1. ОСНОВИ ТЕЛЕКОМУНІКАЦІЙНИХ ТЕХНОЛОГІЙ У РОЗУМНИХ ФЕРМАХ

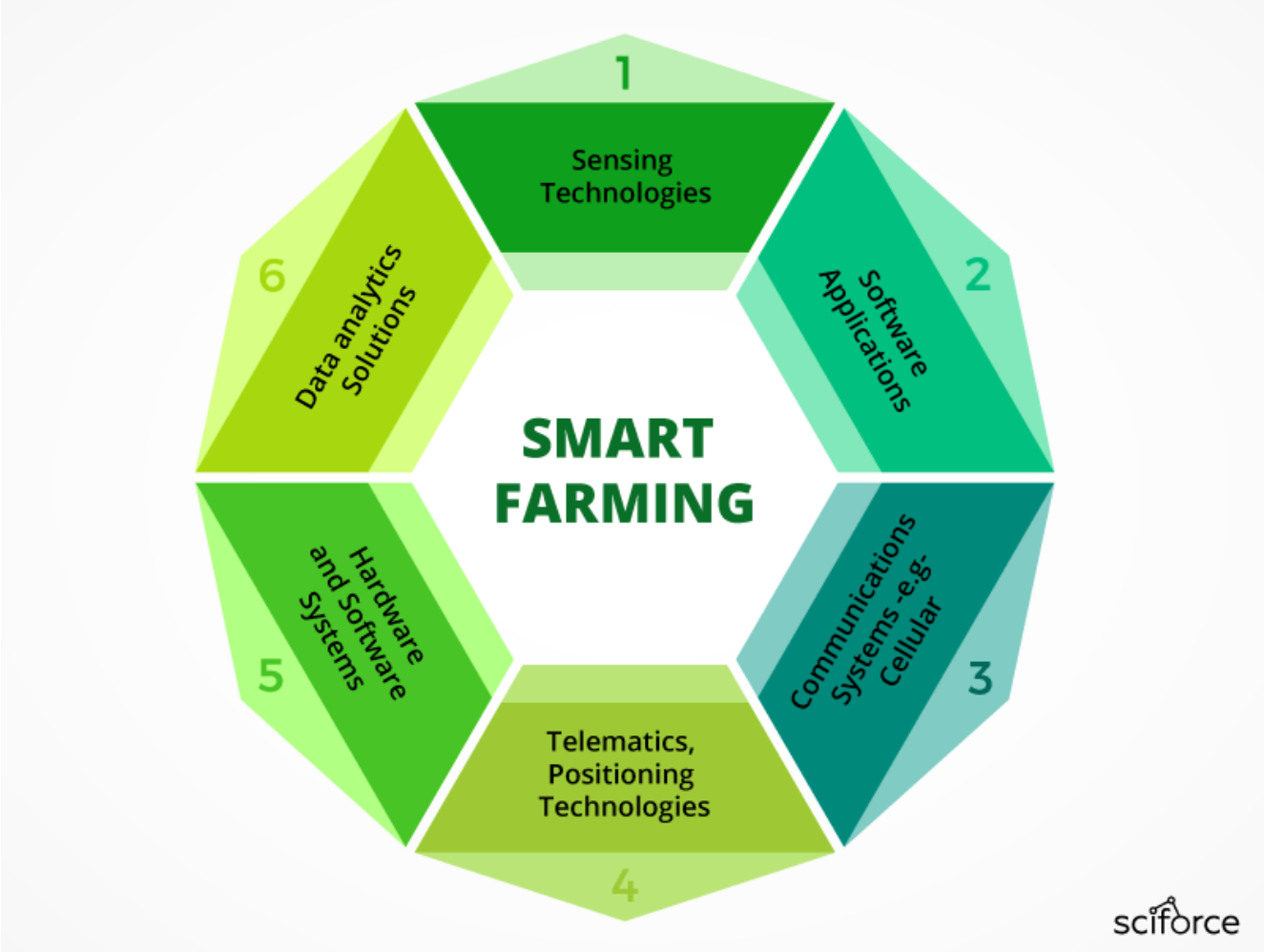
1.1. Концепція розумної ферми та роль телекомунікаційних систем

В останні роки сільськогосподарський сектор пережив трансформаційні зміни, зумовлені технологічним прогресом, що призвело до появи концепції розумної ферми. Розумна ферма інтегрує передову цифрову інфраструктуру з традиційними методами ведення сільського господарства для підвищення продуктивності, ефективності та сталого розвитку. Центральну роль у цій інновації займає роль телекомунікаційних систем, які сприяють безперебійному зв'язку між різними технологічними компонентами та дозволяють приймати рішення на основі даних. У цьому есе досліджується структура та принципи функціонування розумної ферми, ключова роль телекомунікаційних систем у її формуванні та різноманітні типи даних, що циркулюють у такому середовищі. Завдяки цьому дослідженню стає очевидним, що розумні ферми є значним кроком вперед у сучасному сільському господарстві, обіцяючи задовольнити потреби зростаючого населення світу, мінімізуючи вплив на навколишнє середовище.

Основою розумної ферми є її складна цифрова інфраструктура, яка організовує інтеграцію кількох технологічних елементів для створення взаємопов'язаного сільськогосподарського середовища. В її основі лежать датчики, стратегічно розміщені по всій фермі, які контролюють такі параметри, як вологість ґрунту, температура, рівень поживних речовин та рівень поживних речовин, надаючи дані в режимі реального часу, необхідні для точного землеробства. Ці датчики взаємодіють з контролерами, які обробляють зібрані дані, що дозволяє автоматизовано коригувати системи зрошення, удобрення та боротьби зі шкідниками. Дрони, оснащені камерами та мультиспектральними датчиками, ще більше покращують збір даних, надаючи аерофотознімки для оцінки стану сільськогосподарських культур та картографування полів. Хмарні сервіси служать центральним сховищем та центром обробки, агрегуючи дані з датчиків, дронів та

техніки, а також забезпечуючи віддалений доступ та аналіз. Автоматизація досягається за допомогою телекомунікаційних каналів, які передають інструкції від платформ керування до фізичних пристроїв, що дозволяє автономну роботу та дистанційне управління сільськогосподарською діяльністю. Ця інтегрована система ілюструє, як цифрова інфраструктура оптимізує сільськогосподарські операції, зменшує втрати ресурсів та підвищує врожайність завдяки точним втручанням, заснованим на даних.

Рисунок 1.1 демонструє шість ключових компонентів екосистеми smart farming, серед яких технології сенсорики, програмні застосунки, телекомунікаційні системи, засоби телематики та позиціонування, апаратно-програмні системи та аналітичні рішення. Візуальна структура підкреслює їхню взаємодію та циклічну інтеграцію, що забезпечує повну цифровізацію й оптимізацію аграрних процесів.



Мал.. 1.1. Концепція розумної ферми

Телекомунікації відіграють незамінну роль у формуванні інтелектуальної сільськогосподарської системи, забезпечуючи швидкий, надійний та безпечний обмін даними між різними компонентами розумної ферми. Можливість передавати дані в режимі реального часу гарантує, що фермери та автоматизовані системи оперативно реагують на зміну умов, таку як раптові зміни погоди або спалахи шкідників. Наприклад, датчики, що виявляють підвищення рівня вологості ґрунту, можуть негайно запустити систему зрошення, оптимізуючи використання води та запобігаючи її втратам. Синхронізація пристроїв Інтернету речей (IoT) та платформ керування значною мірою залежить від надійних телекомунікаційних мереж, що забезпечує злагоджену роботу всіх пристроїв та миттєву реакцію на команди. Крім того, телекомунікаційні системи підтримують складні процеси прийняття рішень, надаючи платформи, які аналізують вхідні дані, такі як прогнози погоди, показники стану ґрунту та стан техніки, та генерують практичну інформацію. Таке підключення підвищує операційну ефективність, зменшує обсяг ручної праці та підтримує сталий розвиток, забезпечуючи точне землеробство. З розвитком технологій, досягнення в 5G та супутниковому зв'язку обіцяють ще швидші та надійніші з'єднання, що ще більше зміцнює можливості розумних ферм.

У межах розумної ферми різні типи даних постійно циркулюють, утворюючи основу інтелектуального прийняття рішень та операційної ефективності. Технологічні дані, зібрані з датчиків, включають життєво важливі параметри, такі як вологість ґрунту, температура, вологість та вміст поживних речовин, які впливають на планування зрошення та стратегії удобрення. Дані, що генеруються технікою та роботизованими системами, такими як комбайни, сівалки та автономні трактори, відстежують робочий стан, витрату палива та потреби в технічному обслуговуванні, що сприяє прогнозному обслуговуванню та зменшує час простою. Тим часом дані відеоспостереження та аналітики надають візуальне уявлення про стан врожаю, активність шкідників та потенційні загрози безпеці. Розширені алгоритми обробки зображень та машинного навчання аналізують відеопотоки для виявлення аномалій, оцінки стану рослин та оптимізації розподілу ресурсів. Безперебійна циркуляція цих різноманітних типів даних, що забезпечується

телекомунікаційними мережами, гарантує, що всі компоненти розумної ферми працюють гармонійно для підвищення продуктивності, збереження ресурсів та екологічної стійкості. У сукупності ці потоки даних надають фермерам повне розуміння своєї діяльності, що дозволяє здійснювати точні втручання та стратегічне планування.

Надійна телекомунікаційна інфраструктура є основоположною для ефективної роботи розумної ферми, що складається з різних ключових елементів, призначених для забезпечення безперебійного обміну даними та координації систем. Центральним елементом цієї інфраструктури є сенсорні мережі та вузли збору даних, які стратегічно розподілені по всій фермі для постійного моніторингу екологічних та операційних параметрів. Ці вузли збирають критично важливі дані, такі як вологість ґрунту, температура та стан техніки, передаючи цю інформацію до централізованих систем для аналізу. Доповнюють їх як ближні, так і дальні канали зв'язку, які забезпечують зв'язок у межах ферми та між віддаленими центрами керування. Канали ближнього радіусу дії, такі як Wi-Fi та Bluetooth, використовуються для локальної передачі даних, зв'язку датчиків, контролерів та обладнання поблизу, тоді як методи зв'язку дальнього радіусу дії, такі як стільникові мережі, LoRaWAN та супутникові канали, розширюють зв'язок на великі відстані та складну місцевість. Центри обробки даних, шлюзи та мережеві контролери виступають основою цієї інфраструктури, агрегуючи дані з різних джерел, фільтрація шуму та безпечна передача інформації на хмарні платформи або локальні сервери для обробки та прийняття рішень у режимі реального часу. Ці елементи працюють разом, створюючи інтегровану телекомунікаційну мережу, здатну підтримувати складні та динамічні потреби розумної ферми, забезпечуючи ефективний та надійний потік даних на всіх операційних рівнях.

Сільськогосподарське середовище створює унікальні проблеми для розгортання та обслуговування телекомунікаційних мереж, оскільки такі фактори, як неоднорідність рельєфу, енергетичні обмеження та кліматична мінливість, суттєво впливають на продуктивність мережі. Великі відстані між датчиками, блоками керування та центрами обробки даних вимагають використання

спеціалізованих технологій далекого зв'язку, які повинні бути здатними надійно передавати дані через великі та часто пересічені ландшафти. Неоднорідний рельєф, що включає пагорби, долини та нерівні поверхні, може перешкоджати передачі сигналів, що вимагає стратегічного розміщення ретрансляційних станцій або використання супутникового зв'язку для підтримки покриття. Крім того, багатьом сільськогосподарським районам бракує стійких енергетичних ресурсів, таких як енергосистема, що змушує покладатися на відновлювані джерела, такі як сонячні панелі або пристрої для збору енергії для сенсорних вузлів та комунікаційного обладнання. Мінливість погоди та клімату ще більше ускладнює стабільність мережі; екстремальні умови, такі як сильні дощі, шторми або коливання температури, можуть порушити якість сигналу або пошкодити обладнання. Тому проектування стійких, адаптивних та енергоефективних телекомунікаційних мереж має вирішальне значення для стабільної роботи розумних ферм, забезпечуючи безперебійний потік даних та оперативність реагування системи, незважаючи на екологічні проблеми.

Інтеграція телекомунікаційних систем із процесами сільськогосподарського виробництва покращує управління фермерським господарством завдяки низці функціональних застосувань, що сприяють ефективності та сталому розвитку. Системи точного землеробства є прикладом цієї інтеграції, використовуючи дані в режимі реального часу, що передаються через телекомунікаційні мережі, для оптимізації внесення вхідних речовин, таких як добрива, пестициди та вода, на основі конкретних потреб культур та умов навколишнього середовища. Інтелектуальні зрошувальні системи, що керуються даними датчиків та прогнозами погоди, автоматично регулюють подачу води, щоб запобігти втратам та забезпечити оптимальний ріст культур. Управління мікрокліматом та живленням виграє від постійного моніторингу, що дозволяє фермерам точно модулювати температуру, вологість та рівень поживних речовин, тим самим покращуючи здоров'я культур та якість врожаю. Крім того, моніторинг стану культур та прогнозування врожайності забезпечуються за допомогою відеоспостереження, дистанційного зондування та алгоритмів машинного навчання, які аналізують потоки даних для виявлення ранніх

ознак стресу, хвороб або зараження шкідниками. Ці дані дозволяють проводити проактивне втручання та точні прогнози результатів збору врожаю, зменшуючи використання ресурсів та максимізуючи продуктивність. Функціональна синергія між телекомунікаціями та процесами сільськогосподарського виробництва втілює суть розумного землеробства, перетворюючи традиційні практики на високоефективні системи, що базуються на даних і можуть швидко адаптуватися до змінних екологічних та операційних умов.

Впровадження телекомунікаційних рішень у сільському господарстві дає численні значні переваги, що сприяють розвитку сучасного сільського господарства. Найголовнішою серед цих переваг є потенціал для суттєвого зниження експлуатаційних витрат, одночасно підвищуючи продуктивність. Завдяки точним рішенням, що базуються на даних, телекомунікаційні системи мінімізують марнотратне використання ресурсів та оптимізують сільськогосподарські операції, що призводить до економії коштів на таких ресурсах, як вода, добрива та енергія. Наприклад, автоматизовані системи зрошення, які реагують у режимі реального часу на дані датчиків, запобігають надмірному поливу, заощаджують воду та зменшують споживання енергії. Аналогічно, прогнозне обслуговування техніки, що забезпечується постійним моніторингом даних, зменшує час простою та витрати на ремонт. Крім того, розширені можливості контролю та прогнозування завдяки інтегрованим телекомунікаційним мережам дозволяють фермерам точніше передбачати умови навколишнього середовища та продуктивність врожаю. Ця підвищена точність прогнозування сприяє кращому плануванню, управлінню ризиками та оптимізації врожайності, що зрештою призводить до більш стабільних та якісніших врожаїв. Більше того, використання ресурсів, зокрема палива, води та добрив, оптимізується завдяки цілеспрямованому застосуванню, що зменшує вплив на навколишнє середовище та сприяє сталому веденню сільського господарства. Ці переваги підкреслюють, як телекомунікаційні технології не лише підвищують операційну ефективність, але й узгоджуються з ширшими цілями охорони навколишнього середовища та економічної доцільності сільського господарства.

Концепція розумної ферми являє собою новаторський прорив у сучасному сільському господарстві, фундаментально трансформуючи традиційні практики шляхом інтеграції цифрової інфраструктури та телекомунікаційних систем. Структура та принципи роботи включають складну мережу датчиків, контролерів, дронів та хмарних сервісів, які працюють у гармонії для автоматизації процесів та полегшення обміну даними в режимі реального часу. Телекомунікаційні системи відіграють життєво важливу роль у цій екосистемі, забезпечуючи швидку, надійну та безпечну передачу різноманітних типів даних – від параметрів навколишнього середовища до стану техніки та візуальної аналітики – тим самим підтримуючи точне прийняття рішень та операційний контроль. Унікальні екологічні проблеми сільськогосподарських ландшафтів вимагають стійких, енергоефективних та адаптивних мережевих рішень для забезпечення безперервного потоку даних та швидкості реагування системи. Крім того, функціональна інтеграція телекомунікаційних технологій у сільськогосподарські процеси підвищує ефективність, оптимізацію ресурсів та сталий розвиток, що призводить до таких переваг, як зниження витрат, підвищення продуктивності та краща точність прогнозування. З розвитком технологій впровадження та вдосконалення телекомунікаційних рішень буде важливим для розробки стійких, сталих та ефективних розумних ферм, здатних задовольнити зростаючий світовий попит на продукти харчування, мінімізуючи вплив на навколишнє середовище.

1.2. Архітектура IoT-інфраструктури аграрних господарств

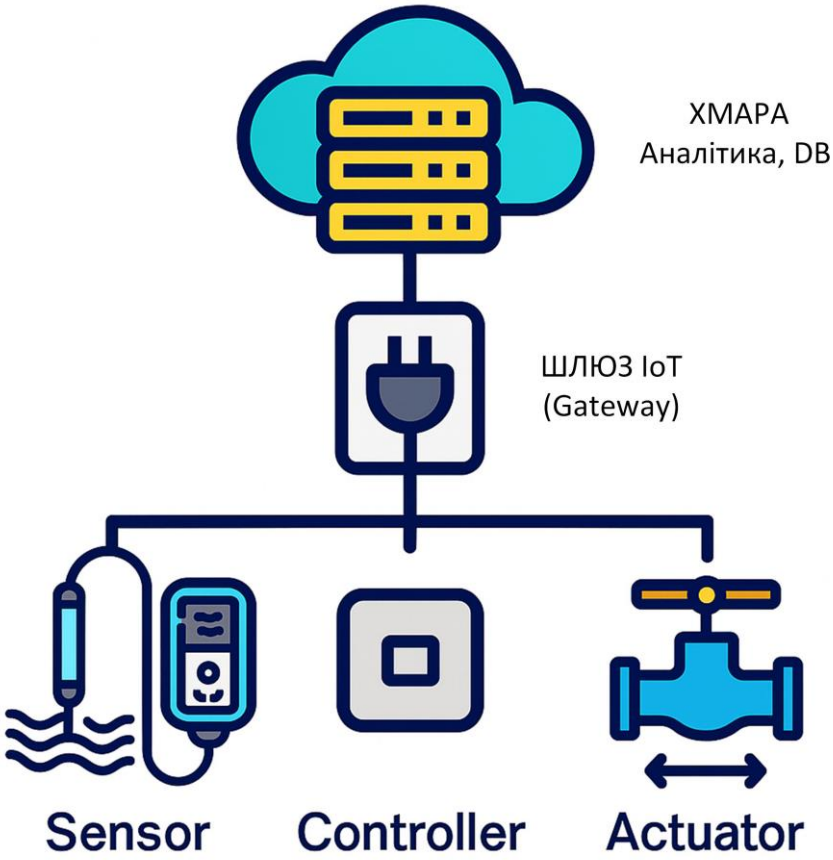
Швидкий розвиток Інтернету речей (IoT) революціонізував сільськогосподарську практику, забезпечивши моніторинг у режимі реального часу, точне управління ресурсами та автоматизацію на фермах. Центральним елементом цієї технологічної трансформації є складна архітектура інфраструктури IoT, яка повинна безперешкодно інтегрувати різні компоненти для забезпечення ефективного збору, обробки та дій з даними. Ефективна інфраструктура IoT для сільськогосподарських ферм має багаторівневу структуру, що охоплює рівень поля,

рівень зв'язку та рівень хмари, кожен з яких відіграє життєво важливу роль у створенні цілісної та адаптивної системи. Такий багаторівневий підхід не лише підвищує масштабованість та гнучкість управління фермерським господарством, але й сприяє інтеграції з новими технологіями, такими як аналітика великих даних та штучний інтелект, що зрештою призводить до розумніших та більш стійких методів ведення сільського господарства.

Архітектура інфраструктури Інтернету речей (IoT) у сільськогосподарських фермах фундаментально побудована на багаторівневій структурі, яка організовує потік даних з фізичного середовища до централізованих блоків обробки. На базовому рівні польовий рівень складається з різних датчиків, виконавчих механізмів та контролерів, стратегічно розміщених по всій фермі. Датчики навколишнього середовища контролюють критичні параметри, такі як вологість ґрунту, температура та вологість, надаючи важливі дані для здоров'я сільськогосподарських культур та управління зрошенням. Датчики худоби, оснащені біометричними пристроями, відстежують життєво важливі показники, рівні активності та локалізацію, що має вирішальне значення для здоров'я та добробуту тварин. Ці датчики з'єднані між собою через локальні мережі, часто використовуючи технології низькоенергетичних мереж широкого радіусу дії (LPWAN) для забезпечення енергоефективності та розширеного покриття. Рухаючись вгору, рівень зв'язку включає мережеві шлюзи, які агрегують дані з різних вузлів датчиків. Ці шлюзи сприяють передачі даних за допомогою таких протоколів, як MQTT, CoAP або LoRaWAN, які оптимізовані для низької пропускної здатності та енергоспоживання. Вони також обробляють трансляцію протоколів, забезпечуючи сумісність між різнорідними сенсорними пристроями. Нарешті, на хмарному рівні агреговані дані передаються на хмарні сервери, де вони обробляються, зберігаються та аналізуються за допомогою передових інструментів аналітики. Хмарні платформи дозволяють інтегрувати великомасштабні дані, полегшують дистанційний моніторинг та підтримують процеси прийняття рішень за допомогою панелей візуалізації, прогнозних моделей та алгоритмів машинного навчання. Таким чином, багаторівнева структура забезпечує систематичний та

масштабований підхід до ефективного управління величезними обсягами сільськогосподарських даних.

Сенсорні мережі складають основу збору даних у розумному сільському господарстві, надаючи життєво важливу інформацію, необхідну для оптимізації сільськогосподарських практик. Датчики навколишнього середовища широко використовуються для моніторингу таких факторів, як pH ґрунту, рівень поживних речовин, вміст вологи, температура повітря та вологість, що дозволяє фермерам впроваджувати стратегії точного зрошення та удобрення. Наприклад, датчики вологості ґрунту можуть запускати зрошувальні системи лише за необхідності, заощаджуючи воду та зменшуючи витрати. Крім того, датчики для худоби відіграють вирішальну роль в управлінні тваринами, постійно фіксуючи біометричні дані, такі як частота серцевих скорочень, температура тіла та моделі активності. Ці датчики часто використовують RFID-мітки, акселерометри або GPS-модулі для полегшення відстеження та оцінки здоров'я в режимі реального часу. Топологія сенсорних мереж впливає на їхню надійність та стійкість; зірчасті топології прості та підходять для невеликих ферм, де датчики безпосередньо зв'язуються з центральним шлюзом, тоді як сітчасті мережі забезпечують резервування та довше покриття для більших, складніших ферм. У сітчастих топологіях кожен сенсорний вузол взаємодіє з сусідніми вузлами, утворюючи стійку мережу, здатну до самовідновлення у разі виходу з ладу вузла. Деревоподібні топології пропонують ієрархічну структуру, що підходить для великих ферм з кількома зонами, що дозволяє організований потік даних від периферійних датчиків до центральних точок збору. Цей різноманітний масив датчиків і топологій забезпечує комплексний моніторинг навколишнього середовища та худоби, надаючи фермерам практичну інформацію для сталого управління фермерським господарством.



Мал. 1.2. Архітектура IoT-інфраструктури

Шлюзи Інтернету речей відіграють ключову роль у подоланні розриву між розподіленими сенсорними мережами та централізованими системами обробки даних. Їхня основна функція включає агрегацію пакетів, де дані з різних датчиків, кожен з яких потенційно використовує різні протоколи зв'язку, збираються та консолідуються. Цей процес спрощує управління даними, зменшуючи кількість прямих підключень до хмарних серверів та підвищуючи ефективність мережі. Шлюзи також виконують протоколізацію та перетворення форматів даних, перетворюючи специфічні для датчиків пакети даних у стандартизовані формати, сумісні з хмарними аналітичними платформами. Наприклад, шлюз може конвертувати повідомлення LoRaWAN у повідомлення MQTT, придатні для хмарного прийому, забезпечуючи безперебійну сумісність. Крім того, шлюзи Інтернету речей (IoT) забезпечують критично важливі точки доступу для передачі даних, підтримуючи кілька комунікаційних інтерфейсів, таких як Wi-Fi, LTE-M,

NB-IoT та Ethernet, залежно від інфраструктури підключення ферми. Ця універсальність дозволяє фермам підтримувати надійний потік даних навіть у віддалених або складних умовах. Крім того, шлюзи часто включають можливості периферійних обчислень, що дозволяє попередньо фільтрувати дані, виявляти аномалії або приймати локальні рішення для зменшення затримки та використання пропускної здатності. Загалом, шлюзи Інтернету речей є важливими для підтримки цілісності, безпеки та ефективності екосистеми Інтернету речей ферми, забезпечуючи оперативне реагування в режимі реального часу та масштабовану інтеграцію з хмарними сервісами.

Ефективні канали зв'язку та транспортні протоколи формують основу інфраструктури Інтернету речей у сільськогосподарських фермах, забезпечуючи надійну та ефективну передачу даних у різних мережевих середовищах. Технології мереж низького енергоспоживання (LPWAN), такі як LoRaWAN, NB-IoT та LTE-M, спеціально розроблені для застосувань Інтернету речей, які потребують підключення на великій відстані з мінімальним споживанням енергії. Наприклад, LoRaWAN дозволяє датчикам, розподіленим по великих сільськогосподарських угіддях, зв'язуватися зі шлюзами на відстані кількох кілометрів, що робить їх ідеальними для моніторингу навколишнього середовища та відстеження худоби в просторих умовах. NB-IoT та LTE-M, з іншого боку, використовують існуючі стільникові мережі для забезпечення надійного з'єднання з вищою швидкістю передачі даних та якістю обслуговування, що підходить для потокової передачі даних у режимі реального часу та програм керування. Доповнюють їх протоколи зв'язку вищого рівня, такі як MQTT, CoAP та AMQP, які сприяють міжмашинному зв'язку та обміну даними в екосистемі Інтернету речей. MQTT, відомий своєю легкою конструкцією, підтримує обмін повідомленнями публікації/підписки, що робить його придатним для сценаріїв з обмеженою пропускною здатністю. CoAP пропонує RESTful взаємодії, оптимізовані для вбудованих пристроїв, що забезпечує просту інтеграцію з веб-сервісами. AMQP забезпечує надійний обмін повідомленнями з розширеними функціями черг та маршрутизації, що підходить для складних систем управління фермерським господарством. Більше того,

інтеграція з локальними мережами, такими як Wi-Fi 6 та Ethernet, забезпечує високошвидкісне та надійне підключення в межах сільськогосподарських об'єктів, особливо в операційних зонах з вищими вимогами до пропускної здатності. Поєднання цих каналів зв'язку та протоколів дозволяє фермам підтримувати безперебійний потік даних, підтримувати прийняття рішень у режимі реального часу та забезпечувати стійкість загальної інфраструктури Інтернету речей.

Хмарні платформи та системна аналітика є невід'ємними компонентами сучасної сільськогосподарської інфраструктури Інтернету речей, перетворюючи необроблені телеметричні дані на практичні висновки, що підвищують продуктивність та сталий розвиток. Після отримання телеметричні дані з датчиків та шлюзів безпечно зберігаються в хмарних базах даних, які підтримують масштабовані рішення для зберігання. Ці платформи здатні обробляти величезні обсяги даних, що генеруються щодня в кількох сільськогосподарських зонах, гарантуючи, що дані залишаються доступними та організованими для аналізу. Щоб врахувати зростаючий обсяг даних, хмарні системи використовують еластичні обчислювальні ресурси, які можуть динамічно масштабуватися вгору або вниз, забезпечуючи оптимальну продуктивність без зайвих витрат. Розширені інструменти аналітики, вбудовані в ці платформи, дозволяють отримувати цінну інформацію за допомогою алгоритмів машинного навчання, панелей візуалізації даних та прогнозного моделювання. Ці інтелектуальні сервіси сприяють прогнозуванню врожайності сільськогосподарських культур, виявленню хвороб, оптимізації ресурсів та автоматизованому управлінню системами зрошення, удобрення та боротьби зі шкідниками. Інтеграція аналітики в реальному часі з історичними даними створює комплексну систему управління фермерським господарством, яка адаптується до змінних умов навколишнього середовища та операційних потреб. Такий багаторівневий підхід до хмарної аналітики зрештою дає фермерам можливість приймати рішення на основі даних, підвищувати ефективність та сприяти сталому веденню сільського господарства.

Керування та оркестрація пристроїв Інтернету речей мають вирішальне значення для підтримки безпечної, надійної та ефективної екосистеми

фермерського господарства. Централізовані платформи управління конфігурацією дозволяють фермерам та системним адміністраторам контролювати великі парки датчиків, шлюзів та виконавчих механізмів з єдиного інтерфейсу, спрощуючи налаштування пристроїв, налаштування параметрів та операційний нагляд. Дистанційне оновлення програмного забезпечення здійснюється за допомогою бездротових (OTA) механізмів, що дозволяє своєчасно розгортати патчі прошивки, покращення безпеки та функції без фізичного доступу до пристроїв. Інструменти постійного моніторингу стану відстежують стан пристроїв, рівень заряду батареї, якість підключення та продуктивність датчиків, попереджаючи операторів про потенційні проблеми, перш ніж вони вплинуть на роботу фермерського господарства. Забезпечення безпеки доступу та авторизації пристроїв має першочергове значення для захисту конфіденційних даних фермерського господарства та запобігання зловмисним вторгненням. Це включає впровадження надійних протоколів автентифікації, зашифрованих каналів зв'язку та контролю доступу на основі ролей для обмеження дозволів пристроїв та користувачів. Крім того, використання блокчейну або подібних технологій може підвищити довіру та відстеження взаємодії пристроїв. Ефективні механізми управління та оркестрації не лише оптимізують операції фермерських господарств, але й захищають цілісність усієї екосистеми Інтернету речей, забезпечуючи стійке та безпечне середовище, яке підтримує постійні зусилля з модернізації фермерських господарств.

Взаємодія інфраструктури Інтернету речей із системами планування ресурсів підприємства (ERP) та системами диспетчерського контролю та збору даних (SCADA) є важливою для досягнення безперешкодної інтеграції між збором даних та операційним управлінням. Ці системи дозволяють синхронізувати дані, згенеровані Інтернетом речей, з виробничими процесами, що дозволяє здійснювати моніторинг та контроль діяльності фермерських господарств у режимі реального часу. Інтегруючи датчики та шлюзи Інтернету речей з модулями ERP, фермери можуть автоматизувати управління запасами, планування ресурсів, та операції ланцюга поставок, гарантуючи, що дані про врожайність сільськогосподарських культур, здоров'я худоби та споживання ресурсів безпосередньо впливають на

бізнес-рішення. Аналогічно, системи SCADA отримують вигоду від потоків даних Інтернету речей, забезпечуючи централізований нагляд за критично важливими сільськогосподарськими операціями, такими як зрошення, удобрення та керування технікою, сприяючи оперативному реагуванню на зміни навколишнього середовища або несправності обладнання. Обмін життєво важливими технологічними даними, такими як рівень вологості ґрунту, що запускає коригування зрошення, або біометричні сповіщення про худобу, що ініціюють ветеринарне втручання, підвищує операційну ефективність та оперативність реагування. Крім того, ця інтеграція дозволяє автоматизувати рішення в режимі реального часу; наприклад, датчики, що виявляють раптове падіння вологості ґрунту, можуть автоматично активувати системи зрошення без втручання людини, оптимізуючи використання води та здоров'я врожаю. Така динамічна взаємодія між інфраструктурою Інтернету речей та системами управління створює цілісну екосистему, де аналітичні дані, засновані на даних, перетворюються на негайні, автоматизовані дії, що значно підвищує продуктивність та сталий розвиток фермерських господарств.

Архітектура інфраструктури Інтернету речей (IoT) для сільськогосподарських ферм є складною, але високоорганізованою системою, яка інтегрує кілька рівнів — від фізичного розгортання датчиків та виконавчих механізмів на рівні поля до складної хмарної аналітики та управління пристроями. Багаторівнева структура забезпечує ефективний потік даних, масштабованість та надійність, тоді як сенсорні мережі слугують основою для моніторингу навколишнього середовища та худоби в режимі реального часу. Шлюзи IoT відіграють вирішальну роль у консолідації та перетворенні різноманітних даних датчиків, сприяючи безперебійному зв'язку через різні канали та протоколи. Хмарні платформи ще більше покращують управління фермерським господарством, пропонуючи масштабоване сховище, розширену аналітику та інтелектуальні інструменти прийняття рішень, які оптимізують використання ресурсів та врожайність. Доповнюють їх надійні системи управління та оркестрації, які підтримують безпеку та операційну цілісність пристроїв. Взаємодія IoT з

системами ERP та SCADA поєднує збір даних з контролем виробництва, забезпечуючи автоматизацію та негайне реагування на сигнали навколишнього середовища та експлуатації. Загалом, ця інтегрована інфраструктура прокладає шлях для розумніших, більш сталих та високоефективних сільськогосподарських практик, що ілюструє трансформаційний потенціал IoT у сучасному сільському господарстві.

1.3. Технології передавання даних у сільськогосподарських системах: NB-IoT, LTE-M, LoRaWAN, IEEE 802.15.4, Wi-Fi, Ethernet

Швидкий розвиток технологій суттєво змінив сільськогосподарські практики, проклавши шлях для точного землеробства та покращеного управління сільськогосподарськими культурами. Центральним елементом цих інновацій є впровадження різних технологій передачі даних, які сприяють моніторингу, контролю та збору даних у режимі реального часу на великих та різноманітних сільськогосподарських ландшафтах. Серед найвідоміших стандартів бездротового зв'язку є вузькосмуговий Інтернет речей (NB-IoT), LTE-M, LoRaWAN, IEEE 802.15.4, Wi-Fi та Ethernet. Кожна з цих технологій пропонує унікальні можливості, адаптовані до конкретних сільськогосподарських застосувань, починаючи від масштабного моніторингу навколишнього середовища до зв'язку мобільного обладнання. У цьому есе досліджуються три критично важливі технології передачі даних — NB-IoT, LTE-M та LoRaWAN — з акцентом на їхні експлуатаційні характеристики, переваги та придатність для різних сільськогосподарських сценаріїв, тим самим ілюструючи їхню ключову роль у розвитку сучасного сільського господарства.

NB-IoT став потужною технологією для масштабного моніторингу в сільськогосподарських системах, головним чином завдяки своїй вузькосмуговій роботі та високій чутливості приймача. Працюючи в ліцензованому спектрі LTE, NB-IoT використовує вузьку смугу пропускання — зазвичай близько 180 кГц — що дозволяє досягати виняткової якості сигналу навіть у складних умовах. Така

вузькосмугова робота забезпечує надійне з'єднання на великих відстанях, що робить його ідеальним для моніторингу великих сільськогосподарських полів, що простягаються на кілька кілометрів. Крім того, висока чутливість приймача NB-IoT дозволяє йому виявляти слабкі сигнали, що передаються на значні відстані, забезпечуючи надійну передачу даних від віддалених датчиків, розміщених у важкодоступних районах. Додатковою перевагою є його здатність підтримувати тривалу автономну роботу датчиків, що працюють завдяки низькому споживанню енергії та оптимізованим стратегіям управління живленням. Наприклад, фермери можуть розгортати датчики для моніторингу вологості ґрунту, температури або стану врожаю на великих фермах без частої заміни батарей, тим самим знижуючи витрати на обслуговування та забезпечуючи безперервний потік даних. Глибоке проникнення сигналу технології також забезпечує надійний зв'язок навіть у середовищах з такими перешкодами, як густа рослинність або споруди, що ще більше підкреслює її придатність для масштабних, постійних застосувань моніторингу, необхідних для точного землеробства.

Таблиця 1.3.

Призначення технологій передавання даних у сільськогосподарських системах

Параметр	NB-IoT	LTE-M	LoRaWAN	IEEE 802.15.4	Wi-Fi	Ethernet
Дальність дії	Велика	Середня	Дуже велика	Мала/середня	Мала	Провідна
Енергоспоживання	Низьке	Низьке	Дуже низьке	Низьке	Високе	Не актуально
Пропускна здатність	Низька	Середня	Низька	Низька	Висока	Висока
Затримка	Висока	Низька	Висока	Середня	Низька	Дуже низька

Мобільність	Немає	Підтримується	Немає	Немає	Обмежена	Немає
Типове застосування	Сенсори ґрунту, кліматичні вузли	Трактори, дрони, мобільна техніка	Розподілені сенсорні мережі	Zigbee/Thread сенсори	Відео, контролери, приміщення	ЦОД, комуніка ційні вузли

LTE-M (Long Term Evolution for Machines – довгострокова еволюція для машин) особливо підходить для мобільних та динамічних сільськогосподарських об'єктів, таких як трактори, дрони та автономні транспортні засоби, де безперебійний зв'язок та низька затримка є критично важливими. На відміну від NB-IoT, LTE-M підтримує мобільність та передачу даних, дозволяючи пристроям підтримувати з'єднання під час переміщення між різними мережевими комірками, що є важливим для техніки, яка працює на великих фермах або на полях зі зміною положення. Ця можливість забезпечує безперервний обмін даними, що дозволяє контролювати та моніторити мобільне обладнання в режимі реального часу. Крім того, LTE-M пропонує меншу затримку порівняно з NB-IoT, часто в діапазоні 10-50 мілісекунд, що має вирішальне значення для чутливих до часу застосувань, таких як автономна навігація або точне обприскування. Наприклад, автономні трактори, оснащені модулями LTE-M, можуть отримувати миттєві команди та надсилати телеметричні дані з мінімальною затримкою, оптимізуючи операційну ефективність та безпеку. Крім того, оптимізована пропускна здатність та мережева архітектура LTE-M підтримують вищі швидкості передачі даних, ніж NB-IoT, що сприяє передачі більш насичених наборів даних, включаючи зображення високої роздільної здатності з дронів або детальні показники датчиків. Таке поєднання підтримки мобільності, низької затримки та вищої пропускної здатності робить LTE-M життєво важливою технологією в умовах мінливого ландшафту розумного

сільського господарства, де динамічне обладнання вимагає надійних та швидких каналів зв'язку.

LoRaWAN (мережа широкого радіусу дії) утворює основу енергоефективних систем мереж широкого радіусу дії з низьким енергоспоживанням (LPWAN), особливо підходящих для масштабного розгортання сільського господарства, що вимагає низького енергоспоживання та високої перешкодостійкості. Її метод модуляції CSS (розширення спектру чирпу) забезпечує надійну роботу в шумному радіосередовищі, забезпечуючи високу стійкість до перешкод від інших бездротових сигналів або факторів навколишнього середовища. Ця висока перешкодостійкість гарантує стабільну передачу даних у сільській місцевості, де кілька бездротових пристроїв або природні перешкоди можуть погіршити якість сигналу. Рівень MAC (контроль доступу до середовища) в LoRaWAN підтримує кілька класів — A, B та C — кожен з яких адаптований для різних операційних сценаріїв. Пристрої класу A оптимізовані для енергоефективності, що дозволяє датчикам періодично передавати дані та залишатися в режимах сну з низьким енергоспоживанням більшу частину часу, що робить їх придатними для датчиків вологості ґрунту або метеостанцій, які потребують рідкісних оновлень. Пристрої класу B та C, що пропонують режими запланованого або безперервного прослуховування, можуть підтримувати більш інтерактивні програми, такі як сповіщення в режимі реального часу для худоби або керування зрошенням. Крім того, здатність LoRaWAN створювати приватні фермерські мережі дозволяє фермерам підтримувати безпечні, виділені канали зв'язку, незалежні від загальнодоступних мереж, тим самим підвищуючи безпеку даних та контроль над критично важливою сільськогосподарською інформацією. Його масштабованість та низьке енергоспоживання роблять LoRaWAN ідеальним вибором для впровадження великомасштабних, енергоефективних систем моніторингу на різних сільськогосподарських територіях.

Таблиця 1.4.

Технічне порівняння технологій передавання даних

Параметр	NB-IoT	LTE-M	LoRaWAN	IEEE 802.15.4	Wi-Fi	Ethernet
Робочий діапазон частот	700–900 MHz	700–900 MHz	433/868/915 MHz	2.4 GHz, 868 MHz	2.4/5/6 GHz	Провідна технологія
Метод модуляції	BPSK/QPSK	QPSK	CSS (Chirp Spread Spectrum)	O-QPSK/BPSK	OFDM	Не застосовується
Ширина смуги	≈180 kHz	1.4 MHz	125–500 kHz	2 MHz	20–160 MHz	До 10 Gbps і більше
Чутливість приймача	≈ –135 dBm	≈ –129 dBm	≈ –137 dBm	≈ –100 dBm	≈ –90 dBm	Не актуально
Потужність передавача	20–23 dBm	20–23 dBm	14–20 dBm	0–20 dBm	До 30 dBm	Не актуально
Максимальна швидкість	≈ 250 kbps	≈ 1 Mbps	≈ 50 kbps	250 kbps	До 9.6 Gbps (Wi-Fi 6E)	1–10 Gbps+
Тип топології мережі	Star (cellular)	Star (cellular)	Star	Star/Mesh	Star	Ієрархічна (провідна)
Тип автентифікації	SIM/eSIM	SIM/eSIM	AES-128	AES-128	WPA2/WPA3	802.1X

Типові затримки	1–10 сек	50–100 мс	1–10 сек	10–50 мс	1–10 мс	<1 мс

IEEE 802.15.4 – це широко прийнятий стандарт для створення малопотужних сенсорних мереж з низькою пропускною здатністю в сільськогосподарських умовах, особливо підходить для розподілених сенсорних та mesh-мереж фермерських господарств. Його конструкція надає пріоритет енергоефективності, дозволяючи датчикам та пристроям працювати протягом тривалого часу від невеликих батарей, що має вирішальне значення для великомасштабного або віддаленого розгортання. Низька швидкість передачі даних, характерна для IEEE 802.15.4, зазвичай близько 250 кбіт/с, забезпечує мінімальне енергоспоживання, одночасно підтримуючи важливі дані датчиків. збір даних, таких як вологість ґрунту, температура та рівень вологості. Протокол підтримує кілька стеків вищого рівня, зокрема Zigbee та Thread, які забезпечують безпечний та надійний зв'язок між численними пристроями в сітчастій топології. Ці сітчасті мережі дозволяють датчикам взаємодіяти один з одним безпосередньо або через проміжні вузли, тим самим розширюючи покриття на великі поля та складні схеми ферм. Сітчаста архітектура підвищує стійкість мережі; якщо один вузол вийде з ладу або заблокується, дані можуть бути перенаправлені через альтернативні шляхи, забезпечуючи безперебійний моніторинг. Такі розподілені сенсорні мережі життєво важливі для точного землеробства, дозволяючи фермерам збирати комплексні дані про навколишнє середовище та швидко реагувати на зміни мікроклімату або стану врожаю. Здатність організовувати ці мережі децентралізованим та самовідновлювальним способом робить IEEE 802.15.4 незамінною технологією для масштабованих, енергоефективних та гнучких систем моніторингу фермерських господарств.

Технологія Wi-Fi пропонує високошвидкісне рішення для локального доступу, яке доповнює ширшу екосистему Інтернету речей у сільськогосподарських умовах, особливо там, де необхідна висока пропускна здатність даних. Її здатність підтримувати високу пропускну здатність робить її ідеальною для застосувань, що

включають потокове відео в режимі реального часу, складні системи керування та передачу великих обсягів даних у теплицях, складах та сільськогосподарських будівлях. Найновіші досягнення, такі як Wi-Fi 6 (802.11ax), значно підвищують ефективність мережі завдяки таким технологіям, як OFDMA (множинний доступ з ортогональним поділом частот), що дозволяє кільком пристроям передавати дані одночасно, зменшуючи затримку та збільшуючи загальну ємність мережі. Це досягнення особливо корисне в середовищах, де одночасно працюють численні датчики, камери та пристрої автоматизації. Наприклад, у теплицях Wi-Fi забезпечує відеомоніторинг високої чіткості за станом рослин, автоматизований кліматконтроль та управління зрошенням. У сховищах він підтримує відстеження запасів у режимі реального часу та керування обладнанням. Високошвидкісні можливості Wi-Fi 6 з низькою затримкою дозволяють цим системам безперебійно функціонувати, забезпечуючи надійне підключення для завдань з ресурсомісткою пропускною здатністю, що є вирішальним для сучасного точного землеробства. Його простота розгортання та сумісність з існуючою мережевою інфраструктурою роблять Wi-Fi універсальним вибором для локалізованого високошвидкісного зв'язку в сільськогосподарських операціях.

Ethernet залишається основою дротової комунікаційної інфраструктури в критичних сегментах сільськогосподарських систем, пропонуючи неперевершену стабільність та мінімальну затримку, необхідну для застосувань з високою швидкістю передачі даних. Його надійність має вирішальне значення для центрів обробки даних, центрів керування та інших централізованих вузлів, де обов'язкова стабільна високошвидкісна передача даних. Властива Ethernet стабільність забезпечує безперебійну роботу життєво важливих систем, таких як автоматизовані контролери зрошення, блоки контролю навколишнього середовища та сервери агрегації даних. Крім того, технологія живлення через Ethernet (PoE) спрощує інфраструктуру, забезпечуючи одночасну передачу даних та електроенергії через один кабель, що особливо вигідно при живленні камер, датчиків та вузлів збору даних у полі або в сільськогосподарських будівлях. Використання Ethernet у таких критичних сегментах гарантує зв'язок з низькою затримкою, підтримуючи

прийняття рішень та керування в режимі реального часу, що є важливим для підтримки оптимальних умов вирощування врожаю та операційної ефективності. Крім того, надійність та функції безпеки Ethernet роблять його придатним для завдань з інтенсивним використанням даних, таких як передача зображень високої роздільної здатності з дронових досліджень або потокове відео в реальному часі зі станцій моніторингу. Його розгортання в центрах обробки даних та сільськогосподарських вузлах виступає основною інфраструктурою, яка підтримує всю екосистему цифрового землеробства, забезпечуючи надійне, безпечне та високопродуктивне з'єднання між усіма критично важливими компонентами.

Під час вибору найбільш підходящої телекомунікаційної технології для сільськогосподарських систем необхідно враховувати кілька критичних критеріїв, щоб забезпечити оптимальну продуктивність та стійкість. По-перше, дальність дії та можливості проникнення сигналу технології мають першочергове значення; Великі ферми та складні ландшафти вимагають таких рішень, як NB-IoT та LoRaWAN, які можуть надійно передавати дані на кілометри та долати перешкоди, такі як густа рослинність або споруди. Технології з обмеженим радіусом дії або поганим проникненням вимагатимуть розгалуженої інфраструктури або повторних установок, що збільшуватиме витрати та складність. По-друге, споживання енергії пристроєм та час роботи датчиків є важливими факторами, особливо для дистанційних або батарейних датчиків, розгорнутих на великих полях. Технології з низьким енергоспоживанням, такі як LoRaWAN та IEEE 802.15.4, мають тут переваги, оскільки вони сприяють тривалій роботі з мінімальним обслуговуванням, зменшуючи потребу в частій заміні батарей та перебоях у роботі. Зрештою, вимоги до пропускної здатності та затримки залежать від конкретних сільськогосподарських процеси. Наприклад, відеомоніторинг у режимі реального часу та автономне керування транспортними засобами вимагають високої пропускної здатності та низької затримки — сфер, де Wi-Fi та LTE-M переважають, — тоді як датчики навколишнього середовища, що передають періодичні дані, можуть покладатися на рішення з низькою пропускною здатністю, такі як NB-IoT або LoRaWAN. Балансування цих критеріїв відповідно до конкретних потреб ферми

гарантує, що обрана технологія підтримуватиме ефективні, надійні та економічно вигідні сільськогосподарські операції.

Ландшафт технологій передачі даних у сільському господарстві різноманітний, і кожен стандарт пропонує унікальні переваги, адаптовані до різних операційних потреб. NB-IoT виділяється масштабним моніторингом навколишнього середовища завдяки широкому діапазону, глибокому проникненню сигналу та енергоефективній роботі, що робить його придатним для великих ферм, які прагнуть довгострокового розгортання датчиків. LTE-M доповнює це, сприяючи мобільним та динамічним додаткам, підтримуючи зв'язок у режимі реального часу для рухомої техніки та автономних транспортних засобів з низькою затримкою та вищою швидкістю передачі даних. LoRaWAN, завдяки своїй енергоефективності та стійкості до перешкод, забезпечує масштабоване рішення для розгалужених сенсорних мереж з низьким енергоспоживанням та зв'язку на приватних фермах. Тим часом, IEEE 802.15.4 дозволяє створювати стійкі mesh-мережі для локального розгортання датчиків, підтримуючи детальний моніторинг навколишнього середовища на розподілених ділянках ферми. Wi-Fi та Ethernet відіграють вирішальну роль у високошвидкісному, високопродуктивному локальному та критичному системному зв'язку, забезпечуючи відеоспостереження в режимі реального часу, системи управління та стабільну передачу даних у сільськогосподарських будівлях та центрах обробки даних. Вибір відповідної технології залежить від конкретних критеріїв, таких як потреби в покритті, споживання енергії та вимоги до даних, що підкреслює важливість індивідуального, інтегрованого підходу до цифрового сільського господарства. Оскільки технології продовжують розвиватися, стратегічне впровадження цих різноманітних стандартів зв'язку матиме важливе значення для просування сталих, ефективних та інноваційних практик ведення сільського господарства в усьому світі.

1.4. Вимоги до телекомунікаційних мереж розумних ферм: надійність, масштабованість, енергоефективність, безпека

Еволюція сільськогосподарських практик у розумне землеробство значною мірою залежить від надійних телекомунікаційних мереж, які підтримують широкий спектр датчиків, пристроїв та блоків обробки даних. Зі зростанням технологічної інтеграції ферм, продуктивність та стійкість цих мереж стають критичними факторами для забезпечення операційної ефективності, точності даних та загальної стійкості. Щоб відповідати унікальним вимогам точного землеробства, телекомунікаційні мережі повинні втілювати певні фундаментальні якості: надійність, масштабованість, енергоефективність та безпеку. Серед них надійність, масштабованість та енергоефективність відіграють ключову роль у підтримці безперервної, адаптивної та стійкої роботи фермерських господарств. У цьому есе досліджуються ці ключові вимоги, підкреслюючи їхню важливість шляхом детального розгляду їхніх специфічних характеристик та проблем у контексті телекомунікаційних мереж розумних ферм.

Надійність є наріжним каменем вимоги до телекомунікаційних мереж у розумному сільському господарстві, оскільки вона безпосередньо впливає на узгодженість та цілісність критично важливих сільськогосподарських даних. Ферми часто розташовані у віддалених або суворих умовах, де зовнішні впливи, такі як погодні умови, фізичні перешкоди та електромагнітні перешкоди, можуть порушити передачу сигналу. Тому мережа повинна бути стійкою до таких збоїв, використовуючи відмовостійкі конструкції та надійні апаратні компоненти, здатні витримувати вплив навколишнього середовища. Крім того, мережа повинна підтримувати роботу навіть тоді, коли певні вузли або сегменти зазнають часткової деградації, гарантуючи, що збір та передача даних не будуть повністю порушені. Це включає впровадження таких стратегій, як резервні шляхи та динамічна перемаршрутизація для підтримки зв'язку.

Таблиця 1.4

Вимоги до телекомунікаційних мереж розумних ферм

Параметр	Характеристика
Надійність	Стійкість до збоїв, резервування каналів, мінімізація втрат даних.
Масштабованість	Можливість розширення мережі та підключення додаткових пристроїв.
Енергоефективність	Робота сенсорів у режимах низького споживання енергії та тривала автономність.
Безпека	Захист каналів зв’язку, аутентифікація пристроїв, контроль доступу.
Пропускна здатність і затримки	Підтримка потоків у реальному часі та низьколатентних процесів.
Стійкість до умов середовища	Працездатність при рельєфних перешкодах, вологості, температурних коливаннях.
Інтеграційна сумісність	Підтримка різнорідних протоколів та взаємодія з ERP/SCADA.

Наприклад, резервування каналів дозволяє використовувати кілька шляхів зв'язку, щоб запобігти втраті даних у разі відмови одного каналу, тим самим мінімізуючи ризик втрати або затримки критично важливої інформації. Крім того, мінімізація втрати даних є життєво важливою для прийняття рішень у режимі реального часу; отже, використання протоколів виправлення помилок та методів буферизації гарантує збереження цілісності даних навіть за несприятливих умов. Ці заходи разом підвищують надійність мережі, що є важливим для таких видів діяльності, як контроль зрошення, боротьба зі шкідниками та моніторинг сільськогосподарських культур, де своєчасні та точні дані мають вирішальне значення. Масштабованість є не менш важливою характеристикою, яка дозволяє телекомунікаційним мережам розумних ферм зростати та адаптуватися разом із

розширенням сільськогосподарських операцій. Зі збільшенням розмірів та складності ферм кількість датчиків, пристроїв Інтернету речей та джерел даних зростає, що вимагає мережевої інфраструктури, здатної враховувати це зростання без шкоди для продуктивності. Це передбачає проектування мереж, які підтримують безперебійне підключення тисяч датчиків, розподілених по великих полях, тваринницьких зонах та сховищах. Вертикальна масштабованість передбачає модернізацію існуючого обладнання та збільшення пропускної здатності для обробки більших навантажень даних, тоді як горизонтальна масштабованість зосереджена на додаванні нових вузлів та пристроїв для розширення покриття. Наприклад, ферма, спочатку оснащена датчиками вологості ґрунту, може пізніше включати метеостанції, системи зв'язку з дронами та автономну техніку, всі з яких потребують мережевої інтеграції. Конфігурація повинна бути адаптивною, що дозволяє реорганізацію або розширення топології мережі в міру розвитку ферми, без необхідності повного перебудови. Адаптивна архітектура мережі гарантує, що зі збільшенням обсягу операцій телекомунікаційна система залишатиметься ефективною, чутливою та здатною підтримувати передачу даних у режимі реального часу, методи точного землеробства та системи автоматизації, необхідні для сучасного сільського господарства. Енергоефективність є критично важливим фактором при розгортанні телекомунікаційних мереж у межах розумних ферм, особливо враховуючи часто віддалені та обмежені в потужності середовища, в яких ці мережі працюють. Багато пристроїв, таких як датчики та комунікаційні модулі, розроблені для роботи від автономних джерел живлення, таких як батареї або системи відновлюваної енергії (сонячні панелі), що вимагає оптимізованого споживання енергії для функціонування протягом тривалого часу. Впровадження енергоефективних протоколів та апаратних компонентів зменшує споживання енергії, тим самим подовжуючи термін служби пристроїв та мінімізуючи витрати на обслуговування. Наприклад, оптимізація протоколів контролю доступу до середовища (MAC) та використання режимів сну можуть значно знизити споживання енергії, дозволяючи пристроям переходити в стани низького енергоспоживання під час періодів

бездіяльності. Крім того, зниження частоти передачі – шляхом використання агрегації даних або звітності на основі подій – може підтримувати якість моніторингу, одночасно зберігаючи енергію. Наприклад, датчик вологості ґрунту може передавати дані лише тоді, коли виявляються значні зміни, а не постійно, таким чином економлячи енергію без шкоди для точності рішень щодо зрошення. Ці заходи гарантують, що елементи мережі підтримують довгострокову автономну роботу, що дозволяє здійснювати безперервний моніторинг та керування без частої заміни батарей або залежності від зовнішнього живлення, що є вирішальним для практичної та економічної життєздатності систем розумного землеробства.

Безпека є фундаментальною вимогою для телекомунікаційних мереж у розумному сільському господарстві, оскільки зростаючий обсяг і чутливість даних, що передаються через ці системи, роблять їх привабливими цілями для кіберзагроз. Захист каналів зв'язку від перехоплення та несанкціонованої модифікації є важливим для захисту власницьких сільськогосподарських даних, інформації про управління активами та операційних команд. Для захисту даних під час передачі слід використовувати протоколи шифрування, такі як AES або TLS, що гарантує, що зловмисники не зможуть підслуховувати або підробляти інформацію, що обмінюється. Крім того, автентифікація пристроїв та механізми суворого контролю доступу... необхідно для запобігання підключенню неавторизованих пристроїв до мережі, що може призвести до витоків даних або зловмисного втручання. Такі методи, як цифрові сертифікати, багатофакторна автентифікація та контроль доступу на основі ролей, гарантують, що лише перевірені та авторизовані суб'єкти можуть отримати доступ до конфіденційних даних або функцій керування. Крім того, захист хмарних платформ та шлюзів від кіберзагроз є критично важливим, оскільки вони часто є центральними вузлами, що керують зберіганням, обробкою та дистанційним керуванням даних. Впровадження брандмауерів, систем виявлення вторгнень та регулярних оновлень безпеки допомагає захистити ці критично важливі компоненти від шкідливого програмного забезпечення, спроб злому та інших кібератак. Забезпечення надійних заходів кібербезпеки на всіх рівнях мережевої інфраструктури є життєво важливим для підтримки цілісності,

конфіденційності та доступності даних та операційного контролю в середовищі розумної ферми.

Пропускна здатність та затримка є ключовими параметрами, що визначають ефективність та швидкість реагування телекомунікаційних мереж у розумному сільському господарстві. Висока пропускна здатність необхідна для підтримки передачі великих потоків даних, включаючи відео високої чіткості з дронів або камер спостереження, а також телеметричні дані з численних датчиків, розподілених по всій фермі. Ці потоки в режимі реального часу життєво важливі для своєчасного прийняття рішень, моніторингу здоров'я врожаю, поведінки худоби та умов навколишнього середовища. Не менш важливим є підтримка низької затримки в мережі, щоб системи керування могли працювати з мінімальною затримкою, що є критично важливим для автоматизованої техніки, систем зрошення та інших технологій точного землеробства. Будь-яка значна затримка може призвести до втрачених можливостей для втручання або неефективності роботи. Для досягнення цього використання спектру має бути оптимізовано за допомогою ефективних схем модуляції та методів динамічного балансування навантаження, які рівномірно розподіляють мережевий трафік, запобігаючи перевантаженням та забезпечуючи стабільну продуктивність. Алгоритми балансування навантаження можуть адаптуватися до коливань навантаження даних, розподіляючи пропускну здатність там, де це найбільше потрібно, тим самим підтримуючи безперебійний зв'язок у режимі реального часу навіть у періоди пікової активності. Ці заходи разом гарантують, що передача даних залишається швидкою та надійною, підтримуючи високі вимоги до управління фермерським господарством та автоматизації в режимі реального часу.

Стійкість до складних сільськогосподарських умов є життєво важливим аспектом проектування телекомунікаційних мереж, оскільки ферми часто розташовані у фізично складних середовищах, які можуть погіршити якість сигналу та функціональність пристроїв. Рельєф місцевості, густа рослинність та такі споруди, як комори та силоси, можуть перешкоджати радіосигналам, спричиняючи ослаблення або повну втрату зв'язку. Щоб вирішити ці проблеми,

мережеві компоненти повинні бути надійними та здатними ефективно працювати в різних фізичних середовищах, включаючи розгортання ретрансляторів або ретрансляційних станцій для обходу перешкод. Коливання температури — від екстремальної спеки до морозу — та високий рівень вологості можуть негативно впливати на електронні компоненти, призводячи до збоїв або погіршення продуктивності. Тому обладнання, що використовується в таких умовах, має бути промислового класу з відповідними рішеннями для герметизації, охолодження та нагрівання, щоб витримувати вплив навколишнього середовища. Зовнішні електромагнітні впливи, такі як лінії електропередач, радіопередачі або блискавки, також можуть створювати перешкоди, порушуючи передачу даних. Методи екранування, управління частотою та стратегії зменшення перешкод є важливими для підтримки стабільних каналів зв'язку в цих умовах. Проектування стійких мереж, які можуть витримувати та адаптуватися до цих факторів навколишнього середовища, забезпечує безперервну роботу, що має вирішальне значення для підтримки надійності та ефективності систем інтелектуального землеробства в реальних умовах.

Інтеграція є фундаментальною вимогою для ефективної роботи телекомунікаційних мереж інтелектуальних ферм, оскільки вона забезпечує безперебійну координацію між різними системами, пристроями та платформами управління. Сумісність з існуючими сільськогосподарськими системами, такими як протоколи ERP (планування ресурсів підприємства) та SCADA (система диспетчерського контролю та збору даних), є важливою для консолідації потоків даних, оптимізації робочих процесів та забезпечення комплексного управління фермерським господарством. Ці протоколи сприяють стандартизованому обміну даними, дозволяючи різнорідним системам — від контролерів зрошення до кліматичних датчиків — ефективно взаємодіяти в єдиній структурі. Більше того, підтримка різнорідних комунікаційних технологій, таких як Wi-Fi, LTE/5G, LPWAN (низькоенергетичні мережі широкого радіусу дії) та Bluetooth — в єдиній архітектурі підвищує гнучкість та стійкість. Різні пристрої та датчики можуть працювати на різних технологіях залежно від їхніх обмежень потужності, вимог до

дальності та умов навколишнього середовища; таким чином, багатотехнологічний підхід забезпечує оптимізоване підключення, адаптоване до конкретних застосувань. Крім того, мережа повинна бути адаптованою до майбутніх технологічних досягнень, забезпечуючи прості точки інтеграції для нових модулів автоматизації та датчиків. Така модульність дозволяє фермам поступово модернізувати свою інфраструктуру, впроваджувати нові пристрої Інтернету речей та розширювати можливості автоматизації без капітального ремонту всієї мережі. Така гнучкість гарантує, що телекомунікаційна система залишається масштабованою, перспективною та здатною підтримувати інноваційні сільськогосподарські практики в міру їх розвитку.

Розробка надійних телекомунікаційних мереж для розумних ферм залежить від виконання кількох критично важливих вимог. Надійність має першорядне значення, забезпечуючи безперервну роботу, незважаючи на екологічні проблеми та відмови компонентів, завдяки резервуванню та відмовостійким конструкціям. Масштабованість дозволяє розширювати підключені пристрої та адаптувати мережу в міру зростання сільськогосподарських операцій, підтримуючи як вертикальне, так і горизонтальне зростання. Енергоефективність забезпечує стійку довгострокову роботу пристроїв у віддалених або обмежених енергоспоживання середовищах завдяки оптимізованим протоколам та стратегіям управління живленням. Безпека захищає конфіденційні дані та системи управління від кіберзагроз, впроваджуючи шифрування, автентифікацію та заходи захисту мережі. Крім того, підтримка високої пропускної здатності та низької затримки є життєво важливою для передачі та управління даними в режимі реального часу, що сприяє швидкій автоматизації та моніторингу. Стійкість до екологічних труднощів гарантує стійкість мережі до рельєфу місцевості, погодних умов та електромагнітних перешкод, підтримуючи стабільне з'єднання у складних умовах. Нарешті, можливості інтеграції дозволяють безперешкодно інтегрувати різноманітні системи та майбутні технології, забезпечуючи адаптивність та довговічність мережі. У сукупності ці вимоги формують основу для ефективних, безпечних та стійких телекомунікаційних мереж, які є важливими для успіху

розумного сільського господарства. Оскільки сільськогосподарські технології продовжують розвиватися, вирішення цих ключових аспектів залишатиметься вирішальним для оптимізації продуктивності, управління ресурсами та охорони навколишнього середовища в цифрову епоху.