

УДК 621.324-007.5

*О. І. Дребот,*

*д. е. н., професор, академік НААН,*

*Інститут агроекології і природокористування НААН*

*ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-2681-1074>*

*В. О. Герасимчук,*

*магістр, Національний технічний університет України "Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського"*

*ORCID ID: <https://orcid.org/0009-0002-2894-2799>*

*П. П. Мельник,*

*д. е. н., с. н. с., Інститут агроекології та природокористування НААН*

*ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0002-6083-677X>*

*Н. В. Зіновчук,*

*д. е. н., професор, Інститут агроекології і природокористування НААН*

*ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0002-3221-8173>*

*Н. В. Палапа,*

*д. с-г. н., професор, Інститут агроекології і природокористування НААН*

*ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0003-3748-6414>*

DOI: 10.32702/2306-6814.2025.8.63

# ІНТЕЛЕКТУАЛЬНІ РОЗПОДІЛЕНІ СИСТЕМИ АГРОМОНІТОРИНГУ З ВИКОРИСТАННЯМ ШТУЧНОГО ІНТЕЛЕКТУ ТА ІНТЕРНЕТУ РЕЧЕЙ

O. Drebot,

Doctor of Economic Sciences, Professor, Academician of NAAS,

Institute of Agroecology and Environmental Management of NAAS

V. Herasymchuk,

Master, National Technical University of Ukraine "Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute"

P. Melnyk,

Doctor of Economics Sciences, Senior Research Fellow, Institute of Agroecology and Environmental Management of NAAS,

N. Zinovchuk,

Doctor of Economic Sciences, Professor, Institute of Agroecology and Environmental Management of NAAS

N. Palapa,

Doctor of Agricultural Sciences, Professor, Institute of Agroecology and Environmental Management of NAAS

## INTELLIGENT DISTRIBUTED AGROMONITORING SYSTEMS USING ARTIFICIAL INTELLIGENCE AND THE INTERNET OF THINGS

**У статті розглянуто питання підвищення ефективності та достовірності функціонування інтелектуальних систем агромоніторингу з використанням штучного інтелекту та інтернету речей. Розглянуто доцільність реалізувати агромоніторинг параметрів ґрунту на основі методів експрес-аналізу із застосуванням портативних аналізаторів ґрунту DS LOGGER 500, які дозволяють вимірювати температуру ґрунту, вологість ґрунту, щільність, водневий показник в режимі експрес-аналізу (без взяття проб). Впровадження інтелектуальної системи агромоніторингу ста-**

нугрунтів має забезпечити основу для прийняття рішень щодо автоматичного моніторингу, автоматичного контролю, інформатизації та наукового управління сільськогосподарським виробництвом та сприяти розвитку сільськогосподарського виробництва в напрямку інтелектуального (розумного) та точного.

Розглянуто алгоритм роботи системи агромоніторингу на основі методу екстраполяції з використанням фреймової моделі подання знань. Проаналізовано досвід закордонних практиків агромоніторингу з використання інтернету речей та його ключових компонентів: платформи IoT, сенсорні мережі (WSN) та структура IoT.

*The article deals with the issue of improving the efficiency and reliability of intelligent agromonitoring systems using artificial intelligence and the Internet of Things. The expediency of implementing agro-monitoring of soil parameters based on express analysis methods using portable soil analyzers DS LOGGER 500, which allow measuring soil temperature, soil moisture, density, hydrogen index in express analysis mode (without sampling), is considered. The implementation of an intelligent agromonitoring system for soil condition should provide a basis for decision-making on automatic monitoring, control, informatization and scientific management of agricultural production and to promote the development of agricultural production towards intelligent (smart) and precise production.*

*The algorithm of the agromonitoring system based on the method of extrapolation using a frame model of knowledge representation is considered. The experience of foreign agromonitoring practitioners in using the Internet of Things and its key components (IoT platforms, sensor networks (WSN) and IoT structure) is analyzed.*

*The implementation of intelligent agromonitoring systems using artificial intelligence (AI) and the Internet of Things (IoT) significantly increases the efficiency of agricultural resource management. The use of portable analyzers, such as the DS LOGGER 500, allows you to obtain accurate data on the state of the soil in real time without laborious sampling. This provides operational analysis of key parameters (moisture, pH, temperature, etc.), which is critical for making timely agrotechnical decisions, such as watering or fertilizing.*

*The use of a frame model of knowledge representation and the extrapolation method in the system algorithms allows predicting changes in soil conditions based on historical data and current measurements. This reduces the likelihood of errors and increases the reliability of recommendations. The experience of foreign countries shows that IoT platforms and wireless sensor networks (WSN) provide scalability and flexibility of systems, which is especially important for large farms with different soil types and climatic conditions.*

*Ключові слова: інтернет речей, експрес аналіз, захист інформації, агромоніторинг, розподілена інформаційно-вимірювальна система, моделювання, прогнозування.*

*Key words: Internet of Things, express analysis, information protection, agromonitoring, distributed information and measurement system, modeling, forecasting.*

## ПОСТАНОВКА ПРОБЛЕМИ

Зміна клімату, деградація ґрунтів та обмеженість земельних і водних ресурсів поставили під сумнів здатність забезпечувати продовольством швидко зростаюче населення. Щоб розв'язати цю проблему, сучасні сільськогосподарські системи спираються на нові технології, такі як Інтернет речей (IoT), аби підвищити продуктивність сільського господарства та ефективність використання ресурсів. Незважаючи на зростаючий інтерес аграріїв до інтеграції пристроїв з підтримкою IoT у виробництво, на сьогоднішній день такі технології не набули широкого поширення серед виробників через занепокоєння щодо ціни [1].

Результати вчасного і якісного агромоніторингу є важливою і необхідною складовою інформаційного забезпечення сучасного сільськогосподарського виробництва. Планування, підготовка та реалізація завдань агромоніторингу є складною багатофакторною проблемою, під час розв'язання якої на перше місце виходить необхідність забезпечення високих метрологічних характеристик агромоніторингу, технологічної доскона-

лості, надійності та економічних характеристик агромоніторингу.

Розробка недорогої інтелектуальної системи агромоніторингу стану ґрунтів є важливим показником рівня розвитку модернізації сільського господарства. Вона допоможе, насамперед, підвищити якість та достовірність моніторингу в еколого-економічному управлінні, який являє собою системне спостереження за поточними процесами стосовно розвитку і змін у природокористуванні проблемних ситуацій, оцінки та прогнозу використання, відтворення й збереження природних ресурсів, а також прогнозування стану навколишнього природного середовища.

## АНАЛІЗ ОСТАННІХ ДОСЛІДЖЕНЬ І ПУБЛІКАЦІЙ

Системи розумного сільського господарства з'явилися в середині 1980-х років, коли в Японії, Європі та США розпочалися дослідження автоматизованих систем збору фруктів. З того часу було досягнуто вражаючих успіхів у розробці систем для використання в сучасному сільському господарстві. На сьогоднішній день сільськогосподарські системи використовують різні технології, такі як точне землеробство, гідропоніка, аквапоніка, роботи, датчики температури і вологості, аерофотозображення, GPS-технології та вертикальне землеробство. Найпопулярніші застосування штучного інтелекту в сільському господарстві можна поділити на три основні категорії: сільськогосподарські роботи, предиктивна аналітика та моніторинг сільськогосподарських культур і ґрунтів. Комп'ютерний зір і алгоритми глибокого навчання використовуються для обробки даних, зібраних дронами та/або програмними технологіями для моніторингу посівів. Фермери використовують технології щодня. Автоматизовані дрони вже здійснюють моніторинг полів та збирають дані про посіви. Для виконання польових робіт розробляються сільськогосподарські роботи. Роботи успішно висаджують, доглядають та збирають врожай. Метод управління сільським господарством, що підтримується технологіями, відстежує, аналізує та оцінює потреби конкретних полів і культур. Основна увага у світі приділяється робототехніці, яка включає в себе датчики, аерофотознімки і складні місцеві прогнози погоди, а також великі дані і розширені аналітичні можливості. Це призводить до зменшення впливу на навколишнє середовище, фінансової економії та оптимізації використання добрив. Використання даних та інформаційних технологій для оптимізації складних сільськогосподарських систем відоме як "розумне землеробство" [2].

Міжнародне товариство точного землеробства визначає розумне землеробство як "стратегію управління, яка збирає, обробляє та аналізує часові, просторові та індивідуальні дані і поєднує їх з іншою інформацією для підтримки управлінських рішень відповідно до передбачуваної мінливості для підвищення ефективності використання ресурсів, продуктивності, якості, прибутковості сільськогосподарського виробництва". Розумне сільське господарство — це сільське господарство з використанням програмного забезпечення, датчиків, автоматизації та технологій обробки даних.

Ключовими компонентами Інтернету речей є платформи IoT, сенсорні мережі (WSN) та структура IoT. Платформа IoT може бути визначена як локальний програмний пакет або хмарний сервіс (платформа IoT як послуга [PaaS]), який здійснює і може керувати різними типами кінцевих точок, як правило, за допомогою додатків, встановлених на платформі. Платформи IoT надають пропрієтарний або відкритий набір програм для управління пристроями та даними в системі IoT. Наразі у світі доступні різні платформи IoT, як пропрієтарні, так і з відкритим кодом, для обробки даних з різних джерел за допомогою різних пристроїв. Вони виконують такі функції, як прийом, фільтрація, агрегація, зберігання та обчислення даних. Ці платформи підтримують певні мікроконтролери, приймачі, пам'ять даних і розширення, а також програмування [1].

Найбільш відомі сучасні IoT платформи для сільського господарства:

FarmBot — це платформа для точного землеробства з відкритим кодом, яка складається з сільськогосподарської машини, програмного забезпечення та сховища сільськогосподарських даних. Три основні компоненти FarmBot включають механізми для посадки насіння, систему доставки поживних речовин та універсальну систему кріплення інструментів. FarmBot зазвичай використовується в міському сільському господарстві для моніторингу параметрів росту рослин і прогнозування відповідної дати збору врожаю в майбутньому.

Raspberry Pi — це невеликий, недорогий комп'ютерний чіп, який можна використовувати з монітором, мишкою та клавіатурою. Базова структура Raspberry Pi включає оперативну пам'ять (ОЗП), процесор, порти USB, універсальні контакти вводу/виводу, порт Ethernet, повноцінний порт HDMI, інтерфейс відеореєстрації, інтерфейс дисплея та слот для карт пам'яті micro SD. Raspberry Pi використовується в широкому спектрі застосувань в сільськогосподарських системах. Зростаюча доступність Raspberry Pi з високою обчислювальною потужністю уможливила вирішення багатьох завдань дистанційного зондування в сільському господарстві, включаючи візуалізацію посівів, визначення родючості ґрунту.

Node MicroController Unit (NodeMCU) — це IoT-платформа з відкритим вихідним кодом з мікроконтролером ESP8266 і системою Wi-Fi на кристалі (SoC) від Expressif Systems, а також апаратним забезпеченням, яке працює на модулі ESP-12. Ця прошивка працює на мові сценаріїв Lua. Вона функціонує так само, як Raspberry Pi, і може бути підключена до різних датчиків для моніторингу вологості ґрунту, відносної вологості та повітря в реальному часі [1].

## ОСНОВНІ РЕЗУЛЬТАТИ ОБГРУНТУВАННЯ

Агромоніторинг є важливою складовою системи управління якістю та ефективністю агровиробництва [3, 4]. Традиційні технології реалізації агромоніторингу, які передбачають відбір проб ґрунту, транспортування цих проб до стаціонарної лабораторії із наступним дослідженням параметрів ґрунту сьогодні не є ефективним,

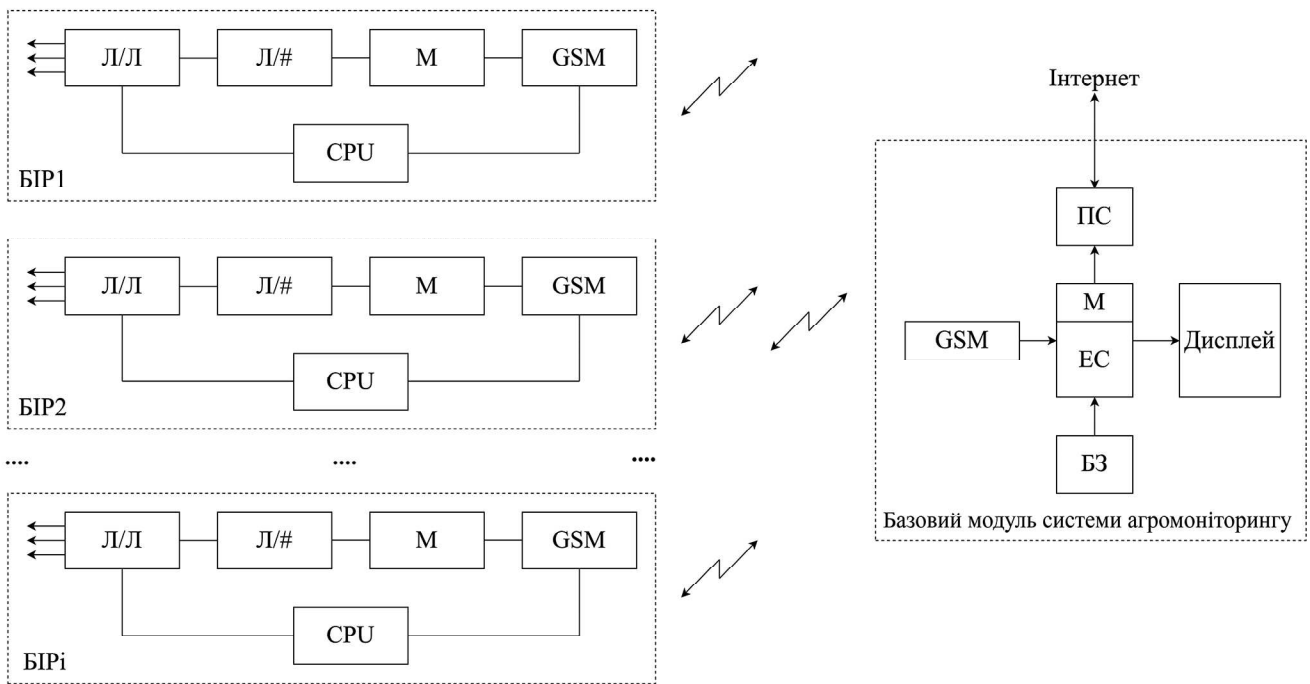


Рис. 1. Структура системи агромоніторингу

оскільки вимагають значних матеріальних, інтелектуальних та часових витрат.

Як відомо, повний цикл агромоніторингу вимагає:

- Планування процесів реалізації агромоніторингу.

- Вимірювання необхідної сукупності параметрів ресурсного забезпечення агровиробництва (перш за все ґрунту).

- Аналіз отриманих результатів вимірювання і спостережень.

- Прогнозування можливих змін стану агроресурсного забезпечення в короткостроковій перспективі.

Порівнюючи біосферний (екологічний) моніторинг і агромоніторинг, можна констатувати, що агромоніторинг відіграє важливу роль на локальному і регіональному рівнях, коли біосферний моніторинг є більш результативним на глобальному і регіональному рівнях.

Сьогодні керівнику агропідприємства для ухвалення рішень недостатньо статистичних даних за попередні періоди та його особистого досвіду. Йому необхідно "зазирнути" у майбутнє, тобто мати у своєму розпорядженні прогнозовану інформацію про можливі зміни та динаміку змін стану усіх видів агроресурсного забезпечення. Саме таку інформацію можливо отримати на основі системного використання результатів агромоніторингу, здобутих на локальному і на регіональному рівнях з подальшим аналізом і прогнозуванням можливих змін основних складових ресурсного забезпечення сільгоспвиробництва [5].

Прогнозування змін на локальному рівні буде мати вищу достовірність результатів, якщо для такого прогнозування будуть братися до уваги результати агромоніторингу, отриманих як на локальному рівні, так і на регіональному.

Інформаційно-метрологічне і технічне забезпечення сучасного ефективного агромоніторингу — це склад-

ний системний ресурс, вартість якого є все ще високою. Одним із шляхів скорочення витрат на агромоніторинг може бути використання розподілених інтелектуальних систем агромоніторингу з використанням Інтернет речей. (IoT). [5].

У широкому розумінні Інтернет речей — це концепція розподіленої інформаційної мережі, яка складається із сукупності фізично відокремлених, але інформаційно взаємопов'язаних фізичних пристроїв, які мають у своєму складі вбудовані сенсори (давачі), а також включають в себе програмне забезпечення, що дозволяє здійснювати обмін даними між фізичним світом (довкіллям) і комп'ютерними системами з використанням стандартних протоколів зв'язку. Прикладами використання IoT є використання бездротових польових датчиків для покращення відстеження тварин; супутники, безпілотні літальні апарати (БПЛА) та нові підходи до дистанційного зондування (наприклад, PlanetLab); оцінка висоти рослин, оцінка біомаси, виявлення бур'янів, управління ґрунтовим азотом, виявлення хвороб сільськогосподарських культур, оцінка індексу листкової поверхні, вимірювання вологості повітря і ґрунту, а також їхньої температури, електропровідності ґрунту, водневого показника Ph, концентрації CO<sub>2</sub> та інших.

За прогнозами аналітиків у 2025 році на Землі буде близько 50 млрд різноманітних сенсорів, які, безумовно, внесуть багато змін у всі види діяльності людини, і технологія IoT набуватиме все більш широкого застосування. У завданнях агромоніторингу IoT має ряд переваг, а саме — можливість спостереження за станом ресурсного забезпечення та вимірювання його основних параметрів в режимі on-line і, практично, безперервно. Це сприятиме оптимізації рішень щодо практики управління сільським господарством, перехід його на рівень точного та розумного сільськогосподарства.

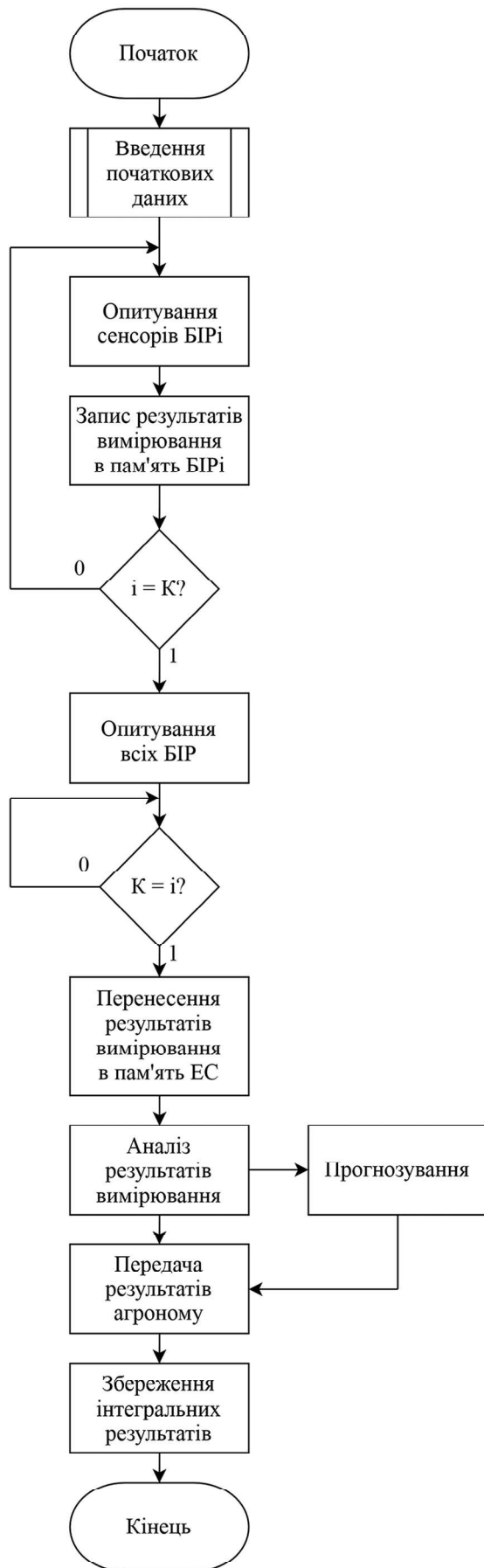


Рис. 2. Алгоритм роботи системи моніторингу

Агромоніторинг стану ґрунтів. Практичні рекомендації виробникам

На нашу думку, доцільно реалізувати агромоніторинг параметрів ґрунту на основі методів експрес-аналізу [3, 6].

Для цього пропонується використати систему агромоніторингу, структура якої наведена на рис 1.

БІР1, БІР2,..., БІРi — моделі інтернету речей, які дозволяють реалізувати методи експрес-аналізу основних параметрів ґрунту. В якості таких модулів доцільно використати портативні аналізатори ґрунту DS LOGGER 500, які дозволяють вимірювати температуру ґрунту, вологість ґрунту, щільність, водневий показник в режимі експрес аналізу (без взяття проб). Ці модулі дозволяють вимірювати не лише поточні значення параметрів ґрунту, але і динаміки їхніх змін, що є дуже важливим для достовірного прогнозування можливих змін характеристик і етапів цього забезпечення.

Модуль має внутрішню пам'ять на 5000 результатів вимірювання, що дозволяє вести моніторингові спостереження протягом тривалого часу. Також модуль має датчик GPS, що дозволяє автоматично визначати місце вимірювання параметрів ґрунту. Крім цього, модуль обладнаний блоком радіозв'язку, що дозволяє передавати результати вимірювання на відстань до 1000 метрів при зчитуванні цих результатів за допомогою дрона — цей варіант зв'язку є більш надійним та захищеним [7].

Базова версія запропонованого модуля системи агромоніторингу має приймач радіосигналів, експертну систему (ЕС), базу галузевих знань (БЗ), засоби зв'язку із мережею інтернет через додатковий проксі-сервер (для захисту інформації, що міститься у пам'яті пристрою). До базового модуля також входять засоби виводу інформації, такі як дисплей.

Система моніторингу працює у відповідності до алгоритму наведеному на рис. 2. Після введення початкової інформації (номер поля, координати, дата вимірювання та ін.) по команді оператора відбувається почергове опитування усіх сенсорів модуля інтернету речей з наступним записуванням результатів у пам'ять модуля. Після опитування усіх модулів відбувається передача отриманих результатів у пам'ять експертної системи (ЕС).

Після отримання всіх результатів вимірювання, ЕС розпочинає їхній аналіз і інтегральний результат передає безпосередньо агроному.

Паралельно всі результати вимірювання параметрів ґрунту та результати аналізу використовуються для прогнозування можливих змін стану ґрунту в коротко- та середньостроковій перспективі.

Інтелектуальна складова системи (ЕС, БЗ) — це технічно реалізовані засоби штучного інтелекту, що дозволяють реалізувати різні методи прогнозування. Наразі найбільше використовуються чотири методи [8, 9]:

1. Метод екстраполяції.
2. Метод найменших квадратів.
3. Метод експоненційного згладжування.
4. Метод ковзної середньої.

Звичайно, ці методи відрізняються своєю складністю і точністю прогнозування.

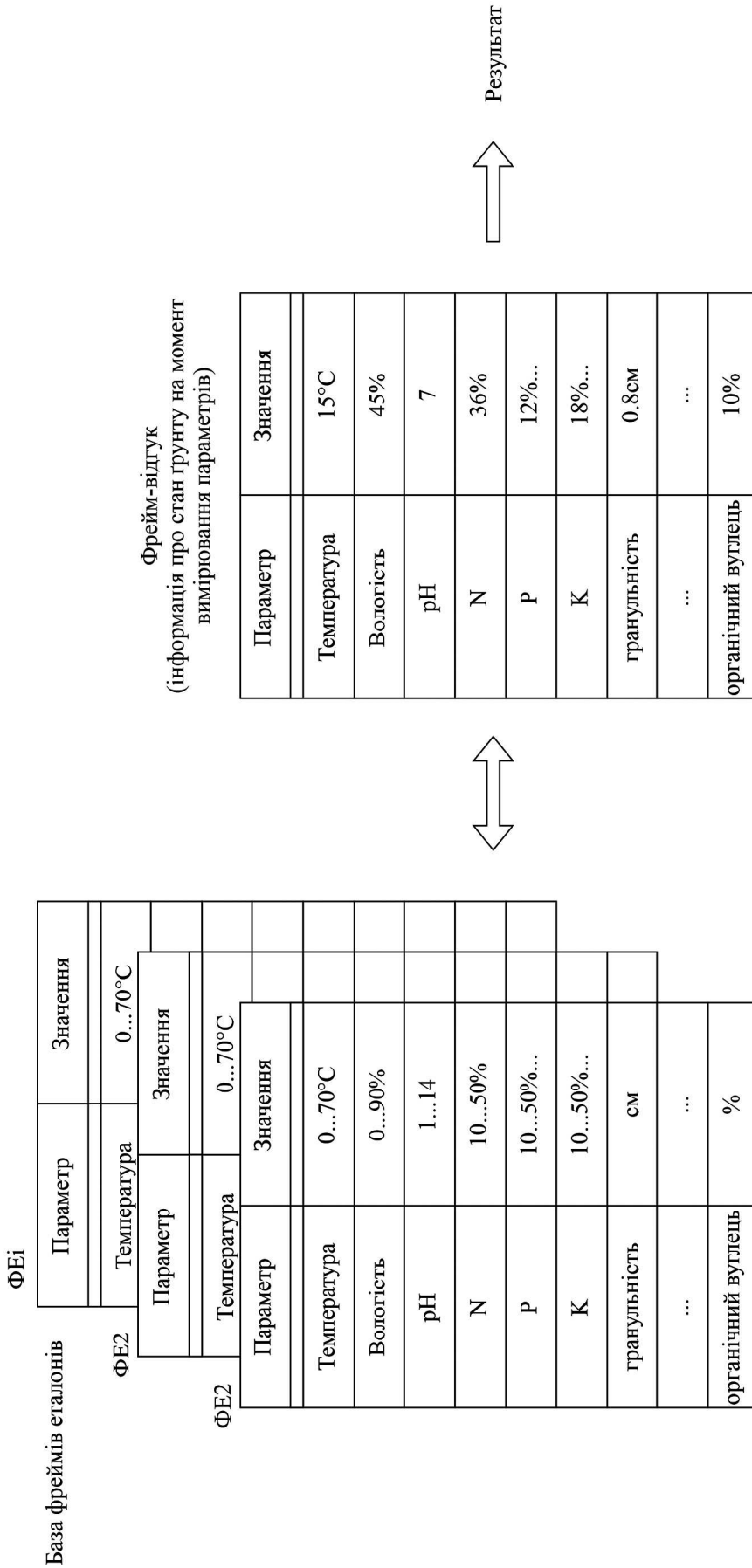


Рис. 3. Фрагмент бази знань на основі фреймів

Аналіз досвіду закордонних [4] та вітчизняних [9] практиків показує, що для завдань прогнозу в аграрній галузі можна успішно використовувати метод екстраполяції.

Необхідно зауважити, що ефективність та точність прогнозу в значній мірі залежить від наповнення бази знань експертної системи релевантними, точними та повними значеннями про об'єкт дослідження, які отримані у минулому та не містять протиріч [10].

Найчастіше в таких системах використовують наступні моделі подання знань [11]:

1. Семантичні мережі.
2. Фреймові структури.
3. Продукційні системи.
4. Логіку предикатів.

На практиці найчастіше використовують фреймові моделі. На рис.3 наведено приклад фрагменту бази знань на основі фреймів. Така база містить сукупність фреймів-еталонів, в яких зберігаються взірцеві значення параметрів ґрунту. При цьому фрейми-еталони можуть містити інформацію про найоптимальніші значення параметрів ґрунту для вирощування на ньому конкретної культури [8, 10, 11].

## ВИСНОВКИ

Сучасні системи агромоніторингу доцільно будувати з використанням інтернету речей, сенсори яких здатні реалізувати методи експрес-аналізу ґрунту.

Такі системи агромоніторингу мають використовувати елементи штучного інтелекту, що дозволяє вести обробку та аналіз отриманих результатів вимірювань в масштабах реального часу та реалізувати прогнозування можливих змін параметрів ґрунту.

Використання внутрішньої пам'яті в модулях інтернету речей, мінімізація відстаней передачі інформації з них та використання проксі-сервера для зв'язку із зовнішніми мережами суттєво підвищують захист інформації в системі та надійність її функціонування.

### Література:

1. Sambandh, D., Wyatt, B.M., Shikhadri, M., Bhattarai, N., Sharma, S., Rout, T., Saud, P., & Acharya, B.S. (2023). Internet of Things (IoT) in digital agriculture: An overview. *Agronomy Journal*. P. 1—20. doi:10.1002/agj2.21385.
2. Amerlet, S., Gebresenbet, G., & Alwan, H.M. (2024). Utilizing an Internet of Things (IoT) Device, Intelligent Control Design and Simulation for an Agricultural System. doi:10.20944/preprints202401.1505.v1.
3. Шикуча, М.К., Гнатенко, О.Ф. (2004) Охорона ґрунтів: Підручник. 2-ге вид. випр. — К. Т-во "Знання" КОО. — 398 с.
4. Kinsey's, N. (2019). *Hands-on agronomy*. Greeley, Colorado: Acres USA, 450 с.
5. Павлишин, М., Павлишин, М.М., Гусар І. (2019). Розподілена інтелектуальна система агромоніторингу з використанням інтернет речей. Новітні технології в АПК: дослідження та управління. Випуск 24 (38). С. 214—219.
6. Національний стандарт України. ДСТУ 4362:2004 Якість ґрунту. Показники родючості ґрунтів. URL:

[https://zakon.isu.net.ua/sites/default/files/normdocs/dstu\\_4362\\_2004.pdf](https://zakon.isu.net.ua/sites/default/files/normdocs/dstu_4362_2004.pdf).

7. Бобало, Ю. Інформаційна безпека (2019). Навч. посібник. Львів. — 580 с.
8. Кравчук, В., Кушнарьов, А., Таргоня, В., Павлишин, М., Гусар, В. (2015) Біосфера і агротехнології: інженерні рішення. Укр НДІ ПВТ ім. Л. Погорілого. Дослідницьке. 228 с.
9. Кравчук, В., Сердюченко, Н. (2011) Прогнозування врожаїв в Україні. Техніка і технологія АПК. № 3. С. 12—21.
10. Мінський М. (2001). Фрейми для подання знань. Видавн. "Наука", 58с.
11. Лун, Ж. (2004). Системи штучного інтелекту. "Знання", 106 с.

### References:

1. Sambandh, D., Wyatt, B.M., Shikhadri, M., Bhattarai, N., Sharma, S., Rout, T., Saud, P., and Acharya, B.S. (2023), "Internet of Things (IoT) in digital agriculture: An overview", *Agronomy Journal*, vol. 116 (3), pp. 1—20. DOI: <http://dx.doi.org/10.1002/agj2.21385>.
2. Amerlet, S., Gebresenbet, G., and Alwan, H.M. (2024), "Utilizing an internet of things (IoT) device, intelligent control design and simulation for an agricultural system", *IoT*, vol. 5 (1), pp. 58—78. DOI: <https://doi.org/10.3390/iot5010004>.
3. Shykula, M.K., and Hnatenko, O.F. (2004), *Okhorona gruntiv [Soil protection]*, 2nd ed, T-vo "Znannia" KOO, Kyiv, Ukraine.
4. Kinsey, N. (2019), *Hands -on agronomy*, Acres, Greeley, Colorado USA.
5. Pavlyshyn, M., Pavlyshyn, M.M., and Husar, I. (2019), "Distributed intellectual agromonitoring system with use of the network internet", *The latest technologies in the agroindustrial complex: research and management*, vol. 24 (38), pp. 214—219, available at: [https://www.ndipvt.com.ua/zbirnyk\\_2019\\_22.html](https://www.ndipvt.com.ua/zbirnyk_2019_22.html) (Accessed 11 March 2025).
6. State standards of Ukraine (2005), "DSTU 4362:2004 "Soil quality. Indicators of soil fertility", available at: [https://zakon.isu.net.ua/sites/default/files/normdocs/dstu\\_4362\\_2004.pdf](https://zakon.isu.net.ua/sites/default/files/normdocs/dstu_4362_2004.pdf) (Accessed 11 March 2025)
7. Bobalo, Y. (2019), *Informatsiina bezpeka [Information security]*, Lviv, Ukraine.
8. Kravchuk, V., Kushnarev, A., Targonya, V., Pavlyshyn, M., and Husar, V. (2015), *Biosfera i ahrotekhnolohii: inzhenerni rishennia [Biosphere and agrotechnology: engineering solutions]*, UkrNDIPVT im. L. Pohoriloho, Doslidnytske, Ukraine.
9. Kravchuk, V., and Serdyuchenko, N. (2011), "Forecasting of crops in Ukraine", *Tekhnika i tekhnolohiia APK*, vol. 3, pp. 12—21.
10. Minsky, M. (2001), *Freimy dlia podannia znan [Frames for knowledge representation]*, Vydavn. "Nauka", Kyiv, Ukraine.
11. Lun, Zh. (2004), *Systemy shtuchnoho intelektu [Systems of artificial intelligence]*, Znannia, Kyiv, Ukraine.

*Стаття надійшла до редакції 09.04.2025 р.*