТЕТНІ КОНСТРУКТИВНІ ТА ТЕХНОЛОГІЧНІ ОСОБЛИВОСТІ ОБПРИСКУВАЧІВ ДЛЯ ЗАХИСТУ РОСЛИН В УМОВАХ ТЕХНІЧНОГО ПЕРЕОСНАЩЕННЯ АГРОПІДПРИЄМСТВ АПК

В умовах активного впровадження енергозберігаючих технологій у сільському господарстві особливу роль у забезпеченні ефективного виробництва та високої якості продукції відіграє хімічний захист рослин. Саме тому промисловість різних країн світу розробляє й постачає широкий спектр моделей обприскувачів, які мають різні технічні характеристики та рівень технологічної досконалості.

Серед ключових аспектів при виборі обприскувачів доцільно враховувати не лише продуктивність і витрату робочого ресурсу, а й здатність техніки адаптуватися до конкретних агротехнічних умов. Зокрема, йдеться про наявність систем розпізнавання меж поля, ступеня забур'яненості, рельєфу місцевості, а також інших функцій, що підвищують точність і ефективність виконання захисних операцій. Надійність у роботі, технологічна адаптивність, зручність експлуатації — це ті характеристики, що формують пріоритети при технічному переоснащенні аграрного підприємства.

Різноманіття моделей обприскувачів зумовлено тим, що провідні машинобудівні компанії (як-от німецький виробник «AMAZONE-WERKE») орієнтуються на випуск техніки для господарств різного масштабу — від великих агрохолдингів до невеликих фермерських господарств. Правильний підбір техніки для виконання захисних заходів відповідно до рекомендованих агротехнічних строків з урахуванням структури сівозміни, площі, форми полів, особливостей рельєфу та наявного парку тракторів є вирішальним чинником забезпечення стабільної продуктивності та економічної ефективності.

Досвід взаємодії з провідними науковими установами, а також із підприємствами-виробниками техніки дозволив обґрунтувати підходи до комплектації сільськогосподарських підприємств високоефективною технікою. Особливу увагу було приділено формуванню рекомендацій щодо вибору оптимальних моделей обприскувачів із широкої лінійки компанії «AMAZONE-

WERKE» залежно від особливостей кожного господарства — його розмірів, економічного стану, агрофону, оснащення енергетичними засобами тощо. Це дозволяє проводити заходи хімічного захисту в стислі агрономічно обґрунтовані терміни з високою якістю та мінімальними витратами ресурсів.

У процесі аналізу модельного ряду обприскувачів компанії AMAZONE-WERKE, як причіпних, так і самохідних, було здійснено їх класифікацію за рівнем продуктивності та техніко-технологічними можливостями. Усі моделі цієї компанії вирізняються високим рівнем якості, що відповідає міжнародним стандартам, та здатні ефективно виконувати широкий спектр польових операцій — залежно від обраної комплектації.

Під час оцінювання потенціалу техніки продуктивність розглядалася з урахуванням номінальної (теоретичної) години чистої роботи на рекомендованих швидкостях обприскування. Водночас враховувалося, що на практиці технологічні зупинки можуть становити до 30–40 % усього робочого часу, що впливає на реальний обсяг виконаних робіт.

Систематизація моделей дозволила згрупувати техніку за шириною захвату штанги та середньою продуктивністю. За наявності відповідного парку енергетичних засобів (тракторів), а також з урахуванням структури сільськогосподарських площ, форми й конфігурації полів, можна розрахувати доцільну кількість обприскувачів для підприємства. Основним фактором при цьому виступає дотримання рекомендованих агротехнічних строків обробки — саме у ці терміни необхідно досягти максимальної продуктивності з найменшими втратами (рис.8.5.1).

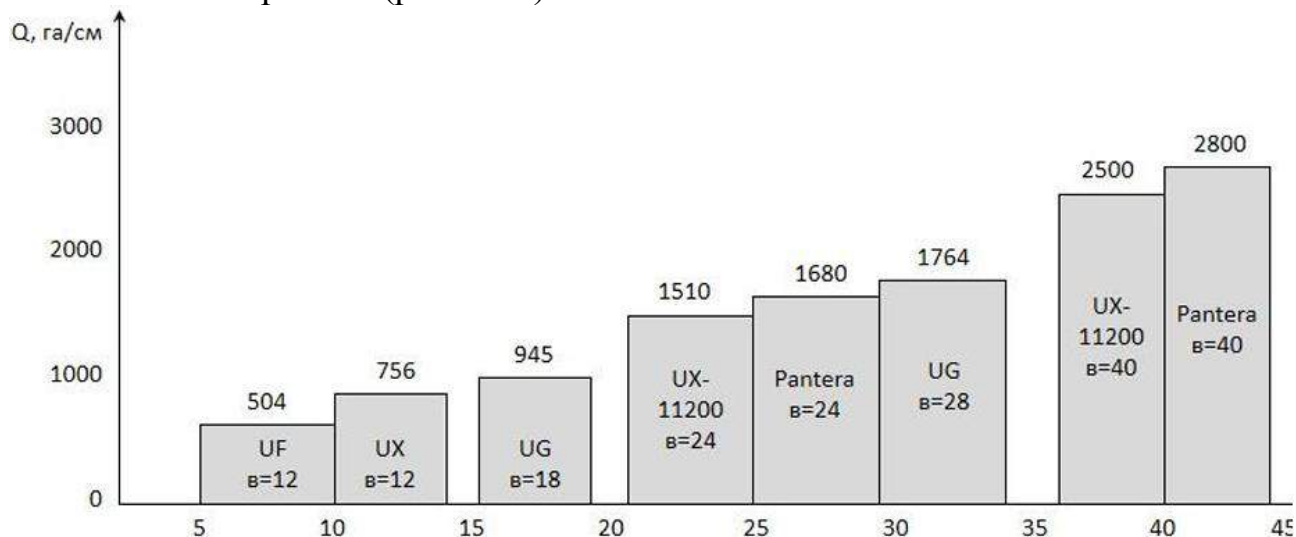


Рис. 8.5.1. Розрахункова (максимальна) виробітка (Q , га/см) обприскувачів компанії «AMAZONE-Werke» за агрострок 5 діб при 10-годинному добовому навантаженні без урахування часу на підготовчі роботи (30 %) за різної ширини захвату штанги ($v = 12, 18, 24, 28$ і 40 м) на рекомендованих робочих швидкостях (12 км/год для UF; 18 км/год для UX та UG; 20 км/год для Pantera).

Для візуалізації можливостей обприскувачів різних типів компанії AMAZONE-WERKE була побудована номограма (рис. 8.5.2), що дозволяє

швидко визначити обсяги обробки в задані агростроки залежно від технічних характеристик.

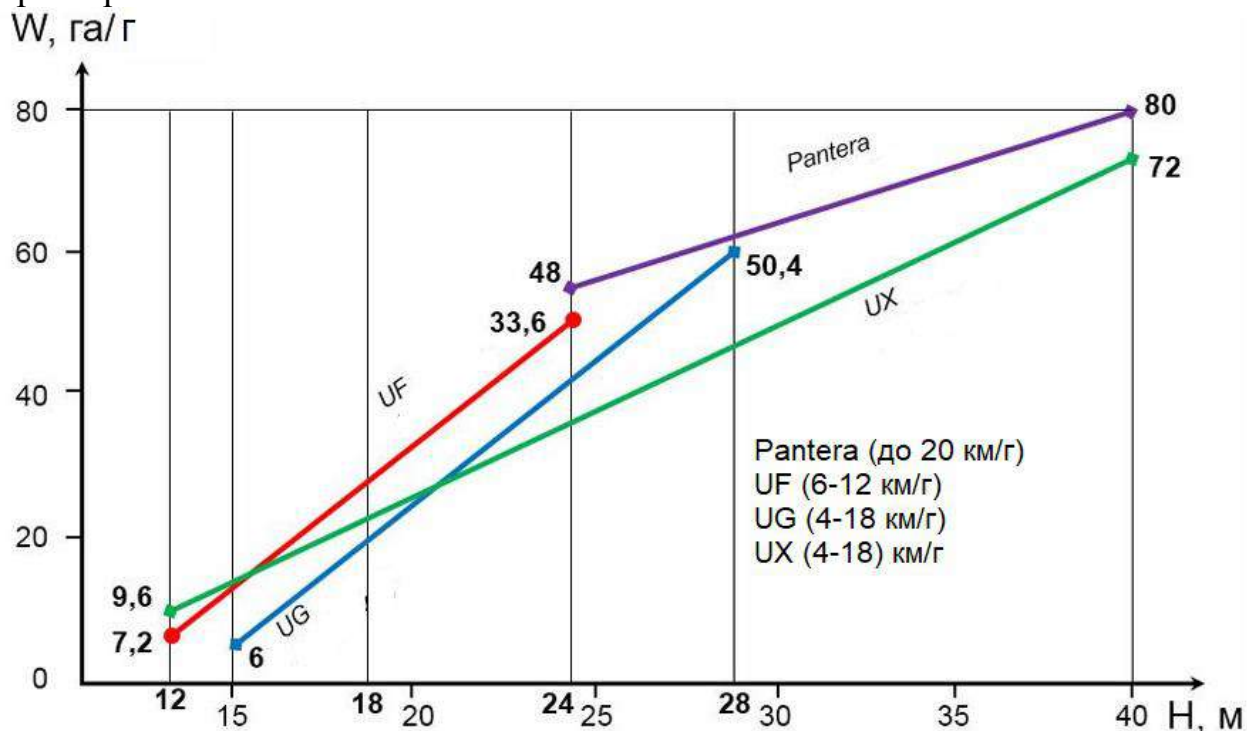


Рис. 8.5.2. Номограма для вибору обприскувачів фірми «AMAZONEN-Werke» за продуктивністю агрегатів залежно від ширини захвату та рекомендованих робочих швидкостей.

Для експериментального підтвердження заявлених параметрів у реальних умовах польових робіт було проведено випробування найпотужнішого причіпного обприскувача UX 11200 з баком об'ємом 12 000 л, обладнаного штангою Super-L шириною 40 м. Випробування проходило у зв'язці з трактором Fendt потужністю 330 к.с. та автоматизованою системою керування на базі сигналу RTK з мобільної станції. Під час обробки посівів ріпаку гліфосатом при нормі витрати 100 л/га та швидкості руху до 17 км/год (у безвітряних умовах) було досягнуто продуктивності 43 га/год. За 24 години машина обробила 1032 гектари.

Таким чином, під час вибору оптимальної моделі обприскувача для виконання хімічного захисту у визначені агротехнічні терміни найважливішим параметром виступає величина робочого ресурсу (виторг) техніки в заданий проміжок часу. Це значення обчислюється з урахуванням планових строків виконання технологічної операції, можливостей наявної техніки та організаційних факторів у господарстві.

Для вибору найбільш ефективного (або ефективних) обприскувача для забезпечення якісного та своєчасного хімічного передпосівного обробітку або обробки посівів у рекомендовані агротехнічні строки серед широкого асортименту машин, що випускаються компанією «AMAZONE-WERKE», головним показником є продуктивність обприскувачів (Q) в межах агростроку (1, 3, 5 діб), яка розраховується за формулою з урахуванням тривалості

виконання технологічної операції у межах рекомендованого агротехнічного строку A (днів):

$$Q_A = f (W \times T_{\text{зм}} \times \Pi_{\text{зм}} \times A), \text{ га}$$

Де: W – годинна продуктивність агрегату за даними номограми (рис. 1), га/год;

$T_{\text{зм}}$ – тривалість зміни (8–10 год);

$\Pi_{\text{зм}}$ – кількість змін на добу (1, 2, 3);

A – рекомендований оптимальний агрострок (1, 2, 3, 4, 5), діб;

f – коефіцієнт використання часу зміни (0,6–0,7).

За результатами розрахунків виробітку обприскувачів за агрострок (у розрахунках — 5 днів) при однозмінному режимі роботи по 10 годин на добу протягом п'яти робочих днів (максимальний рекомендований термін для хімічної обробки), з урахуванням технологічних простоїв (заправка, розвороти, ремонти, переїзди, погодні умови — 30 %) побудовано номограму розрахункової (максимальної) виробітку обприскувачів компанії «AMAZONE-WERKE».

З аналізу номограми випливає, що при технічному переоснащенні агропідприємств із урахуванням їхнього масштабу (обсягів робіт) та фінансових можливостей (рис. 8.5.3):



Рис. 8.5.3. Обприскувачі компанії «AMAZONE-Werke»: 1 – навісний обприскувач UF; 2 – найбільший причіпний обприскувач UX 11200, що встановив світовий рекорд; 3 – самохідний обприскувач Amazone Pantera-SX 4000 з високим кліренсом – до 1,7 м.

- для невеликих господарств найбільш ефективним є навісний обприскувач типу UF;

- для середніх підприємств — причіпні обприскувачі типу UX та UG зі штангами шириною від 12 до 28 м;
- для великих, високорентабельних підприємств — причіпний обприскувач UX 11200 зі штангами шириною від 24 до 40 м та об'ємом бака для робочого розчину 11 200 л;
- а також самохідний, висококліренсний і більш технологічний обприскувач Pantera-SX4000..

Висновки

Під час вибору оптимального обприскувача для агропідприємства в умовах його технічного переоснащення головними критеріями є висока продуктивність і виробіток, що забезпечують своєчасну обробку посівів у межах встановлених агротехнічних термінів.

При комплектації господарства доцільно віддавати перевагу техніці одного виробника, який пропонує широкий модельний ряд обприскувачів із різною шириною захвату, рекомендованими високими робочими швидкостями і продуктивністю. Такій стратегії найбільше відповідає техніка німецької компанії «AMAZONE-WERKE».

Рекомендована література (сенсори)

- Prem Rajak, Abhratanu Ganguly, Satadal Adhikary, Suchandra Bhattacharya (2023) "Internet of Things and smart sensors in agriculture: Scopes and challenges", *Journal of Agriculture and Food Research*, Vol. 14, 100776, <https://doi.org/10.1016/j.jafr.2023.100776>.
- Anjali Bharti, Utkarsh Jain, Nidhi Chauhan (2024) "From lab to field: Nano-biosensors for real-time plant nutrient tracking", *Plant Nano Biology*, Vol. 9, 100079, <https://doi.org/10.1016/j.plana.2024.100079>.
- Anna F. Cord, Kevin Darras, Ryo Ogawa, Luc Barbaro, Charlotte Gerling, Maria Kernecker, Nonka Markova-Nenova, Gabriela Rodriguez-Barrera, Felix Zichner, Frank Wätzold (2025) "Leveraging passive acoustic monitoring for result-based agri-environmental schemes: Opportunities, challenges and next steps", *Biological Conservation*, Vol. 305, 111042, <https://doi.org/10.1016/j.biocon.2025.111042>
- Omar Adel Ibrahim, Savio Sciancalepore, Roberto Di Pietro (2022) "Noise2Weight: On detecting payload weight from drones acoustic emissions", *Future Generation Computer Systems*, Vol. 134, pp. 319-333, <https://doi.org/10.1016/j.future.2022.03.041>.
- Xujun Chen, Longgang Ma, Zhengzhong Wan, Ruihua Zhang, Maoyuan Yin, Zhencan Yang, Xinqing Xiao (2025) "Olfactory biosensor for smart agriculture", *Biotechnology Advances*, Vol. 83, 108611, <https://doi.org/10.1016/j.biotechadv.2025.108611>.
- Janani Mani, Seenivasan Nagachandrabose, Prabhu Somasundaram, Suryaprabha Deenan (2025) "Artificial intelligence integrated nano biosensor technology: A breakthrough in early detection and sustainable management of

phytonematodes", *Physiological and Molecular Plant Pathology*, Vol. 139, 102756, <https://doi.org/10.1016/j.pmpp.2025.102756>.

Питання для самоперевірки (сенсори)

- Які основні напрями модернізації технічного обладнання в агропромисловому секторі?
- Які проблеми гальмують впровадження сучасних технологій у сільському господарстві?
- Які тенденції можна виокремити у використанні технологічного обладнання в АПК?
- Які ключові можливості відкриває застосування технологій IoT у сільському господарстві?
- У чому полягає роль розумних сенсорів для моніторингу агропроцесів?
- Які основні виклики постають при впровадженні IoT у аграрну практику?
- Які переваги використання нанобіосенсорів у моніторингу живлення рослин?
- У чому полягає принцип роботи нанобіосенсорів?
- Як використання нанобіосенсорів впливає на ефективність агрохімічних заходів?
- У чому полягає сутність пасивного акустичного моніторингу?
- Які можливості цей метод відкриває для агроекологічних досліджень?
- Які виклики обмежують ефективність використання пасивного акустичного моніторингу?
- Який принцип покладено в основу технології Noise2Weight?
- У чому переваги використання акустичних сигналів для визначення ваги вантажу дрона?
- Які можливі практичні сфери застосування цієї технології?
- Які конструктивні особливості сучасних обприскувачів є визначальними для їх ефективності?
- Як технічне переоснащення агропідприємств впливає на вимоги до обприскувальної техніки?
- Які технологічні інновації у сфері обприскувачів мають найбільший потенціал для розвитку?
- Які технології вважаються ключовими для переходу агропідприємств до концепції «розумного» сільського господарства?
- Чим відрізняються розумні сенсори від традиційних вимірювальних приладів у сільському господарстві?
- Які переваги дає поєднання дронів із системами моніторингу (у тому числі акустичного аналізу)?
- Як використання нанобіосенсорів може сприяти точному землеробству?
- Які основні чинники визначають вибір типу обприскувача для сучасних агропідприємств?

ТЕМА 9. РОБОТОТЕХНІЧНІ СИСТЕМИ АГРАРНОЇ ГАЛУЗІ.

9.1 КОНЦЕПЦІЯ РОБОТИЗОВАНОГО ТЕПЛИЧНОГО КОМПЛЕКСУ ДЛЯ ВИРОЩУВАННЯ ТОМАТІВ З ОДНИМ ОПЕРАТОРОМ

Останні роки в Україні гостро постає проблема нестачі робочої сили в сільському господарстві. Через обмеження трудової міграції, зниження мотивації до фізично важкої й низькооплачуваної праці, а також високу плинність кадрів, аграрні підприємства стикаються з труднощами у забезпеченні стабільного виробничого процесу. Постійна потреба у пошуку нових працівників та їхнє навчання прямо на робочому місці призводять до додаткових витрат і нерідко — до зниження якості продукції.

Окрім кадрової проблеми, в тепличному виробництві надзвичайно важливим залишається питання дотримання фітосанітарних норм. Людський фактор часто стає джерелом розповсюдження захворювань — бактерій і спор, що потрапляють до теплиць через інструменти, руки, одяг та візки. Це знижує врожайність і якість продукції, ускладнює процес догляду за рослинами. Особливої актуальності набуває ця проблема у великих тепличних комплексах та у випадку організації теплиць у кліматично складних регіонах України.

Сьогодні з'являється все більше можливостей для автоматизації таких господарств. Зниження вартості електронних компонентів, доступність безкоштовного програмного забезпечення, підвищення обчислювальних потужностей комп'ютерної техніки та розвиток акумуляторних технологій — усе це відкриває шлях до впровадження аграрної робототехніки.

Структура роботизованого тепличного комплексу

У межах цієї глави пропонується концепція автоматизованої теплиці для вирощування томатів, у якій більшість технологічних операцій виконується за допомогою роботизованих систем. Запропонована концепція передбачає поділ тепличного комплексу на дві функціональні зони — ділянку для вирощування розсади та зону плодоношення, де безпосередньо вирощуються томати. У розсадному відділенні можлива установка автоматизованої лінії для висіву насіння, яку доповнює дельта-маніпулятор. Усі операції з розсадою виконує мобільний робот із маніпулятором.

У зоні вирощування томатів встановлено систему автоматичного поливу та дозування добрив. Збір врожаю і видалення рослинних залишків здійснюють мобільні роботи з маніпуляторами, які співпрацюють із транспортними роботами. Для забезпечення роботи теплиці використовуються комбіновані джерела енергії — вітрогенератори, сонячні панелі, генератори на біогазі та метані. Перекачування води забезпечують як електричні, так і вітряні насоси. Для обігріву води та регулювання мікроклімату застосовують сонячні колектори та теплові гармати, що працюють на метані.

Залишки рослин після збирання врожаю, зокрема пошкоджені плоди, потрапляють до спеціального бункера, з якого сировина спрямовується на виробництво біогазу. Електроенергія, згенерована з усіх джерел, розподіляється контролером: вона йде на заряджання акумуляторів, від яких живляться

споживачі постійного струму (наприклад, зарядні станції для роботів), а також через інвертори — на споживачів змінного струму.

До базових операцій у тепличному вирощуванні томатів належать:

- висів насіння;
- догляд за розсадою (полив, підживлення, пікірування);
- пересадка у ґрунт;
- подальший полив і внесення добрив;
- формування куща (видалення пасинків, прищипування, обрізання листя);
- захисні обробки;
- регулярне видалення старого листя.

Насіння томатів можуть бути як свіжими, так і такими, що зберігались до семи років. Терміни висіву залежать від обраної технології вирощування. Посів проводиться у ящики, касети або торф'яні горщики з попередньо збалансованим субстратом, зволоженим і підігрітим до 22–25 °С. Насіння заглиблюється на 1–2 см, після чого посадкові ємності накривають плівкою та розміщують у темному місці. Сіють або сухе насіння, або попередньо пророщене до появи корінця. Для автоматичного посіву ефективно використовуються спеціалізовані автоматизовані лінії. Як приклад — обладнання італійської компанії Urbinati, яке пропонується застосовувати у складі цієї концепції (рис. 9.1.1).

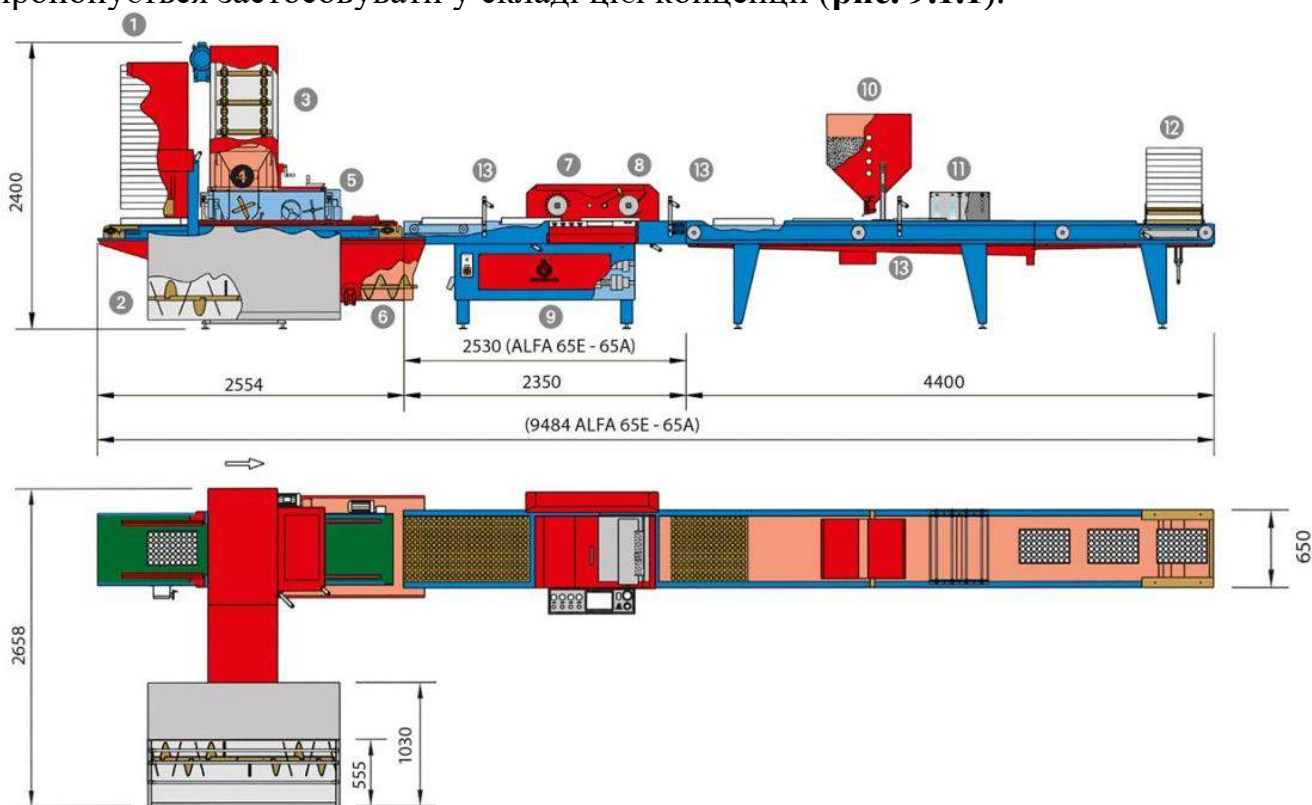


Рис. 9.1.1 Приклад автоматизованої посадкової лінії Urbinati (Італія)

Лінія виконує точний та швидкий висів насіння у касети або лотки. Така система складається з низки функціональних модулів, кожен з яких виконує окрему операцію в послідовному циклі. Вона включає механізм пневматичного типу, який вибирає посадкову тару (зокрема пінополістирольні лотки) та подає її далі по траєкторії. Для приготування поживного субстрату встановлено містку

ємність об'ємом близько 1200 літрів із мішалкою, з якої ґрунт подається до системи транспортування ковшовим транспортером з двома ланцюгами.

Для наповнення касет або лотків субстратом застосовується чотирилопатевий роторний апарат лінійної дії. Після цього працює щітковий механізм з подвійним шнеком, який очищує тару від зайвого субстрату, а надлишки повертаються до системи повторного використання.

На наступному етапі запускається лункокопач з очисною щіткою, який формує заглиблення для насіння. Потім спрацьовує спеціалізований посівний барабан діаметром 169 мм, що обладнаний вставками, які створюють отвори мінімальним діаметром 0,15 мм. Насіння утримується за допомогою повітряних штанг із подвійними рядами сопел і коливальною пластиною. Для точного розміщення насіння по центру лунок передбачено регульовані молоточки, які діють на насіння після його подачі.

Управління всією системою здійснюється через сенсорну панель, яка інтегрована в електричний блок. Крім того, для покриття висіяного насіння застосовується контейнер з вермикулітом на 230 літрів, у якому передбачено налаштування швидкості та дозування.

Після посіву спрацьовує зрошувальний модуль із чотирма зрошувальними штангами, який забезпечує зволоження субстрату. Завершальним етапом є автоматизоване укладання касет у штабелі за допомогою балансового укладача. Для точного вирівнювання під посадкову тару в системі також передбачено автоматичний механізм самовирівнювання по ширині.

Основною складовою такої посівної системи є барабан, який забезпечує високу продуктивність і здатний працювати з насінням різної форми та розміру (рис. 9.1.2).



Рис. 2 Спосіб прикріплення насіння до барабану

Завдяки пневматичному принципу захоплення насіння та точній механіці, автоматизована посівна лінія дозволяє зменшити кількість відходів, підвищити рівень автоматизації та знизити вплив людського чинника.

Під час автоматизованого висіву насіння складної форми (зокрема томатів) можуть виникати проблеми, пов'язані з неповним заповненням касет: деякі

комірки залишаються порожніми або, навпаки, містять кілька насінин. Це особливо актуально для дрібного та легкого насіння. Для надійного фіксування таких насінин у барабані застосовуються спеціальні сопла, які висуваються з отворів і утримують насіння за допомогою вакууму (рис.9.1.3).

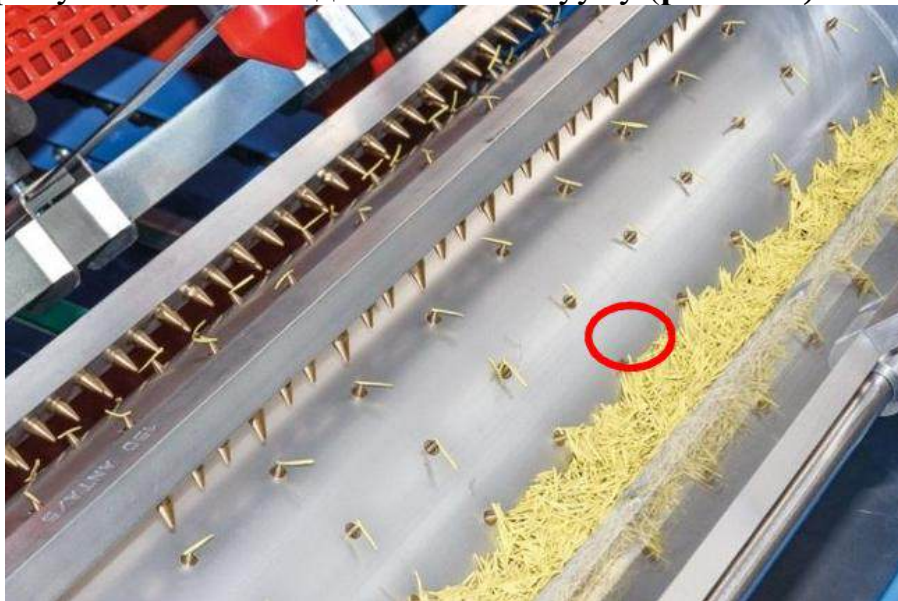


Рис. 9.1.3 Спосіб прикріплення насіння складної форми на барабан

Однак навіть така система не гарантує абсолютної точності посіву. Для виправлення похибок — наприклад, пропущених осередків чи надлишково засіяних — доцільно інтегрувати додатковий модуль із високошвидкісним дельта-маніпулятором, оснащеним пневматичним захватом та системою машинного зору (рис. 9.1.4).

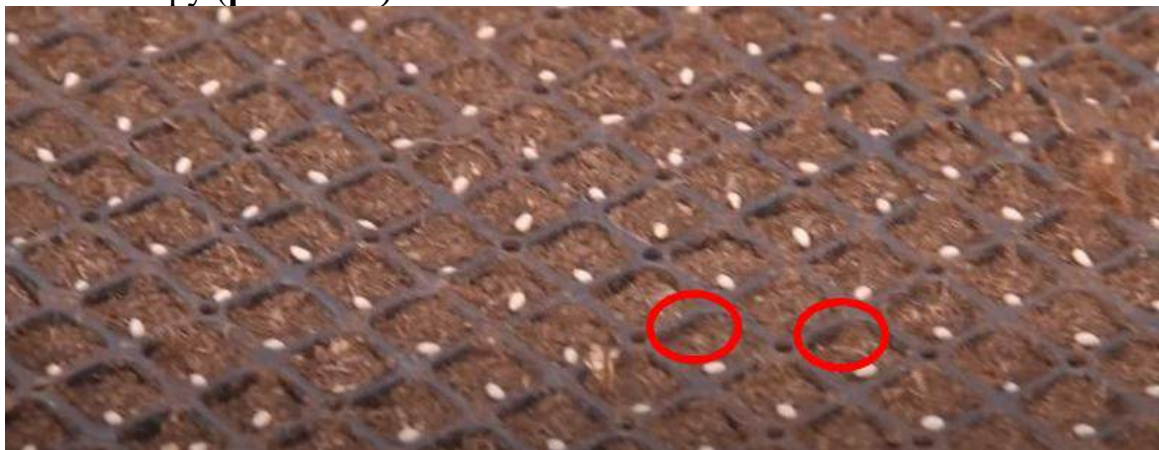


Рис. 9.1.4 Пропущені комірки у касеті

Такий модуль сканує касету після первинного висіву і коригує неточності: додає насіння в порожні клітинки або вилучає надлишок. Як приклад можна навести дельта-робота компанії ABB, хоча для промислових теплиць доцільно використовувати його бюджетні аналоги з подібною кінематикою (рис. 9.1.5).



Рис. 9.1.5 Дельта-робот фірми ABB

Такий модуль може працювати як у складі загальної посівної лінії разом із барабаном, так і як автономний вузол. Його гнучкість дозволяє інтегрувати його в систему на різних етапах вирощування розсади.

Окрім автоматизації посіву, важливу роль відіграє система моніторингу росту розсади. Камери з алгоритмами комп'ютерного зору, розташовані над касетами з рослинами, здатні фіксувати ключові моменти розвитку – наприклад, появу перших сходів, розкриття справжніх листків, а також ідентифікувати ослаблені, уражені чи неякісні рослини (рис. 9.1.6).



Рис. 9.1.6 Стан сходу, який реєструється СТЗ для включення досвітки

Крім того, такі системи дають змогу контролювати рівень освітлення (виявляючи затінені ділянки), аналізувати схожість та приймати рішення щодо включення додаткового освітлення (досвітки), поливу, підживлення, пікірування або формування розсади. Усе це забезпечує не лише стабільний розвиток рослин, а й зменшує залежність тепличного господарства від людського чиннику.

Зовнішній вигляд пророслої та сформованої розсади, а також результат роботи алгоритму виділення контурів ростків із використанням кольорового фільтру, що входить до складу системи технічного зору, наведено на **рис. 9.1.7**. Такий підхід дозволяє здійснювати автоматизований аналіз стану сіянців, визначати їхні межі, щільність розташування та виявляти відхилення у розвитку. Застосування цього алгоритму сприяє своєчасному прийняттю рішень щодо корекції умов вирощування без залучення оператора.

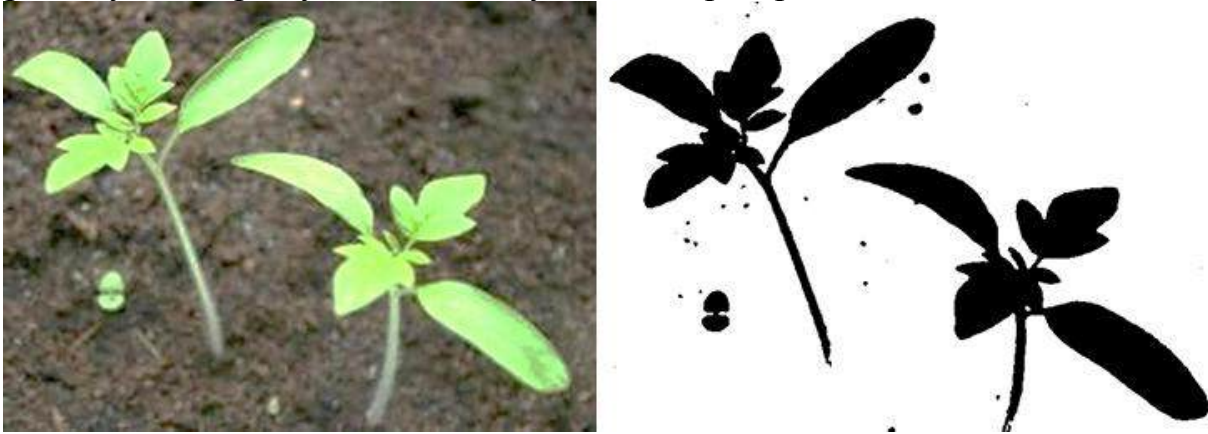


Рис. 9.1.7 Зовнішній вигляд перших справжніх листків та результат виділення контурів

Розробка моделей мобільних сільськогосподарських роботів

Розміщення посівних ящиків у теплиці може здійснюватися за допомогою мобільних транспортних роботів (**рис. 9.1.8**).



Рис. 9.1.8 3D-модель транспортного робота для проведення типових транспортувальних операцій

Розробка моделей мобільних сільськогосподарських роботів передбачає застосування транспортних платформ для переміщення посівних ємностей у тепличному середовищі. Такі роботи базуються на конструкції з трьома всенаправленими колесами, кожне з яких обладнане безщіточним двигуном постійного струму з датчиками Холла для відстеження швидкості обертання. На вантажній частині платформи також встановлюються всенаправлені колеса, що

забезпечують переміщення контейнерів або ящиків, особливо коли кілька роботів працюють як єдина конвеєрна система. Для переміщення важких об'єктів передбачено використання лінійних електроприводів, що дозволяють підіймати вантаж на платформу та опускати його.

Керування кожним двигуном виконується через окремі контролери, які отримують дані з датчиків Холла, обробляються мікроконтролером, і на основі цього формується керуючий сигнал на обмотки двигунів. Така система дозволяє точно регулювати швидкість та напрямок руху робота.

Контроль за станом мікроклімату в теплиці, зокрема вологістю ґрунту та температурою в окремих її зонах, здійснюється за допомогою датчиків, вмонтованих у маніпулятори мобільних роботів. У межах запропонованої концепції передбачається, що такі роботи також виконують агротехнічні операції — пікірування, пасинкування, прищипування стебел, видалення листя, збір урожаю та очищення теплиці від ботви.

Для реалізації цих функцій використовуються змінні робочі органи. Наприклад, аналіз стану ґрунту відбувається за допомогою зондового модуля з сенсорами температури та вологості, а операції пасинкування і пікірування — за допомогою інструментів із загостреними кінцями, які дозволяють не тільки зрізати частини рослин, а й одразу збирати їх у спеціальні контейнери для подальшої утилізації в біореакторах. Для висадки розсади в ґрунт можуть використовуватись двопальцеві захвати у поєднанні з адаптованими розсадопосадковими модулями, що забезпечують точне встановлення рослин у тепличному середовищі (рис.9.1.9).



Рис. 9.1.9 Кінцевий механізм розсадосаджувального пристрою

Аналіз вологості ґрунту та температури повітря передбачає встановлення на кінці маніпулятора спеціального модуля, оснащеного зондовим сенсором для визначення вологості ґрунту та термодатчиком. Такий функціональний блок дозволяє отримувати актуальні параметри мікроклімату у різних зонах теплиці.

Операції пікірування розсади, а також пасинкування та прищипування стебел можуть виконуватись за допомогою уніфікованого інструменту — відщипуючого модуля. Для цих завдань доцільним є використання плоского

захвату з загнутими та загостреними краями, який дозволяє акуратно видаляти листя, пасинки або частини стебел, не залишаючи обрізаних частин біля рослин. Такий захват також забезпечує транспортування зрізаних фрагментів до спеціального ящика, звідки вони далі можуть бути подані до біореактора для утилізації.

Для збирання врожаю необхідне більш складне захватне обладнання — наприклад, трипальцевий камерний захват або захват із камерами, заповненими сипким матеріалом, що дає змогу рівномірно розподілити тиск на плоди та запобігти їх пошкодженню. Концепцію автоматизованого збирання врожаю за допомогою мобільних роботів, оснащених маніпуляторами, доцільно проілюструвати на **рис. 9.1.10**.

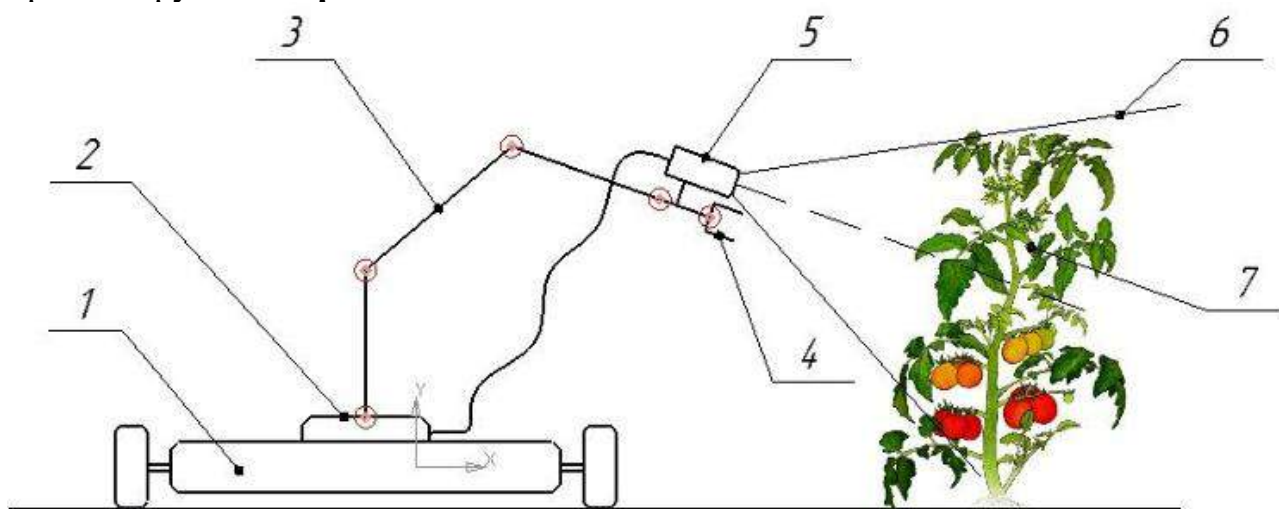


Рис. 9.1.10 Узагальнена схема мобільного робота для збирання врожаю.

На рис. 10 представлено мобільну робототехнічну платформу «1» з установленим на ній маніпулятором «3», який оснащено спеціалізованим захватом «4» і сенсорною телезорною системою «5». Ця система складається з відеокамери та ультразвукового далекоміра, з'єднаних із блоком керування «2». Завдяки визначеному полю зору «6», камера і далекомір забезпечують точне підведення захватного пристрою до плода, що росте на стеблі рослини «7». Основними завданнями цієї системи є точне визначення просторового положення плодів, керування траєкторією переміщення маніпулятора та виконання операції відділення плода від стебла.

Прототип робота для збирання томатів може бути реалізований на основі 3D-моделі, зображеної на **рис. 9.1.11**. Він має чотириколісне шасі за схемою Акермана, що регулюється по висоті та ширині відповідно до розмірів теплиці та характеристик вирощуваних сортів. Робот обладнаний двома маніпуляторами, системою позиціонування, комп'ютерною системою зору, яка включає відеокамери та ультразвукові сенсори, розміщені як на маніпуляторах, так і на рамі. Для покращення видимості передбачені прожектори. Система також включає модуль керування рухом, рульовий електропривід та електродвигуни приводу коліс.



Рис. 9.1.11 3D-модель робот у для збору врожаю

Запропонована концепція передбачає відмову від використання стаціонарних конвеєрних ліній, оскільки вони є складними в обслуговуванні та недостатньо гнучкими в умовах сучасних виробничих систем. Замість них пропонується впровадження груп роботів, здатних самостійно формувати конвеєрні траси та виконувати сортування вантажів масою до 100 кг. Такий підхід дозволяє швидко переобладнати будь-яке приміщення з рівною поверхнею під потреби сортувальних процесів. Для уникнення зіткнень між роботами доцільно застосовувати ультразвукові та інфрачервоні датчики. Дані з усіх сенсорів обробляються центральною системою керування, яка в разі виявлення перешкоди надсилає сигнал до системи нижнього рівня з командою призупинити роботу всіх виконавчих механізмів. У локальній системі позиціонування використовуються QR-мітки та високочастотна камера, що дозволяє роботу визначати власне положення в теплиці шляхом зчитування інформації з мітки.

У результаті використання таких технологій виконання стандартних агротехнічних операцій із розсадою та стиглими плодами може бути повністю автоматизоване. Людський персонал у теплиці замінюється робототехнічними комплексами під керуванням лише одного оператора. Такий підхід особливо актуальний в умовах нових викликів, з якими вже стикаються або в майбутньому стикатимуться виробники сільськогосподарської продукції.

9.2 ПРИКЛАД РОБОТОТЕХНІЧНОЇ СИСТЕМИ ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ ТЕПЛИЧНОГО ВИРОБНИЦТВА ОВОЧЕВИХ КУЛЬТУР

Сучасні овочеві тепличні господарства характеризуються високим рівнем автоматизації основних технологічних процесів, зокрема підтримання мікроклімату, поливу рослин, внесення добрив тощо. Проте низку трудомістких

і відповідальних операцій — таких як збирання врожаю, підкручування та обвивання стебел у міру росту, а також боротьба з хворобами та шкідниками — продовжують виконувати вручну, переважно із залученням сезонних працівників.

Для боротьби зі шкідниками застосовують клейові пастки у вигляді блакитних або жовтих листів, які змінюють своє просторове розташування в процесі росту рослин. Ці поверхні потребують регулярного візуального огляду для прийняття рішень щодо точкової обробки шкідників (наприклад, локального внесення спеціальних розчинів або обробки всієї теплиці). Перед збиранням врожаю, а іноді й на етапі дозрівання, оцінка стиглості плодів також здійснюється візуально.

У світі вже існують приклади агропромислових тепличних комплексів, де реалізовано автономний технологічний цикл. До таких належать, зокрема, робот Strawberry Picking Robot, який оснащений системою визначення ступеня стиглості плодів для збирання полуниці; маніпулятор FestoWP5, призначений для збирання перцю; пристрій SprayRobot, що автоматично розпилює рідкі препарати під час вирощування овочевої продукції, а також обладнання від компанії Panasonic.

Матеріал статті орієнтовано на особливості організації тепличного виробництва в умовах сучасних агропромислових комплексів, у яких теплиці обладнано центральними та технологічними проходами (оснащеними стандартними рейковими напрямними), між якими розміщено ряди вирощуваних сільськогосподарських культур. Так типовий тепличний комплекс передбачає наявність 108 поперечних рядів та двох поздовжніх рядів для вирощування. Рейкові напрямні, розташовані вздовж технологічних проходів, мають довжину 42 метри, а їх ширина варіюється в межах 3,5–7 см. Центральний прохід має ширину 3 метри, тоді як технологічні проходи з обох боків рядів — 0,5 метра.

Для боротьби з шкідниками використовуються пастки розміром 40×25 см, які розміщуються з урахуванням конфігурації рядів та особливостей росту культур. У процесі збирання томати масою від 80 до 150 г укладаються в коробки розміром 50×40×13,5 см, що оптимізує транспортування та подальшу сортувальну обробку.

Дослідження інноваційних агротехнологій, зокрема в напрямі точного землеробства, та застосування технічних засобів для їх реалізації ґрунтується на системологічному підході. Згідно з цим підходом, агротехнологічна система (агротехноценоз) розглядається як біологічно самоорганізована сукупність агрооб'єктів (біоценоз), що цілеспрямовано керується робототехнічними компонентами (техноценозом). У ході проєктування роботизованої системи для тепличного господарства було враховано такі ключові положення: біоценози мають первинне значення щодо техногенних елементів агросистеми, а архітектура технічних компонентів, систем керування і програмного забезпечення повинна базуватись на принципах модульності та відкритості інформаційного обміну.

Проведено аналіз технологічних процесів, автоматизація яких здатна суттєво покращити техніко-економічні показники функціонування теплиці, зменшити споживання ресурсів і сировини при вирощуванні овочів. У результаті сформульовано завдання розробки багатфункціональної робототехнічної системи для тепличного середовища, що включає проектування транспортних платформ для руху як по рейкових напрямних, так і по бетонованих покриттях; створення маніпуляторів із захватними пристроями для збору врожаю; розробку системи технічного зору для контролю стану рослин, виявлення шкідників, хвороб і визначення стиглості плодів; впровадження систем позиціонування транспортних засобів і маніпуляторів; організацію переміщення тари; створення верхнього рівня керування та засобів інформаційної інтеграції між усіма компонентами.

Усі основні вузли робототехнічної системи були змодельовані в середовищі твердотільного проектування, а дослідження систем керування, позиціонування та технічного зору проводились у середовищі Simulink MATLAB. Отримані результати дозволили сформувати повну модель роботизованого комплексу, який об'єднує дві основні групи мобільних агрегатів, що взаємодіють між собою та з центральною системою керування.

Першу групу становить технологічний агрегат з маніпулятором, який пересувається вздовж технологічних проходів по рейкових напрямних. Він виконує завдання зі збору врожаю: аналізує стан рослин, виявляє та обриває стиглі плоди, розміщує їх у тарі, контролює наявність шкідників у клейових пастках. За потреби, після заміни виконавчого модуля, агрегат може здійснювати й інші операції, зокрема локальну обробку рослин. Другу групу складає транспортний агрегат, що рухається центральним проходом теплиці по бетонованій поверхні. Його функція полягає у доставленні порожніх ящиків до технологічного агрегата, транспортуванні тари з урожаєм до зони зберігання, а також у зміні технологічного проходу для АМТ через перебазування на іншу рейкову лінію.

У процесі виконання агротехнічних операцій важливу роль відіграє система технічного зору, яка забезпечує безперервне оновлення даних про стан об'єктів впливу. Ці системи можуть працювати як окремо, так і у взаємодії з іншими пристроями комплексу. Технологічний агрегат, що здійснює безперервний збір плодів уздовж проходу, оснащено пристроями для переміщення тари, системою позиціонування, маніпулятором із захватом, модулем укладання врожаю в тару та блоком технічного зору (рис. 9.2.1).

На рисунку 1 представлено модуль технологічного маніпулятора, що складається з кількох функціональних компонентів. Основа конструкції — транспортна платформа (1), яка забезпечує переміщення агрегата по теплиці. У відсіку (2) розміщені системи автономного енергоживлення та керування. Тара для зібраного врожаю переміщується за допомогою спеціального пристрою (3), встановленого на вертикальній опорній стійці (4). Контроль стану рослин, виявлення стиглих плодів та шкідників здійснює система технічного зору (5), розміщена на маніпуляторі (6), який виконує операції зі збирання врожаю.

Зірвані плоди переміщуються в тару за допомогою спеціального механізму (7). Захоплення плодів відбувається завдяки захватному пристрою (8), розташованому на кінці маніпулятора. Усі пристрої — позиціонування, маніпулятор і блок СТЗ — переміщуються вертикальною стійкою з зубчастою рейкою та роликівими напрямними. Вони дозволяють фіксувати положення агрегата в теплиці, виявляти стиглі плоди та наявність шкідників у пастках. Технологічні орієнтири визначаються за допомогою реперів, а для оцінювання стиглості плодів застосовуються еталони. Маніпулятор обережно відділяє плід, здійснюючи оберт навколо плодоніжки без значного механічного впливу. Захват виконується вакуумною присоскою з великою площею контакту, що забезпечує дбайливе поводження з плодами, включаючи овочі та фрукти неідеальної (наприклад, овальної) форми.

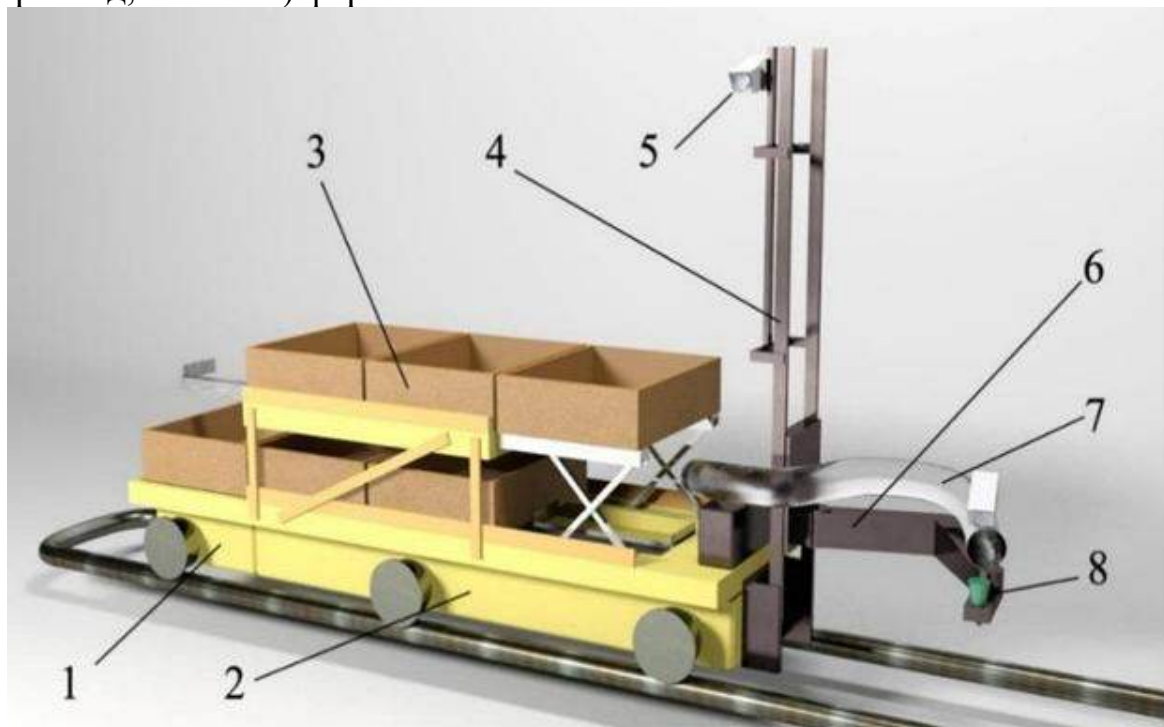


Рис. 9.2.1 Модуль технологічного маніпулятора

Конструкція пристрою переміщення тари передбачає наявність комірок для розміщення ящиків або коробок у два ряди по чотири. Заповнені ємності переміщуються в сусідню вільну комірку — вертикально або горизонтально, за допомогою ножничного механізму — звільняючи місце для нової порожньої тари, яка подається для подальшого наповнення.

У конструкції транспортного агрегату (АТ), зображеному на **рис. 9.2.2**, використано паз (2), що взаємодіє з рейками (1) технологічних проходів теплиці. У разі необхідності переміщення технологічного агрегату з маніпулятором (АМТ) на інший технологічний прохід або при заміні заповнених ящиків на порожні, АМТ заїжджає на транспортний агрегат. Транспортний агрегат може передавати ящики або коробки (3) іншим роботам або здійснювати їх розвантаження.

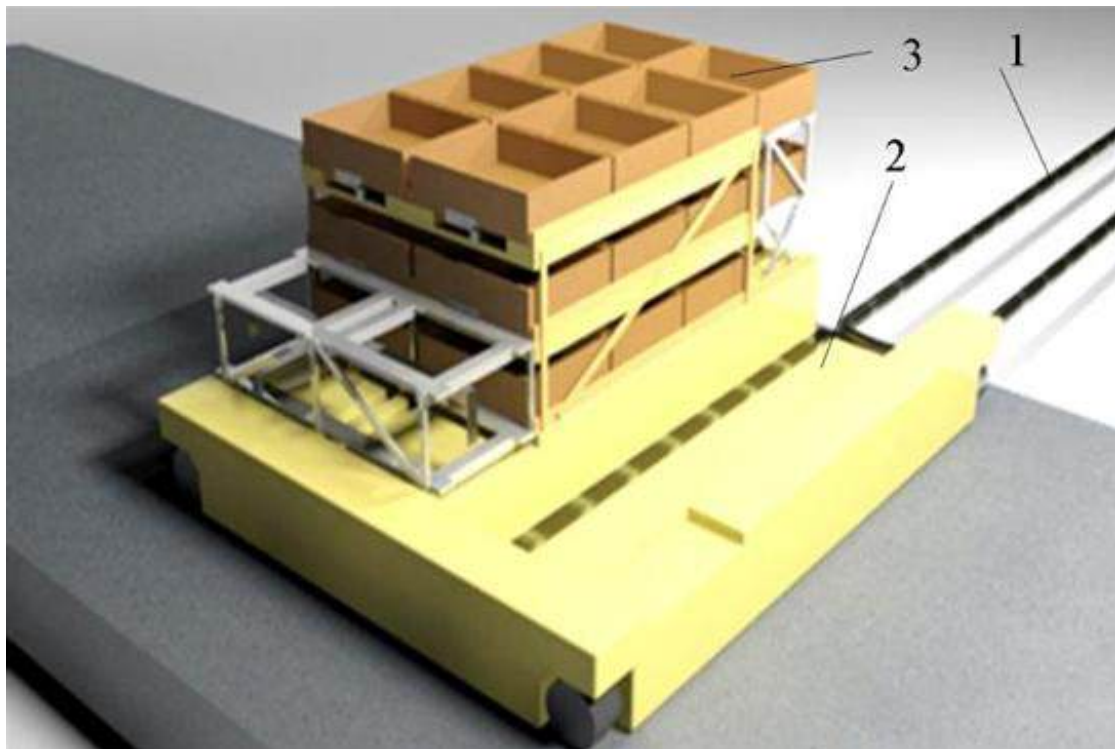


Рис. 9.2.2 Модуль транспортного агрегату, що включає рейки технологічного проходу теплиці (1), паз (2), який взаємодіє з цими рейками, та тару для вантажів (3).

Для отримання актуальної та регулярно оновлюваної інформації про хід технологічних процесів, окрім сенсорних пристроїв і систем технічного зору, встановлених на мобільних транспортних платформах технологічного агрегата з маніпулятором (АМТ) і транспортного агрегата (АТ), використовуються також стаціонарні датчики та стаціонарні системи технічного зору.

Функціонування компонентів багатофункціональної робототехнічної системи, що включає повторювані цикли дій груп АМТ і АТ у закріплених за ними секторах промислової теплиці (рис. 9.2.3), забезпечується триступеневою системою керування. Перший рівень системи керування – контролери приводів, другий – контролери маніпуляторів та платформ, третій – головний контролер та комп'ютер. Обмін даними між компонентами здійснюється через дротові лінії та Wi-Fi мережу. В системі управління передбачено використання промислових контролерів ПЛК-210 з модулями розширення.

Для керування групами роботів у великих тепличних комплексах можливе впровадження алгоритмів «взаємодії рою».

Перед початком роботи система верхнього рівня управління (оператор) надсилає завдання компонентам багатофункціональної системи у вигляді технологічних карт або нестандартних команд. Після проходження етапів самотестування та локалізації у просторі теплиці роботи приступають до виконання технологічних операцій.

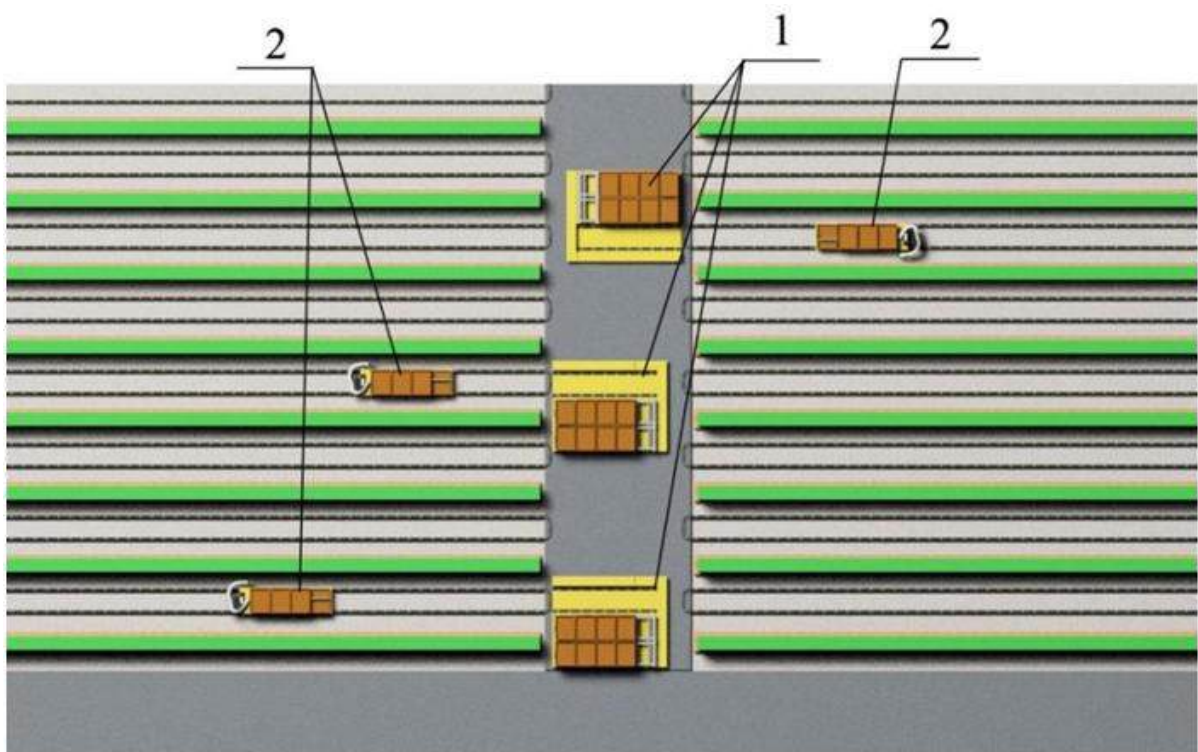


Рис. 9.2.3 Схема розташування основних компонентів робототехнічної системи в промисловій теплиці. Технологічний агрегат з маніпулятором позначено цифрою 1, а транспортний агрегат — цифрою 2.

Під час збору томатів система технічного зору технологічного агрегату з маніпулятором (АМТ) формує знімки рослин з плодами. Після аналізу отриманих зображень захват маніпулятора позиціюється відносно обраного об'єкта. Визначивши стиглий томат і центр плода, формується траєкторія підведення маніпулятора та координати позиціювання захвату для акуратного відривання плода. Зібрані томати захоплюються вакуумною присоскою, а спеціальний поворотний механізм відокремлює плід від плодоніжки шляхом обертання.

Далі томати транспортуються пневматичною системою до ящиків або коробок. Коли тара заповнюється, її замінюють на порожню за допомогою ножничного механізму, який здійснює поперечні та поздовжні переміщення.

Після завершення обробки технологічного проходу транспортний агрегат (АТ) переміщує АМТ у контрольне положення згідно з технологічним регламентом. Функціями АТ також є заміна заповненої тари на порожню та доставка зібраних томатів до навантажувача для подальшого транспортування на склад.

Окремі технологічні агрегати можуть виконувати нестандартні завдання: контроль окремих пасток, визначення чи відстеження стиглості плодів без їхнього збору, збирання плодів у певних ділянках теплиці тощо. Для цього формується відповідне спеціальне завдання.

При роботі в бездротовій мережі АМТ передає на сервер системи верхнього рівня управління інформацію про хід процесів — обсяг зібраного врожаю, знімки пасток, відхилення параметрів від регламентованих норм та

іншу супутню інформацію. Ці дані можуть зберігатися в пам'яті системи, піддаватися аналізу та статистичній обробці, а також використовуватися для формалізації трендів змін параметрів технологічного процесу.

У разі відхилення параметрів технологічних процесів від заданих у технологічних картах здійснюється оперативне планування, під час якого коригуються склад або параметри виконуваних операцій та режими роботи обладнання. Найкращі техніко-економічні показники агротехнологій при мінімальному споживанні матеріально-технічних ресурсів досягаються шляхом свідомої адаптації параметрів процесів відповідно до актуальних і прогнозованих змін природних структур агротехноценозу.

Ефективне прогнозування процесів та вибір алгоритмів керування згідно з прогнозом є важливим і пріоритетним етапом у реалізації агротехнологій. Для формалізації прогнозних залежностей на основі ретроспективної інформації про попередні реалізації подібних процесів (база даних) раціонально застосовувати методи нечіткої логіки (Fuzzy Logic) та математичні моделі, які екстраполюють перспективні зміни параметрів агропроцесів за допомогою нормалізованих функцій.

Джерелами електроживлення для АМТ та АТ є автономні акумуляторні батареї. При використанні стаціонарного живлення перспективними є кабельні системи (кабель «штора», натягнуті кабелі), тролейні контактні системи або однопровідникові резонансні лінії

9.3 ОСОБЛИВОСТІ ЗАСТОСУВАННЯ АГРОДРОНІВ У СИСТЕМІ АГРОХІМІЧНОГО ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ ТА АГРОПРОМИСЛОВОГО КОМПЛЕКСУ

Агродрони (квадрокоптери) або безпілотні літальні апарати (БПЛА) — це відносно новий, проте стрімко зростаючий напрям у сфері сільського господарства. Вони являють собою мультикоптери з декількома гвинтами, які обертаються у протилежних напрямках, що забезпечує їх вертикальний зліт, стабільний політ та маневреність під час виконання аграрних завдань.

Сьогодні агродрони активно застосовуються в агропромисловості провідних країн світу — США, Китаї, державах Європи, Бразилії, а також в Україні. Вони стали важливим інструментом у точному землеробстві, моніторингу стану посівів та внесенні добрив. Утім, вітчизняні агропідприємства ще не повною мірою усвідомлюють переваги цієї технології. Нестача інформації, консультативної підтримки та практичного досвіду гальмує впровадження БПЛА в аграрну практику.

Метою даного розділу є висвітлення ключових сфер застосування агродронів у системі агрохімії та агровиробництва, визначення їх переваг і можливих обмежень.

Залежно від типу сільськогосподарських завдань, обирається відповідна модель квадрокоптера, що відповідає технічним і виробничим потребам

господарства. На основі практичних кейсів виділено низку напрямів, у яких агродрони довели свою ефективність:

- Аерофотознімання та картографування полів. Створення ортофотопланів, 3D-моделей рельєфу, геопросторовий моніторинг стоку води тощо. Це допомагає виявляти проблемні ділянки, зменшувати екологічні ризики та планувати меліоративні заходи.
- Внесення агрохімікатів. Оптимізоване розпилення рідких і твердих добрив, мікроелементів та засобів захисту рослин. Наприклад, дрони можуть працювати на висоті 3–3,5 м зі швидкістю до 35 км/год, охоплюючи до 9 м у ширину при витратах 8–15 л на гектар. Дрон типу XAG 1000Pro здатен обробляти до 20 га/год із навантаженням 25 л робочої рідини.
- Дистанційне зондування агробіоценозів. Моніторинг вологості ґрунту, температури рослин, оцінка стану посівів за допомогою тепловізійних та мультиспектральних камер, зокрема за індексом водного стресу (CWSI).
- Розселення корисних ентомофагів. Наприклад, трихограм — природних ворогів шкідників.
- Управління хімічною меліорацією. Автоматизація процесів вапнування кислих ґрунтів, контроль дозування доломітового борошна та інших меліорантів.
- Оцінювання польових робіт і агрооб'єктів. Обрахунок площ, моделювання рельєфу, прогноз урожайності, визначення моменту збирання врожаю, оцінка стану ґрунту й залишків органіки.

У практиці застосування агродронів важливе місце займають приклади з реального виробництва. Зокрема, на посівах соняшнику, де через неякісну роботу сівалок виникли пропуски та надмірні згущення, квадрокоптер здійснив обліт поля площею 100 км². Рівень сингуляції (однорідності висіву) складав 86%. Після аналізу та корекції роботи сівалок цей показник наступного сезону зріс до 98%, що забезпечило приріст урожайності на 8% і чистий прибуток у 55 млн грн — у 68 разів більше за витрати на дрон.

Впровадження агродронів у сільське господарство відкриває низку переваг, які підвищують ефективність агропроцесів, знижують витрати та сприяють точному землеробству. Серед ключових переваг варто відзначити такі:

1. Однією з головних переваг є зниження часу та собівартості обробки посівів. Наприклад, обробка поля площею 4–6 га займає приблизно 20 хвилин, при цьому відсутні витрати на паливе, обслуговування агротехніки та залучення персоналу.
2. Агродрони мають широкий функціонал, що включає точне розпилення, транспортування агрохімікатів у важкодоступні ділянки поля, побудову маршрутів обльоту та автоматизоване дозування препаратів із рівномірним покриттям.
3. Завдяки інтуїтивному управлінню, обробка полів може виконуватися навіть некваліфікованим користувачем, що особливо важливо для малих господарств.
4. Якість обприскування за допомогою дронів значно вища, ніж при застосуванні авіаційної або наземної техніки — розпилення є більш рівномірним і менш залежним від рельєфу поля.

5. Оптимізація витрат агрохімікатів досягається за рахунок зменшення розміру крапель. Наприклад, при розмірі краплі 150 мкм (порівняно з 300 мкм у традиційних оприскувачах) площа покриття значно зростає, а з додаванням ад'ювантів — ще у 1,5–4 рази. При цьому дотримання точного дозування запобігає опікам культур.
6. Форсунки агродронів, зокрема роторні атомайзери, забезпечують краще покриття в порівнянні зі щілинними чи інжекторними, які часто засмічуються. Технологія RevoSpray забезпечує однорідність крапель та мінімізує ризик опіків навіть при роботі з агресивними речовинами.
7. Агродрони ефективно працюють із системними інсектицидами, зокрема при обробці кукурудзи чи соняшнику від шкідників (наприклад, совки).
8. Можливість нічної роботи завдяки відсутності чутливості до роси розширює час проведення обробок.
9. Застосування для десикації — підсушування культур перед збиранням — є ще однією ефективною функцією, яка прискорює дозрівання й полегшує збір урожаю.
10. Для оперативної та масштабної роботи достатньо двох дронів і двох операторів, які відповідають за дозаправку та заряджання батарей. Такий комплект здатен обробити 150–200 га за день. Наприклад, БПЛА Агродрон А60-Х демонструє продуктивність до 240 га на добу.
11. Технічне обслуговування дронів є доступним — витрати на сервіс, витратні матеріали та незначні ремонти при щорічній експлуатації на тисячах гектарів становлять приблизно 80–120 тис. грн.
12. Доступність технологій також зростає — комплектуючі друкують на 3D-принтерах або замовляють з онлайн-платформ. У країні з'являється все більше сервісних компаній, а також відкриваються виробництва дронів, що робить технологію економічно доцільною.
13. Агродрон не залишає технологічних колій, на відміну від наземної техніки, та може працювати по високих культурах — кукурудзі, соняшнику, що дозволяє зберегти до 10% урожаю.
14. Синхронізована робота з дронами-розвідниками, оснащеними мультиспектральними камерами, дозволяє точно визначити зони ураження рослин і направити основний дрон для обробки саме в ці ділянки.
15. До того ж, агродрони активно використовуються в освітніх і наукових установах — університетах, науково-дослідних інститутах — для вивчення нових рішень в агротехнологіях.

Незважаючи на широкий спектр переваг, використання агродронів у сільському господарстві має низку суттєвих обмежень, які впливають на ефективність їх упровадження в аграрну практику:

1. Обмежений час польоту. Середня тривалість одного польоту дрона становить до 40 хвилин, після чого необхідна заміна або підзарядка акумулятора.

2. Обмеження вантажопідйомності. Більшість комерційних моделей можуть піднімати до 12 кг, що обмежує обсяг хімікатів чи добрив для обробки за один виліт.
3. Невеликий об'єм робочого бака. Типовий об'єм резервуара для рідких препаратів також не перевищує 12 літрів, що вимагає частих дозаправок.
4. Залежність від погодних умов. Сильний вітер, сонячна активність і низька вологість повітря сприяють швидкому випаровуванню дрібних крапель, що знижує ефективність обробки — препарат не досягає листової поверхні.
5. Потреба в огляді поля перед роботою. Для безпечного запуску дрона бажано вибирати підвищення, звідки зручно візуально контролювати політ. Додаткові складнощі створюють перешкоди у вигляді дерев, кущів, ліній електропередач по периметру поля. Не завжди є можливість забезпечити зручний під'їзд транспорту до місця запуску, особливо в умовах бездоріжжя.
6. Недостатнє проникнення препарату у густі посіви. Якщо для культур із розрідженими посівами (кукурудза, соняшник) дрони ефективні, то у випадку зернових культур (пшениця тощо) нижні яруси рослин часто залишаються необробленими.
7. Часта дозаправка. Необхідно регулярно поповнювати бак агрохімікатами, мати на місці додаткове обладнання — резервуари, вузли змішування, помпи тощо.
8. Часта заміна або зарядка батарей. Робота в полі потребує запасних акумуляторів або наявності портативних зарядних пристроїв, іноді — бензогенератора для зарядки.
9. Складність точного дозування гербіцидів. Через високу концентрацію робочого розчину деякі препарати можуть мати знижений ефект або призводити до пошкоджень культур. У деяких випадках обробка з дрона може виявитись дорожчою, ніж традиційна наземна.
10. Висока вартість обладнання. За даними 2023–2024 років, повний комплект (2 дрони, вузол приготування розчину, зарядні станції, акумулятори) може коштувати від 3,9 до 7,8 млн грн (еквівалентно в рублях — за джерелами, що використовувались у дослідженні).
11. Висока вартість оренди. Умовна ціна послуг з використання агродронів може сягати 1000–1500 грн за гектар, що є суттєвим навантаженням для фермерських господарств при великих площах обробки.

Отже, щоб задовольнити зростаючий світовий попит на продукти харчування, сільське господарство має ставати дедалі ефективнішим, зокрема шляхом упровадження безпілотних літальних апаратів (БПЛА), які здатні виконувати широкий спектр завдань — від обприскування до картографування сільськогосподарських угідь.

Застосування агродронів сприяє підвищенню ефективності агровиробництва, що, своєю чергою, посилює продовольчу безпеку країни та розширює її експортний потенціал. Крім того, використання дронів дозволяє скоротити витрати на найману працю, зменшити фізичне навантаження на працівників і мінімізувати людський фактор.

Особливо вагоме значення БПЛА мають для малих і середніх господарств, садів і виноградників, де доступ до техніки обмежений, а точність обробки має критичне значення.

Однак, попри високий потенціал, агродрони поки що не здатні повністю замінити традиційні наземні сільськогосподарські машини — насамперед через обмежений час польоту та невелику вантажопідйомність. Також стримуючим фактором є недостатній рівень обізнаності аграріїв щодо можливостей БПЛА, а також відсутність розвинених сервісів агроконсалтингу в цій сфері, що уповільнює впровадження інноваційних технологій на підприємствах агропромислового комплексу.

9.4 РОБОТИЗОВАНІ ЦИФРОВІ ДВІЙНИКИ У ВИРОБНИЦТВІ: ТЕХНОЛОГІЇ, ЗАСТОСУВАННЯ, ТЕНДЕНЦІЇ ТА ПРОБЛЕМИ

Вступ.

Останніми роками виробнича галузь зазнала глибокої трансформації у напрямі впровадження «розумних», цифрових та гнучких практик. Ці зміни характеризуються високим рівнем автоматизації та інтеграцією новітніх технологій, таких як штучний інтелект (AI), промисловий Інтернет речей (IIoT), сучасна робототехніка, великі дані, блокчейн, кіберфізичні системи та хмарні/периферійні обчислення. Їх розвиток заклав основу для формування нового покоління «розумних фабрик» і став архітектурною базою концепції Індустрії 4.0.

Серед цих технологій особливе місце посідає цифровий двійник (Digital Twin, DT) — ключовий елемент кіберфізичних систем, що поєднує фізичний та віртуальний простори. Цифровий двійник являє собою динамічну та реалістичну віртуальну копію фізичного об'єкта, яка здатна моделювати, аналізувати й оптимізувати виробничі процеси. Завдяки своїй здатності забезпечувати комплексне цифрове представлення виробничих активів, DT вважається незамінним для досягнення цілей Індустрії 4.0 і наступних етапів розвитку промисловості.

Водночас роботи посідають дедалі важливіше місце у сучасному виробництві, виконуючи рутинні або небезпечні операції. Проте сучасні роботизовані системи — це не лише виконавчі механізми, а й складні комплекси з інтегрованими сенсорами, периферійними пристроями, підключенням до IoT, зручними людино-машинними інтерфейсами, хмарною аналітикою та адаптивними системами керування. Зростаючі вимоги до гнучкої автоматизації та застосування алгоритмів штучного інтелекту у виробництві сприяли ускладненню таких систем, що, своєю чергою, потребує інтелектуальних рішень.

Традиційні методи моделювання і керування дають лише часткові результати, адже часто обмежені браком інтерактивності та можливостей роботи в реальному часі. У цьому контексті виникла концепція цифрового двійника робота (Robot Digital Twin, RDT), яка забезпечує двонаправлену синхронізацію між фізичною та віртуальною моделями. Завдяки цьому стає можливим

моніторинг у реальному часі, адаптивне керування та безперервна оптимізація роботи роботизованих систем. Таким чином, RDT підсилює їхню гнучкість, масштабованість і здатність швидко реагувати на зміни, що є ключовим для розвитку «розумного» виробництва.

Особливий потенціал RDT проявляється у сфері людино-роботної взаємодії (Human-Robot Collaboration, HRC), де він сприяє оптимізації обробки даних, планування та керування виробництвом, а також підвищує безпеку спільної роботи операторів і роботів. Ці приклади підтверджують, що RDT стає основою нового етапу розвитку виробничих систем і формує підґрунтя для подальших досліджень, спрямованих на подолання існуючих викликів.

У більшості оглядових робіт, присвячених цифровим двійникам, робототехніці та виробництву, технології на зразок штучного інтелекту (AI) чи віртуальної реальності (VR) визначаються як ключові. Проте середовище впровадження цифрових двійників роботів (Robot Digital Twin, RDT) у виробництві охоплює надзвичайно широкий спектр технологій. У наукових працях зазвичай аналізується лише одна з них або окремі важливі напрями, зокрема використання AI, доповненої реальності (AR) чи методів глибинного підкріплювального навчання.

Складність полягає ще й у тому, що архітектура RDT будується для конкретних сфер застосування, є багаторівневою та складною, але водночас бракує їй універсальності. Через це результати досліджень, що стосуються саме архітектурного підходу, залишаються обмеженими.

З огляду на це виникають чотири ключові дослідницькі питання:

- RQ1: Які основні технології забезпечують роботу RDT та як вони впливають на архітектуру і продуктивність систем?
- RQ2: У яких сферах виробництва застосовуються RDT-системи та яку роль вони відіграють в оптимізації роботизованих операцій і виробничих процесів?
- RQ3: Які сучасні тенденції у дослідженнях RDT з точки зору функцій та технологічних підходів?
- RQ4: Які головні виклики стоять перед розробкою та впровадженням RDT і які напрями подальших досліджень сприятимуть їх ширшому застосуванню?

Загальна архітектура RDT та ключові технології

Сьогодні величезна кількість технологій, пов'язаних із концепцією Індустрії 4.0, бере участь у створенні та функціонуванні систем цифрових двійників роботів (RDT). Наприклад, мережі 5G та промисловий Інтернет речей (IIoT) забезпечують безперервний обмін даними між фізичним і віртуальним світом; технології VR і AR створюють точні цифрові зображення для покращеної взаємодії «людина–машина»; алгоритми штучного інтелекту (AI) забезпечують інтелектуальні рішення для виконання конкретних роботизованих завдань. З огляду на багатогранність цих технологій, необхідним є узагальнений підхід, який визначає рамки для майбутнього проектування та впровадження RDT-систем.

Нижче розглянуто ієрархічну архітектуру RDT-системи та роль ключових технологій у різних її рівнях.

Огляд ієрархій архітектури RDT

Початкову архітектуру цифрового двійника запропонував Грівз, визначивши три основні компоненти:

- фізичний об'єкт,
- його віртуальну модель,
- двонаправлений канал обміну даними.

Ця тришарова архітектура стала базовою структурою для забезпечення конвергенції між фізичними та віртуальними продуктами.

Згодом Тао розширив підхід до п'ятишарової архітектури, включивши: фізичну сутність, віртуальну модель, з'єднання, дані та сервіси. Додані рівні даних і сервісів забезпечили більш повний збір інформації та розширення функціональності цифрових двійників.

На **рис. 9.4.1** наведено приклади тришарової та п'ятишарової архітектури DT.

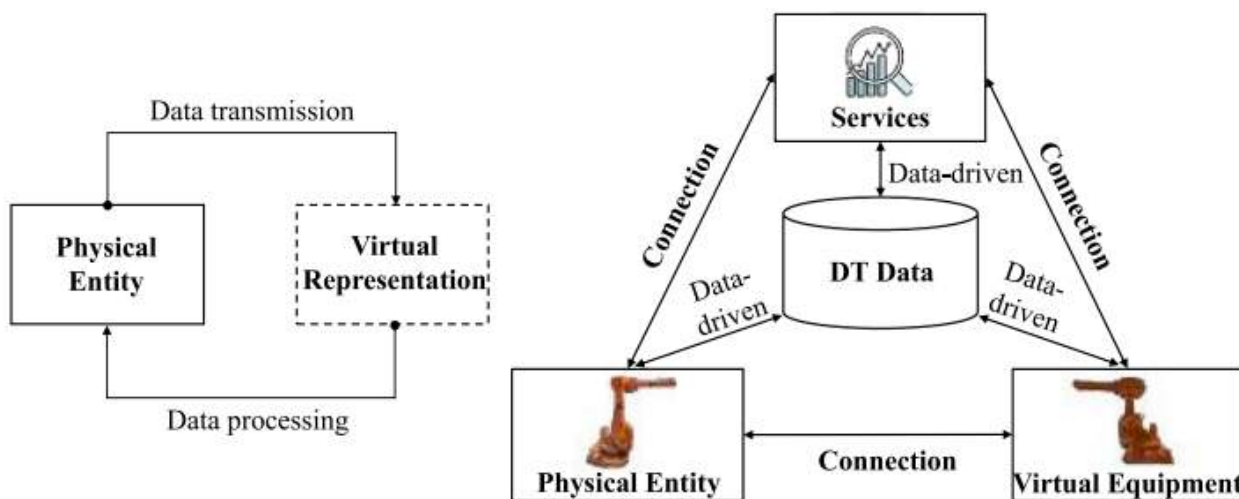


Рис. 9.4.1 Два приклади архітектур DT: тришарова (ліворуч) та п'ятишарова (праворуч)

Попри очевидні переваги, існуючі архітектури мають обмеження при застосуванні до роботизованих систем. Зокрема, вони узагальнюють процеси збору й обробки даних, але недостатньо враховують специфічні потреби робототехніки — такі як оптимізація траєкторій руху в реальному часі, кооперація кількох роботів чи інтеграція алгоритмів AI у процес ухвалення рішень.

З огляду на це, запропоновано чотиришарову архітектуру, спеціально адаптовану до RDT. Вона включає:

- Фізичний рівень — містить матеріальні компоненти системи, що взаємодіють із реальним середовищем, виконуючи та контролюючи виробничі завдання.
- Рівень з'єднання — забезпечує двонаправлений обмін даними між усіма іншими шарами, підтримуючи безперервну комунікацію.

- Віртуальний рівень — створює й підтримує цифрові моделі, які точно відображають реальні роботизовані системи, забезпечуючи симуляцію, аналіз і оптимізацію.
- Допоміжний рівень — відповідає за аналітику, інтелектуальні алгоритми та ухвалення рішень. Саме тут реалізуються оптимізаційні функції, а інтеграція AI підвищує розумність, масштабованість і адаптивність системи.

Така архітектура відображає гнучкий і динамічний обмін даними між усіма шарами, створюючи основу для інтелектуальних і високоефективних виробничих систем.

Фізичний рівень: взаємодія з реальним середовищем

Відповідно до міжнародних стандартів цифрових двійників у виробництві, фізичні сутності охоплюють персонал, обладнання, матеріали, процеси, виробничі приміщення, навколишнє середовище, продукцію та супровідну документацію.

У контексті RDT до фізичного рівня відносять промислових роботів, сенсори, інструменти та інші пристрої. У деяких випадках він також включає працівників, які взаємодіють із системою.

Промислові роботи — це виконавці, які реалізують виробничі завдання (наприклад, складання). Вони можуть працювати за наперед визначеними інструкціями або адаптивними алгоритмами, відіграючи ключову роль в автоматизації процесів.

Сенсори — збирають дані в реальному часі про стан системи та навколишнє середовище (температуру, тиск, положення, силу тощо), створюючи основу для роботи RDT.

Передова робототехніка

Передові роботизовані системи вирізняються високим рівнем автономності, точності та гнучкості. Вони інтегрують складні алгоритми керування й планування, що дозволяє працювати в динамічних і непередбачуваних умовах.

До типових виробничих операцій відносяться: складання, розбирання, захоплення, транспортування матеріалів, зварювання, свердління, фрезерування, різання, укладання.

Сучасні тенденції передбачають інтеграцію таких роботів із цифровими двійниками для підтримки:

- HRC (Human-Robot Collaboration) — спільне виконання завдань людиною і роботом,
- HRI (Human-Robot Interaction) — взаємодія через сенсори, інтерфейси та аналітичні системи.

У виробничому контексті найбільш поширені роботи:

- UR (Universal Robots) — 37 випадків використання,
- KUKA — 21 випадок,
- ABB — 15 випадків.

Фізичні компоненти роботів (маніпулятори, актуатори, сенсори) відносяться до фізичного шару. Проте їхня інтелектуальна поведінка

забезпечується алгоритмами, що функціонують у допоміжному шарі. Такий міжшаровий підхід дає змогу досягти високого рівня автономності й адаптивності.

Розумні сенсори

Сенсори нового покоління не лише збирають дані, а й здійснюють їх попередню обробку, передавання та аналіз. Це забезпечує міст між фізичним та цифровим світом.

Приклади:

- температурні сенсори відстежують нагрівання роботизованих маніпуляторів,
- силові сенсори контролюють навантаження на захвати,
- візуальні сенсори фіксують зміну умов та виявляють відхилення.

Візуальні сенсори особливо затребувані в системах HRC, де необхідно прогнозувати поведінку людини.

Сучасні сенсори зазвичай працюють у комплексі (технологія data fusion) або інтегруються з іншими модулями. Вони є невід'ємною частиною ІоТ, підтримуючи різні протоколи зв'язку та синхронізацію даних у реальному часі.

Завдяки вбудованим алгоритмам АІ сенсори здатні до інтелектуальної обробки сигналів, що підвищує їхню автономність і корисність у виробничих системах.

Рівень з'єднання: безшовна комунікація

Рівень з'єднання є інфраструктурною основою RDT-системи. Його головне завдання — забезпечити безперервний і двонаправлений потік даних між фізичними об'єктами (роботами, сенсорами, актуаторами) та їхніми цифровими двійниками.

Саме тут реалізуються технології, що гарантують високу пропускну здатність, низькі затримки та надійність обміну даними. Це критично важливо для роботи в реальному часі, моделювання та оптимізації процесів.

Висока ефективність рівня з'єднання досягається завдяки інтеграції передових засобів зв'язку (5G, промислові мережі) та обчислювальних ресурсів (edge- і cloud-computing).

Комунікації

У системах роботизованих цифрових двійників комунікаційні технології відіграють ключову роль, оскільки саме вони забезпечують безперервний обмін даними між фізичними об'єктами та їхніми віртуальними моделями. Збір даних починається безпосередньо на рівні роботів, сенсорів і машин, після чого інформація передається через сучасні бездротові мережі, серед яких найчастіше використовуються Wi-Fi, Bluetooth та, особливо, 5G. Остання технологія завдяки своїй високій швидкості, надійності та наднизькій затримці відкриває можливість майже миттєвої синхронізації фізичного робота з його цифровим відображенням. Це суттєво підвищує ефективність функціонування роботизованих комірок та забезпечує основу для їх безперервної оптимізації.

Не менш важливим елементом є протоколи передачі даних, зокрема MQTT, CoAP та OPC UA, які стали стандартами для промислового Інтернету речей. Вони гарантують стабільність і безпеку інформаційного обміну між усіма

учасниками виробничого процесу — від сенсорів і камер до роботів та периферійних пристроїв. Саме промисловий Інтернет речей виступає фундаментальною технологією Індустрії 4.0, адже забезпечує передачу даних із виробничого майданчика до хмарних платформ або крайових серверів для подальшої аналітики та управління. Це відкриває можливості для віддаленого програмування роботів, а також для безперервної синхронізації цифрових моделей, що дозволяє підтримувати їх актуальність у режимі реального часу. Поєднання можливостей 5G та IoT-протоколів формує надійну та масштабовану основу комунікаційної інфраструктури RDT-систем.

Хмарні та крайові обчислення

Ефективна робота комунікаційної інфраструктури RDT неможлива без належної організації обчислювальних ресурсів, де ключову роль відіграють хмарні, крайові та туманні обчислення. Хмарні технології забезпечують зберігання великих масивів даних, їхню аналітику, проведення складних симуляцій і навчання моделей машинного навчання. Завдяки масштабованості інфраструктури цифрові двійники можуть виконувати ресурсоємні завдання без обмежень локального обладнання, отримуючи при цьому віддалений доступ, можливості централізованого контролю та модульного розширення функціональності.

Паралельно із цим крайові обчислення дають змогу обробляти інформацію безпосередньо на місці експлуатації роботів, що суттєво зменшує затримку передачі даних і підвищує оперативність системи. Edge-пристрої підтримують швидкий обмін між сенсорами, актуаторами та віртуальною моделлю, створюючи умови для безперервного моніторингу виробничих сцен і швидкого локального реагування на зміни.

Між цими рівнями розташовуються туманні обчислення, які виконують проміжну функцію — обробку, аналітику та зберігання даних на рівні мережевої інфраструктури. Вони оптимізують використання каналів зв'язку та зменшують навантаження на хмарні ресурси, водночас забезпечуючи баланс між швидкістю локальних обчислень і масштабованістю централізованої обробки. У сукупності ці підходи формують багаторівневу систему управління даними, де хмарні обчислення відповідають за складні моделі та глобальну масштабованість, крайові — за швидку реакцію й контроль у режимі реального часу, а туманні — за оптимізацію потоків даних. Така інтеграція забезпечує гнучкий та стійкий зв'язок між фізичною і цифровою складовою RDT, що має вирішальне значення для розвитку роботизованого виробництва.

Віртуальний рівень: створення точних цифрових моделей

Віртуальний рівень у архітектурі RDT представляє цифровий або віртуальний аналог фізичної роботизованої системи. Його завдання полягає у створенні, управлінні та оновленні цифрового двійника. Віртуальний рівень забезпечує симуляцію, аналіз, оптимізацію та взаємодію з роботизованими системами у віртуальному середовищі, надаючи критично важливі дані для прийняття рішень та планування операцій. Крім традиційних методів моделювання та симуляції, активно використовуються технології віртуальної

(VR) та доповненої (AR) реальності для більш інтуїтивної та занурюючої взаємодії з моделями цифрових двійників.

Моделювання та симуляція

Моделювання RDT передбачає побудову цифрового відображення робота, яке охоплює чотири аспекти: геометрію, фізичні властивості, поведінку та правила роботи. Геометрична модель відображає конструкцію робота, фізична — матеріали, енергоспоживання, вантажопідйомність та стан суглобів, поведінкова модель описує різні операції робота, наприклад переміщення або захоплення деталей, а модель правил виділяє та формалізує правила роботи робота, включно з максимальною швидкістю руху та допустимими кутами обертання, на основі даних про обслуговування та інструкцій користувача.

Ці моделі використовуються для симуляції поведінки та оцінки продуктивності роботів у різних умовах. Наприклад, Zhang та співавт. запропонували конфігуровану модель для систем розумного виробництва на основі DT, яка поєднує геометричну, фізичну, поведінкову та модель правил у п'ятивимірну інтегровану модель. Інші дослідження розробили динамічну модель гармонічного приводу суглоба робота, створивши попередній цифровий двійник за допомогою Gazebo та MATLAB. Chen та співавт. сконструювали модель двійника робота з можливістю руху та захоплення деталей, а також модель камери з функціями зйомки та розпізнавання, інтегруючи фізичні, поведінкові та правила аспекти для реалізації RDT. Цифрові двійники також застосовуються для енергетичного моделювання роботів; Yan та співавт. запропонували фізично-орієнтовану модель енергоспоживання промислових роботів, яка поєднує тривимірну модель робота, дані DT та онтологічну єдину цифрову описову модель для відображення віртуальної моделі на фізичну.

Процес моделювання RDT здійснюється за допомогою різних інструментів, залежно від специфіки виробничих завдань. Найчастіше використовуються програми для 3D-моделювання та механічного дизайну, такі як SolidWorks, CATIA, 3D Studio Max, Siemens NX та Blender, які забезпечують високу точність моделювання компонентів роботів і сумісність із промисловими стандартами. Для інтерактивних аспектів RDT застосовують симуляційні платформи Unity3D, Technomatix, Gazebo, RobotStudio та MATLAB. Unity3D, спочатку розроблений як ігровий двигун, використовується завдяки потужним 3D-візуалізаціям і кросплатформеним можливостям, що робить його придатним для навчання та VR/AR-інтегрованих додатків. Technomatix та RobotStudio призначені для промислових симуляцій та програмування роботів, Gazebo відзначається фізичною симуляцією та інтеграцією з ROS, а MATLAB із Simulink забезпечує підтримку проєктування систем управління та аналізу даних.

Віртуальна реальність

Застосування віртуальної реальності у створенні інтерактивних 3D-віртуальних середовищ становить значний крок уперед у взаємодії людина-машина. RDT забезпечує високоточні цифрові моделі, що дозволяє виконувати комплексну симуляцію процесів до фактичного виконання робототехнічного завдання. Поширеним підходом є створення RDT-системи з інтегрованим VR-

інтерфейсом, який слугує віртуальним полігоном для налаштування поведінки системи та перевірки операційної придатності перед впровадженням. Таке поєднання ефективно використовується для точного налаштування, навчання операторів, моніторингу в реальному часі та ранньої оцінки продуктивності системи в різних робочих сценаріях. Інтеграція VR у RDT-системи також сприяє покращенню співпраці людини та робота, надаючи контрольоване середовище для оцінки реакцій людини на передбачувані та непередбачувані рухи робота. Це дозволяє розробляти адаптивні стратегії HRC, підвищуючи безпеку працівників і ефективність спільної роботи. Використання VR у RDT також робить програмування робіт більш гнучким і зручним, спрощуючи процес налаштування та оптимізації. Незважаючи на переваги, інтеграція VR стикається з проблемами, пов'язаними зі складністю системи та розробкою користувацького інтерфейсу.

Доповнена реальність

На відміну від VR, яка створює повністю занурене цифрове середовище, доповнена реальність розширює сприйняття користувача, додаючи інтерактивні цифрові елементи до реального середовища. AR задовольняє потреби візуалізації та взаємодії з цифровими двійниками більш наочно, локально та ефективно. Інтеграція AR у RDT змінює спосіб взаємодії людей із роботизованими системами, дозволяючи підвищити когнітивні здібності за допомогою поєднання людського інтелекту та робототехніки. Завдяки покращеному сприйняттю, працівники можуть здійснювати моніторинг і взаємодію з системами RDT у реальному часі, підвищуючи безпеку та ефективність виробничих процесів. AR дозволяє контролювати робота через інтерфейси на основі окулярів або планшетів, візуалізувати та перевіряти траєкторії руху, вносити корективи в реальному часі та забезпечувати повний контроль над роботизованими процесами. Таким чином, AR у RDT сприяє підвищенню точності виробництва, зменшенню помилок і формуванню більш гармонійної взаємодії між людиною і роботом.

Змішана та розширена реальність

Змішана реальність поєднує реальний і віртуальний світи, створюючи середовище, в якому фізичні та цифрові об'єкти взаємодіють у реальному часі. RDT у поєднанні з MR часто використовується в сценаріях співпраці людини та робота як ефективний засіб підвищення безпеки та контролю. Наприклад, DT і MR можуть забезпечувати віддалене та безпечне управління маніпулятором робота з відображенням безпечних зон у полі зору оператора. Розширена реальність (XR) охоплює AR, VR та MR, виступаючи узагальнюючим терміном для занурювальних технологій, які інтегруються в RDT для оптимізації промислових робочих місць та покращення безпеки й ергономіки виробничого середовища. Сучасні підходи, такі як TwinXR, дозволяють синхронізувати цифрові двійники з XR-додатками для виробничих пристроїв, створюючи ефективні інтерфейси без повторного розроблення XR, що підкреслює потенціал інтеграції RDT та занурювальних технологій у майбутніх інтелектуальних виробничих системах.

Підтримуючий рівень: забезпечення комплексних рішень для специфічних завдань

Підтримуючий рівень надає обчислювальні, аналітичні та прийняття рішень, необхідні для обробки даних, зібраних іншими рівнями, і для формування практичних та комплексних рішень. Цей рівень відіграє ключову роль у наданні роботизованим системам інтелектуальних можливостей. Завдання, такі як планування рухів, виявлення аномалій, динамічне розподілення завдань і автономне прийняття рішень, залежать від аналітичних та навчальних модулів цього рівня, які взаємодіють з фізичними компонентами роботів для забезпечення швидкої та інтелектуальної роботи. Для обробки складності та масштабу сучасних виробничих систем на підтримуючому рівні використовуються передові технології, такі як машинне навчання та аналітика великих даних. Інтеграція цих технологій забезпечує RDT-системам інтелект, ефективність, автономність, гнучкість, масштабованість і надійність у виробництві. Одночасно RDT виступає складною платформою, яка трансформує професійні знання у високоточні дані, що потім використовуються для навчання або валідації алгоритмів штучного інтелекту, розширюючи та оптимізуючи конкретні роботизовані завдання у фабричних та цехових умовах.

Машинне навчання

У контексті Індустрії 4.0 зростає інтерес до підходів, орієнтованих на дані, через складність виробничих систем. Машинне навчання активно застосовується в RDT для отримання знань із даних та підвищення продуктивності систем. Його основні переваги проявляються у трьох напрямках: виявлення, оптимізація та прогнозування. За допомогою ML системи можуть ідентифікувати несправності обладнання, дефекти та аномалії в реальному часі, аналізуючи дані з сенсорів та віртуальних моделей. Це зменшує потребу у дорогих фізичних випробуваннях і покращує здатність системи своєчасно діагностувати проблеми, підвищуючи надійність роботи. ML-методи також застосовуються для оптимізації роботи роботів, включаючи розташування сенсорів, траєкторії руху, стратегії управління та розподіл завдань. Такі методи дозволяють RDT-системам динамічно коригувати робочі параметри на основі даних у реальному часі, підвищуючи ефективність та використання ресурсів. Крім того, ML-моделі дозволяють прогнозувати майбутню поведінку, наприклад, стан роботи та рухи роботів, що забезпечує можливість проактивного технічного обслуговування та оптимізації процесів прийняття рішень, зменшуючи час простою та підвищуючи плавність операцій.

Глибокі нейронні мережі (Deep Learning) та навчання з підкріпленням (Reinforcement Learning) є спеціалізованими підгалузями ML, які надають RDT-системам додаткові можливості. Глибинне навчання ефективно для складного розпізнавання образів, обробки зображень і прогнозової аналітики, тоді як навчання з підкріпленням дозволяє роботам навчатися автономно через взаємодію з середовищем, що особливо цінно для управління та оптимізації завдань. Таким чином, машинне навчання на підтримуючому рівні формує основу для інтелектуальної, ефективної та адаптивної роботи RDT-систем.

Глибинне навчання (Deep Learning)

Розвиток сучасного виробництва значно розширив застосування RDT, особливо через інтеграцію глибинного навчання. Оснащення RDT-систем потужними можливостями обробки даних підвищує їхню інтелектуальність, дозволяючи аналізувати складні нелінійні залежності та опрацьовувати великі обсяги даних. Збір реальних виробничих даних часто є дорогим і трудомістким процесом, проте RDT-системи здатні компенсувати ці труднощі, генеруючи різноманітні набори даних у змодельованих середовищах. Крім того, вони використовують симуляції та взаємодію з даними у реальному часі, що дозволяє підвищувати точність розпізнавання, надійність прогнозування та оцінку продуктивності роботів у виробничих умовах.

У завданнях розпізнавання глибинні нейронні мережі, наприклад, згорткові CNN, дозволяють RDT-системам ідентифікувати пози, типи та дії роботизованих об'єктів. Такі моделі забезпечують точне виявлення об'єктів, розпізнавання дефектів і класифікацію поведінки, що критично важливо для моніторингу виробничих процесів у реальному часі. Наприклад, Wang та співавт. запропонували фреймворк DT, інтегрований з DL, для класифікації поведінки операторів і роботів, навчивши повністю контрольований детектор на основі швидкої регіональної CNN із синтетичних даних, згенерованих у системі цифрового двійника.

Щодо прогнозування, алгоритми глибинного навчання застосовуються для динамічного передбачення продуктивності роботизованих систем, включно з прогнозом майбутніх станів системи, результатів операцій і локалізації точок захоплення на основі аналізу історичних та поточних даних. Yang та співавт. запропонували підхід, що поєднує CNN і модель LSTM, для прогнозування дій робота, що дозволяє візуалізувати частково закриті види у цифровому двійнику з прийнятною точністю.

У завданнях оцінки продуктивності DL-техніки сприяють безпосередньому аналізу роботи роботів та ефективності системи, адаптуючись до змін виробничих процесів і підвищуючи продуктивність. Загалом інтеграція глибинного навчання в RDT-системи забезпечує підвищену надійність, адаптивність і масштабованість сучасних виробничих середовищ.

Великі мовні моделі (Large Language Models, LLM)

Великі мовні моделі представляють собою складні нейронні мережі з великою кількістю параметрів, які демонструють значний прогрес у галузі штучного інтелекту. Завдяки масштабованості даних та потужним обчислювальним ресурсам, LLM відзначаються революційними можливостями у розумінні, генерації та інтерактивному опрацюванні природної мови.

Недавні дослідження показують, що LLM відкривають нові шляхи для підвищення ефективності RDT-систем. Зокрема, Gkournelos та співавт. розробили систему керування виробничими процесами на основі LLM, яка інтегрує дані цифрових двійників у реальному часі через природномовний інтерфейс та генерує послідовності дій роботів для ефективної взаємодії людина-робот. Li та співавт. створили когнітивну платформу цифрових двійників із LLM,

що забезпечує динамічне сприйняття виробничої сцени та високорівневе планування завдань і виявлення аномалій у сценаріях HRC. Крім того, Chen та співавт. запропонували інтерактивну структуру цифрового двійника, яка системно пояснює механізми інтеграції LLM у RDT-системи.

На відміну від традиційних моделей глибинного навчання, які потребують жорсткого попереднього опрацювання даних, LLM значно підвищують масштабованість RDT-систем завдяки здатності обробляти неструктуровані текстові дані. Вони також сприяють підвищенню зручності та інтуїтивності взаємодії з RDT-системами, трансформуючи інструкції операторів у команди, які робот може виконати, одночасно оптимізуючи прогностичний аналіз системи через автоматизоване мислення.

Інтеграція LLM із RDT забезпечує подолання когнітивного розриву між людиною та машиною та просуває системи до адаптивних, орієнтованих на людину, розумних виробничих парадигм.

Підкріплювальне навчання (Reinforcement Learning, RL)

В останні роки спостерігається зростання досліджень у сфері інтеграції RL із RDT. Підкріплювальне навчання дозволяє автономне прийняття рішень та оптимальне управління в динамічних середовищах шляхом безперервної взаємодії з середовищем та отримання зворотного зв'язку. RDT-системи створюють ідеальні умови для навчання агентів RL, забезпечуючи високоточні віртуальні середовища, де алгоритми можуть тренуватися та валідуватися перед фактичним впровадженням. Це значно прискорює процес навчання та зменшує операційні ризики.

Синергія RL і RDT підвищує інтелектуальні можливості роботів, дозволяючи більш ефективно приймати рішення та адаптуватися в реальному часі до умов виробництва. Зокрема, RL застосовується для планування руху, оптимізації розкладів та оптимізації захвату об'єктів. Планування руху включає два етапи: побудову шляху та траєкторії. На першому етапі визначається геометрична конфігурація маршруту між початковою та кінцевою точками, тоді як траєкторійне планування враховує часовий параметр, положення робота на шляху, швидкість, прискорення та час. Методи RL, такі як proximal policy optimisation, deep Q-network та deep deterministic policy gradient, дозволяють роботам автономно навчатися від середовища, коригувати рухи, уникати перешкод та оптимізувати траєкторії. Безперервний зворотний зв'язок від RDT-систем підвищує точність рухів у динамічних і складних умовах.

Оптимізація розкладів у RL дозволяє системі динамічно розподіляти завдання та ресурси в режимі реального часу. Алгоритми RL здатні адаптувати політики планування залежно від актуальних даних RDT-систем, що покращує загальну ефективність виробництва. Крім того, RL використовується для оптимізації процесу захвату об'єктів, дозволяючи роботу визначати оптимальну силу, кут і положення захвату для предметів із різними формами та текстурями. Це особливо цінно для роботи з складними або крихкими об'єктами, де традиційні методи не забезпечують потрібної точності.

2.5.2. Оптимізаційні алгоритми

Інтелект RDT-систем значною мірою забезпечується завдяки AI-технологіям, особливо алгоритмам оптимізації на основі штучного інтелекту. Такі алгоритми підвищують ефективність виробничих процесів, вдосконалюючи роботизовані операції, оптимізуючи стратегії пошуку та забезпечуючи інтелектуальне прийняття рішень. Вони особливо ефективні у плануванні траєкторій роботів, розв'язанні задач розкладу та оптимізації загальної продуктивності систем.

Планування траєкторій є ключовим завданням у робототехнічних системах, особливо коли роботи повинні пересуватися складним середовищем, уникаючи зіткнень. У RDT-системах застосовують алгоритми, такі як Ant Colony Optimisation або Genetic Algorithms, для визначення оптимальних шляхів руху роботів у віртуальному середовищі з подальшим перенесенням результатів у фізичну реальність. Інтеграція RDT із алгоритмами оптимізації траєкторій дозволяє підвищити швидкість виконання завдань, зменшити енергоспоживання та забезпечити адаптацію до динамічних виробничих умов. Крім того, гібридні підходи, що поєднують метаевристичні алгоритми або RL з RDT, підвищують точність і гнучкість планування в складних промислових середовищах.

Оптимізація розкладів має вирішальне значення для розумного виробництва, оскільки дозволяє здійснювати адаптивний розподіл завдань та ефективне використання ресурсів. У RDT-системах застосовуються алгоритми, які динамічно змінюють планування завдань у відповідь на непередбачувані події або вимоги користувачів. Це забезпечує можливість реалізації інтелектуальної автоматизації виробничих процесів та підтримує динамічне й адаптивне планування в розумному виробництві.

Для оптимізації загальної продуктивності системи в RDT-середовищах використовують методи роїв, такі як Particle Swarm Optimisation або Bee Algorithm, а також графи знань, що дозволяють створювати структуроване й семантично насичене подання даних. Такі підходи сприяють підвищенню навчальної здатності роботів та поліпшенню виконання виробничих завдань. Алгоритми оптимізації, що впроваджуються в RDT-системах, дозволяють проводити всебічне тестування та вдосконалення у віртуальному середовищі перед реальним застосуванням, що підвищує надійність, оперативність і продуктивність промислових роботизованих систем.

Застосування RDT-систем у виробництві

У цьому розділі демонструються різні приклади використання RDT-систем у виробництві, включно з гнучкою збіркою на мехатронних лініях, виконанням легких обробних операцій, управлінням роботами в хмарних робототехнічних середовищах, контролем стану збірки літаків, організацією HRC у «розумних» фабриках, калібруванням руху промислових роботів, проведенням симуляцій та віртуального запуску, прийняттям рішень на основі III та проєктуванням розташування для переналаштовуваних виробничих систем. Крім того, останнім часом досліджуються перспективи інтеграції новітніх технологій, таких як Metaverse та великі мовні моделі (LLM), з RDT у виробничих процесах.

RDT-системи дозволяють здійснювати комплексний моніторинг умов роботи обладнання та роботів, що забезпечує раннє виявлення потенційних проблем і запобігає серйозним збої виробництва. Завдяки точним цифровим відображенням фізичних систем оператори та техніки можуть здійснювати візуалізацію виробничих процесів у реальному часі, тестувати та перевіряти виробничі системи ще до їх фізичного впровадження, що скорочує час запуску та знижує витрати. Крім того, це дозволяє надавати віддалену підтримку та вирішувати проблеми без фізичної присутності на виробництві.

Прогнозні можливості RDT-систем базуються на аналізі історичних і реальних даних для передбачення майбутніх подій, включно з потенційними відмовами обладнання чи зниженням його продуктивності, що дає змогу вчасно втрутитися й уникнути дорогих простоїв. Використання алгоритмів штучного інтелекту для обробки даних цифрових двійників забезпечує оптимізацію виробничих процесів, дозволяючи визначати найефективніші стратегії виконання завдань, підвищуючи продуктивність і зменшуючи відходи. Це стосується, зокрема, оптимізації прийняття рішень та розкладів, що дозволяє виробникам адаптуватися до змінних виробничих потреб і підвищувати гнучкість та реактивність систем.

Зважаючи на різноманітність впроваджень RDT-систем у різних сферах, особливий інтерес становить класифікація їхніх застосувань у виробництві. Одні підходи зосереджуються на оптимізації конкретних роботизованих завдань і операційних процесів, інші акцентують увагу на інтеграції технологій RDT у систему в цілому та підвищенні ефективності виробничого процесу. Поєднання RDT-систем із сучасними технологіями дозволяє оновлювати традиційні виробничі практики та сприяє розвитку майбутніх рішень у промисловості.

Вузькоспеціалізовані застосування ("Domain-specific applications")

Вузькоспеціалізовані застосування RDT-систем у виробництві мають великий потенціал для підвищення точності, ефективності та адаптивності роботизованих процесів. Використання реальних симуляцій у віртуальному середовищі, дистанційного керування та алгоритмів оптимізації на основі штучного інтелекту сприяє значним удосконаленням у складанні, розбиранні, механічній обробці, захопленні об'єктів та транспортуванні матеріалів. У завданнях складання та розбирання RDT-системи дозволяють виконувати моніторинг та симуляцію у реальному часі, що допомагає відповідати на зростаючі вимоги до складності конструкцій та якості продукції. У процесах механічної обробки такі системи забезпечують безперервну оптимізацію та енергоефективність, пропонуючи більш досконалі альтернативи традиційним методам моделювання. Системи захоплення та маніпулювання об'єктами підвищують точність локалізації та ефективність завдань завдяки інтеграції алгоритмів машинного навчання. Подібним чином, RDT-системи покращують виконання завдань обробки матеріалів у складних виробничих середовищах, роблячи традиційні роботизовані процеси більш інтелектуальними, точними та здатними відповідати на зростаючі вимоги сучасного виробництва.

Складання та розбирання ("Assembly and disassembly")

Використання робототехнічних технологій у складанні та розбиранні на автоматизованих виробничих лініях значно підвищило продуктивність. Сучасні економічні умови зумовлюють підвищені вимоги до якості та продуктивності продукції, що супроводжується збільшенням складності конструкцій виробів та потребою у високій точності операцій. RDT-системи дозволяють роботам досягати більшої точності та ефективності на етапах планування та виконання складних процесів завдяки точним цифровим симуляціям. Тестування та оптимізація шляхів складання, контролю зусиль та інших операційних параметрів у віртуальному середовищі зменшують кількість помилок і скорочують витрати, пов'язані з фізичними випробуваннями. RDT-системи застосовуються у складанні автомобілів, друкованих плат, літаків, цегли, складних конструкційних плит, неорганізованих деталей, дрібних елементів та у розбиранні виробів. Завдяки моніторингу та керуванню у режимі реального часу, RDT-системи здатні коригувати стратегії виконання, забезпечуючи надійність і стабільність процесів.

Механічна обробка ("Machining")

У міру того як виробництво стає більш інтелектуальним та гнучким, завдання механічної обробки, виконувані промисловими роботами, залишаються актуальною проблемою сучасних виробничих середовищ. Симуляція процесу механічної обробки є ключовим етапом підвищення якості продукції та безпеки виробництва. Традиційні симуляції не завжди здатні забезпечити зворотний зв'язок у реальному часі та безперервну оптимізацію виробничого процесу. На противагу цьому, RDT-системи мають великий потенціал для підвищення ефективності, економії енергії та оптимізації процесів механічної обробки шляхом симуляції фізичного процесу в реальному часі. Крім того, у завданнях механічної обробки RDT-системи можуть контролювати критичні параметри процесу, такі як температура, вібрації та сили різання, для прогнозування та запобігання можливих відмов. RDT-системи вже застосовуються у таких завданнях, як зварювання, свердління, фрезерування, зняття задирок, шліфування, склеювання, різання, очищення та інші операції з обробки матеріалів. Ці досягнення підкреслюють зростаючу роль RDT-систем у стимулюванні інновацій та подоланні обмежень традиційних процесів механічної обробки.

Захоплення об'єктів ("Grasping")

Роботизоване захоплення об'єктів є широко застосовуваною операцією в промисловому виробництві, включно з виробництвом, логістикою та складальними лініями. Воно особливо ефективне для високоповторюваних завдань, де швидкість та точність мають вирішальне значення, таких як транспортування матеріалів, пакування, сортування та складання деталей. У реальних промислових умовах роботизоване захоплення ускладнюється різноманітністю сценаріїв, форм і категорій об'єктів. RDT-системи відкривають нові можливості для підвищення ефективності роботизованого захоплення. Це проявляється у здатності локалізувати цільові об'єкти у віртуальному та фізичному просторі, моделювати оптимальні стратегії захоплення та

дистанційно керувати роботами. Крім того, алгоритми машинного навчання, інтегровані з RDT-системами, підвищують ефективність захоплення, забезпечуючи більш надійне сприйняття та контроль під час виконання завдань.

Транспорт матеріалів ("Material handling")

Транспорт матеріалів є фундаментальним аспектом виробництва, забезпечуючи ефективне та безпечне переміщення матеріалів на різних етапах виробничого процесу, особливо на виробничому майданчику. Безперебійне виконання завдань з транспортування вимагає скоординованих операцій за участю різних ресурсів та компонентів. RDT-системи пропонують ефективне рішення для моделювання в реальному часі та прогнозової аналітики у процесах обробки матеріалів, передусім завдяки керованим та інтерактивним моделям, які імітують складні фізичні об'єкти чи системи у реальному світі.

Декілька досліджень продемонстрували застосування RDT у різних аспектах транспортування матеріалів, включно з безконтактною доставкою, динамічним плануванням маршрутів, точною оцінкою часу обробки та гнучким плануванням завдань на виробничих ділянках. Використовуючи дані в реальному часі, розширені симуляції та оптимізацію на основі ШІ, RDT-системи підвищують ефективність, гнучкість та безпеку систем транспортування матеріалів, роблячи їх більш інтелектуальними та адаптивними до змінних потреб сучасного виробничого середовища.

Системний рівень застосувань ("System-level applications")

Системні застосування RDT-систем підкреслюють їхні широкі операційні, стратегічні та колаборативні можливості з цілісної системної перспективи. Зокрема, у сфері взаємодії людини та робота (HRI), RDT-системи пропонують новий підхід для безшовної співпраці між робототехнічними системами та операторами шляхом інтеграції технологій, орієнтованих на людину, таких як VR та AR. Така інтеграція підвищує безпеку, адаптивність і залучення користувачів у виробничі операції, дозволяючи навіть непрофесіоналам брати участь у програмуванні та контролі системи.

Ці людсько-орієнтовані можливості представляють суттєвий прогрес у створенні ергономічної та ефективної взаємодії людини та робота (HRC). Прогнозне обслуговування (PdM), як ключовий системний застосунок, значно виграє завдяки можливостям RDT-систем у реальному часі щодо моніторингу та аналітики даних. Завдяки своєчасному передбаченню відмов обладнання, оптимізації терміну служби компонентів та забезпеченню комплексного управління станом системи, RDT-системи значно знижують непланові простої та витрати на обслуговування, підвищуючи стійкість та надійність виробничих процесів.

Крім того, останні дослідження RDT у поєднанні з адитивними технологіями виробництва демонструють помітний прогрес. Функція моніторингу в реальному часі дозволяє контролювати весь процес адитивного виробництва. Це дає змогу виробникам знижувати витрати, скорочувати виробничі цикли та ефективно задовольняти потреби конкурентного ринку у кастомізованих продуктах. Інші потенційні системні застосування, такі як

контроль якості, управління ланцюгами постачання та віддалена діагностика, можуть ще більше розширити сферу та вплив RDT-систем у виробництві. Ці приклади демонструють, як RDT-системи впливають на взаємодію роботів із операторами, управління обслуговуванням та виробництво складних продуктів, сприяючи створенню більш адаптивного, людсько-орієнтованого та ефективного розумного виробничого середовища.

Взаємодія людини і робота ("Human-robot interaction")

У контексті RDT, HRI є ключовим процесом, що значно підвищує ефективність та безпеку, особливо у сценаріях HRC. HRC є найрозвиненішим застосуванням HRI у промисловості, оскільки передбачає одночасне спільне виконання завдань та використання робочих просторів операторами та робототехнічними системами. У цьому випадку технологія RDT зміцнює можливості робототехнічних систем.

Наприклад, Martinez та співавт. розробили RDT-систему для полегшення наглядових функцій операторів у гнучкому виробничому середовищі. Додатково, Niermann та співавт. створили модульну та людсько-орієнтовану програмну платформу для взаємодії людина-машина. Ця платформа інтегрує програмування різних систем за допомогою принципів візуального програмування та технології DT. Така інтеграція дозволяє непрофесійним операторам виконувати централізоване та інтуїтивне програмування системи.

Технології HRI, такі як VR та AR, за останні роки активно впроваджуються у RDT-системи. Їх інтеграція демонструє трансформаційний зсув у виробництві з акцентом на дизайн, орієнтований на людину. По мірі розвитку та вдосконалення цих технологій їхня роль у покращенні HRI буде зростати, відкриваючи шлях до більш інноваційних та адаптивних виробничих рішень.

Прогнозне обслуговування ("Predictive maintenance")

Прогнозне обслуговування (PdM) використовує дані в реальному часі та сучасні алгоритми для передбачення ймовірних відмов обладнання, дозволяючи виконувати обслуговування вчасно, щоб уникнути несподіваних поломок. Цей підхід широко досліджувався у багатьох інженерних галузях, включаючи механіку, енергетичні системи та аерокосмічну промисловість. Наприклад, Лі запропонував прогностичну систему на основі фільтру частинок, яка поєднує фізично орієнтовані та дані з реального світу моделі деградації, забезпечуючи точне прогнозування розвитку тріщин та залишкового ресурсу обладнання.

Що стосується промислових робототехнічних систем, RDT-фреймворк зазвичай передбачає розподіл складної робототехнічної системи на кілька компонентів, кожен із яких контролюється через сенсорні дані та їх аналіз. Такий підхід на основі даних дозволяє прогнозувати майбутню поведінку системи та точно визначати залишковий ресурс, що є критично важливим для планування обслуговування та розподілу ресурсів. Переваги цього підходу ще більше посилюються при використанні алгоритмів ML, де точність PdM для робототехнічних клітинок можна значно підвищити за допомогою RDT-систем.

Окрім традиційного PdM, прогностичне обслуговування та управління станом (PHM) розширює його охоплення, поєднуючи аналіз відмов із

управлінням життєвим циклом системи. PNM фокусується на загальному стані системи, забезпечуючи підтримку PdM через аналіз деградації роботів та створення даних для сценаріїв «що-якщо». У результаті RDT-системи здатні генерувати корисні дані для PdM, моделювати можливі відмови та створювати платформу для аналізу альтернативних рішень. Загалом, PdM є високоефективним інтелектуальним застосуванням RDT-систем, що значно підвищує надійність виробничих систем.

Системи адитивного виробництва ("*Additive manufacturing systems*")

Адитивне виробництво є надзвичайно універсальним методом у промисловості, значно знижуючи витрати та скорочуючи виробничий цикл, одночасно задовольняючи індивідуальні потреби змінного ринкового середовища. У таких умовах RDT-системи слугують надійним засобом для моніторингу та оптимізації вироблених деталей безпосередньо на місці.

Використання промислових роботів у системах адитивного виробництва широко досліджувалося, зокрема для роботи з кінцевими ефекторами, роботів для 3D-друку деталей та різних режимів виробництва металу та пластику. RDT суттєво розширило можливості адитивного виробництва, впливаючи майже на всі аспекти виробничого процесу. Системи адитивного виробництва можуть бути оснащені сенсорами, які бездротово передають дані до RDT-систем через Інтернет, що дозволяє покращувати процес за допомогою моніторингу на місці або прогнозувати проблеми через симуляції для підвищення якості продукції.

Поєднання адитивного виробництва та RDT-систем забезпечує ефективний та узгоджений перехід від проєкту до готового продукту та прискорює впровадження розумного виробництва. Наприклад, Li та співавт. розробили RDT-систему для інтелектуальної реалізації адитивного виробництва, яка дозволяє дистанційно візуалізувати, контролювати та керувати процесом виробництва на невеликій роботизованій виробничій станції. Крім того, планування траєкторії інструмента для адитивного виробництва є одним із ключових аспектів. Zhu та співавт. запропонували методику, у якій RDT-система симулює траєкторію інструмента для металевих деталей, встановлюючи, командуючи та контролюючи виробничий процес.

Отже, RDT-базовані системи адитивного виробництва мають велике значення для промислової автоматизації та розумного виробництва.

Обговорення

Системи RDT отримують значну користь від розвитку різних передових технологій, що прискорює перехід традиційного виробництва до розумного виробництва. Кожна технологія пропонує унікальні переваги для RDT-систем. Наприклад, IoT забезпечує безперебійну взаємозв'язок і обмін даними в реальному часі між фізичними роботами та їх цифровими двійниками, тоді як edge- та cloud-комп'ютинг підвищують обчислювальну ефективність та масштабованість. Алгоритми DL орієнтовані на прогнозу аналітику та автономне прийняття рішень. Технології VR та AR підтримують занурюючу візуалізацію та інтуїтивне управління для людино-орієнтованого виробництва. У

комплексі ці технології підвищують ефективність, інтелектуальність, гнучкість та масштабованість RDT-систем у виробничому середовищі.

Попередні розділи проаналізували архітектуру RDT на основі ключових технологій, після чого було проведено детальний огляд відповідних застосувань та їх впливу на сучасне виробництво. На цій основі цей розділ розглядає тенденції розвитку RDT-систем за останнє десятиліття та класифікує їх з точки зору функцій та технологій.

Незважаючи на швидкий розвиток і зростаючий інтерес, RDT-системи все ще стикаються з низкою проблем, що перешкоджають їх широкому впровадженню. Вирішення цих проблем вимагає інноваційних стратегій і технологічних удосконалень. Тому в цьому розділі також визначаються існуючі виклики та напрями майбутніх досліджень, окреслюючи шляхи для повного розкриття потенціалу RDT-систем у виробництві. Надання цінних рекомендацій для дослідників та практиків у сфері Industry 4.0 спрямоване на підтримку подальшого розвитку та створення більш інтелектуальних виробничих систем.

Висновки

У минулому досягнення дистанційного моніторингу, керування, прийняття рішень, реального часу моделювання та безперервного оновлення на основі зворотного зв'язку для роботизованих систем у виробничих цехах було значним викликом. Хоча традиційні технології симуляції та керування частково полегшили ці проблеми, їх застосування в промислових умовах часто обмежувалося через відсутність реального часу та інтуїтивної інтерактивності.

Ця робота провела систематичний та всебічний огляд існуючих публікацій за останні десять років, щоб дослідити технології, що забезпечують функціонування, застосування, практичні виклики та тенденції систем RDT. У цьому контексті системи RDT обіцяють розширити межі традиційних підходів. Крім того, зростаюча кількість досліджень і застосувань систем RDT у виробництві в останні роки свідчить про активне дослідження їх потенціалу як академічною спільнотою, так і промисловістю.

Зокрема, робота проаналізувала різноманітні технології Industry 4.0 на основі запропонованої чотирирівневої архітектури систем RDT. На фізичному рівні увага приділяється передовим робототехнічним системам і смарт-сенсорам. Віртуальний рівень створює основу для реалізації RDT-систем через моделювання та симуляцію; у зв'язку з цим робота підсумувала різноманітне програмне забезпечення для моделювання та симуляцій, що використовується у проєктуванні та реалізації DT, пропонуючи нові ідеї для фахівців із симуляційних систем.

Крім того, VR та AR, які почали активно застосовуватися в RDT-системах з 2022 року, були розглянуті з точки зору їхнього поточного стану досліджень. Рівень з'єднання (connection layer) досліджувався з двох перспектив: комунікацій та обчислень, підкреслюючи роль edge computing, cloud computing, 5G та IoT. Рівень підтримки (supporting layer) охоплює оптимізаційні технології, де AI підкреслює потужну роль у підвищенні ефективності систем RDT.

Крім того, застосування RDT у промисловому виробництві стає дедалі поширенішим, з широким використанням у моніторингу, керуванні, симуляції, прогнозуванні та прийнятті рішень. Ці застосування охоплюють роботизовані задачі, такі як складання, обробка, захоплення та транспортування матеріалів, а також більш широкі впровадження в сценаріях HRI, PdM та адитивного виробництва. Проведені аналізи демонструють масштабованість систем RDT у різних системах.

Ключовим внеском цього огляду є визначення тенденцій технологій RDT на основі існуючих досліджень. Робота також аналізує та синтезує ці тенденції з двох перспектив: функцій і технологій, що забезпечують RDT-системи. Незважаючи на численні переваги, що надають системи RDT, залишаються певні виклики, зокрема у таких сферах: (1) управління даними, (2) продуктивність у реальному часі, (3) конфіденційність, безпека та надійність даних, (4) високоточне моделювання, (5) сумісність та інтеграція систем, (6) витрати на розробку.

Слід зазначити, що це дослідження зосереджене на виробничій сфері, а не на ширшому спектрі робототехніки, що призводить до переважного акценту на промислових роботах у переглянутій літературі. Це становить обмеження дослідження. Майбутні роботи будуть розширені на ширший спектр роботизованих систем, включаючи логістичні роботи, медичні роботи, м'яких роботів, сільськогосподарські роботи, а також гуманоїдні роботи, які зараз отримують зростаючу увагу з боку академічної спільноти та промисловості.

Крім того, системи RDT мають значний потенціал для адаптації в інших секторах за межами загального виробництва. Наприклад, у будівельній галузі системи RDT можуть підтримувати дистанційний нагляд, аналіз безпеки та планування завдань для роботів на динамічних будівельних майданчиках. У логістиці системи RDT можуть покращити контроль та координацію мобільних роботів і автоматизованих складських систем через відстеження в реальному часі та прогнозування. Включення цих сфер застосування у майбутніх дослідженнях значно розширить практичний вплив систем RDT і інформуватиме їхнє впровадження в різних промислових контекстах.

Рекомендована література (роботи)

- Qiang Qin, Zhihao Liu, Ruirui Zhong, Xi Vincent Wang, Lihui Wang, Magnus Wiktorsson, Wei Wang (2026) "Robot digital twin systems in manufacturing: Technologies, applications, trends and challenges", *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*, Vol. 97, 103103, <https://doi.org/10.1016/j.rcim.2025.103103>.
- Shweta, Ashique Mohammed, Meisam Mohammadi, Sunny Sharma, Umesh Sharma, Vishal Singh Rana, Mohit Kumar, Sonia Sood, Ghasem Eghlima (2025) "Assessment of advancements and applications of robotics, artificial intelligence, and automated technology in the modern food sector", *Applied Food Research*, Vol. 5, Iss. 2, 101261, <https://doi.org/10.1016/j.afres.2025.101261>.

Питання для самоперевірки (роботи)

- Які основні напрями застосування робототехнічних систем у сільському господарстві?
- Які переваги впровадження роботів у порівнянні з традиційними технологіями?
- Як роботизація впливає на продуктивність та якість аграрного виробництва?
- Які види роботів найбільш поширені в аграрній галузі?
- Які фактори стримують широке впровадження робототехніки в АПК?
- У чому полягає основна ідея створення тепличного комплексу з одним оператором?
- Які функції виконує роботизована система в теплиці?
- Як автоматизація впливає на контроль мікроклімату та стану рослин?
- Які технології дозволяють мінімізувати кількість персоналу в теплиці?
- Які економічні та екологічні переваги забезпечує такий підхід?
- Які завдання вирішує робот у тепличному виробництві овочів?
- Які приклади роботизованих рішень у теплицях існують сьогодні?
- Як застосування роботів впливає на ефективність зрошення та внесення добрив?
- Які сенсорні технології інтегруються у тепличні роботи?
- У чому полягає практична значущість впровадження таких систем?
- Які основні завдання виконують агродрони в агрохімії?
- У чому переваги дронів порівняно з традиційною технікою внесення агрохімікатів?
- Як агродрони сприяють зниженню витрат ресурсів і підвищенню точності обробки?
- Які технічні вимоги ставляться до агродронів для роботи в агропромисловому комплексі?
- Які існують обмеження і проблеми в застосуванні агродронів?
- Що таке «роботизований цифровий двійник» і яка його сутність?
- Які галузі виробництва виграють від використання цифрових двійників?
- Які технології лежать в основі створення цифрових двійників?
- Які проблеми виникають при впровадженні цифрових двійників у сільське господарство?
- Які перспективи розвитку цієї технології в аграрному секторі?