

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ «ЛЬВІВСЬКА ПОЛІТЕХНІКА»

Кваліфікаційна наукова праця
на правах рукопису

ФЕДИШИН ТЕТЯНА ІГОРІВНА

УДК 681.5


ДИСЕРТАЦІЯ
МЕТРОЛОГІЧНЕ ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ КІБЕР-ФІЗИЧНОЇ СИСТЕМИ
МОНІТОРИНГУ ГРУНТІВ

152 - Метрологія та інформаційно-вимірювальна техніка

15 - Автоматизація та приладобудування

Подається на здобуття наукового ступеня доктора філософії

Дисертація містить результати власних досліджень. Використання ідей,
результатів і текстів інших авторів мають посилання на відповідне джерело

 / Т. І. Федішин /

Науковий керівник: Бубела Тетяна Зіновіївна, д.т.н., професор

Львів - 2024

АНОТАЦІЯ

Федишин Т.І. Метрологічне забезпечення кібер-фізичної системи моніторингу ґрунтів.

Дисертація на здобуття наукового ступеню доктора філософії за спеціальністю 152 - Метрологія та інформаційно-вимірвальна техніка, галузь знань 15 – Автоматизація та приладобудування, Національний університет «Львівська політехніка», Міністерство освіти та науки України, Львів, 2024.

Дисертація присвячена дослідженню, вивченню та вирішенню проблем метрологічного забезпечення кібер-фізичних систем у сфері моніторингу ґрунтів, що базується на теоретичних засадах метрології та поглибленому опрацюванні результатів вимірювань.

У вступі розглянуто основні аспекти, пов'язані з забезпеченням єдності вимірювань. Зазначено, що вимірювання параметрів ґрунту має велике значення для аграрного сектору та екологічного контролю, проте недостатня уніфікація методів і приладів може призвести до неточних результатів вимірювань. Окреслено значення поглибленого аналізу результатів вимірювань, що дозволить виявити можливі джерела помилок та розробити стратегії їх усунення.

У першому розділі проаналізовано основні аспекти концепції інтернету речей та можливості його використання для моніторингу стану ґрунтів, як один із перспективних напрямків в агросекторі. За результатами аналітичного дослідження впливних факторів на параметри ґрунтів сформовано найважливіші показники, оціночні критерії та процеси, що контролюються при проведенні оперативного моніторингу ґрунту. Розглянуто сутність та значення дистанційного моніторингу ґрунтів у сучасному контексті, виокремлено переваги та недоліки дистанційних методів контролю. Здійснено дослідження характеристик сучасного інструментарію для моніторингу стану ґрунтів та запропоновано шляхи їх вдосконалення для малих агрогосподарств в сучасних умовах.

У другому розділі здійснено оцінку потенціалу створення кібер-фізичних систем для застосування у агросекторі. Запропоновано класифікаційні ознаки та представлено класифікацію кібер-фізичних систем. Здійснено аналіз міжнародних стандартів щодо побудови та функціонування кібер-фізичних систем та сформовано рекомендації для його імплементації у національну систему нормативного забезпечення. Запропоновано визначення поняття кібер-фізичної системи. Представлено структуру кібер-фізичної системи моніторингу стану ґрунтів відповідно до етапів вирощування агрокультур на прикладі вирощування зерна пшениці. Запропоновано апаратне забезпечення системи. Представлено характеристики сенсорів, що використовуються для збору основних характеристик ґрунтів (вологість, температура, кислотність, провідність, вміст найважливіших компонентів). Проаналізовано засоби зв'язку, які використовуються для передачі даних з сенсорів до центральної системи обробки інформації. Важливим аспектом, що розглядається у розділі, є програмне забезпечення кібер-фізичної системи моніторингу ґрунтів. Описано програмні модулі, які використовуються для збору, обробки та аналізу даних про ґрунти. Розглянуто алгоритми обробки даних, включаючи попередню обробку та аналіз результатів. Також висвітлено питання інтеграції програмних засобів з апаратними компонентами системи та можливості їхньої дистанційної конфігурації та управління.

У третьому розділі проведено дослідження метрологічних характеристик кібер-фізичної системи моніторингу ґрунтів. Запропоновано методику верифікації системи моніторингу ґрунтів та проведено дослідження непевностей результатів вимірювання основних параметрів ґрунту – температури, вологості, провідності (щільності) та вмісту азоту, фосфору і калію. Здійснено оцінювання ризиків функціонування системи. Запропоновано розділити їх на ризики інформаційного характеру та метрологічні ризики, оскільки кібер-фізична система – це інформаційно-вимірювальна система. Запропоновано класифікаційні ознаки та здійснено структурування ризиків кібер-фізичної системи моніторингу ґрунтів. Для отриманих ризиків було

запропоновано коригувальні заходи, застосування яких дасть можливість мінімізувати ризики.

У четвертому розділі досліджено конкретні сценарії та приклади застосування розробленої кібер-фізичної системи моніторингу стану ґрунтів у агропромисловому секторі. Представлено процес побудови прогностичної моделі на основі використання штучної нейронної мережі, яка використовується для прогнозування параметрів, що впливають на сільськогосподарський процес. Наведено можливості застосування нейронної мережі для оптимізації поливу рослин, визначення найсприятливішого часу для внесення добрив, попередження про можливість засухи чи занадто високої вологості. Представлено процес навчання мережі за допомогою вхідних даних про вологість ґрунту, кліматичні умови та інші параметри. На основі параметрів виробництва зернової продукції здійснено дослідження його життєвого циклу за допомогою програмного забезпечення SimaPro, долучення ресурсів якого до розробленої системи моніторингу ґрунтів дасть можливість прогнозувати вплив діяльності людини на довкілля в агросекторі.

Ключові слова: кібер-фізична система, моніторинг, ідентифікація та оцінка ризиків, верифікація та калібрування, метрологічні характеристики, підвищення точності, метрологічні дослідження, нормативна документація, класифікація, моделювання, нейронні мережі, агровиробництво.

ABSTRACT

Fedyshyn T.I. Metrological support of the cyber-physical system of soil monitoring.

Dissertation for the degree of Doctor of Philosophy in specialty 152 - Metrology and Information-Measuring Technics, field of knowledge 15 - Automation and Instrumentation, Lviv Polytechnic National University, Ministry of Education and Science of Ukraine, Lviv, 2024.

The dissertation is devoted to the research, study and solution of metrological support of cyber-physical systems in the field of soil monitoring, based on the

theoretical foundations of metrology and in-depth processing of measurement results.

The introduction discusses the main aspects related to ensuring the unity of measurements. It is noted that the measurement of soil parameters is of great importance for the agricultural sector and environmental control, but insufficient unification of methods and devices can lead to inaccurate measurement results. The value of an in-depth analysis of measurement results is outlined, which will allow identifying possible sources of errors and developing strategies for their elimination.

The first chapter analyzes the main aspects of the concept of the Internet of Things and the possibility of its use for soil condition monitoring, as one of the promising directions in the agricultural sector. Based on the results of an analytical study of influencing factors on soil parameters, the most important indicators, evaluation criteria and processes that are controlled during operational soil monitoring were formed. The essence and significance of remote soil monitoring in the modern context are considered, the advantages and disadvantages of remote control methods are highlighted. A study of the characteristics of modern instruments for soil condition monitoring was carried out and ways of their improvement were proposed for small farms in modern conditions.

The second chapter assesses the potential of creating cyber-physical systems for use in the agricultural sector. Classification features are proposed and the classification of cyber-physical systems is presented. An analysis of international standards regarding the construction and functioning of cyber-physical systems was carried out and recommendations for its implementation into the national system of regulatory support were formed. The definition of the concept of a cyber-physical system is proposed. The structure of the cyber-physical soil condition monitoring system is presented in accordance with the stages of growing agricultural crops using the example of wheat grain growing. System hardware is offered. The characteristics of the sensors used to collect the main characteristics of soils (moisture, temperature, acidity, conductivity, content of the most important components) are presented. The means of communication used to transmit data from

sensors to the central information processing system were analyzed. An important aspect considered in the section is the software of the cyber-physical soil monitoring system. Software modules used for collection, processing and analysis of soil data are described. Algorithms for data processing, including pre-processing and analysis of results, are considered. The issue of software integration with hardware components of the system and the possibility of their remote configuration and management is also highlighted.

In the third section, a study of the metrological characteristics of the cyber-physical soil monitoring system was conducted. The method of verification of the soil monitoring system is proposed and the uncertainty of the results of the measurement of the main parameters of the soil - temperature, humidity, conductivity (density) and the content of nitrogen, phosphorus and potassium - is investigated. Risk assessment of system functioning was carried out. It is proposed to divide them into information risks and metrological risks, since the cyber-physical system is an information and measurement system. Classification features are proposed and risk structuring of the cyber-physical soil monitoring system is carried out. Corrective measures were proposed for the received risks, the application of which will make it possible to minimize the risks.

In the fourth chapter, specific scenarios and examples of application of the developed cyber-physical soil condition monitoring system in the agro-industrial sector are investigated. The process of building a prognostic model based on the use of an artificial neural network, which is used to predict parameters affecting the agricultural process, is presented. The possibilities of using a neural network to optimize plant watering, determine the most favorable time for applying fertilizers, and warn of the possibility of drought or too high humidity are presented. The process of training the network using input data on soil moisture, climatic conditions, and other parameters is presented. Based on the parameters of grain production, a study of its life cycle was carried out with the help of the SimaPro software, the inclusion of resources of which in the developed soil monitoring

system will make it possible to predict the impact of human activity on the environment in the agricultural sector.

Keywords: cyber-physical system, monitoring, risk identification and assessment, verification and calibration, metrological characteristics, increasing accuracy, metrological research, regulatory support, classification, modeling, neural networks, agricultural production.

СПИСОК ПРАЦЬ, ОПУБЛІКОВАНИХ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

В яких опубліковані основні наукові результати дисертації:

1. Бубела Т. З., Федішин Т. І. Підсистема збирання даних для кіберфізичної системи моніторингу агровиробництва та її верифікація // Вимірювальна техніка та метрологія : міжвідомчий науково-технічний збірник. – 2018. – Вип. 79, № 1. – С. 28–33. (фахове видання України за спеціальністю 152 – Метрологія та інформаційно-вимірювальна техніка). *Особистий внесок - запропоновано конструкцію підсистеми збирання інформації для кібер-фізичної системи моніторингу процесу агровиробництва зернових культур, відповідне програмне забезпечення та програму верифікації запропонованої підсистеми.*

<https://doi.org/10.23939/istcmtm2018.01.028>,

<https://science.lpnu.ua/uk/istcmtm/vsi-vypusky/volume-79-1-2018/pidsystema-zbyrannya-danyh-dlya-kiberfizychnoyi-systemy>,

2. Бубела Т. З., Федішин Т. І. Аналіз потенціалу кіберфізичних систем для застосування у агросекторі // Вимірювальна техніка та метрологія : міжвідомчий науково-технічний збірник. – 2019. – Вип. 80, № 4. – С. 23–30. (фахове видання України за спеціальністю 152 – Метрологія та інформаційно-вимірювальна техніка). *Особистий внесок – запропоновано класифікацію кібер-фізичних систем, запропоновано ввести у нормативні документи з метрології поняття “кіберфізична система ” та подано її визначення.*

<https://doi.org/10.23939/istcmtm2019.04.023>,

<https://science.lpnu.ua/uk/istcmtm/vsi-vypusky/vypusk-80-no-4-2019/analiz-potencijalu-kiberfizychnyh-system-dlya-zastosuvannya-u>.

3. Bubela T., Yatsuk V., Fedyshyn T., Krachunov H., Ivakh R. Study of the primary converter-object system for electrochemical devices // Вимірювальна техніка та метрологія : міжвідомчий науково-технічний збірник. – 2021. – Вип. 82, № 4. – С. 18–25. (фахове видання України за спеціальністю 152 –

Метрологія та інформаційно-вимірювальна техніка). *Особистий внесок - розглянуто проблему створення електрохімічних приладів та синтезовано схеми заміщення в різних частотних і концентраційних діапазонах досліджуваних об'єктів.*

<https://doi.org/10.23939/istcmtm2021.04.018>,

<https://science.lpnu.ua/uk/istcmtm/vsi-vypusky/vypusk-82-no4-2021/doslidzhennya-procesiv-vzayemodiyi-systemy-pervynnyu>,

4. Fedyshyn T., Przystupa K., Bubela T., Petrovska I. Data acquisition system for monitoring soil parameters // Lecture Notes on Data Engineering and Communications Technologies. 2023. Vol. 181 : Advances in computer science for engineering and education VI. Proceedings of the 6th International conference on computer science, engineering, and education applications (ICCSEEA2023), Warsaw, Poland, March 17–19, 2023. P. 499–513. (наукове періодичне видання іншої держави, Scopus). *Особистий внесок – розроблена нейромережа для прогнозування ступеня врожайності; здійснено аналітичне дослідження факторів, що впливають на стан ґрунту, та наслідків, до яких може призвести зміна цих факторів.* doi: [10.1007/978-3-031-36118-0_45](https://doi.org/10.1007/978-3-031-36118-0_45).

5. T. Bubela, T. Fedyshyn, “Cyber-Physical System as a Tool of Monitoring, Control, and Management” in Cyber-Physical Systems and Metrology 4.0 Publishing, 2021.–160-185с. (розділ колективної монографії). *Особистий внесок - модернізування систем моніторингу, яке полягає у впровадженні інноваційних технологій на основі побудови кібер-фізичних систем.*

https://www.sensorsportal.com/HTML/BOOKSTORE/Cyber-Physical_Systems_and_Metrology_4_0.htm

Які засвідчують апробацію матеріалів дисертації:

6. Бубела Т. З., Фецишин Т. І. . Програмне забезпечення етапу збору інформації для кібер-фізичної системи контролю органічного виробництва // Technical using of measurement-2017 : тези доповідей III Всеукраїнської науково-технічної конференції молодих вчених у царині метрології (Славське, 24-29 січня 2017 р.). – 2017. – С. 28–30.

7. Бубела Т. З., Федішин Т. І. Розроблення проекту програми верифікації підсистеми збору інформації для кібер-фізичної системи моніторингу агровиробництва // Technical Using of Measurement-2018 : тези доповідей IV Всеукраїнської науково-технічної конференції молодих вчених у царині метрології (Славське, 13–18 лютого 2018 р.). – 2018. – С. 18–19.

8. Бубела Т. З., Федішин Т. І. Верифікація підсистеми збору інформації для кібер-фізичної системи контролю параметрів ґрунту // Міжнародна конференція метрологів МКМ'2019 (XXIII міжнародний семінар метрологів МСМ'2019) : тези доповідей, до 100-річчя кафедри інформаційно-вимірювальних технологій (Львів, 10–12 вересня 2019 р.). – 2019. – С. 97–98.

9. Bubela T., Fedyshyn T., Mikhalieva M. Simulation of electrochemical systems by analyzing impedance spectra // Study of modern problems of civilization : abstracts of V International scientific and practical conference, Oslo, Norway, October 19-23, 2020. – 2020. – С. 414– 417.

10. Федішин Т. І., Бубела Т. З. Метрологічна перевірка підсистеми збору даних для кібер-фізичної системи моніторингу у агропромисловому секторі // Інформаційні технології в освіті, техніці та промисловості: збірник тез доповідей всеукраїнської науково-практичної конференції молодих вчених і студентів (Івано-Франківськ, 08 жовтня 2020 р.). – 2020. – С. 139–142.

11. Федішин Т. І., Бубела Т. З., Шпак О. В. Функціонування кіберфізичних систем та формування їх нормативного забезпечення // Управління якістю в освіті та промисловості: досвід, проблеми та перспективи : тези доповідей V Міжнародної науково-практичної конференції (Львів, 20–21 травня 2021 р.). – 2021. – С. 189–191.

12. Федішин Т. І., Бубела Т. З. Процес прогнозування як складова кіберфізичні системи моніторингу у агропромисловому секторі // Інформаційно-вимірювальні технології ІВТ-2022 : тези доповідей міжнародної науково-практичної конференції, 09-10 листопада 2022р., Львів. – 2022. – С. 130–131.

ЗМІСТ

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ.....	14
ВСТУП.....	15
РОЗДІЛ I. ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА МЕТОДІВ	
ДИСТАНЦІЙНОГО МОНІТОРИНГУ СТАНУ ҐРУНТІВ.....	21
1.1. Простежування концепції інтернету речей в системах моніторингу.....	21
1.2. Аналіз впливних факторів на параметри ґрунтів.....	25
1.3. Характеристики сучасного інструментарію для моніторингу стану ґрунтів.....	31
1.4. Формування задач подальших досліджень.....	43
Висновки до розділу 1.....	44
РОЗДІЛ II. КОНЦЕПЦІЯ РЕАЛІЗАЦІЇ АПАРАТНОГО ТА	
ПРОГРАМНОГО ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ СИСТЕМИ ЗБОРУ ІНФОРМАЦІЇ	
ДЛЯ КІБЕР-ФІЗИЧНОЇ СИСТЕМИ МОНІТОРИНГУ СТАНУ ҐРУНТІВ.....	
46	
2.1. Дослідження потенціалу кібер-фізичних систем для застосування у агросекторі.....	46
2.1.1. Точне землеробство як запорука створення smart-технологій у сфері сільського господарства.....	47
2.1.2. Класифікація кібер-фізичних систем та ризиків під час їх створення та функціонування.....	48
2.1.3. Стандартні вимоги, що регулюють створення та функціонування кібер-фізичних систем.....	52
2.2. Структурування кібер-фізичної системи моніторингу стану ґрунтів відповідно до етапів вирощування агрокультур.....	57
2.3. Апаратне забезпечення кібер-фізичної системи моніторингу основних параметрів ґрунтів.....	66
2.4. Реалізація програмного забезпечення, як невід’ємна складова кібер-фізичної системи.....	76

Висновки до розділу 2.....	91
РОЗДІЛ III. ДОСЛІДЖЕННЯ МЕТРОЛОГІЧНИХ ХАРАКТЕРИСТИК КФС МОНІТОРИНГУ СТАНУ ҐРУНТІВ.....	93
3.1. Методики калібрування КФС моніторингу стану ґрунтів.....	93
3.1.1. Калібрування сенсору для вимірювання температури ґрунту.....	93
3.1.2. Калібрування сенсору для вимірювання вологості ґрунту.....	100
3.2. Верифікація підсистеми збору вимірювальної інформації.....	106
3.3. Дослідження непевності вимірювання параметрів ґрунту.....	111
3.3.1. Дослідження непевності вимірювання температури.....	111
3.3.2. Дослідження непевності вимірювання вологості.....	117
3.3.3. Дослідження непевності вимірювання кислотності.....	123
3.3.4. Дослідження непевності вимірювання щільності.....	128
3.3.5. Дослідження непевності вимірювання вмісту основних компонентів ґрунту.....	134
3.3.5.1. Дослідження непевності вимірювання вмісту калію в ґрунті.....	134
3.3.5.2. Дослідження непевності вимірювання вмісту азоту в ґрунті.....	140
3.3.5.3. Дослідження непевності вимірювання вмісту фосфору в ґрунті	146
3.4. Оцінювання ризиків функціонування КФС моніторингу ґрунтів як інформаційної системи.....	151
3.5. Аналіз метрологічних ризиків функціонування КФС моніторингу ґрунтів як вимірювальної системи.....	158
Висновки до розділу 3.....	162
РОЗДІЛ IV. ПРИКЛАДНІ АСПЕКТИ ФУНКЦІОНУВАННЯ КІБЕР-ФІЗИЧНОЇ СИСТЕМИ.....	163
4.1. Побудова прогнозної моделі зміни стану ґрунтів на основі використання нейромереж та хмарних технологій.....	163
4.1.1. Формування навчального набору даних.....	170

4.1.2. Процес тренування нейромережі.....	173
4.2. Надійність результатів вимірювань в кібер-фізичній системі.....	176
4.3. Оцінювання екологічних аспектів вирощування зернових культур за допомогою технології SimaPro.....	183
Висновки до розділу 4.....	191
ВИСНОВКИ.....	192
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ЛІТЕРАТУРНИХ ДЖЕРЕЛ.....	194
ДОДАТКИ.....	206

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ

КФС – кібер-фізична система;

ІоТ – інтернет речей;

МР – метрологічний ризик;

БПЛА - безпілотні літальні апарати;

РЕ – робочий еталон;

ОС – операційна система;

БНМ - багатошаровий перцептрон;

SOM – Self-organizing map;

GPS - Global Positioning System;

IEC - International Electrotechnical Commission;

ISO - International Organization for Standardization;

IEEE - Standards Association;

AIDC - Automatic Identification and Data Capture;

NCAP - Network Capable Application Processor;

TEDS - Transducer Electronic Data Sheet;

CRAMM - Risk Analysis & Management Method (CRAMM);

CNN - Convolutional Neural Network;

LVQ - Learning Vector Quantization.

ВСТУП

Актуальність теми дисертації. Необхідність науково виваженої програми регулювання і контролю виробництва зернових культур пояснюється тим, що сільськогосподарська продукція характеризується нееластичним попитом: агровиробництву властиві сезонність, ризики та нестабільність, пов'язані з природними чинниками, наслідки розбалансованості цін між сільськогосподарською продукцією та продукцією інших галузей економіки. Прийняття правильних керівних рішень у системі моніторингу агровиробництва великою мірою залежить від ступеня достовірності інформації про стан об'єктів довкілля. Особливого значення ці питання набувають під час моніторингу виробництва сільськогосподарської продукції, яке передбачає вирощування продукції на ґрунтах з відповідними характеристиками. Моніторинг параметрів ґрунтів повинен складатися із систематичних спостережень за їх станом, фіксування змін, їх оцінювання, прогнозування, а отже, управління.

Одним із найважливіших завдань, що постало перед Україною сьогодні, є забезпечення сталого розвитку регіонів та стабільного економічного зростання на основі застосування інноваційних методів підвищення ефективності в різних галузях економіки, зокрема в системі агропромислового комплексу. Модернізування подібних систем управління повинно полягати у впровадженні інноваційних технологій на основі побудови кібер-фізичних систем моніторингу. Відповідно актуальною є наукова задача інтелектуалізації сучасних інформаційно-вимірювальних систем шляхом розроблення належного їх метрологічного забезпечення та інтеграції з системами та архітектурними рівнями IoT.

Зв'язок теми дисертації з державними програмами, науковими напрямами університету та кафедри. Тема дисертації відповідає науковому напрямку кафедри «Інформаційно-вимірювальні технології» Національного університету «Львівська політехніка»: теоретичні та прикладні основи метрології і вимірювань в інформаційних технологіях

(інформаційно-вимірювальних, кібер-фізичних, робототехнічних та інших системах); тестування якості продукції і програмного забезпечення. Дисертаційна робота виконана аспіранткою очної форми навчання в межах виконання нею низки науково-дослідних робіт, а саме : науково-дослідна робота «Розвиток нормативно-технічного забезпечення системи органічного виробництва» (№ державної реєстрації 0116U006724), науково-дослідна робота «Метрологічне забезпечення кібер-фізичної системи моніторингу ґрунтів» (№ державної реєстрації 0121U112541).

Мета і завдання досліджень. Метою дослідження є вдосконалення нормативного та технічного забезпечення виробництва зернової продукції шляхом створення кібер-фізичної системи моніторингу ґрунтів та розроблення її метрологічного забезпечення на основі застосування апаратно-програмних засобів та мобільних платформ.

Для досягнення поставленої мети необхідне розв'язання таких завдань:

- проаналізувати проблематику та сучасний інструментарій для моніторингу стану ґрунтів під час виробництва агропродукції в Україні та сформулювати основні аспекти вдосконалення системи його контролю з врахуванням міжнародного досвіду та світових тенденцій;
- сформулювати пропозиції щодо шляхів національної стандартизації в царині кібер-фізичних систем у зв'язку з їх відсутністю;
- для забезпечення оперативного контролю агровиробництва розробити апаратне та програмне забезпечення кібер-фізичної системи моніторингу стану ґрунтів;
- ідентифікувати та оцінити ризики функціонування розробленої кібер-фізичної системи моніторингу ґрунтів;
- розробити прогнозну модель зміни стану ґрунтів на основі використання нейромереж та хмарних технологій;
- здійснити верифікацію запропонованої кібер-фізичної системи моніторингу стану ґрунтів та дослідити її метрологічні характеристики.

Об'єкт досліджень: розроблення кібер-фізичної системи моніторингу параметрів ґрунтів та її метрологічного забезпечення.

Предмет досліджень: методи та засоби контролю параметрів ґрунтів.

Методи дослідження ґрунтуються на принципах системного аналізу (ієрархічності, декомпозиції та інше). Для розв'язання поставлених у дисертації завдань використано методи створення кібер-фізичних систем, теоретичні аспекти метрології, концепції невизначеності, засади використання нейромереж, традиційного моделювання та програмно-математичного забезпечення а також чисельні експериментальні дослідження.

Наукова новизна отриманих результатів полягає у подальшому розвитку та вдосконаленні метрологічного забезпечення у сфері моніторингу ґрунтів.

У дисертаційній роботі отримано такі наукові результати:

Вирішується важлива науково-практична задача підвищення точності та надійності визначення стану ґрунтів шляхом впровадження методичного, метрологічного, інструментального та апаратно-програмного забезпечення, що в цілому представляє собою кібер-фізичну систему моніторингу.

Запропоновано метод автоматизованого визначення стану ґрунтів, який полягає у контактному вимірюванні основних показників ґрунту та враховує вплив факторів зовнішнього середовища на ці показники і застосовує дистанційне опитування сенсорів та формування результатів обробки вимірювальних сигналів, що підвищує адекватність та оперативність оцінювання стану ґрунтів агровиробничого призначення;

Розроблена прогнозна модель зміни стану ґрунтів на основі використання нейромереж та хмарних технологій, що дасть можливість формувати управлінські рішення щодо здійснення сільськогосподарських робіт та підвищить ефективність прогнозування врожаю зернових культур.

На основі результатів досліджень технологій точного землеробства, що спрямовані на використання даних моніторингу, через які можна ефективніше впливати на процеси агровиробництва, оптимізовано технологію вирощування зернової продукції. Доведено, що вдосконалення процесу моніторингу ґрунтів

шляхом створення кібер-фізичних систем, призводить до підвищення якості вирощування агрокультур.

Набули подальшого розвитку методи ідентифікації та оцінки ризиків функціонування кібер-фізичних систем моніторингу шляхом врахування ризиків інформаційного та метрологічного характеру, оскільки КФС – це інформаційно-вимірювальна система, що в кінцевому результаті дасть змогу підвищити ефективність функціонування КФС.

Практичне значення одержаних результатів. Результати досліджень кібер-фізичної системи можна використати для оперативного проведення тестів у відкритому ґрунті та миттєво реагувати на зміну його важливих параметрів, а у поєднанні з прогнозуванням на основі нейронної мережі, допомогти користувачеві прийняти правильні управлінські рішення щодо стабілізації і поліпшення якості врожаю. Розроблено методику верифікації та калібрування запропонованої системи. Розроблений мобільний застосунок, який стане незамінним у вирішенні проблем контролю виробництва зернових культур. При встановленні мобільної версії програми на смартфоні чи планшеті користувачі (власники малих господарств) зможуть контролювати всі процеси виробництва зернових культур та отримувати поради на кожному з етапів виробництва.

Отримані результати досліджень дисертації також впроваджено у навчальний процес для викладання дисциплін «Вимірювання в промисловості» для студентів освітньо-кваліфікаційного рівня «бакалавр», що навчаються за спеціальністю 152 «Метрологія та інформаційно-вимірювальна техніка», та «Системи екологічного управління та сталий розвиток» для студентів освітньо-кваліфікаційного рівня «магістр», що навчаються за спеціальністю 175 «Інформаційно-вимірювальні технології».

Особистий внесок здобувача. Основний зміст роботи, всі теоретичні та практичні результати, дослідження і висновки, які представлено до захисту, одержані автором особисто. Здобувачем особисто сформовано постановку задачі та розроблено КФС та її метрологічне забезпечення, вивчено

можливості імплементації Європейських стандартів у сфері нормування метрологічних характеристик КФС, розроблено прогнозну модель зміни стану ґрунтів на основі використання нейромереж та хмарних технологій, вдосконалено методику калібрування КФС, розроблено методику оцінювання інформаційних та метрологічних ризиків КФС.

Апробація результатів дисертації. Викладені в дисертаційній роботі наукові положення та результати досліджень доповідались та обговорювались на всеукраїнських та міжнародних науково-практичних та науково-технічних конференціях: III Всеукраїнській науково-технічній конференції молодих вчених у царині метрології, «Technical using of measurement-2017», Славське, 24-29 січня 2017 р., Україна; IV Всеукраїнській науково-технічній конференції молодих вчених у царині метрології, «Technical using of measurement-2018», Славське, 13–18 лютого 2018 р., Україна; Міжнародній конференції метрологів МКМ'2019: XXIII Міжнародному семінарі метрологів (МСМ'2019) до 100-річчя кафедри інформаційно-вимірювальних технологій, 10–12 вересня 2019 р. м. Львів, Україна; V International scientific and practical conference «Study of modern problems of civilization», Oslo, Norway, October 19-23, 2020; Всеукраїнській науково-практичній конференції молодих вчених і студентів «Інформаційні технології в освіті, техніці та промисловості», Івано-Франківськ, 08 жовтня 2020 р., Україна; V Міжнародній науково-практичній конференції «Управління якістю в освіті та промисловості: досвід, проблеми та перспективи», Львів, 20–21 травня 2021 р., Україна; Міжнародній науково-практичній конференції «Інформаційно-вимірювальні технології ІВТ-2022», 09-10 листопада 2022р., Львів, Україна.

Публікації. За матеріалами дисертації опубліковано 12 наукових праць, з них: з них 1 стаття у науковому періодичному виданні інших держав, які включено до міжнародних наукометричних баз Scopus; 1 розділ у закордонній колективній монографії в Open Space; 3 статті - у наукових періодичних фахових виданнях України, що включені до міжнародних наукометричних баз, та 7 тез доповідей.

Структура та обсяг роботи. Дисертаційна робота складається із вступу, чотирьох розділів, висновків, списку використаних джерел і додатків. Загальний обсяг основного тексту складає 205 сторінок, 43 рисунки, 42 таблиці, список використаних джерел з 104 найменувань на 13 сторінках, додатки на 11 сторінках.

РОЗДІЛ I. ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА МЕТОДІВ ДИСТАНЦІЙНОГО МОНІТОРИНГУ СТАНУ ҐРУНТІВ

1.1. Простежування концепції інтернету речей в системах моніторингу

Поняття "Інтернет речей" (IP) було вперше запропоноване Кевіном Ештоном у 1999 році під час його роботи в компанії Procter & Gamble. Він використав цей термін для опису системи, яка забезпечує підключення фізичних об'єктів до сенсорів та Інтернету [1]. Ештон ввів цей термін, щоб описати потенціал радіочастотної ідентифікації для використання в корпоративних системах постачання для підрахунку та відстеження товарів без необхідності втручання людини. Сьогодні «Інтернет речей» — це загальний термін, який описує сценарій, у якому підключення до Інтернету та обчислювальна потужність поширюються на широкий спектр об'єктів, пристроїв, давачів і повсякденних речей [2]. Інтернет речей (IP) являє собою систему, яка об'єднує фізичні пристрої, оснащені вбудованими датчиками та програмним забезпеченням. Ця система використовує стандартні комунікаційні протоколи для передачі та обміну даними між реальними об'єктами та комп'ютерними системами [3].

Окрім сенсорів, мережі включають виконавчі механізми, вбудовані у фізичні об'єкти та можуть бути з'єднані між собою через дротові або бездротові мережі [4]. Ці взаємопов'язані пристрої мають можливості зчитування та маніпулювання, програмування та ідентифікації та можуть навіть усунути участь людини завдяки використанню інтелектуальних інтерфейсів. Інтернет речей – одна з найпопулярніших концепцій сучасної футурології. Більш того, це одна з небагатьох речей, яка перестає бути концепцією і стає реальністю. У найзагальнішому вигляді Інтернет речей — це концепція комп'ютерної мережі фізичних об'єктів (насправді речей) із технологіями, які взаємодіють один з одним [5-7].

Концепція передбачає, що Інтернет речей може мати глибокий вплив на розвиток сучасного суспільства, оскільки він забезпечує багато процесів без

втручання людини. Інтернет речей уже привертає увагу на найвищому рівні, особливо з 2009 року, коли в Брюсселі за підтримки Європейської комісії проводиться щорічна конференція з Інтернету речей [8]. Аналітики передбачають, що в найближчі роки Інтернет речей зазнає значного зростання. Згідно з прогнозами компанії Gartner, до 2025 року кількість підключених пристроїв у світі сягне 60 мільярдів, а сукупний дохід від продажу пристроїв, програмного забезпечення та послуг складе 1,9 трильйона доларів. Деякі інші аналітики висловили ще більш оптимістичні прогнози. Найбільші ІТ-компанії світу вже почали боротьбу за лідерство на цьому ринку. Після випуску своєї SoC Edison корпорація Intel ініціювала конкурс «Make it Wearable», пропонуючи приз у розмірі 1,3 мільйона доларів США за найкраще використання їхньої системи в концепції IP. Крім того, Intel створила власний підрозділ «Internet of Things Solutions Group» для розвитку цього напрямку. На початку 2014 року Google придбав невелику компанію під назвою Nest Labs, яка виробляє розумні термостати, за 3,2 мільярда доларів. Фахівці компанії були залучені до впровадження технології IP на американському ринку. У цьому напрямку працюють і виробники побутової техніки. На виставці CES у Лас-Вегасі було представлено ряд побутової техніки (холодильники, телевізори, пральні машини) з можливістю підключення до Інтернету. Лідуючі позиції у розвитку та впровадженні технологій Інтернету речей займають країни з потужною мікропроцесорною індустрією та виробництвом вбудованих комп'ютерів, такі як США, Китай і Південна Корея. Водночас європейські держави та Японія також демонструють вагомі досягнення у цій галузі [9].

Інтернет речей кардинально змінює особисті та соціальні аспекти життя, а також економіку та навіть цілі галузі. Крім того, ця технологія має потенціал для вирішення деяких сучасних глобальних проблем. Наприклад, за даними дослідження, проведеного компанією мобільного зв'язку Verizon, сьогодні лише 50% зібраного врожаю досягає кінцевого споживача. Цю

проблему можна вирішити завдяки автоматизованим системам логістики харчових продуктів.

Також можна заощадити близько 25% свого врожаю, спостерігаючи за погодними умовами онлайн. Це може стати ключовим фактором у розв'язанні глобальної проблеми голоду. Технології Інтернету речей здатні значно покращити здоров'я та продовжити тривалість життя людей. Лікарі в Австралії вже використовують переносні сенсори для дистанційного моніторингу здоров'я пацієнтів і реагування в режимі реального часу. А американська компанія мобільного зв'язку AT&T розробила систему, спрямовану на вирішення однієї з найнебезпечніших проблем, з якою стикаються літні люди: несподівані падіння [10].

Невеликий пристрій автоматично розпізнає раптові зміни положення тіла власника та зв'язується з колл-центром для надання негайної допомоги. Сімейні проблеми будуть займати менше місця в житті людей, а більше часу буде приділятися сім'ї, творчості і хобі. Пристрої, підключені до Інтернету, надають людям більше можливостей для раціонального управління ресурсами. Вони вже допомагають нам оптимально використовувати тепло, воду та світло та економити на рахунках за електроенергію. Важливо відзначити, що зміниться життя не тільки окремих людей, але й галузі в цілому. Однією з галузей, найбільш вразливих до змін, ймовірно, будуть телекомунікації, оскільки оператори мобільного зв'язку поступово змінюють свою бізнес-модель із мережевих провайдерів на провайдерів «розумних» сервісів і додатків.

Концепція Інтернету речей охоплює широкий спектр застосувань. Немає чітко визначеного списку пристроїв, які підпадають під цю категорію. Це і побутова техніка, пральні машини, якими можна керувати онлайн, холодильники, для яких можна створити список продуктів і замовити доставку тощо. Інший варіант – носити гаджет, фітнес-трекер або «розумний» годинник. Інтернет речей також включає автомобілі та інші транспортні засоби, обладнані системами автопілота, тобто ними можна керувати без водія [11, 12].

На сьогоднішній день світове економічне суспільство розуміє економічну динаміку як нерівномірний і невизначений процес еволюційного розвитку суспільного виробництва, з багатьма змінами, що відбуваються під впливом якісних технологічних змін, значних досягнень науки і техніки що вона визначається факторами [13].

Одним із багатообіцяючих напрямків для впровадження концепції IP є моніторинг стану ґрунтів, що є надзвичайно важливим для аграрних господарств задля ефективного контролю всіх етапів вирощування сільськогосподарських культур.

В багатьох країнах розробляються системи моніторингу сільськогосподарського середовища [14]. В деяких з них використовується бездротова сенсорна технологія і технологія позиціонування GPS для отримання зображень ґрунту та посівів, де реалізована функція дистанційного моніторингу рослинництва, яка полегшує користувачам керування посівами та використовує сонячну енергію для забезпечення нормальної роботи обладнання. The Climate Corporation надає послуги страхування від стихійних лих для фермерів, щоб сільськогосподарське виробництво мало певний ступінь захисту [15]. Корпорація PepsiCo також розробила систему управління врожаєм, яка ефективно покращила врожайність і збільшила доходи великих агропродуцентів [16]. Було запропоновано платформу для обміну сільськогосподарськими даними [17]. З розвитком інформаційного середовища люди стикаються з величезною кількістю даних, що також привертає увагу вітчизняних і зарубіжних вчених, які пропонують структуру сільського господарства шляхом аналізу зібраних сільськогосподарських екологічних даних [18], які можуть допомогти виробникам і компаніям-посередникам приймати правильні рішення, і досягти підвищення продуктивності сільського господарства та наукового обґрунтованого управління природними ресурсами. Алвес Габріель з колегами розробив і спроектував систему моніторингу та аналізу родючості ґрунту, а також надання аграріям відповідних рекомендацій для його поліпшення [18].

1.2. Аналіз впливних факторів на параметри ґрунтів

Загальноприйнятих рекомендацій щодо структури параметрів ґрунту та методів їх дослідження для оперативного забезпечення інформаційних систем моніторингу немає. Класичні фізико-хімічні методи зазвичай застосовуються в лабораторіях і непридатні для польових умов [19]. Примітно, що останнім часом швидко розвиваються методи з використанням біоіндикаторів [20]. Однак вони займають багато часу і вважаються непридатними для оперативного моніторингу чи контролю.

Моніторинг такого параметра, як вологість ґрунту, настільки важливий, що для надання користувачам необхідної інформації була створена міжнародна мережа вологості ґрунту. Ключовим аспектом є також контроль впливу змін вологості ґрунту на моделювання гідрологічних процесів, що враховують різноманітні фактори зовнішнього середовища, такі як топографічні особливості, характеристики ґрунту, типи землекористування та історичні дані про опади [21]. Для компенсації ефектів перехресної чутливості використовується спектроскопія імпедансу для більш точного вимірювання вологості ґрунту на основі багатовимірного аналізу результатів експериментальних досліджень на різних природних ґрунтах. Однак запропонований спосіб конфігурації займає багато часу і не підходить для реалізації в портативних пристроях керування.

Тому створення економічно ефективних систем спостереження є особливо актуальним сьогодні.

Для забезпечення об'єктивної інформації та прийняття коректних рішень моніторинг ґрунтів повинен надавати початкові, поточні та регулярні дані про основні характеристики ґрунтового покриву [22]. Необхідними критеріями оцінки є гранулометричний та мінералогічний аналізи, інформація про гумусний стан ґрунту та дані щодо формування ґрунтових умов (табл. 1).

Протягом століть, а в деяких регіонах протягом тисячоліть, люди використовували ґрунт настільки ефективно, що вони не тільки не знищили його, але вони фактично підвищили його родючість і, природно, перетворили

землю, яку було знищено, на родючу землю. Упродовж історії людської цивілізації було безповоротно втрачено та знищено більше продуктивної землі, ніж нині обробляється в усьому світі.

Аналіз показує, що можна виділити такі основні впливні фактори:

- внесення добрив;
- сонячна радіація;
- обробіток ґрунту.

Отже, основними параметрами оперативного моніторингу ґрунтів є:

- кислотність;
- температура;
- вологість;
- твердість.

Таблиця 1.1

Показники, оціночні критерії та процеси, що контролюються при проведенні оперативного моніторингу ґрунту

Показники, оціночні критерії	Процеси, що контролюються
Поживний режим: – вміст рухомих форм макро- та мікроелементів; – використовувані запаси макроелементів	Забезпеченість ґрунту поживними елементами
Водний режим: вологість ґрунту; – запаси продуктивної вологи; – режим РГВ на меліорованих землях	Особливості накопичення та витрат вологи у ґрунті
Температурний режим: – температура ґрунту; – індекс прогрівання суми активних та ефективних температур	Теплообмін в ґрунтах, теплозабезпеченість ґрунту
Оцінка агроекологічного стану: – збалансованість за поживними елементами; – щільність радіоактивного забруднення;	Потенціал родючості ґрунту за вмістом поживних елементів та отримання екологічно чистої

–вміст рухомих форм важких металів; –вміст пестицидів	сільськогосподарської продукції
Оцінка інтенсивності проявів ерозії: – розвиток водної лінійної та площинної ерозії; – дефляція та виникнення пилових бур; – іригаційна ерозія	Розвиток та інтенсивність ерозійних процесів
Оцінка фізико-хімічного стану ґрунтів: – рН сольове та водне; – гідролітична кислотність; – ємність катіонного обміну; – ступінь насичення основами	Зміна фізико-хімічних властивостей ґрунту, прояви фізико-хімічної деградації

Зміни кислотності ґрунту.

Зміни кислотності ґрунту мають значний вплив на доступність до рослин поживних речовин. Занадто високі (понад 9,0) і надто низькі (нижче 4,0) значення рН ґрунту негативно впливають на коріння рослин, оскільки в межах цих показників відбуваються процеси, що визначають відкладення або перетворення поживних сполук у доступні чи недоступні для рослин форми. Тому в сильно кислих ґрунтах (рН 4,0-5,5) такі елементи, як залізо, алюміній і марганець, перетворюються на форми, які легко засвоюються рослинами, і їх концентрація досягає токсичного рівня. З підвищенням кислотності ґрунту знижується фільтраційна здатність, капілярність і водопроникність. За певних умов посіви можуть загинути через голодування без видимих причин. Проте сильнолужні ґрунти (рН 7,5-8,5) значно знижують доступність рослинам заліза, марганцю, фосфору, міді, цинку, бору та більшості мікроелементів. Ґрунти з рН 6,5 оптимально реагують на рослини, при цьому більшість поживних сполук залишаються в ґрунтовому розчині в доступній для рослин формі, що зазвичай запобігає дефіциту.

Різка зміна кислотності ґрунту може бути викликана кислотними дощами, недостатнім внесенням добрив або активним використанням хімічних пестицидів.

Характеристика термічного режиму ґрунту.

У змінних умовах глобального клімату, питання впливу температури ґрунту на ріст рослин набуває все більшого значення. Це підвищує зацікавленість науковців у вивченні механізмів і впливу температури ґрунту на рослинні екосистеми.

Віртуально всі процеси, що відбуваються в ґрунті, починаючи від вивітрювання первинних мінералів до живлення рослин та накопичення органічного карбону, сильно залежать від температури ґрунту. Основним чинником, який впливає на температурний режим ґрунту, є сонячна інсоляція, що залежить від географічного розташування, експозиції місцевості, пори року й наявності хмар. Кількість тепла, поглинутого поверхнею ґрунту, залежить від кольору ґрунту, наявності рослинних решток чи вегетуючих рослин, вмісту органічної речовини й евапорації. Здатність ґрунту постачати в рослини елементи живлення залежить від загальної кількості елемента в твердій фазі ґрунту (його запас) і значно меншою фракцією, яка перебуває у рівновазі між ґрунтовим розчином та обмінними місцями на глинистих часточках і органічній речовині (обмінно фіксована ґрунтовим вбирним комплексом) (рис. 1.1.).

Тож температура ґрунту є одним із визначальних чинників впливу на живлення рослин, що не варто недооцінювати під час складання системи удобрення культур.



Рис. 1.1. Концептуальна діаграма взаємодії між рослинами і ґрунтовими факторами, що контролюють доступність та поглинання елементів живлення

Вологість ґрунту як один із найважливіших параметрів системи збору даних для моніторингу ґрунтів.

Останні роки показали зростання ризику посушливих умов, що стає серйозним викликом як для науковців, так і для аграріїв. Сучасні технології потребують значних удосконалень, зокрема у пошуку комплексу заходів для раціонального використання вологи.

Поверхня випаровування відіграє ключову роль у вмісті вологи в ґрунті: чим більша її рівність, тим менше випаровується вологи. Також важливою є експозиція земельної ділянки та рельєф: випаровування інтенсивніше на підвищених місцях порівняно з пониженими. Місцева флора також впливає на водний режим ґрунту: ліси, зокрема, можуть позитивно вплинути на збереження вологи в ґрунті, особливо коли вони розташовані поруч з полів.

Вміст вологи в ґрунті суттєво впливає на ключові аграрні процеси, визначаючи розчинність, переміщення та ефективність органічних і мінеральних добрив, а також ступінь забруднення ґрунту пестицидами та іншими техногенними речовинами. Більша вологість може сприяти засвоєнню шкідливих хімікатів рослинами, що має прямий вплив на якість продуктів та здоров'я людей. Тому контроль за вологою ґрунту є ключовим аспектом сільськогосподарської діяльності.

Кількість води, яку рослина може спожити, визначається поєднанням факторів: кількістю доступної для рослини води, глибиною коренів у ґрунтовому шарі та щільністю кореневої системи. Доступність води залежить від діаметра пор (табл. 1.2). Уникнення ущільнення ґрунту є важливим, оскільки це може зменшити пористість і обмежити доступ до води. Наприклад, суглинок містить приблизно 20 мм рослинно-доступної води на 10 см ґрунту, але фактична доступна кількість води залежить від глибини проникнення та розгалуження коренів.

Таблиця 1.2

Кількість води, доступної для рослини в залежності від типу ґрунту

Тип ґрунту	Кількість води, доступної для рослини на 10 см ґрунтового профілю, мм
пісок	приблизно 10
мул	приблизно 20-25
суглинок	приблизно 20
коричнева глина	приблизно 10-15

Так, знання запасу вологи в ґрунті та прогнозування середньої кількості опадів дозволяє прогнозувати врожайність і раціонально використовувати добрива. Це дозволяє сільськогосподарським підприємствам та фермерам забезпечувати оптимальні умови для росту рослин, враховуючи вологу, необхідну для їхнього розвитку, і запобігаючи недостачі або надмірному зволоженню ґрунту. Такий підхід сприяє підвищенню врожайності та зниженню витрат на добрива, що в свою чергу позитивно впливає на економічну ефективність сільського господарства. Потреба рослин у воді неоднакова в різні періоди, наприклад, злакові культури найбільше споживають вологи під час викидання волоті. Тому для зернових культур необхідно визначитися з місцем посіву, яке залежить від виду попередників і вологості ґрунту перед посівом.

Точно так, рівень вологості в ґрунті впливає на потребу рослин у фосфорі та калії. Це через те, що вологість впливає на доступність цих макроелементів для рослин, а також на їхню мобілізацію та засвоєння корінням. Недостатнє зволоження може ускладнити процеси транспорту та доступу рослин до поживних речовин у ґрунті, що може призвести до дефіциту фосфору та калію. Це, в свою чергу, може обмежити потенційний врожай та вплинути на кількість мінеральних компонентів, які рослини можуть витягти з ґрунту. Таким чином, контроль рівня вологості дозволяє оптимізувати внесення фосфору та калію для підтримання високої врожайності та родючості ґрунту.

Вплив добрив на родючість зрошуваного ґрунту.

Органічна речовина є ключовим показником потенційної родючості ґрунту, і її наявність сприяє покращенню його якості. Використання якісного поливу та агротехніки може прискорити накопичення органічної речовини в ґрунті. Додавання добрив сприяє зростанню кількості коренів сільськогосподарських культур, що є одним із джерел гумусу в орному шарі. Важливою є не лише кількість добрив, але й їхній спосіб внесення.

Люцерна є однією з найефективніших культур для збагачення ґрунту органічною речовиною під час зрошення та внесення добрив. Також ефективним у цьому є вирощування проміжних культур. Наприклад, на полях, де вирощують три врожаї за рік, за рахунок коренів і післяжнивних решток у ґрунті залишається значна кількість органічної маси.

Зрошення також сприяє активізації біологічних процесів і хімічних перетворень у ґрунті, що розширює кругообіг речовин. Це одна з важливих характеристик зрошуваного землеробства, яка сприяє поліпшенню стану ґрунту та підвищенню врожайності.

Одним із найважливіших факторів посилення біологічних процесів у ґрунті при зрошенні є прискорення мінералізації органічної речовини та її розщеплення амоніфікуючими бактеріями, в результаті чого утворюється аміак, який потім нітрифікується.

1.3. Характеристики сучасного інструментарію для моніторингу стану ґрунтів

Моніторинг ґрунтового покриву є одним із найефективніших засобів систематичного отримання та оновлення просторово-часової інформації про ґрунти. Тільки на основі отриманих результатів можна буде підтримувати родючість землі і тим самим оптимально використовувати та раціонально її охороняти [23, 24]. Проблеми, що виникли у моніторингу ґрунтового покриву на виробничих майданчиках, потребують негайного вирішення [25]. Україна вже розробила концепцію моніторингу ґрунтів, яка враховує комплексність природних ресурсів. Головною метою цього моніторингу є стабілізація та

покращення якості ґрунтів, екологізація землеробства та прийняття ефективних управлінських рішень для досягнення розширеного відтворення природних ресурсів. Згідно з Земельним законом України, моніторинг ґрунтового покриву виступає основою для практичних заходів, пов'язаних з екологічним оздоровленням ґрунтів. На даному етапі дуже важливим є моніторинг ґрунтового покриву та придатності земель в Україні, головним чином через значний негативний вплив властивостей ґрунтів. Наші дослідження вказують на ряд основних причин такої ситуації, включаючи розораність річкових територій, інтенсивні ерозійні процеси при неефективних протиерозійних заходах, хімізацію землеробства без врахування наукових розробок, а також використання зрошуваних і осушуваних земель без належного еколого-економічного обґрунтування. До цього також додаються втрата гумусу і поживних речовин, вторинне засолення, підвищення кислотності, забруднення ґрунтів радіонуклідами та важкими металами. Шість ключових органів моніторингу, зокрема МНС (Державна гідрометеорологічна служба), Мінприроди (Державна екологічна інспекція), МОЗ (санітарно-епідеміологічна служба), Мінагрополітики, Держкомлісгосп та Держкомзем України, відіграють важливу роль у перспективному землеустрої та моніторингу земель і ґрунтів, а також у аналізі вмісту забруднюючих речовин у навколишньому середовищі. Техніка дистанційного зондування відкриває широкі перспективи для отримання високоякісної інформації про використання земельних ресурсів у сільському господарстві. Її застосування дозволяє отримати детальний аналіз особливостей використання сільськогосподарських земель.

Аналіз даних, отриманих за допомогою космічних апаратів, виявив наступні важливі факти:

1. Космічні методи дослідження природних ресурсів можуть ефективно доповнювати системи класифікації земель.

2. Близько 90% даних, необхідних для повного аналізу використання сільськогосподарських земель, можна отримати шляхом дистанційного зондування.

3. Приблизно 2–5% відомостей про характер землеволодіння та призначення сільськогосподарських культур неможливо отримати виключно за допомогою методів дистанційного зондування.

Це свідчить про значущість та потенціал використання техніки дистанційного зондування для удосконалення аграрної сфери та ефективного управління земельними ресурсами.

На сьогоднішній день активно розвивається сфера створення систем дослідження природних ресурсів Землі з космосу. Це включає: супутники для розробки способів спостереження за природними ресурсами з космосу, системи телеметричних станцій, які приймають інформацію із супутників, групи літальних апаратів, які одночасно виконують лазерне сканування або аерофотозйомку та спектроскопічні вимірювання, одночасно отримуючи зображення із супутників, наземні станції, особливо автоматичні наземні станції, для збору даних про навколишнє середовище, центри обробки, зберігання та розповсюдження отриманої інформації [26]. Якість камер покращується з кожним роком, як і ємність акумуляторів [27]. Алгоритми обробки зібраної інформації вдосконалюються, а використання дронів стає все доступнішим. Комерційні служби продовжують відправляти на орбіту супутники ДЗЗ. Нові програми Landsat і Sentinel-2 мають у планах запуск нових апаратів, які використовуватимуть більш передові технології для зйомки та сканування поверхні Землі. Це призводить до збільшення зацікавленості аграріїв у використанні дронів та супутникового моніторингу.

У останній час в Інтернеті з'явилося чимало інформації про безпілотні системи – дрони. Сучасне сільське господарство – це галузь, що використовує передові наукові та технічні розробки. ГІС-технології, дистанційний моніторинг посівів, точне землеробство та прогнозування врожаю – це основні складові сучасного сільського господарства.

Тому не дивно, що дрони, назва яких за іронією долі походить від англійського слова «drones», все частіше можна побачити над полями. За різними оцінками, потенціал цільового ринку використання безпілотних літальних

апаратів у сільському господарстві сягне \$32,4 млрд у 2020 році. Зараз основним покупцем послуг дронів є аграрний сектор. Наприклад, за даними Міжнародного товариства безпілотних систем (UAVSI), 80% цивільних дронів у США використовуються саме в сільськогосподарському секторі. При цьому розвиток ринку так званих "малих БПЛА" вагою до 25 кг наразі є одним із найбільш швидкозростаючих. За прогнозами ABI Research, до 2025 року сума перевищить 30 мільярдів доларів, з яких 70% припадатиме на комерційний сектор і, перш за все, сільське господарство. Дрони також виконують різні функції спостереження. Зокрема, це:

- спостереження за станом рослин на різних стадіях розвитку: починаючи з вирощування сходів і закінчуючи оцінкою стану озимих культур на початку весняного відновлення вегетації. Це включає оцінку зараження бур'янами, оцінку розвитку рослин на різних фенологічних стадіях, моніторинг захворювань і пошкоджень, спричинених шкідниками, оцінку забезпеченості рослин поживними речовинами, особливо азотом, і оцінку потреб рослин у зрошенні та управління потребами рослин у зрошенні.

- Контроль якості технічних робіт - обробіток ґрунту, посів, зрошення, внесення добрив тощо.

- Моніторинг ґрунтового стану - використання даних високоточних обстежень для створення ґрунтових карт та класифікації ґрунтів за вмістом гумусу та поживних речовин, постачання та моніторинг активних процесів деградації ґрунтів (ерозія, підтоплення, засолення, засолення).

- Інвентаризація угідь.
- Стеження за худобою.
- Контроль за надзвичайними ситуаціями, такими як пожежі, порубки, підтоплення, а також крадіжки, є важливою складовою моніторингу ґрунтового стану.

Ці заходи дозволяють оперативно виявляти та реагувати на потенційні загрози для здоров'я ґрунту та природних екосистем. Вони сприяють

попередженню збитків та збереженню природних ресурсів, забезпечуючи ефективний контроль за виникненням негативних подій.

Однак необхідно враховувати, що безпосереднє спостереження наземних об'єктів і моніторинг у формі оцінки ґрунтів і рослинності вимагають різних підходів у техніці зйомок і обробки даних. Тому спочатку необхідно чітко розуміти, для яких цілей буде використовуватися дрон. Вони створюють тривимірні карти для аналізу азоту та інших речовин у ґрунті, які можна використовувати для розробки планів посадки. Дрони також можуть самі сіяти насіння. Вертоліт ширяє над розсадником і запускає капсули з насінням і поживними речовинами глибоко в землю. БПЛА можуть розпилювати добрива та пестициди на рослини. Використовуючи ультразвукову ехолокацію, дрон регулює висоту польоту та сканує місцевість, щоб рівномірно розподілити необхідну кількість пестициду чи інсектициду. Цей же дрон потім може оцінити стан посівів або вчасно виявити появу шкідників. Дрони також можуть мати позитивний вплив на структуру сільського населення. Зараз молоді кваліфіковані фахівці не завжди готові обирати кар'єру в сільському господарстві. Однак впровадження новітніх технологій може змінити цю ситуацію, роблячи роботу в агропромисловому секторі престижною та захопливою для випускників коледжів і університетів. Наприклад, застосування наземної техніки при обприскуванні може значно зменшити витрати рідини, використовуючи від 300 до 400 літрів на гектар. Принципово, фермери прагнуть абсолютно захистити листя рослин від шкідників, наносячи захисні засоби та використовуючи різні клеї. Однак до 40% рідини, яка наноситься, все одно витікає з листя, потрапляє в ґрунт та навіть проникає в підземні води, що абсолютно не сприяє екологічній безпеці навколишнього середовища.

Використання спеціальних насадок під лопатями двигуна дрона та технології ультратонкого розпилення, яка розбиває краплі на частинки розміром 50-100 мікрон, зменшує споживання гідравлічної рідини. Він досягає ~5 літрів на гектар, або в 60-80 разів більше. Це економить до 30-40% діючої речовини. Крім того, спеціально розроблена насадка додатково заряджає ці мікрокраплі, щоб

вони не притягувалися одна до одної в повітрі. Завдяки статичній електриці він щільно прилипає до поверхні рослини навіть знизу. Дрон літає низько, з висоти до 2 метрів, ідеально повторюючи рельєф поля, тому нічого не здуває «на вітер». При обробі саду турбулентність двигуна дозволяє цим мікрокраплям «проникати» до 8 метрів у крону дерева, забезпечуючи однакову концентрацію препарату як на верхівці, так і в глибині гілок. Суттєві переваги та недоліки наведені (табл. 1.3).

Таблиця 1.3

Переваги та недоліки використання дронів

Переваги	Недоліки
Стабільність системи	Слабкий опір вітру
Висока надійність	Необхідність тримати апарат в прямому полі зору
Планове обслуговування є простим	
Батарея може заряджатися повторно, має низьку вартість, не шкодить навколишньому середовищу	Короткий польотний час від 15 до 40 хвилин
Простота в підготовці до старту	Витривалість (на основі існуючих акумуляторів, щільність енергії, життя батареї є слабким)
Легкість в управлінні	
Апарат неможливо зламати необережним поводженням	
Стабільна якість відео сигналу	
Можливість польоту при вітрі до 15 м/с	
Ефективний на площах до 150 га	
Після завершення маршруту дрон повертається на точку запуску	
Простота в підготовці до старту	

Безпілотники як сільгосптехніка практично не мають недоліків. Він може працювати в будь-який час доби і може бути закритий лише через сильний вітер або дощ. Водночас ці дрони виявляються дуже автономними. Роль оператора зводиться в основному до того, щоб вчасно долити хімічні речовини у бак і замінити акумулятор. Одним з обмежень, які ще заважають дронам стати повністю функціональними в сільському господарстві, є обмежена ємність

акумуляторів. Ємності одного з них достатньо для 15-хвилинного польоту, перш ніж бак для добрив або ЗЗР спустошиться і потребує заміни на новий. Загалом батарея вистачає на 300 циклів зарядки, після чого її необхідно замінити на нову. Але наука працює над цим питанням. Причина в тому, що є попит не тільки з боку виробників БПЛА, а й з боку електромобілів і смартфонів. Якщо на цьому фронті відбудеться прорив, мікрополіт стане нестримним.

Звісно, не кожен фермер може дозволити собі обладнання свого господарства такими допоміжними засобами. Зазвичай цікавляться впровадженням таких інновацій великі і середні сільгоспідприємства, а також компанії, які надають аграріям послуги з внесення добрив та хімікатів. Особливо вони зацікавлені у використанні безпілотників, оскільки це надає можливість ефективно обробляти фермерські угіддя області до 100 гектарів без необхідності використання великої сільгосптехніки.

Використання дронів у сільському господарстві є перспективним напрямком і однозначно потребує подальшого розвитку. Однак нагадаємо, що 1 червня влада оприлюднила тимчасові "Правила використання повітряного простору України". Ці правила самі по собі є заборонними і значно обмежать ефективність БПЛА в сільськогосподарській промисловості, коли вони стануть постійними і повністю запрацюють. Важко стежити за посівами, якщо ви не можете літати принаймні 50 метрів над землею. Незрозуміло, як можна підтримувати візуальний контакт з дроном, коли відстань між полями часто становить кілька кілометрів. Якщо вам дійсно потрібно полетіти вище і далі, ви повинні подати запит на бронювання повітряного простору принаймні за 10 днів. Є ще один нюанс. Дозвіл на політ можна отримати лише в Українському центрі, представництва якого є по всій Україні. При запровадженні принципу свободи пересування автори Постанови не врахували можливість подання заяв на електронну видачу. Якщо комерційне використання безпілотників не буде суттєво лібералізовано, агрономам, які щойно перейшли з джипів на комп'ютерні монітори, знову доведеться їздити поодиночі, щоб оцінити здоров'я своїх посівів.

Про точне землеробство можна зовсім забути. Бо без операцій і, головне, пильного моніторингу, точне землеробство неможливе.

Моніторинг стану посівів є ключовим джерелом інформації про виявлення бактерій, бур'янів, захворювань та інших проблем. Цей процес дозволяє вчасно виявляти будь-які відхилення у рості та розвитку рослин, розуміти їх причини та приймати оперативні управлінські рішення. Однак моніторинг є трудомістким процесом і вимагає значних зусиль. Це стосується як великих полів, так і невеликих ділянок, розкиданих на території кількох сільських рад. Навіть в найкращому випадку агрономам потрібно бути на полі практично кожен день, щоб перевіряти стан врожаю. Рослини можуть досягати висоти до двох метрів і більше, що ускладнює виконання аналізу посівів. При традиційному методі спостереження "навіть за коробками" важко отримати повну картину стану всього поля. І відсутність достатньої інформації може призвести до потенційних втрат у врожаї. Зараз існує багато способів стежити за рослинами протягом сезону. Це включає використання супутників і дронів, позакореневу діагностику, аналіз зразків ґрунту тощо. Розглянемо використання дронів і супутників, які зробили революцію в сільському господарстві за останні роки.

На відміну від пілотованих літальних апаратів, дрони можуть залишатися в повітрі тривалий час. Зазвичай цього часу достатньо, щоб, наприклад, пролетіти над кінотеатром, виміряти навколишню місцевість і передати дані через супутник. Переваги дронів над супутниками наведені нижче (рис. 1.2).

	 СУПУТНИК (10м - 250м)	 СУПУТНИК (60 см - 1.5м)	 ДРОН
Реальна площа поля, його рельєф	✗	✗	✓
Стан поля, наявність калюж, солончаків, підтоплення, заболочування	✗	✓	✓
Площа виконаних технологічних операцій	✗	✗	✓
Якість виконаних операцій	✗	✗	✓
Стан і динаміка вегетації на основі індексу NDVI	✓	✓	✓
Наявність на полі бур'янів	✗	✗	✓

Рис. 1.2. Переваги дронів над супутниками

Суть такого моніторингу полягає в оцінці стану рослин на основі аналізу даних з супутникових знімків. Супутники літають над певними областями та роблять зображення з високою роздільною здатністю, фіксує потрібну вам область поля. Отримані зображення стають цінним джерелом оперативної інформації щодо стану посівів та рослинності. Спеціально розроблені спектральні камери дозволяють здійснювати розрахунки вегетаційних індексів, таких як NDVI, NDRi, RVI та інші. Ці індекси вказують на рівень здоров'я та розвитку рослин, а також допомагають виявляти будь-які аномалії чи проблеми, що можуть виникнути в ході вирощування культур. Завдяки цьому фермери можуть приймати своєчасні та обґрунтовані рішення щодо заходів догляду за посівами та управління врожаєм.

Найпопулярнішим у рослинництві є індекс NDVI, або «нормований індекс відносної рослинності». За даними про активність біомаси використовують індикатори для оцінки стану врожаю в певний момент часу або в динаміці. У процесі фотосинтезу зелені рослини поглинають більшу частину спектра видимого світла та відбивають ближнє інфрачервоне світло. Так, індекс NDVI (Normalized Difference Vegetation Index) розраховується шляхом віднімання значень відображення у червоному та ближньому інфрачервоному спектральних

діапазонах, після чого отримане значення ділиться на їх суму. Цей індекс є показником щільності рослинності і дозволяє визначити стан рослин на ділянці поля. Високі значення NDVI вказують на здорову та щільну рослинність, тоді як низькі можуть свідчити про проблеми з рослинами або потребу у додатковому догляді. Ця інформація допомагає фермерам приймати рішення щодо необхідних заходів, таких як пересівання чи внесення добрив, для оптимізації врожаю.

Головною перевагою використання супутникових систем є їх ретроспективний характер. Використання сервісів з власною базою даних зображень дозволяє отримати історичну інформацію про ділянки поля за останні кілька років, включаючи інформацію про сівозміну, динаміку розвитку біомаси та продуктивність земельних ділянок. Це допомагає агрономам визначити проблеми та прийняти ефективні рішення для їх вирішення. Дрони забезпечують ще більш детальну та мобільну збір інформації про стан посівів, оскільки вони можуть працювати на більш низьких висотах з більш високою роздільною здатністю. Вони дозволяють збирати великі обсяги даних за короткий час, що дозволяє агрономам швидко отримувати необхідну інформацію. Важливою різницею між різними типами БПЛА є їх характеристики, такі як дальність польоту, стійкість, підйомна здатність та ціна, що впливає на їх ефективність і вартість використання.

Так, дрони виявляються дуже корисними інструментами для сільського господарства, проте мають і свої переваги і недоліки.

Переваги:

1. Висока мобільність і оперативність проведення зйомки: Дрони можуть швидко пересуватися над полями, що дозволяє оперативно отримувати необхідні дані про стан посівів.
2. Точність від 2 сантиметрів: Дрони здатні забезпечити високу точність зйомки, що дозволяє детально аналізувати стан посівів та виявляти проблеми.

3. Можливість проведення зйомок у умовах хмарності: Деякі моделі дронів можуть працювати і в умовах обlačності, що робить їх більш універсальними в застосуванні.
4. Висока продуктивність: Дрони здатні збирати великі обсяги даних за короткий проміжок часу, що дозволяє ефективно використовувати їх для моніторингу посівів.

Недоліки:

1. Ефект, який мають погодні умови на якість здійснення фотозйомки: Погодні умови, такі як сильний вітер або дощ, можуть обмежувати можливості дрона для збору даних.
2. Наявність "no fly zone" в обмежених зонах: Деякі області, такі як аеропорти чи військові об'єкти, можуть бути недоступними для польотів дронів через обмеження з пункту безпеки.
3. Вартість дрона: Вартість дронів і їх устаткування може бути значною, що ускладнює їх доступність для деяких фермерів чи сільгоспприємств.

Так, моніторинг з використанням супутників та дронів дозволяє проводити якісний контроль починаючи з передпосівної підготовки ґрунту і закінчуючи збором врожаю. Перед посівом, основною інформацією моніторингу є якість проведення передпосівної обробки ґрунту. Супутникові дані та зображення, отримані від дронів, дозволяють оцінити стан ґрунту, виявити проблемні ділянки та визначити потребу у додаткових заходах для підготовки ґрунту до посівів. Крім того, дрони використовуються для створення точних тривимірних карт рельєфу, що важливо для планування посівів. Ці дані дозволяють враховувати всі перепади висот та природні об'єкти на полі, що допомагає максимально ефективно використовувати земельні ресурси.

Після висадки рослин, аналіз ґрунту проводиться для розробки оптимальної схеми зрошення та внесення добрив. Зібрані дані про стан ґрунту дозволяють точно визначити потреби культур у воді та поживних речовинах, що сприяє оптимізації процесів зрошення та добрив (рис. 1.3).



Рис. 1.3. Моніторинг ґрунтів за допомогою безпілотних літальних апаратів

Точно, дрони мають перевагу у використанні спектральних камер, які здатні отримувати зображення в різних спектральних діапазонах, зокрема в ближньому інфрачервоному спектрі. Це дозволяє використовувати дані для розрахунку таких показників, як індекси рослинного покриву, зокрема NDVI (Normalized Difference Vegetation Index), який вказує на стан рослинності та потенційний врожай. Хоча звичайні камери також можуть застосовуватися для цих цілей, вони потребують модифікацій та додаткової обробки даних для досягнення такої самої точності та ефективності, як спеціалізовані спектральні камери. Крім того, існують "хмарні" програмні рішення, такі як DroneDeploy, які дозволяють збирати, обробляти та аналізувати дані, зібрані за допомогою дронів, для отримання різноманітної інформації про стан полів та посівів. Ці рішення роблять процес обробки та аналізу даних більш швидким та ефективним. Цей сервіс дозволяє розраховувати індекс NDVI і обробляти зображення окремо. При цьому не потрібно завантажувати і встановлювати спеціальне програмне забезпечення або виконувати складні обчислення, все робиться безпосередньо в браузері користувача. Такий комплексний моніторинг, який починається з передпосівної підготовки ґрунту і закінчується збором врожаю, дійсно дозволяє фермерам ефективно керувати своїми посівами та максимізувати врожайність. Використання супутникових зображень і даних, а також застосування дронів, надає можливість оперативно виявляти проблеми та вживати заходів для їх

вирішення. Під час посіву, аналізуючи ступінь втрати рослин та потребу у підсіві чи пересіві, фермери можуть приймати рішення щодо оптимізації посівної діяльності. За допомогою карт густоти посівів і зон неоднорідності сходів вони можуть визначити, де необхідно провести додаткові заходи для покращення врожайності.

Особливо важливим є моніторинг озимих культур, де розвиток весняних сходів має велике значення для врожайності. Використання даних від дронів та супутників допомагає фермерам визначити оптимальний час та обсяги внесення добрив для підтримки здоров'я рослин. Усі ці дані і аналізи стають основою для створення електронних карт-завдань для сільськогосподарської техніки. Ці карти дозволяють оптимізувати використання добрив та інших агротехнічних заходів, спрямовуючи їх у зони, де вони найбільш необхідні.

Для моніторингу стану ґрунтів та посівів у невеликих господарствах особливо в умовах військових дій є неможливим використання дронів, отже, доцільним є розроблення наземних стаціонарних кібер-фізичних систем контролю, про що й буде йти мова у дисертації.

Отже, створення недорогих та ефективних систем моніторингу на основі кібер-фізичних систем сьогодні є особливо актуальним. Такі рішення вже пропонуються і реалізуються на базі персональних комп'ютерів (ПК) [1м], але доступ до ПК не завжди можливий і не забезпечує мобільність. Найнадійніша система збору даних для КФС має бути зручною для користування фермерами та мобільною. Мобільні додатки розробляються, наприклад, для моніторингу пожежі, ідентифікації рослин [28, 29]. Тож в роботі пропонується реалізація системи моніторингу ґрунтів (на прикладі вирощування зернових культур) у вигляді мобільного додатку, що є хорошим рішенням завдання моніторингу стану агровиробництва [30, 31].

1.4. Формування задач подальших досліджень

Основні завдання подальших досліджень щодо вдосконалення метрологічного забезпечення системи контролю стану ґрунтів можуть включати:

- розробка системи класифікаторів для кібер-фізичних систем та оцінка

ризиків під час їх створення та функціонування з метою забезпечення раціонального їх вибору за конкретних умов;

- формування пропозиції щодо шляхів національної стандартизації в царині кібер-фізичних систем у зв'язку з її відсутністю;

- для забезпечення оперативного контролю агровиробництва розробка апаратного та програмного забезпечення кібер-фізичної системи моніторингу стану ґрунтів;

- ідентифікація та оцінка ризиків функціонування розробленої кібер-фізичної системи моніторингу ґрунтів;

- розробити прогнозну модель зміни стану ґрунтів на основі використання нейромереж та хмарних технологій, що дасть можливість формувати управлінські рішення щодо здійснення сільськогосподарських робіт (висівання, збір врожаю, тощо) та підвищить ефективність прогнозування врожаю зернових культур.

- розробити методику верифікації та калібрування запропонованої кібер-фізичної системи моніторингу стану ґрунтів, дослідити її метрологічні характеристики.

Висновки до розділу 1

1. Проаналізовано основні аспекти концепції інтернету речей та можливості його використання для моніторингу стану ґрунтів, як один із перспективних напрямків для реалізації IoT, що є особливо важливим для агрогосподарств з метою контролю всіх етапів вирощування сільськогосподарських культур.

2. Після аналізу впливових факторів на параметри ґрунтів визначено основні показники, критерії оцінки та процеси, які контролюються під час проведення оперативного моніторингу ґрунту та сприяють підвищенню їхньої продуктивності.

3. Здійснено дослідження характеристик сучасного інструментарію для моніторингу стану ґрунтів та запропоновано шляхи їх вдосконалення для малих агрогосподарств в сучасних умовах.

4. Проведено аналіз основних аспектів розвитку систем моніторингу стану ґрунтів агропромислового призначення, на основі якого сформовано проблематику та задачі подальших досліджень.

РОЗДІЛ II. КОНЦЕПЦІЯ РЕАЛІЗАЦІЇ АПАРАТНОГО ТА ПРОГРАМНОГО ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ СИСТЕМИ ЗБОРУ ІНФОРМАЦІЇ ДЛЯ КІБЕР-ФІЗИЧНОЇ СИСТЕМИ МОНІТОРИНГУ СТАНУ ҐРУНТІВ

2.1. Дослідження потенціалу кібер-фізичних систем для застосування у агросекторі

Для забезпечення ефективної державної політики у сфері побудови та функціонування кіберфізичних систем в Україні необхідно провести детальне дослідження сучасного стану та тенденцій розвитку КФС, а також аналіз типів світу в сфера особливостей сільськогосподарської галузі Є. Національні механізми менеджменту в основних країнах світу, особливо в ЄС, розробка нормативних положень для КФС в Україні та прийняття національних і міжнародних стандартів як національних щодо різноманітних вимог і технічних характеристик, необхідних для функціонування КФС. Сертифікація КФС, функціональна сумісність, створює умови для професійної підготовки спеціалізованого персоналу, особливо у важливих сферах, таких як сільськогосподарське виробництво, і підвищує кваліфікацію для управління КФС.

Згідно з проведеним аналізом визначено основні завдання подальших досліджень щодо вдосконалення метрологічного забезпечення системи контролю стану ґрунтів. Сучасні передові технології в аграрному секторі базуються на застосуванні кіберфізичних систем для збору даних, мережевого моніторингу та контролю. Проблеми сталого розвитку сільського господарства в різних регіонах світу ставлять перед ним важливі завдання [32]. Прикладами таких глобальних викликів є ріст населення, урбанізація та зміна клімату. Розв'язання світових економічних проблем повинно враховувати збереження потенціалу сільськогосподарського сектора для задоволення глобальних потреб у продовольстві. Концепція та необхідність інновацій у сільському господарстві включає різноманітні аспекти, включаючи збереження навколишнього середовища, біорізноманіття та здоров'я. Взаємозв'язок між сільським господарством і природним середовищем породжує як проблеми, так і можливості для оптимізації технологій. Інтенсивне сільськогосподарське виробництво

призводить до досягнень людства у сфері продовольства, але також призводить до втрати природного стану екосистем.

Отже, надмірне використання добрив може становити ризик забруднення довкілля, тоді як недостатня їх кількість може призвести до деградації ґрунту та втрати його родючості. Враховуючи ці обставини, системи сільськогосподарського виробництва повинні ефективно управляти біорізноманіттям та екосистемними послугами, щоб вирішити подвійні виклики сталості навколишнього середовища та продовольчої безпеки. Це можна здійснити шляхом впровадження надійних заходів, таких як консервація ґрунту [33-35]. Необхідно приділяти більше уваги збереженню та управлінню.

Розвиток автоматизації транспортних засобів і водіння за допомогою GPS у сільському господарстві призвів до автоматизації виробничих ланцюгів, а також до концепцій точного землеробства та точного землеробства. Однак такі системи мають істотні недоліки щодо гнучкості, стандартизації, надійності та відображення даних у реальному часі. Тому актуальним є теоретичне обґрунтування механізму контролю та стандартизації формування та функціонування КФС у галузі агропромисловості та розробка пропозицій щодо його вдосконалення.

2.1.1. Точне землеробство як запорука створення smart-технологій у сфері сільського господарства

За останні десятиліття досягнення в області автоматизації та дистанційного зондування відіграли важливу роль у вдосконаленні виробництва харчових продуктів і розвитку концепцій точного землеробства. Ці технології вже сформували парадигму підвищення продуктивності та якості в сільському господарстві, сприяючи зменшенню ручної праці та покращенню умов праці. Використання високотехнологічних рішень, таких як обладнання з цифровим керуванням, GPS-підтримувані транспортні засоби та дрони для моніторингу, стало стандартом серед багатьох фермерів. Хоча підходи точного землеробства є

ефективними, вони зазвичай орієнтовані лише на конкретні завдання і не охоплюють всю складність сільськогосподарського процесу.

Сільське господарство можна розглядати як систему, де для кожного набору ресурсів існує конкретний вихідний або проміжний продукт. Однак різні умови, такі як кліматичні фактори, якість ґрунту та поширення шкідників, можуть впливати на результат. Важко передбачити або контролювати зовнішні фактори, які впливають на сільськогосподарські системи. Тому прогнозні моделі не завжди можуть гарантувати очікувані результати. Створення кіберфізичних систем з різноманітними функціональними можливостями стає невід'ємною частиною цього процесу. Фермерам важливо мати інформацію про стан своїх посівів, а збір даних моніторингу в реальному часі надає можливість досягнення інновацій та підтримки стійкої продуктивності. Таким чином, поєднання сучасних вимірювальних технологій і роботизованих інструментів створює основу для розробки розумних концепцій і методологій в сільському господарстві.

2.1.2. Класифікація кібер-фізичних систем та ризиків під час їх створення та функціонування

Після аналізування наявних сьогодні комп'ютерних фізичних систем (КФС), їх програмного та метрологічного забезпечення, стає зрозумілим, що зі зростанням їх кількості розширюються сфери їх використання. Програмне та метрологічне забезпечення постійно розвивається для підтримки роботи наявних КФС і їх придатності для конструювання нових. Отже, основними вимогами, які ставляться при створенні КФС, є безпека, конфіденційність, надійність, стійкість, гарантії щодо поширених взаємопов'язаних пристроїв та інфраструктур, динамічність, сумісність (можливість розмістити різні обчислювальні моделі), підтримка різних режимів комунікування в мережі, розв'язання проблем складності (управління та зворотний зв'язок в будь-якій архітектурі КФС), синхронізація, взаємодія з експлуатаційним середовищем, можливість співпраці для досягнення кількох цілей.

Класифікація кіберфізичних систем (КФС) за різними критеріями є

важливою для створення відповідного нормативно-технічного та метрологічного забезпечення. КФС можуть бути класифіковані за їх функціональним призначенням, сферою застосування, ступенем автономності та технічними характеристиками. Ця класифікація допомагає у розумінні і розвитку різноманітних систем, що використовуються у відповідних галузях, таких як сільське господарство, медицина, промисловість тощо. В Європі оптимізація витрат на оплату праці є одним з ключових факторів використання кіберфізичних систем у сільському господарстві [37]. Це відображається у впровадженні автоматизованих технологій, які дозволяють зменшити ручну працю та підвищити ефективність виробництва. Оптимізація ресурсів та підвищення продуктивності через використання сучасних технологій є важливим кроком у забезпеченні стійкості та конкурентоспроможності сільськогосподарського сектору. Зокрема в залежності від використання КФС можна поділити (рис. 2.1) [36]:



Рис. 2.1. Розділення КФС на категорії в залежності від їх призначення

Кіберфізичні системи мають широкі застосування в сільському господарстві, охоплюючи різні галузі, включаючи рослинництво, тваринництво, переробку сировини, транспортування, зберігання та реалізацію продукції. З цього приводу важливим стає як теоретичне, так і практичне значення класифікації кіберфізичних систем у галузі агропромисловості. Класифікація дозволяє

визначити різноманітність та специфіку таких систем, а також виявити їхні потенційні переваги та обмеження для практичного застосування в конкретних умовах сільськогосподарської діяльності (таб. 2.1).

Таблиця 2.1.

Класифікація КФС в агросекторі

Критерії класифікації кіберфізичних систем	Класифікація кіберфізичних систем
за галузями	<ul style="list-style-type: none"> - в тваринництві; - в рослинництві; - у допоміжних виробництвах
за видами виконуваних робіт	<ul style="list-style-type: none"> - посів сільськогосподарських культур; - обприскування рослин отрутохімікатами і добривами; - видалення, прополювання бур'янів; - контроль лабораторної схожості посівів; - збирання врожаю кормових культур; - збирання фруктів; - догляд за виноградниками та садовими деревами; - транспортування розсади в теплицях; - полив рослин в теплицях; - механізовані роботи з підготовки ґрунту, що виконуються безпілотним (автономним) транспортом - моніторинг сільськогосподарських угідь; - сортування сільськогосподарської продукції; - пакування сільськогосподарської продукції
за характером переміщення	- стаціонарні кіберфізичні системи;

	- мобільні кіберфізичні системи; - безпілотні кіберфізичні системи
за типом управління	- керована оператором; - автономна

Система управління промисловими кіберфізичними системами оперує за програмованими шаблонами рухів в конкретних областях. У відміну від цього, сільськогосподарські кіберфізичні системи працюють у змінних умовах природи та клімату. Вони:

- керують живими організмами, такими як рослини та тварини, що не завжди мають визначену форму або порядок;
- використовують інструменти та обладнання, спроектовані для використання людиною;
- забезпечують безпеку працюючих у навколишньому середовищі, де можуть перебувати люди та тварини.

З технічного погляду можна виокремити різні ризики, що виникають під час будівництва та експлуатації КФС. Врахування цих ризиків є важливим, особливо для сільськогосподарського сектору (рис. 2.2.):



Рис. 2.2. Ризики, пов'язані зі створенням та функціонуванням кіберфізичних систем

1) Різноманітність даних: Проблема різноманітності даних може негативно позначитися на ефективності взаємодії та розробці комунікаційних протоколів у кіберфізичних системах, оскільки системи повинні підтримувати різноманітні додатки і пристрої.

2) Надійність: Важливою характеристикою кіберфізичних систем є їх надійність, особливо у критично важливих галузях, таких як охорона здоров'я та транспорт, оскільки ненадійність може призвести до серйозних наслідків.

3) Управління даними: Кіберфізичні системи потребують ефективного зберігання, аналізу та виведення результатів великого обсягу даних, що надходять в реальному часі від різних мережевих пристроїв.

4) Конфіденційність: Збереження конфіденційності та захист персональних даних є важливими аспектами кіберфізичних систем, особливо враховуючи обробку значних обсягів інформації.

5) Безпека: Кіберфізичні системи повинні забезпечувати безпеку комунікацій та даних, оскільки вони взаємодіють між фізичними та обчислювальними системами в реальному часі.

6) Реальний час: Оскільки фізичні процеси розвиваються незалежно від результатів обчислень, кіберфізичні системи мають забезпечувати ефективне та оперативне оброблення даних у реальному часі.

2.1.3. Стандартні вимоги, що регулюють створення та функціонування кібер-фізичних систем

Для реалізації ефективної державної стратегії у сфері створення та функціонування кібер-фізичних систем (КФС) в Україні ключовим є детальний аналіз поточного стану і прогнозування тенденцій їх розвитку як на світовому рівні, так і в різних секторах економіки. Особливу увагу слід приділити механізмам управління КФС у провідних країнах, зокрема в Європейському Союзі. Важливим є удосконалення нормативного забезпечення, прийняття національних та міжнародних стандартів, а також проведення сертифікації їх функціональної сумісності. Необхідно також забезпечити умови для професійного навчання та підвищення кваліфікації кадрів, які будуть керувати КФС. Оскільки

розвиток інформаційних технологій та застосування кібер-фізичних систем стрімко зростає, необхідно розробити загальноприйняте визначення самої концепції КФС та розглянути особливості нормативного забезпечення їх функціонування в провідних країнах світу.

Міжнародні організації, такі як Міжнародна електротехнічна комісія (ІЕС), Міжнародна організація зі стандартизації (ІСО) та Асоціація стандартів (ІЕЕЕ), розробили ряд стандартів для кібер-фізичних систем (КФС) [38], а саме:

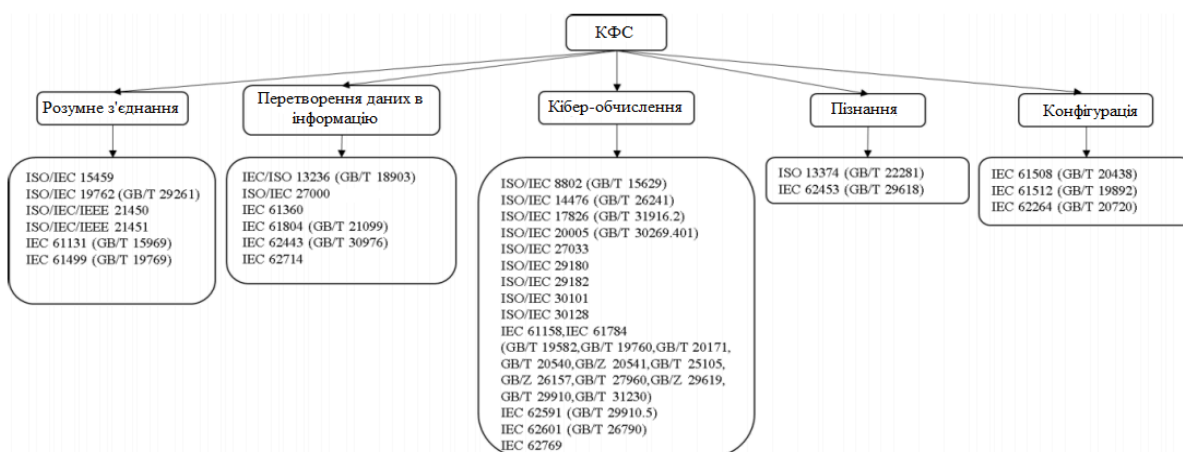


Рис. 2.3. Міжнародні стандарти для кібер-фізичних систем, які описують їхню структуру

Рівень розумного з'єднання у кібер-фізичних системах визначає, як отримувати дані від фізичних об'єктів. Один із широко використовуваних методів - це Automatic Identification and Data Capture (AIDC), який автоматично ідентифікує та збирає дані. Стандарт ISO/IEC 19762:2016 містить терміни та визначення для AIDC. Також існують стандарти серії ISO/IEC 15459, які встановлюють унікальну ідентифікацію для різних видів товарів та упаковок. Для збору даних з виробничих систем використовуються сенсори, для чого визначені стандарти ISO/IEC/IEEE 21450:2010 та серія ISO/IEC/IEEE 21451, які описують основні функції керування системою та розумними сенсорами. Крім того, серія стандартів IEC 61131 регулює основні функціональні характеристики програмованих систем управління, а IEC 61499 встановлює модель для розподілених систем управління та надає настанови для створення надійного зв'язку з іншими системами управління.

Рівень перетворення даних в інформацію включає обробку даних з точки зору рівня інтелектуального зв'язку та аналізу інформації. Стандарти, такі як IEC 61804-3, IEC 61804-4, IEC 6180-5 та IEC 61804-6 (Мова електронного опису пристрою, EDDL), використовуються для опису характеристик пристроїв, тоді як серія IEC 61360 надає основу для чіткого та однозначного визначення характеристичних властивостей всіх елементів електротехнічних систем. Додатково, серія стандартів IEC 62714 забезпечує формат обміну даними, відомий як Automation Markup Language (AML), забезпечуючи уніфікованість даних. Стандарти ISO/IEC13236:1998 і ISO 27000 регламентують найкращі практики щодо безпеки даних та управління ризиками в інформаційних технологіях, а серія стандартів IEC 62443 (ISA99) використовується для забезпечення безпеки промислових систем автоматизації та управління.

Рівень кіберобчислень включає в себе комунікацію як найважливіший аспект кібер-фізичних систем та обчислень. Для обміну даними інформацією між кібер-фізичними системами потрібні відповідні стандарти, які охоплюють дротовий та бездротовий зв'язок. Стандарти, такі як ISO/IEC 8802, описують міжнародні стандарти для локальних мереж. Для дротового зв'язку використовуються серія стандартів IEC 61158 та IEC 61784 для типів та профілів шин, таких як PROFIBUS, PROFINET, і WorldFIP, серед інших. Для бездротового зв'язку використовуються стандарти, такі як IEC 62591 (Wireless HARTTM) та IEC 62601 (WIA-PA). Для забезпечення якості обслуговування використовуються стандарти ISO/IEC 14476 для транспортного протоколу зв'язку. Стандарти, такі як ISO/IEC 20005, ISO/IEC 29180, ISO/IEC 29182, ISO/IEC 30101 та ISO/IEC 30128, використовуються для створення інтелектуальних, надійних та безпечних сенсорних мереж. Додатково, стандарти ISO/IEC 17826 і ISO/IEC 27033 забезпечують надійність та безпеку мережі, а IEC 62769 використовується для інтеграції пристроїв за допомогою комунікаційних технологій.

Рівень пізнання включає в себе процеси моніторингу та процесу прийняття рішень. Стандарти, такі як серія ISO 13374, встановлюють вимоги до відкритих специфікацій програмного забезпечення, які дозволяють машинам

контролювати дані, їх опрацювання та зв'язок. Крім того, стандарт ІЕС 62453 регламентує процес інтеграції всіх пристроїв незалежно від їх постачальників, щоб забезпечити їх взаємодію та сумісність.

Рівень конфігурації охоплює стандарти загального контролю за кібер-фізичними системами. Наприклад, стандарт ІЕС 61512 встановлює моделі контролю, терміни та моделі даних, сприяючи уніфікації процесів управління. Стандарт ІЕС 62264, призначений для інтеграції систем управління підприємством, сприяє одноманітності та послідовності побудови інтерфейсу, зменшуючи ризики, вартість та помилки, пов'язані з реалізацією цих інтерфейсів. Крім того, стандарт ІЕС 61508 спрямований на підвищення безпеки та забезпечення надійності життєвого циклу та контролю промислових процесів.

Звичайно, включення термінології та положень, що стосуються кібер-фізичних систем, у відповідні законодавчі та стратегічні документи, дозволить урізноманітнити та уточнити правовий статус цих систем в Україні. Це важливий крок у напрямку створення прозорого та ефективного регулювання, яке враховує специфіку та потреби розвитку кібер-фізичних систем у сучасному світі. Такі кроки допоможуть забезпечити безпеку та стабільність функціонування цих систем, що має важливе значення для національної економіки та суспільства в цілому [39-43].

Кібер-фізична система (КФС) - це комплексна система, що поєднує фізичні об'єкти з інформаційно-комунікаційними технологіями для забезпечення автоматизованого контролю, моніторингу та управління фізичними процесами. Основні універсальні особливості КФС включають інтеграцію фізичних об'єктів із сучасними інформаційними та комунікаційними технологіями, здатність автоматично отримувати, обробляти та передавати дані про стан фізичних об'єктів у реальному часі, можливість реагувати на зміни в навколишньому середовищі та приймати рішення на основі зібраних даних, забезпечення високого рівня безпеки та конфіденційності обробки та передачі інформації, а також наявність механізмів резервування та відновлення роботи системи в разі виникнення непередбачених ситуацій. Введення поняття "кібер-фізична система" у нормативні документи з

метрології дозволить унормувати та забезпечити належне регулювання їх функціонування, зокрема вимоги до точності вимірювань, стандартизацію даних та протоколів зв'язку, а також забезпечить сумісність з існуючими системами та пристроями: *кібер-фізична система - це інтелектуальна система, що включає інженерно взаємодіючі мережі фізичних та обчислювальних компонентів* [44].

У рамкових документах Німеччини та США, а також у рамковому документі ЄС "Cyber-Physical European Roadmap & Strategy Research Agenda and Recommendations for Action" відзначається важливість сертифікації кібер-фізичних систем (КФС) для підтвердження їхньої надійності, безпеки, стійкості та конфіденційності. Однак зазначається, що сучасні методи та інструменти сертифікації не завжди відповідають вимогам сучасних КФС через їхню невідповідність вимогам середовища, у якому вони функціонують. Таким чином, актуальність та адекватність існуючих методів та інструментів сертифікації потребує подальшого удосконалення, щоб вони краще відповідали потребам сучасних кібер-фізичних систем [45]. У рамкових документах Німеччини та США відзначається значення прийняття та застосування уніфікованих стандартів для кібер-фізичних систем. Це є важливою передумовою для забезпечення їхньої ефективності, безпеки та взаємодії. Це стає важливою умовою для забезпечення їхньої ефективності, безпеки та взаємодії. Для того, щоб надати універсальне та повноцінне визначення кібер-фізичних систем, необхідно ретельно проаналізувати аспекти їх створення та функціонування. Цей аналіз був проведений детально в рамковому документі США "Framework for Cyber-Physical Systems Release May 2016 Cyber Physical Systems Public Working Group". Встановлення уніфікованих стандартів сприятиме спрощенню розробки, впровадженню та управлінню кібер-фізичними системами, а також покращить їх взаємодію та сумісність з іншими системами і пристроями.

Наразі, незважаючи на інтенсивні зусилля різних міжнародних організацій у сфері розробки стандартів для кіберфізичних систем, таких як ISO, ITU, Industrial Internet Consortium, IP-A та інші, ще не вдається досягти повної сумісності між цими стандартами для різноманітних кібер-фізичних систем. Це

свідчить про те, що питання стандартизації кібер-фізичних систем залишається відкритим і вимагає вирішення як на міжнародному, так і на національному рівнях. Виробники, розробники та регулюючі органи повинні співпрацювати для створення спільних стандартів, які забезпечать сумісність та інтероперабельність між різними кібер-фізичними системами. Тільки такий підхід дозволить досягти максимальної ефективності та безпеки у функціонуванні цих систем.

2.2. Структурування кібер-фізичної системи моніторингу стану ґрунтів відповідно до етапів вирощування агрокультур

Пшениця є однією з провідних сільськогосподарських культур за площею посіву і валовим збором як у світі, так і в Україні. Загалом, світова посівна площа пшениці становить приблизно 240 мільйонів гектарів. Найбільші площі пшениці вирощуються у таких країнах, як Китай (26 мільйонів гектарів), США (22 мільйони гектарів), Канада (10 мільйонів гектарів) і Україна (7-8 мільйонів гектарів). Пшеницю вирощують майже в усіх країнах світу. При вирощуванні озимої пшениці за інтенсивною технологією особливе значення має вибір найкращих попередників. Для цього важливо мати родючі та чисті ґрунти. Попередники повинні своєчасно звільняти поле від попередньої культури, очищати від бур'янів та зберігати вологу, щоб забезпечити оптимальні умови для сходів озимої пшениці.

Кібер-фізичні системи (КФС) мають ключову роль у сучасному агровиробництві, особливо щодо збирання інформації про стан ґрунтів. Вони відіграють важливу роль у запобіганні або усуненні негативних процесів, що відбуваються в ґрунті. Функції контролю, діагностики, розпізнавання образів та автоматичного керування, які втілюються в таких системах, дозволяють оптимізувати технологічні процеси агровиробництва. Основне завдання КФС - забезпечити оптимальний перебіг цих процесів, що призводить до підвищення ефективності агропромислового комплексу та поліпшення якості життя населення регіону [46-48]. Згідно зі станом наукових досліджень, на сьогоднішній день відсутні загальноприйняті рекомендації щодо формування структури параметрів ґрунтів та методів їх дослідження для оперативного забезпечення потреб

функціонування інформаційних систем моніторингу. Класичні фізико-хімічні методи, які зазвичай використовуються у лабораторних умовах, виявляються малопридатними для застосування у польових умовах. Таким чином, наукове співтовариство в цій області продовжує шукати ефективні та практичні методи дослідження ґрунтів, які б забезпечували необхідну оперативність та точність результатів, необхідних для інформаційних систем моніторингу [49]. Також важливо відзначити, що в сучасних умовах швидко методи, що використовують біоіндикатори. Ці методи полягають у використанні організмів чи їхніх частин для визначення якості ґрунту та його стану. Біоіндикатори можуть виявляти зміни у рівні забруднення, впливати на фізичні та хімічні властивості ґрунту, а також слугувати показником екологічного стану довкілля. Ці методи стають все більш популярними завдяки своїй ефективності та можливості оперативної оцінки якості ґрунту без необхідності складного обладнання чи довготривалих лабораторних аналізів [50-51]. Вологість ґрунту є ключовим параметром, і її контроль дійсно важливий для сільськогосподарських процесів. Незважаючи на те, що методи з використанням біоіндикаторів можуть бути трудомісткими та не завжди підходять для оперативного контролю, існують інші методи, такі як використання спеціалізованих датчиків і сучасних технологій, які можуть бути більш ефективними. Створення міжнародної мережі вологості ґрунтів свідчить про важливість цього параметру та потребу в оперативному зборі та обміні відповідною інформацією. Ця мережа може забезпечити користувачів, таких як фермери та агротехніки, необхідною інформацією для оптимального вирощування рослин та підтримки агропроцесів [54]. Контроль за динамікою зміни вологості ґрунтів має значення для моделювання гідрологічних процесів, особливо у врахуванні неоднорідності навколишнього середовища. Такі фактори, як топографічні особливості, властивості ґрунту, типи землекористування та рівень попередніх опадів, впливають на зміни вологості ґрунтів і гідрологічні процеси.

Врахування цих факторів у моделях дозволяє краще розуміти взаємозв'язок між вологістю ґрунту та гідрологічними явищами, такими як рівень ґрунтових вод, витрата води, інфільтрація та стікання. Це допомагає управляти водними

ресурсами та розробляти стратегії адаптації до змін клімату та умов середовища. Такий контроль є важливим і для сільськогосподарських ділянок, де відповідна вологість ґрунту може впливати на врожайність та ефективність сільськогосподарських культур [52]. Імпедансна спектроскопія використовується для коригування ефектів перехресної чутливості при вимірюванні вологості ґрунту. Цей метод дозволяє отримувати більш точні вимірювання, враховуючи вплив різних факторів. Він ґрунтується на аналізі імпедансу ґрунту у широкому частотному діапазоні. Багатоваріантний аналіз результатів експериментальних досліджень різних природних ґрунтів дозволяє враховувати різноманітність ґрунтів та їхні особливості. Це допомагає підвищити точність вимірювань і забезпечити більш надійні дані про вологість ґрунту. Такий підхід до вимірювання вологості ґрунту є важливим для сільськогосподарських застосувань, де точні дані про вологість ґрунту можуть впливати на вирощування рослин та оптимізацію землекористування [53]. Проте цей підхід є надзвичайно працезатратним та не може бути виконаним у вигляді переносного малогабаритного пристрою моніторингу. В зв'язку з цим конструювання відносно дешевих результативних систем контролю параметрів довкілля, а саме ґрунтів, у вигляді кібер-фізичної системи, є надзвичайно важливим для невеликих господарств, які не можуть собі дозволити дороге обладнання та програмне забезпечення. Розбиття загальної структури кібер-фізичної системи для управління виробництвом зернових культур на підзадачі може включати такі аспекти, як підготовка сільськогосподарських угідь до посіву та процес вирощування зернових культур. У контексті підготовки угідь до посіву, система може враховувати аналіз параметрів ґрунту та вибір оптимальних методів обробітку для підготовки до посіву, а також розподіл ресурсів для ефективної роботи на полі. Підзадачі вирощування включають моніторинг умов вирощування рослин та керування поливом та добривами відповідно до потреб культур. Ця структура дозволяє забезпечити оптимальний перебіг технологічного процесу і підвищити ефективність агропромислового виробництва. В процесі побудови кібер-фізичної системи для виробництва зернових культур структуруємо основні етапи цього процесу (рис. 2.4), кожен з

яких включатиме прийняття рішень КФС для оптимізації управлінських дій. На початковому етапі система може аналізувати параметри ґрунту та встановлювати необхідність обробки поля. Під час етапу вирощування система контролюватиме умови росту культур та регулюватиме полив та добрива. На фінальному етапі КФС може здійснювати контроль якості зернової продукції та впроваджувати процеси сертифікації. Ця структура допомагає забезпечити ефективне виробництво зернових культур за допомогою автоматизованих управлінських рішень.

1. фізичний світ
2. засоби взаємодії з фізичним світом
3. засоби збирання та доставлення
4. засоби опрацювання інформації
5. засоби прийняття рішень
6. засоби персонального сервісу

Рис. 2.4. Компоненти узагальненої структури КФС

Шоста компонента структури кібер-фізичної системи на рисунку 2.4 вимагає встановлення переліку клієнтів, які будуть користуватись послугами такої системи, а саме: це сільськогосподарські виробники та наглядові організації. Ця сама компонента потребує визначення переліку типів завдань $\{z_1, z_2, \dots, z_i, \dots, z_n\}$, які вирішуватиме створювана кібер-фізична система (задачі керування, прийняття рішень, проведення досліджень, вдосконалення технологій ін.). Крім цього необхідно виокремити фізичні об'єкти та їх властивості і погодити їх між собою. Найосновнішими об'єктами моніторингу будуть властивості ґрунтів, а отже, посівного матеріалу та готового кінцевого продукту – отриманого врожаю [55]. П'ята компонента стосується прийняття рішень (рис. 2.4) та відповідає за генерування ефективних робіт, які мали би оптимізувати об'єкт контролю. До прикладу, етап А, що на рисунку 2.5, має на меті сформулювати пропозицію щодо локації для висіву насіння, що в свою чергу, ґрунтується на врахуванні видів

культур, які висівалися напередодні. Також важливими показниками моніторингу є ступінь ґрунтової вологості на момент висівання.

А. визначення місця зернових у сівозміні
Б. обробіток ґрунту
В. внесення добрив
Г. підготовка посівного матеріалу
Д. висівання
Е. догляд за посівами
Є. збирання врожаю
Ж. контроль показників якості

Рис. 2.5. Головні технологічні процеси агровиробництва зерна

Таблиця 2.2.

Структурування типу інформації для роботи КФС на етапі А – визначення місця зернових у сівозміні

Назва показника	Тип інформації
номенклатура попередників	довідкова інформація
вміст вологи у ґрунті, %	вимірювальна інформація

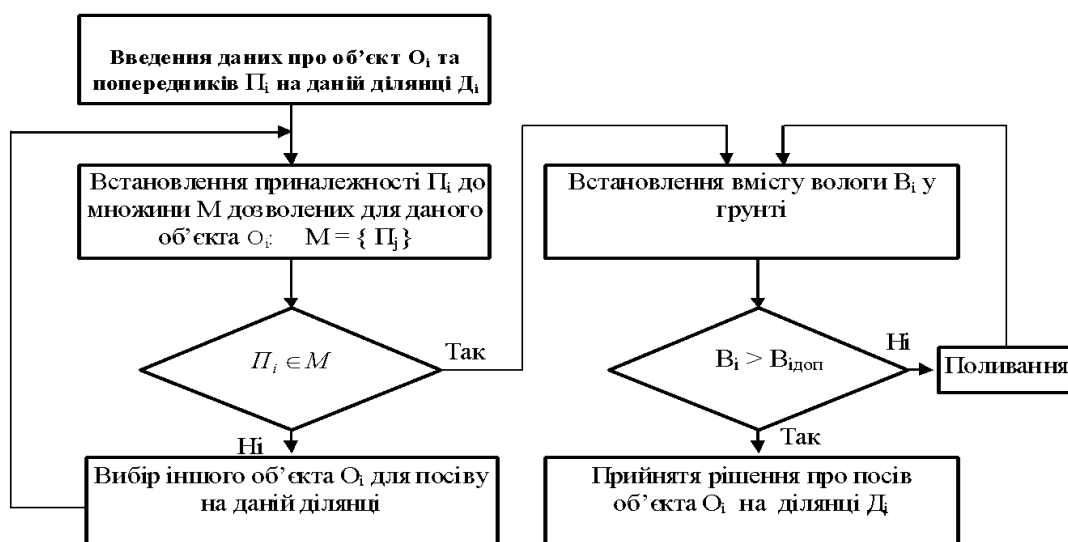


Рис. 2.6. Алгоритм прийняття управлінського рішення на етапі А – визначення місця зернових у сівозміні

Процес Б - оброблення ґрунту, передбачає врахування низки параметрів під час приготування ґрунту до наступних етапів. Отже, на цьому етапі треба взяти до уваги типи попередніх культур, види бур'янів, ступінь вологості у ґрунті, вид ґрунтової зони та часовий період збору врожаю попередньої культури.

Методи визначення фактичної забур'яненості посівів відрізняються, оскільки їх вибір пов'язаний з метою дослідження. Окомірний метод застосовується, коли необхідно отримати об'єктивні дані для прийняття рішень щодо заходів профілактики та захисту. Кількісний і кількісно-ваговий методи використовуються для детального аналізу чисельності та видового складу бур'янів, вивчення динаміки засміченості та ефективності захисних методів. Найоптимальнішим часовим періодом для встановлення фактичного стану ступеня забур'янення під час вирощування агропродукції є час, коли з'являються усі види бур'яну і їх усіх можна врахувати для подальшого прийняття рішень [56]. Фаза колосіння вважається найоптимальнішим періодом для дослідження та огляду посівів зернових, а період вегетації є найкращим для обстеження просапних культур. До прикладу, планування введення гербіцидів для обробки посівів доцільно здійснювати тоді, коли з'явилися сходження рослин і масово проявляються бур'яни.

Таблиця 2.3.

Класифікація видів інформаційних ресурсів, необхідних на внесення добрив
(етап В)

Назва показника	Тип інформації
номенклатура попередників	довідкова інформація
тип ґрунтової зони	довідкова інформація
тип забур'янення	відео інформація

Процес В (рис.2.5) – внесення добрив, передбачає врахування у ґрунті вагомих поживних компонентів, належна кількість яких є передумовою високих врожайів. До них належать вміст калію, азоту, фосфору. Важливим є дотримуватись

методик відбору проб для того, щоб отримати репрезентативну пробу, а отже, об'єктивну інформацію.

Далі розраховується норма внесення добрив для запланованої врожайності, що обчислюється за відповідною формулою. Цей процес потребує доступу до різноманітної довідково-нормативної та вимірювальної інформації, яку повинні забезпечити інші рівні КФС. Наприклад, інформація про агрокліматичні умови регіону, аналіз ґрунту, вміст поживних речовин у ґрунті, а також історія вирощування попередніх культур можуть бути використані для визначення оптимальної кількості добрив для досягнення запланованого врожаю.

Така інформація може бути доступна через сенсорні системи, лабораторні дослідження або інші джерела, які інтегруються в КФС для забезпечення точності та ефективності розрахунків:

$$D = \frac{Y_{пл} \cdot v - ГЗ \cdot КГЗ - D_o \cdot C_o \cdot K_o}{K_m} \quad (2.1)$$

де, D – нормативне значення вмісту основних добрив (N, P, K) (кг/га); $U_{пл}$ – рівень запланованого врожаю (ц/га); v – винесення певної компоненти добрива на один центнер зерна разом з певним об'ємом соломи (кг/га); $ГЗ$ – ґрунтовий запас компонентів живлення, який можна обчислити відповідно до виразу: $h \cdot A \cdot n$, h – це глибина обчисленого ґрунтового пласту, n – значення елемента у ґрунті відповідно до проведених досліджень, або побудованої картограми в розрахунку на сто грамів ґрунту, A – густина ґрунту (г/см³); $КГЗ$ – ступінь засвоюваності поживних елементів, які знаходяться у ґрунті; D_o – ступінь вмісту добрив органічного походження (т/га); C_o – концентрація поживних елементів з розрахунку на одну тону добрив органічного походження (кг/т); K_o – ступінь використання поживних елементів добрив органічного походження; K_m – ступінь використання поживних елементів добрив мінерального походження.

Таблиця 2.4.

Структурування типу інформації для роботи КФС під час внесення добрив (етап В)

Назва показника	Тип інформації
вміст азоту, фосфору, калію у ґрунті, мг/100г	вимірювальна інформація
кислотність ґрунту	вимірювальна інформація
норма внесення добрив Д, кг/га	розрахункова, довідкова, вимірювальна
територіальний розподіл мінеральних солей	вимірювальна інформація

Процес Г (рис. 2.5.) - підготування насіння до висівання передбачає формування рішення про виконання всіх робіт, що передують посіву, включно з процесами спеціального обробітку насінневого матеріалу. Вимоги до таких процедур встановлюються нормативними документами та передбачають проведення процедури встановлення рівня лабораторної схожості, ступеня чистоти насіння, потужності його зростання та вимірювання маси тисячі зернин [57]. Не менш вагомою процедурою під час реалізації процесу підготовки насіння є селекціонування його на окремі групи за розміром зернин. Далі має відбутися обробка отрутохімікатами (pesticides) з наступним висіванням зерна, яке теж проходить у відповідності до нормативних документів та повинно піддаватись контролю.

Таблиця 2.5.

Класифікація видів інформаційних ресурсів, необхідних для підготовки посівного матеріалу (етап Г)

Назва показника	Тип інформації
вміст азоту, фосфору, калію у ґрунті, мг/100г	вимірювальна інформація
кислотність ґрунту	вимірювальна інформація
норма внесення добрив Д, кг/га	розрахункова, довідкова, вимірювальна
територіальний розподіл мінеральних солей	вимірювальна інформація

Процес Д (див. рис. 2.5.) - висівання насіння передбачає моніторинг, на основі якого формується управлінське рішення кібер-фізичної системи щодо таких властивостей, як період висівання та встановлення глибини. А це обумовлюється

ступенем вологості ґрунту, його провідності (через яку розраховується щільність ґрунту), рівень температурного режиму ґрунту і до того ж нормою висівання. Остання розраховується за формулою:

$$M = \frac{h \cdot a \cdot 100}{c \cdot \text{ч}} \quad (2.2)$$

де h – число мільйонів насінин, які будуть висіяні на площі одного гектару на певній ділянці (млн/га); a – маса тисячі насінин (г); c – лабораторна схожість (%). ч – чистота насіння (%).

Таблиця 2.6.

Класифікація видів інформаційних ресурсів, необхідних для висівання (етап Д)

Назва показника	Тип інформації
вміст вологи у ґрунті, %	вимірювальна інформація
щільність ґрунту	вимірювальна
температура	вимірювальна
норма висіву	розрахункова, довідкова, вимірювальна

Процес Е (рис. 2.5.) – доглядання за посівами передбачає здійснення моніторингу вологості ґрунту для прийняття відповідних рішень, а також контроль стану рослин. Цей контроль може здійснюватися за допомогою відеоспостереження, експертних вимірювань або сенсорів, що визначають рівень випромінювання у рослинах, що залежить від вмісту хлорофілу. Це дозволяє вчасно виявляти хвороби та шкідників, що дозволяє вжити заходів для їх захисту, наприклад, обробленням відповідними пестицидами (табл. 2.7.). Об'єм і види застосовуваних пестицидів нормуються відповідно до вимог, що визначені у відповідних регуляторних документах.

Таблиця 2.7.

Класифікація видів інформаційних ресурсів, необхідних для догляду за посівами (етап Е)

Назва показника	Тип інформації
вміст вологи у ґрунті, %	вимірювальна інформація

стан рослин	відео інформація, вимірювальна інформація
вид та норма пестицидів, кг/га	розрахункова інформація

Збирання врожаю на етапі Є (див. рис. 2.5.) передбачає прийняття рішень КФС щодо встановлення термінів збирання врожаю, що залежать від рівня вологості зерен та висоти зрізу посівів, обумовленої висотою стебел. Параметри, необхідні для функціонування КФС на цьому етапі, визначаються шляхом комплексу вимірювань. Такі дані можуть включати рівень вологості ґрунту, стан рослин, метеорологічні умови та інші фактори, що впливають на процес збирання врожаю. Застосування сучасних технологій дозволяє отримувати ці дані у реальному часі, що допомагає у прийнятті ефективних управлінських рішень щодо оптимального часу та методів збирання врожаю (табл. 2.8).

Таблиця 2.8.

Класифікація видів інформаційних ресурсів, необхідних для збирання врожаю (етап Є)

Назва показника	Тип інформації
вміст вологи у зерні, %	вимірювальна інформація
висота стеблостою, м	вимірювальна інформація
комплекс показників готового зерна	вимірювальна, розрахункова інформація

На завершальному етапі Ж проводиться контроль нормованих показників якості вирощених зернових. Цей контроль дозволяє класифікувати зерно на відповідні групи, такі як кормова чи харчова, згідно з встановленими стандартами і вимогами. Такий контроль є важливим кроком для забезпечення якості продукції та визначення її подальшого використання [58].

2.3. Апаратне забезпечення кібер-фізичної системи моніторингу основних параметрів ґрунтів

Виходячи з важливості моніторингу ґрунту та аналізу впливних факторів на його стан, була розроблена структура КФС моніторингу стану ґрунтів. Для

реалізації такої КФС були визначені окремі завдання та методи їх вирішення. Перш за все, це вибір параметрів для моніторингу ґрунтів. Для цього використовувалися методи міждисциплінарного теоретичного аналізу та системного аналізу, за результатами якого було обрано найважливіші параметри моніторингу [59]. Для створення КФС використовувались методи системотехніки. Для системи збирання та передавання даних КФС застосовувалась технологія вибору множини параметрів об'єктів з відповідних вимірювальних масивів та баз даних. Збирання даних від сенсорів може бути здійснене за допомогою технології Wi-Fi. Ця технологія забезпечує швидкість передачі даних понад 100 Мбіт/с. Користувачі можуть вільно пересуватися між точками доступу всередині зони покриття мережі Wi-Fi, використовуючи пристрої з Wi-Fi-адаптерами для отримання доступу в Інтернет. Такий підхід дозволяє ефективно збирати дані з сенсорів у реальному часі з високою швидкістю та мобільністю користувачів. Надійність представлених результатів забезпечена проведенням великого об'єму вимірювань та експериментальних досліджень. Оцінювання точності представлених результатів вимірювань здійснено з використанням теорії ймовірності та математичної статистики. Прогностичне моделювання забезпечене використанням апарату нейронних мереж, а саме архітектури нейронних рекурентних мереж.

Система, яка розроблена, з'єднується з сервером для передачі даних, які потім опрацьовуються в програмному продукті. Цей продукт аналізує дані і виводить результат, зрозумілий користувачеві. Безпроводна передача даних - це процес перенесення інформації від однієї точки до іншої за допомогою електрозв'язку, використовуючи канал передачі даних. Найпоширенішим методом бездротового зв'язку є використання таких технологій, як Wi-Fi і Bluetooth, які дозволяють пристроям спілкуватися без проводів. В Україні популярні районні Internet мережі, для яких часто потрібне прокладання витої пари дротів [60]. Проте, коли з'являється потреба у користуванні Інтернетом саме з комп'ютера, смартфона чи ноутбука із можливістю бездротового підключення, варто задуматись про те, як це правильно реалізувати [61].

Використання плати розробника Arduino WeMos D1 з Wi-Fi модулем ESP8266 (рис. 2.7.) є доцільним для оперативної передачі даних про температуру, вологість та кислотність ґрунту. Ця плата має вбудований модуль Wi-Fi, що дозволяє передавати дані бездротово до сервера або іншого приймача. Крім того, плата Arduino WeMos D1 має достатньо потужний мікроконтролер та велику кількість цифрових та аналогових входів, що дозволяє зчитувати дані з різних датчиків. Такий підхід дозволяє ефективно використовувати пристрій для моніторингу та збору даних про ґрунтові параметри.



Рис. 2.7. Плата розробника Arduino WeMos D1 з Wi-Fi модулем ESP8266

Досить цікаво і те, що цей мікроконтролер містить ядро Tensilica, а також повний стек Wi-Fi. Є можливість запрограмувати мікроконтролер, використовуючи IDE Arduino для простого керування інтернет речами.

Для зручності використання прилад оснащений двома літєвими акумуляторами 3.7V - 18650, і тому має кілька переваг і можливостей, які роблять його корисним для оперативного використання:

1. Портативність: Використання літєвих акумуляторів дозволяє забезпечити джерело живлення для приладу без необхідності підключення до

мережі електроживлення [62]. Це робить прилад мобільним і дозволяє його використання в різних місцях, навіть у віддалених або недоступних місцях.

2. Бездротовий зв'язок: Наявність Wi-Fi модуля ESP8266 дозволяє підключати прилад до мережі Інтернет без потреби в кабельному з'єднанні. Це дає можливість віддалено керувати приладом, відправляти дані на сервер або отримувати оновлення програмного забезпечення через Інтернет.

3. Гнучкість у розробці: Використання плати розробника Arduino WeMos D1 дозволяє швидко розробляти програмне забезпечення для приладу за допомогою Arduino IDE та великої кількості наявних бібліотек та прикладів коду. Це полегшує розробку і випробування нових функцій та можливостей.

4. Ефективність енергоспоживання: Модуль ESP8266 має оптимізований режим енергоспоживання, що дозволяє зберігати заряд акумуляторів і продовжувати час автономної роботи приладу.

5. Загальна доступність: Arduino WeMos D1 та ESP8266 - популярні компоненти, які легкодоступні для покупки і мають широку спільноту розробників, що робить їх привабливим вибором для різних проектів.

Отже, прилад забезпечує зручність і гнучкість у використанні, ефективно використовує енергію та можливість віддаленого керування, що робить його ідеальним для багатьох портативних застосувань. Так, наявність можливості отримання оновлень прошивки для пристрою, такого як Arduino WeMos D1 з Wi-Fi модулем ESP8266, є дуже корисною функцією. Це дозволяє вносити зміни до програмного забезпечення пристрою, такі як зміни у складі модулів, виправлення помилок чи додавання нових функцій, без необхідності фізичної заміни апаратної частини. Оновлення прошивки може бути проведено через з'єднання з комп'ютером чи через безпроводний канал, що дозволяє швидко і зручно покращувати функціональність та надійність пристрою [63]. Інформацію, яку отримуватиме прилад з сенсорів він відправлятиме на адресу https://thingspeak.com/channels/265855/private_show.

Сенсор RS485 4-20mA Soil Temperature Humidity Moisture Conductivity EC PH Sensor NPKTHC-S - це високоточний та надійний сенсор, спеціально

розроблений для вимірювання різноманітних параметрів ґрунту. Завдяки своїй універсальності та комплексному підходу, цей сенсор відповідає вимогам сучасного сільськогосподарського та агротехнічного сектору [64]. Основні характеристики сенсора NPKTHC-S включають в себе можливість вимірювання температури ґрунту, вологості, вмісту різних мінеральних речовин (наприклад, азоту, фосфору, калію), рівня рН та електропровідності [65]. Ці параметри є ключовими для оцінки родючості ґрунту, визначення оптимальних умов для росту рослин та ефективного використання агрохімікатів (рис. 2.8.).

Сенсор NPKTHC-S працює за протоколом RS485 та має аналоговий вихідний сигнал в діапазоні 4-20мА, що забезпечує стабільність та високу точність вимірювань. Крім того, він оснащений вбудованим інтерфейсом, який дозволяє легко підключати сенсор до контрольно-вимірювальних систем та збірників даних.



Рис. 2.8. Візуалізація сенсора в контрольно-вимірювальних системах

Завдяки своїм продуманим конструкцією та високотехнологічним рішенням, сенсор NPKTHC-S є незамінним інструментом для сільськогосподарських досліджень, агротехнічного моніторингу та управління виробництвом [66]. Його висока точність, надійність та універсальність роблять

його важливим компонентом для впровадження сучасних технологій у сільському господарстві.

Для вирішення технічного завдання даної кваліфікаційної роботи доцільно використати такий сенсор вологості резистивного типу (рис. 2.9.). Перевагою сенсорів резистивного типу є доступна ціна.



Рис. 2.9. Сенсор RS485 4-20mA Soil Temperature Humidity Moisture Conductivity EC PH Sensor NPKTHC-S

Сенсор температури DS18B20 (рис. 2.10.) є важливим компонентом вимірювальної системи, оскільки він дозволяє вимірювати температуру з мінімальним обладнанням і проводкою. Цей сенсор використовує цифровий протокол для передачі точних показників температури безпосередньо до плати без необхідності аналого-цифрового перетворення або іншого додаткового обладнання. Доступні різні варіанти однопровідних сенсорів DS18B20, включаючи водонепроникні та високотемпературні моделі, які можуть бути використані для вимірювання температури в різноманітних проектах і застосунках [67]. Так, сенсори температури DS18B20 використовують однопровідний протокол, що дозволяє підключати декілька сенсорів до одного контакту і зчитувати всі значення температури незалежно [68]. За допомогою відповідних з'єднань і програмного коду, написаного на мові CircuitPython, можна швидко

отримувати дані про температуру з декількох сенсорів, що дозволяє ефективно вимірювати температуру в різних точках або приміщеннях одночасно.



Рис. 2.10. Сенсор температури DS18B20

DS18B20 - це програмований однопровідний сенсор температури, розроблений компанією Maxim Integrated. Він широко використовується для вимірювання температури в різних середовищах, таких як хімічні розчини, ґрунт та інше. Сенсор має міцне покриття, а також доступний у водонепроникному варіанті, що спрощує процес монтажу. Він може вимірювати температуру в діапазоні від $-55\text{ }^{\circ}\text{C}$ до $+125\text{ }^{\circ}\text{C}$ з високою точністю $\pm 0.5\text{ }^{\circ}\text{C}$. Кожен сенсор має унікальну адресу і вимагає лише одного контакту для передачі даних, що робить його ідеальним вибором для вимірювання температури в різних точках без великого споживання цифрових виводів мікроконтролера. Сенсор DS18B20 дозволяє швидко та точно вимірювати температуру ґрунту, що робить його незамінним інструментом для ведення тестів у сільському господарстві.

Враховуючи вищезазначену інформацію, прийнято рішення сконструювати вимірювальну систему (рис. 2.11.), для контролю таких параметрів ґрунту, як температура, вологість, кислотність, провідність (щільність), вміст фосфору, азоту, калію.



Рис. 2.11. Підсистема передавання даних про температуру, вологість, кислотність, провідність, та вміст фосфору, азоту, калію у ґрунті.

Для досягнення поставлених завдань ми розглянули різні бездротові технології. Наразі найпоширеніші серед них - Wi-Fi та Bluetooth. Wi-Fi вирізняється використанням неліцензованого діапазону частот, широким поширенням на ринку, можливістю створення мереж без кабелів та низьким випромінюванням пристроїв.

У нашій кібер-фізичній системі використовується плата розробника Arduino WeMos D1 з Wi-Fi модулем ESP8266 (див. рис. 2.7.) та сенсор RS485 4-20mA Soil Temperature Humidity Moisture Conductivity EC PH Sensor NPKTHC-S (див. рис. 2.9.), а також сенсор температури DS18B20 (див. рис. 2.10.).

Дана підсистема складається з білої коробки (корпусу), яка містить вище сказані сенсор, датчик та модуль, а також акумулятори живлення (рис. 2.12.).

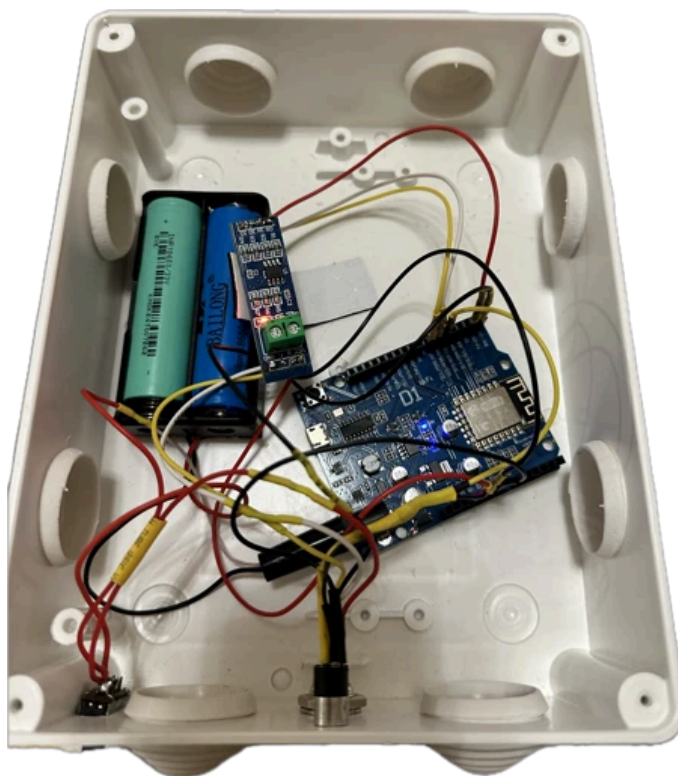


Рис. 2.12. Конструкція системи для передавання даних про параметри ґрунту

Підсистема розроблена для вивчення та вимірювання різних типів ґрунтів. Вбудована панель забезпечує зберігання результатів вимірювань. Переносна підсистема призначена для оперативного та простого вимірювання температури, вологості, кислотності, провідності, а також вмісту фосфору, азоту та калію в ґрунті у будь-якій обраній точці поля. Після опрацювання отриманих даних від сенсорів та датчиків, система допомагає користувачеві приймати правильні управлінські рішення.

Комплектація системи включає не тільки програмне забезпечення але й підсистему для вимірювання параметрів ґрунту, й в подальшому передачі даних на сервер, а потім на смартфон чи персональний комп'ютер (ПК).

Особливостями сконструйованої підсистеми є:

- оперативне отримання результатів вимірювання температури та вологості ґрунту в системі;
- можливість підключення до Android пристроїв, дозволяє спостерігати результат вимірювання на смартфоні або планшеті;
- підключення до мережі Wi-Fi, яка використовує бездротове з'єднання;

- вбудований реєстратор даних;
- дистанційне відправлення вимірювальної інформації у програму, чи на сервер <https://thingspeak.com>.
- прогнозування та допомога у прийнятті правильних управлінських рішень із застосуванням штучного інтелекту.

Вимірювання параметрів ґрунту, зокрема вологості, важливе практично у всіх галузях діяльності людини. У промисловості, таких як будівельна, текстильна, легка, харчова, хімічна та електронна, основні технологічні процеси тісно пов'язані зі змінами вологості оброблюваних матеріалів. Наприклад, у будівництві вологість визначає основні властивості будівельних матеріалів, теплофізичні характеристики будівельних споруд та їхню міцність, що впливає на експлуатаційні якості, довговічність і надійність конструкцій [69]. У сільському господарстві вологість ґрунту визначає доцільність використання різних агротехнічних методів [70]. У сфері обробки зерна вологість є важливим фактором, що визначає якість, ефективність подальшої переробки та можливість тривалого зберігання без втрат.

Розроблена підсистема збору інформації про параметри ґрунту, зокрема за допомогою сенсора RS485 4-20mA Soil Temperature Humidity Moisture Conductivity EC PH Sensor NPKTHC-S, відзначається високою актуальністю та значущістю у сучасному сільськогосподарському виробництві та агротехнічному секторі.

Перш за все, зростаючі вимоги до ефективності виробництва та управління ресурсами у сільському господарстві ставлять підвищений попит на точні та надійні методи збору даних про стан ґрунту. Підсистема збору інформації, реалізована з використанням сучасних технологій та сенсорів, дозволяє в реальному часі отримувати дані про температуру, вологість, рН рівень, електропровідність та інші параметри ґрунту, що дозволяє сільськогосподарським виробникам приймати обґрунтовані рішення щодо обробки та удобрення ґрунту, поливу та інших аспектів сільськогосподарського виробництва [71].

Крім того, враховуючи зростання зацікавленості у сталому розвитку та збереженні ресурсів, підсистема збору інформації про параметри ґрунту є важливим інструментом для впровадження принципів точного землеробства та раціонального використання ресурсів. Збираючи дані про стан ґрунту на різних ділянках поля та адаптуючи агротехнічні заходи до конкретних потреб, фермери можуть підвищити врожайність та якість продукції, знизити споживання води та хімічних речовин, а також мінімізувати вплив агропромислової діяльності на навколишнє середовище.

Отже, розроблена підсистема збору інформації про параметри ґрунту відповідає сучасним вимогам та потребам у сільському господарстві, допомагаючи фермерам підвищити ефективність виробництва, забезпечити стійкий та стабільний розвиток сільськогосподарського сектору та зберегти природні ресурси для майбутніх поколінь.

2.4. Реалізація програмного забезпечення, як невід'ємна складова кібер-фізичної системи

Кваліфікаційна робота спрямована на розробку програмного та апаратного забезпечення для автоматизації та інформатизації робочих місць в агропромисловості, зокрема в контексті моніторингу виробництва зернових культур. Це включає в себе розробку алгоритмів діагностування та управління, що дозволяють ефективно контролювати та управляти процесами виробництва. Засоби діагностування можуть бути зовнішніми або вбудованими. Зовнішні прилади приєднуються до контрольованих виробів тільки під час проведення контролю, тоді як вбудовані (бортові) є конструктивними елементами об'єкта і здійснюють контроль безперервно або періодично за певною програмою. Головною метою цієї роботи є розробка програмного та апаратного забезпечення для генерації управлінських рішень в аграрній промисловості, зокрема в контексті виробництва зернових культур.

Технології забезпечення високої врожайності сільськогосподарських культур на основі різноманітних наукових результатів і матеріально-технологічних засобів у сфері сільськогосподарського виробництва на початку 1980-х років

отримали назву «інтенсивної» [72]. Вони передбачають певні технічні засоби, які дозволяють отримувати врожайність приблизно в 3-4 рази більшу, ніж у природних умовах.

При застосуванні інтенсивних технологій враховуються біологічні особливості кожної культури та аналізується біокліматичний потенціал і рівень використання потенційної родючості ґрунту [73]. Сучасні технології у сільському господарстві передбачають використання азотних добрив для збільшення врожайності, хімічний захист рослин від шкідників та хвороб, а також використання нових сортів інтенсивних культур для покращення якості продукції та збільшення врожаю. Пшениця відіграє важливу роль серед сільськогосподарських культур, займаючи перше місце за площею посіву та врожайністю як у світі, так і в нашій країні. Найбільші площі пшениці вирощуються в Китаї (26 млн. га), США (22 млн. га) та Україні (7-8 млн. га) [74]. Місце в сівозміні при вирощуванні озимої пшениці за інтенсивною технологією насамперед має значення вибір найкращих попередників. Вона вимагає родючих і чистих ґрунтів. Попередники повинні своєчасно вирівняти поле попередньої культури для підготовки ґрунту до посіву, видалення бур'янів, збереження та накопичення вологи та забезпечення отримання екологічно чистих сходів озимої пшениці.

Сучасні бездротові мережі широко застосовуються в промисловості з численними перевагами, такими як зниження витрат на організацію мереж, скорочення термінів виконання робіт, забезпечення зв'язку в ускладнених місцях та підвищення ефективності бізнес-процесів. Однак, незважаючи на спільні принципи та архітектуру, промислові бездротові мережі відрізняються від стандартних своєю надійністю, стійкістю до перешкод та вимогами до працездатності в умовах високої вологості, температурних змін та електромагнітних перешкод [75]. Так, в промисловому використанні Wi-Fi відбувається переорієнтація на забезпечення надійності, безпеки та швидкості передачі даних в агресивних середовищах. Це означає розробку пристроїв та підходів, які здатні забезпечити стабільну роботу телекомунікаційного обладнання

навіть в умовах високого рівня перешкод та екстремальних температурних умов. Такі вимоги відрізняють промислові бездротові рішення від стандартних і покладають особливий акцент на надійність і безпеку передачі даних.

Розроблення програмного забезпечення здійснено в середовищі React Native. Повний код створеного програмного забезпечення буде представлено в Додатку А.

Розроблений мобільний додаток для операційних систем Android та iOS відіграє ключову роль у вирішенні завдань контролю виробництва зернових культур [76]. Встановивши його на смартфон, планшет або інший пристрій, що працює під управлінням відповідної ОС, користувачі отримують можливість моніторити всі етапи виробництва. Це дозволяє переглядати дані про культури окремо, а також отримувати поради щодо кожного з етапів. Основною метою цього застосунку є забезпечення користувачам повного контролю над процесом вирощування зернових культур та надання корисних порад для кращого управління виробництвом [77].

Розроблений мобільний додаток для операційних систем Android і iOS є важливим інструментом у вирішенні завдань контролю виробництва зернових культур. Встановивши його на смартфон, планшет або інший пристрій, користувачі можуть легко моніторити всі аспекти виробництва.

Застосунок надає можливість переглядати дані по культурам окремо і отримувати корисні поради на кожному етапі процесу вирощування. Це дозволяє користувачам ефективно керувати всіма аспектами виробництва зернових культур, навіть без прив'язки до робочого місця, завдяки зручному доступу до інформації через мобільний додаток.

Метою цього проекту є розробка мобільного додатка для операційних систем Android та iOS, який дозволить користувачам контролювати всі етапи виробництва зернових культур [79]. Крім того, вони зможуть отримувати короткі описи про культури та приймати рекомендації, запропоновані розробниками, для прийняття правильних управлінських рішень. Інтерфейс програмного забезпечення для мобільної платформи показаний на рис. 2.12.

Кожне вікно забезпечує певний етап роботи даної програми. Вимірювальна інформація з сенсорів посилаються на сервер, а згодом на мобільний телефон, у застосунок (рис. 2.12.).

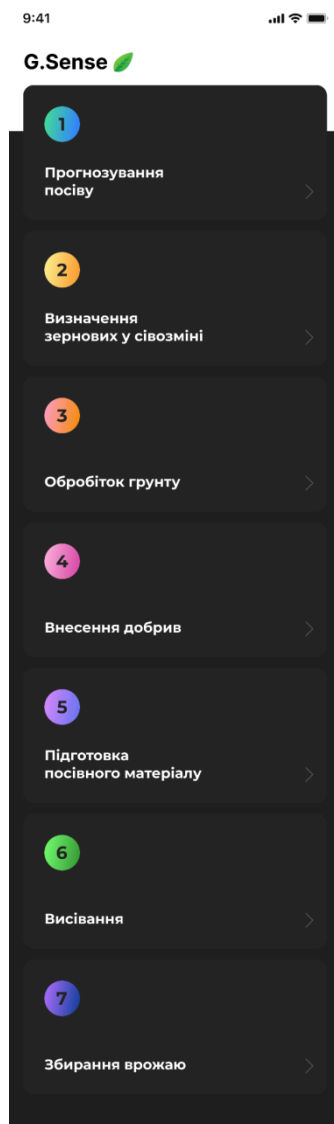


Рис. 2.12. Скріншот інтерфейсу мобільного застосунку, який демонструє етапи виробництва продукції

Перший етап прогнозування посіву - це обробка та аналіз даних отриманих з сенсорів ґрунту та стану погоди з використанням нейронної мережі. На цьому етапі система отримує великий обсяг інформації про різні параметри ґрунту, такі як вологість, рН рівень, температура, вологість, провідність, вміст фосфору, азоту та калію, а також дані про погоду, такі як температура повітря, кількість опадів та вологість повітря, рівень ультрафіолету (рис. 2.13.).

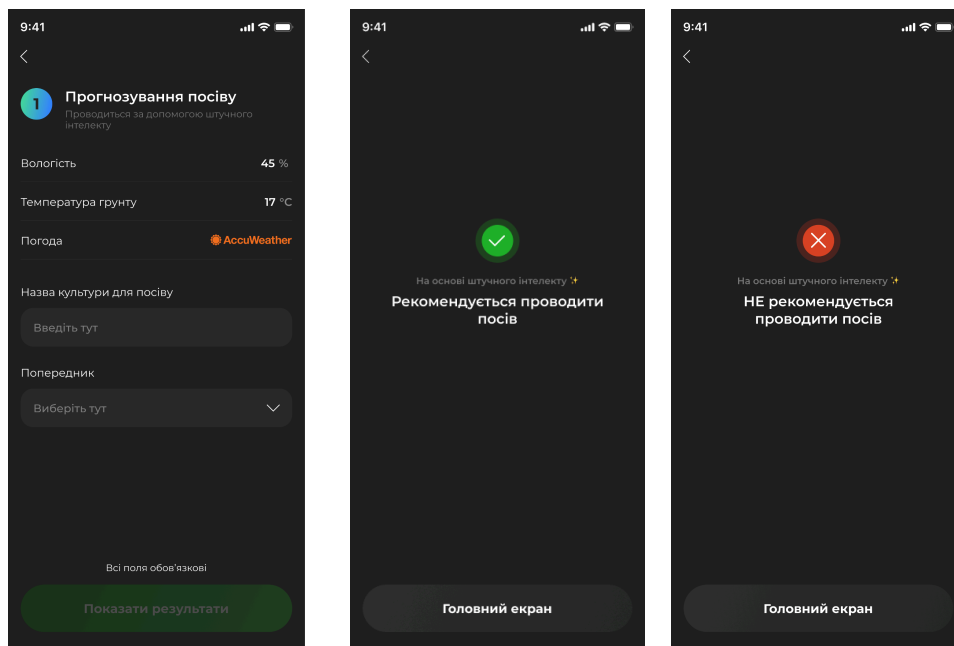


Рис. 2.13. Скріншоти інтерфейсу мобільного застосунку, які демонструють прогнозування посіву

Після отримання цих даних, вони піддаються передбачувальному аналізу за допомогою нейронної мережі. Нейронна мережа вивчає зв'язки між різними параметрами ґрунту, погодними умовами та врожайністю рослин на підставі навчальних даних [79]. Потім, за допомогою цих зв'язків, мережа може передбачити, яким буде врожай даної культури в конкретних умовах ґрунту та погоди.

На основі прогнозу, система може надати рекомендації користувачу щодо того, чи варто садити дану культуру в даних умовах. Наприклад, якщо прогноз показує, що ґрунт має оптимальні показники вологості та рН, а погодні умови сприятливі для зростання рослин, система може порекомендувати садити культуру. У випадку, якщо прогноз показує негативний результат, наприклад, низький рівень вологості ґрунту або очікування заморозків, система може порекомендувати відкласти посів до покращення умов.

Таким чином, перший етап прогнозування посіву забезпечує користувача важливою інформацією для прийняття обґрунтованих рішень щодо вирощування рослин, що сприяє підвищенню врожайності та оптимізації аграрного виробництва.

На другому етапі виробництва зернових культур, при визначенні зернових у сівозміні, необхідно вказати попередника з випадаючого списку для культури, яка планується для посіву. Наступним кроком є отримання вимірювальних даних про температуру та вологість ґрунту. На прикладі обрано зернову культуру - пшеницю (рис. 2.14).

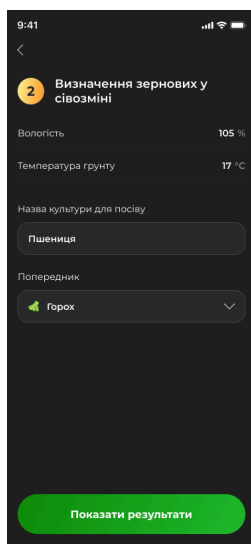


Рис. 2.14. Скріншот інтерфейсу мобільного застосунку, який демонструє отримання даних про вологість та температуру з сенсорів і вибір номенклатури попередника

Тоді опрацювавши введені дані програма видасть результат, про те варто садити дану культуру чи ні (рис. 2.15).

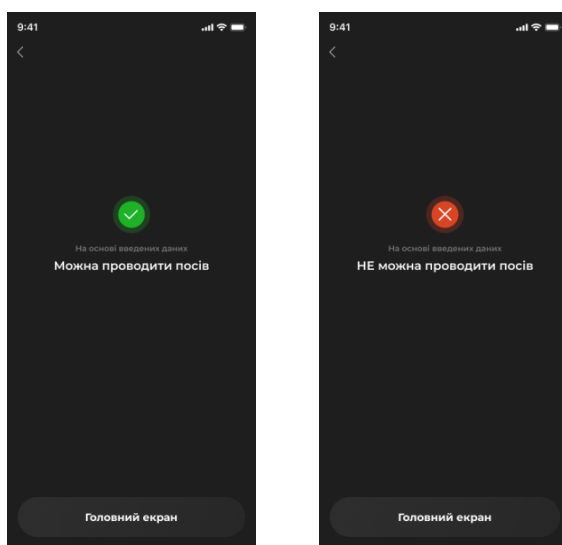


Рис. 2.15. Скріншоти інтерфейсу програми, які демонструють приклад прийняття рішення про доцільність висівання культури

Третім етапом є обробіток ґрунту. Серед випадваючих списків потрібно вибрати попередника, тип ґрунтової зони і тип забур'янення, який в свою чергу зв'язаний з вологістю ґрунту. Для достатнього рівня зволоження, який становить більше 45%, вибирається відповідний тип забур'янення. Внаслідок цього процесу, буде отримана інформація про глибину обробітку ґрунту (рис. 2.16.).

Важливим показником для встановлення параметрів обробітку є роль окремих шарів ґрунту у формуванні ефективної родючості та врожайності культур. Із збільшенням глибини цей ґрунтовий показник різко зменшується як у неудобрених, так і в удобрених ґрунтах. Подібних висновків дійшли багато авторів, які проводили дослідження в різних умовах.

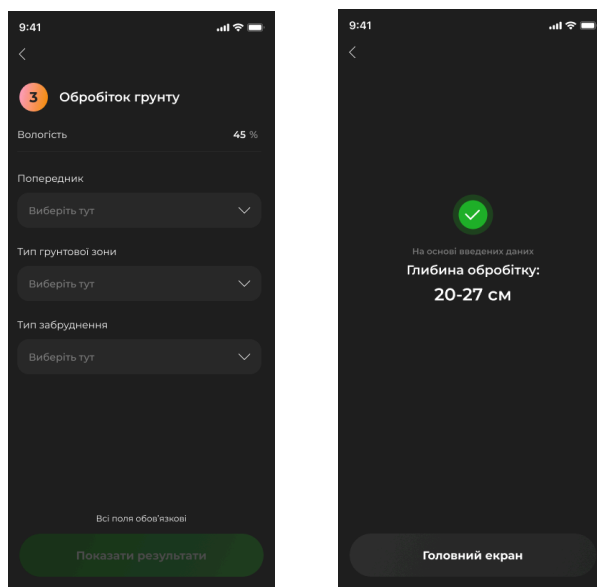


Рис. 2.16. Скріншоти інтерфейсу мобільного застосунку, які демонструють прийняття рішення про умови обробітку ґрунту

Границі глибини доцільного обробітку ґрунту також залежать від типу та розподілу добрив у ґрунті. Застосування деяких мінеральних добрив з домінуючим вмістом азоту разом із частим поливом призводить до вимивання азоту за межі фізіологічних центрів поглинання поживних речовин корінням.

На четвертому етапі внесення добрив акцентується увага на вмісті азоту, фосфору і калію у ґрунті (рис. 2.17.).

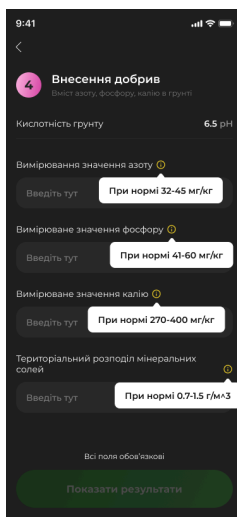


Рис. 2.17. Скріншот інтерфейсу мобільного застосунку, який демонструє прийняття рішення про внесення добрив

Добрива необхідно вносити на оптимальну глибину в ґрунт, оскільки від цього залежить ефективність їх використання. Стандартно добрива вносять на глибину до 30 см. Глибоке внесення може спричинити ускладнення надходження кисню з повітря, що може затримати процес розкладання. Однак, просте розкидання добрив по ділянці без їх внесення в ґрунт може призвести до втрати азоту. Аналізуючи дані про вміст азоту, фосфору та калію в ґрунті, програма може рекомендувати оптимальну кількість добрив для внесення з метою підвищення ефективності вирощування культур (рис. 2.18.).

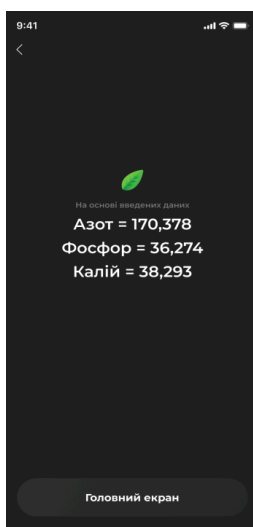


Рис. 2.18. Скріншот інтерфейсу мобільного застосунку, який демонструє прийняття рішення про певну кількість внесення добрив

Етап визначення готовності зернової культури до висівання є важливим для забезпечення оптимальних умов для її вирощування. Це включає аналіз лабораторних показників, таких як схожість, чистота висівання та маса 1000 зерен. На основі цих даних приймається рішення про те, чи настане відповідний момент для початку висівання. Оцінка цих параметрів дозволяє визначити оптимальний час для висівання зернової культури, що може позитивно позначитися на її врожайності та якості. (рис. 2.19).

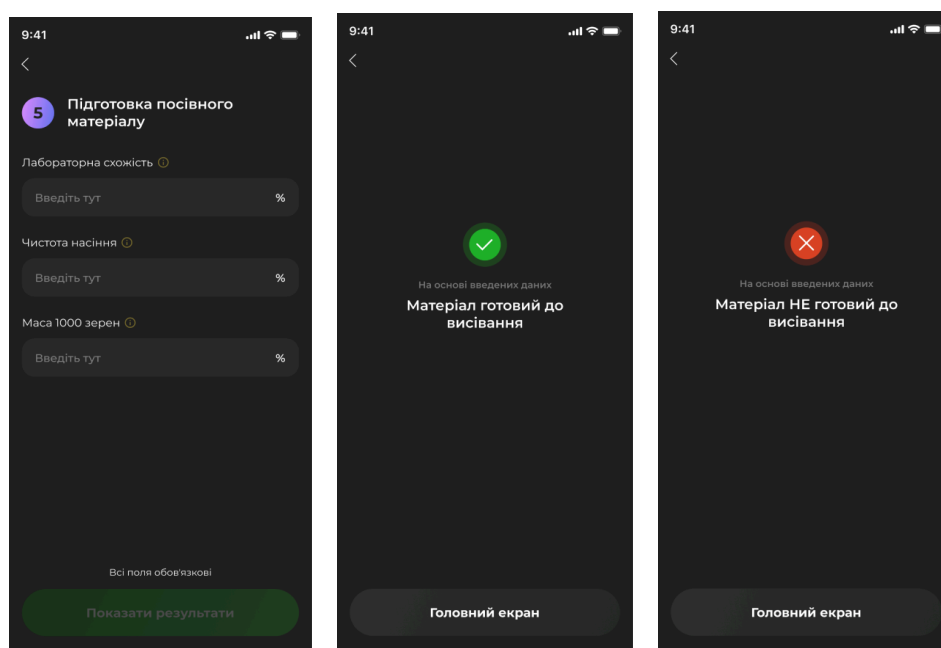


Рис. 2.19. Скріншоти інтерфейсу мобільного застосунку, які демонструють прийняття рішення про підготовку посівного матеріалу

Етап висівання передбачає розрахунок масової норми висіву зернових культур. На (рис. 2.20.) продемонстрована масова норма висіву, яка складає 2.512 кг/га. Для отримання високих урожаїв озимої пшениці необхідно правильно регулювати норми висіву, щоб забезпечити оптимальну кількість рослин на одиниці площі та високопродуктивні стебла. Урожай і якість зерна значно знижуються як у зріджених, так і в сильно загущених насадженнях.

Особливу увагу слід приділити регулюванню швидкості висіву та глибини покриття насіння. Норми встановлюються з урахуванням сорту, розміру насіння, попередника, родючості, забур'яненості поля, строків сівби тощо. Висаджування низькорослих, ранньостиглих, низькорослих, стійких до вилягання сортів з

пряmostоячими листками після гірших сортів-попередників на бідних ґрунтах із добрим водозабезпеченням покращує норми висіву насіння.

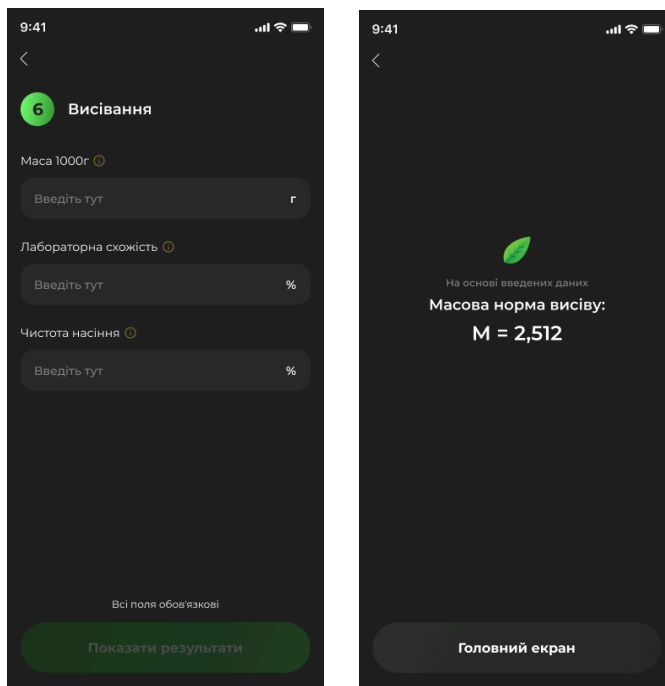


Рис. 2.20. Скріншоти інтерфейсу мобільного застосунку, які демонструють прийняття рішення про висівання

На цьому етапі збирання зернових культур можна дізнатися про готовність даної культури до збирання шляхом проведення оцінки її фізичних та ботанічних характеристик. Цей етап включає в себе ретельне спостереження за розвитком рослин, визначення стиглості зерна та готовності до збору врожаю.

Основні критерії, за якими можна визначити готовність культури до збирання, включають такі параметри, як колір та структура зерна, стан стебла та листя, а також вологість ґрунту. Зазвичай, зернові культури збираються, коли зерно має оптимальний колір (зазвичай жовтий або коричневий для пшениці), стебло стоїть прямо і має загальний жовтуватий або коричневий колір, а листя стає жовтим або бурим.

Крім того, вологість ґрунту та атмосферних умов також важливі для визначення готовності культури до збору. Збирання зерна проводять у той момент, коли вологість зерна досягає оптимального рівня для зберігання та подальшої обробки, що зазвичай становить приблизно 12-14%.

Отже, на цьому етапі збирання зернових культур проводиться оцінка готовності рослин до збору шляхом врахування їхніх фізичних характеристик, стиглості зерна та вологості ґрунту, що дозволяє максимально ефективно організувати процес збирання врожаю (рис. 2.21.).

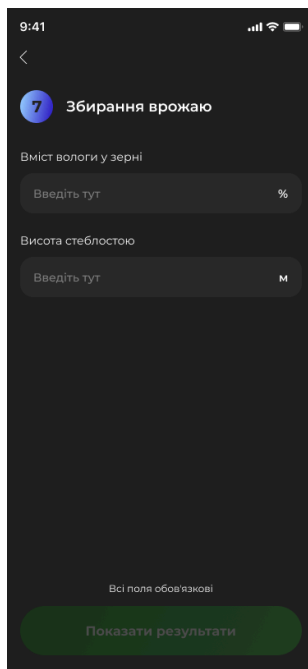


Рис. 2.21. Скріншот інтерфейсу мобільного застосунку, який демонструє прийняття рішення про збирання врожаю

Аналіз вмісту вологи у зерні та висоти стебел може бути важливим для визначення оптимального часу для збирання урожаю зернових культур. Висока вологість у зерні може призвести до проблем при зберіганні та обробці, тоді як низька вологість може вплинути на якість та врожайність культури. Висота стебла також може свідчити про готовність культури до збирання, оскільки вона може впливати на зрілість зерна та його вміст вологи. Отже, програма, проаналізує ці дані, і допоможе прийняти рішення про те, чи настав відповідний момент для збирання урожаю. Це допомагає забезпечити оптимальні умови для збирання зернових культур і зменшує ризик втрат врожаю чи зниження якості зерна (рис. 2.22.).

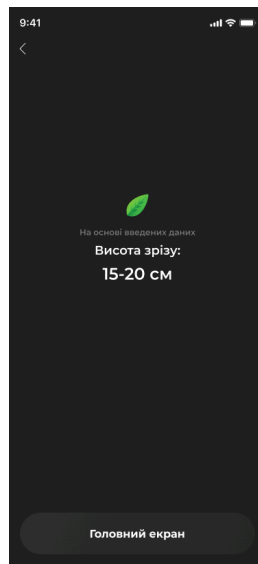


Рис. 2.22. Скріншот інтерфейсу мобільного застосунку, який демонструє прийняття рішення про умови збирання врожаю

Наші спостереження стосовно розробки програмного забезпечення дійсно важливі. Автоматизація процесів та використання мобільних технологій можуть значно полегшити і покращити управління агропромисловим виробництвом. Мобільні додатки стають додатковим інструментом для фермерів та агрономів, дозволяючи їм моніторити та керувати процесами виробництва з будь-якого місця і в будь-який час.

Враховуючи поширення мобільних пристроїв серед користувачів та їхній інтерес до застосування, розробка мобільних додатків для агропромислового сектору стає важливою задачею. Вони можуть забезпечити доступ до різноманітних сервісів, зокрема, віддалений моніторинг виробництва, аналіз даних та прийняття управлінських рішень.

Такі додатки можуть значно полегшити роботу фермерів, дозволяючи їм ефективно керувати всіма аспектами сільськогосподарського виробництва, від вирощування культур до управління ресурсами та вирішення проблем.

Крім того для забезпечення зручного доступу до інформації про реалізоване апаратне та програмне забезпечення системи моніторингу основних параметрів ґрунтів був розроблений веб сайт, який є центральною точкою обміну даними та комунікації користувачів з системою.

Сам вебсайт відіграє ключову роль у впровадженні та використанні кібер-фізичної системи моніторингу, надаючи користувачам зручний інтерфейс для візуалізації та отримання мобільного застосунку про стан ґрунту. На сайті розміщена детальна інформація про функціонал системи, її можливості та переваги. Користувачі можуть знайти тут інструкції щодо підключення сенсорів, налаштування програмного забезпечення та інші корисні матеріали.

Також, веб сайт містить розділ з документацією, де користувачі можуть знайти інформацію про технічні характеристики обладнання, опис алгоритмів роботи системи, та інструкції з експлуатації та обслуговування. На веб сайті також доступні кнопки для завантаження мобільного додатку, які забезпечують додаткову зручність користувачам (рис. 2.23.). Користувачі можуть використовувати ці кнопки для швидкого та простого завантаження мобільного додатку на свої смартфони або планшети. Мобільний додаток забезпечує їм можливість моніторингу параметрів ґрунту та отримання актуальної інформації про стан ґрунту в режимі реального часу, навіть коли вони перебувають поза домом. Завдяки скачаному мобільному додатку користувачі можуть зручно користуватися системою моніторингу навіть у русі, що значно полегшує їхню роботу та дозволяє ефективно використовувати отриману інформацію для прийняття рішень.

Загальна мета веб сайту полягає в тому, щоб забезпечити користувачам доступ до повної та актуальної інформації про систему моніторингу основних параметрів ґрунту, щоб допомогти їм ефективно використовувати цю інформацію для прийняття обґрунтованих рішень у галузі сільського господарства та агротехніки.

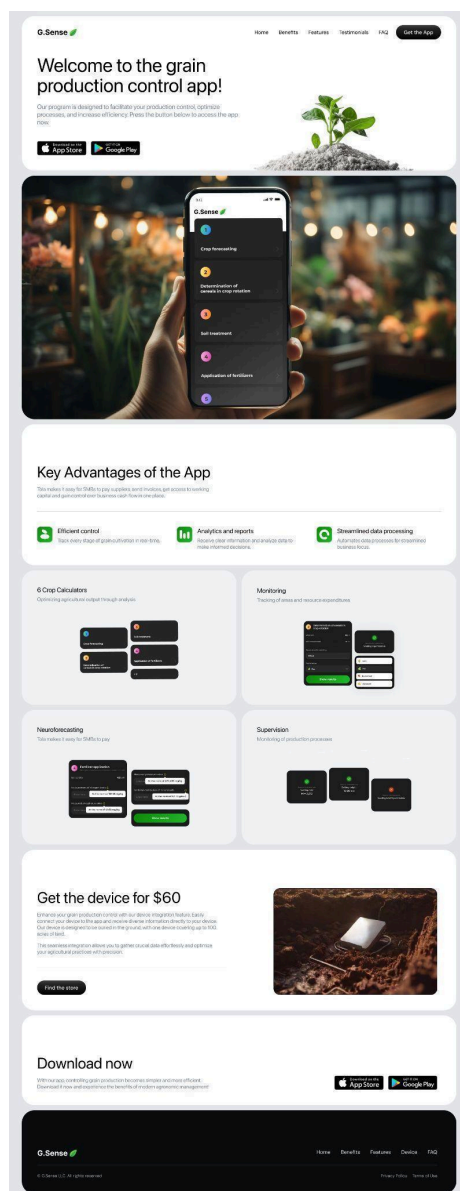


Рис. 2.23. Скріншот інтерфейсу веб сторінки, яка забезпечить користувачам доступ до інформації про функціонал системи

У сучасних системах моніторингу стану ґрунтів критично важливим аспектом є забезпечення надійності та точності зібраних даних. Для цього необхідно постійно перевіряти та калібрувати вимірювальні прилади й сенсори. Одним із ефективних підходів для досягнення цієї мети є автоматизація тестування. Автоматизоване тестування дозволяє значно підвищити ефективність процесу виявлення та виправлення помилок, скоротити час на проведення тестів, а також забезпечити повторюваність та послідовність результатів.

У роботі розроблено програмне забезпечення для оперативного моніторингу стану ґрунтів, яке включає в себе комплекс автоматизованих тестів.

Це програмне забезпечення дозволяє проводити вимірювання у реальному часі, забезпечуючи своєчасне виявлення відхилень та потенційних несправностей.

Автоматизовані тести охоплюють різні аспекти роботи системи, включаючи перевірку точності вимірювань, стабільності роботи в різних умовах, а також відповідності отриманих даних встановленим стандартам.

Слід підкреслити важливість автоматизації в забезпеченні високої якості та надійності системи моніторингу ґрунтів, що є ключовим елементом для успішного функціонування всієї системи.

Автоматизація тестування дійсно відіграє важливу роль у поліпшенні якості програмного забезпечення та збільшенні продуктивності тестувальних процесів. За допомогою автоматизованих засобів тестування можна ефективно виконувати широкий спектр тестів, включаючи функціональне, навантажувальне та інтеграційне тестування.

Однією з основних переваг автоматизації є здатність швидко виявляти дефекти та забезпечувати швидке їх усунення. Це дозволяє знизити час, необхідний для тестування, та покращити якість продукту. Крім того, автоматизовані тести забезпечують кращу відтворюваність, що сприяє отриманню більш точних і надійних результатів.

З розвитком технологій, таких як штучний інтелект і машинне навчання, можливості автоматизації тестування продовжують розширюватись. Це відкриває нові можливості для автоматичного генерування тестових сценаріїв, покращення аналізу результатів тестування та більш ефективного виявлення та усунення помилок у програмному забезпеченні.

Вибір інструменту автоматизації тестування є ключовим аспектом успішного проекту. При виборі інструменту важливо враховувати сумісність з існуючими технологіями та платформами, гнучкість для адаптації до змін, зручність використання та інтеграцію з іншими інструментами. Наприклад, інструменти, такі як Cypress, Playwright та Selenium, мають свої унікальні характеристики та переваги, які слід враховувати.

Стратегія впровадження автоматизації включає планування, визначення обсягу автоматизації, вибір тестових випадків та підготовку тестового середовища. Важливо також встановити ефективні системи моніторингу та аналізу результатів для виявлення та документування помилок, а також оцінки загальної ефективності тестування.

Для оцінки ефективності автоматизації тестування важливо розробити набір метрик, таких як процент помилок, виявлених під час тестування, відсоток покриття коду тестами, час виконання тестів та інші. Використання цих метрик допоможе об'єктивно оцінити якість тестування та внести корективи для його покращення.

Висновки до розділу 2

1. Доведено, що КФС складаються з різноманітних елементів, які взаємодіють між собою, включаючи фізичні об'єкти, обчислювальні хмари, засоби зв'язку та сенсори, що надають реально вчасний моніторинг у різних секторах, зокрема в сільському господарстві. Стандартизація цих систем стає важливим завданням, оскільки вони є складними та розпорошеними.

2. Враховуючи досвід європейських країн, де термін "кібер-фізичні системи" використовується для опису програмно-апаратних вбудованих систем, що забезпечують доступ до послуг через глобальні мережі, такі як Інтернет, і мають значний потенціал для розвитку та використання, пропонується визначення та обґрунтовується необхідність включення цього терміну в українську нормативну базу.

3. Запропоновано класифікаційні ознаки та здійснено класифікацію кібер-фізичних систем та ризиків, пов'язаних з їх функціонуванням.

4. Керуючись світовими тенденціями, проаналізовано міжнародне нормативне забезпечення функціонування КФС та обґрунтовано необхідність їх сертифікації, яка має підтверджувати вимоги до їх надійності, безпеки, стійкості та конфіденційності.

5. Було проведено аналіз технології виробництва сільськогосподарської продукції, конкретно на прикладі вирощування пшениці, з урахуванням

можливостей створення кібер-фізичних систем. В результаті були визначені ключові показники та типи інформації, необхідні для ефективної функціонування кібер-фізичної системи на кожному етапі виробництва. Ця інформація послужить основою для прийняття управлінських рішень щодо моніторингу стану ґрунтів під час проведення сільськогосподарських робіт.

6. Запропоновано та реалізовано апаратне та програмне забезпечення кібер-фізичної системи моніторингу основних параметрів ґрунтів.

РОЗДІЛ III. ДОСЛІДЖЕННЯ МЕТРОЛОГІЧНИХ ХАРАКТЕРИСТИК КФС МОНІТОРИНГУ СТАНУ ҐРУНТІВ

3.1. Методики калібрування КФС моніторингу стану ґрунтів

Для виконання процедури калібрування необхідно розробити методики калібрування, які відповідають стандартам [81-84], які описують основні вимоги [82].

Структура методики також повинна відповідати стандартам. Нижче наведено розроблені методики щодо калібрування сенсору для вимірювання температури ґрунту та сенсору вимірювання вологості ґрунту.

Згідно чинного законодавства України про регулювання метрологічної діяльності, усі ЗВТ, на добровільному порядку, підлягають періодичному калібруванню.

3.1.1. Калібрування сенсору для вимірювання температури ґрунту

Для забезпечення надійності та точності вимірювань у дослідженнях агрономічних і екологічних параметрів, зокрема таких як вміст поживних речовин у ґрунті, використовується спеціалізоване лабораторне обладнання. Одним з ключових елементів такого обладнання є кліматична камера. Кліматична камера дозволяє створювати і підтримувати задані умови температури, вологості та інших кліматичних параметрів, що є критично важливим для проведення точних та відтворюваних експериментів.

Для корекції температури в вимірювальному каналі використовується еталонний термогігрометр та спеціальна кліматична камера [83]. Одним із прикладів такої камери є модель КК-50СН, виготовлена словенською компанією Kamбіс. Ця модель обрана для проведення процедури калібрування.

Нижче наведено зовнішній вигляд кліматичної камери (рис. 3.1.).



Рис. 3.1. Кліматична камера Kambic KK-50CH

Використання спеціальної кліматичної камери з можливістю налаштування температури та вологості дозволяє проводити калібрування сенсорів у режимах, що імітують швидке старіння, та здійснювати стрес-тести.

Доцільно розглянути технічні характеристики кліматичної камери, яка використовується в лабораторії для дослідження впливу різних кліматичних умов на ґрунт і рослинність [84]. Ці характеристики включають діапазони регульованих параметрів, точність їх підтримки, об'єм камери та інші технічні аспекти, що визначають її функціональність та ефективність [85]. Наведена нижче таблиця містить основні технічні характеристики кліматичної камери, що використовується в наших дослідженнях.

Таблиця 3.1.

Опис технічних характеристик кліматичної камери Kambic KK-50CH

Характеристика	Значення
Напруга живлення $U_{жив}$, В	230
Діапазон вимірювання вологості H , %	10 – 98
Діапазон вимірювання температур T , °С	5 – 180
Невизначеність вимірювання вологості та температури U , %	0,6
Матеріал сенсору	Поліетилен
Геометричні зовнішні розміри (ВхШхД), мм	30х70х270
Геометричні внутрішні розміри (ВхШхД), мм	
Вага приладу, кг	125

Під час проведення калібрування повинні дотримуватися умови та застосовуватись відповідні засоби їх контролю. Калібрування є ключовим етапом у забезпеченні точності та надійності вимірювань в лабораторних дослідженнях.

Калібрування сенсорів температури і вологості ґрунту є важливим етапом у забезпеченні точності та надійності вимірювань в геологічних та агрономічних дослідженнях [86]. Нижче наведено основні умови, що слід враховувати при калібруванні цих сенсорів:

1. Стандартизовані умови: Калібрування проводиться в умовах, що максимально наближені до умов реального експлуатаційного середовища, в якому будуть використовуватися сенсори. Це включає температурний режим, вологість, атмосферний тиск та інші параметри.

2. Стандартні контрольні зразки: Перед калібруванням необхідно мати наявність стандартних контрольних зразків, які характеризуються відомими значеннями температури і вологості. Ці зразки використовуються для побудови калібрувальних кривих та перевірки точності сенсорів.

3. Методи калібрування: Для калібрування сенсорів температури та вологості застосовуються різноманітні методи, включаючи методи лінійної та нелінійної регресії. Вибір методу залежить від характеристик сенсора та умов його використання.

4. Перевірка точності: Після калібрування проводиться перевірка точності сенсорів за допомогою стандартних контрольних зразків. Відхилення вимірюваних значень від відомих стандартних повинні бути на прийнятному рівні відповідно до вимог стандартів.

5. Документація і відслідковуваність: Всі калібрувальні процедури мають бути документовані з вказівкою відомих даних про кожен сенсор і вимог до точності вимірювань. Кожен сенсор повинен мати унікальний ідентифікатор для відслідковуваності його калібрувального статусу та історії використання.

Ці умови дозволяють забезпечити високу точність і надійність вимірювань температури і вологості ґрунту за допомогою сенсорів та є важливими для

отримання достовірних даних у геологічних, агрономічних та екологічних дослідженнях [87].

Таблиця 3.2.

Умови проведення процесу калібрування температури

Параметр	Нормовані значення	Засоби контролю (найменування, типи ЗВТ, метрологічні характеристики)
Температура навколишнього середовища	$(20,1 - 22,3) \pm 0,2$ °C	Гігрометри психрометричні ВІТ-1, зав. діапазон вимірювань 0 - 25°C, 20 - 90%, $\Delta = \pm 0,2$ °C
Відносна вологість повітря	$(42 - 45) \pm 6$	
Атмосферний тиск	$(97,9 - 98,0) \pm 0,15$ кПа	Барометр-анероїд БАММ-1, діапазон вимірювань 80 - 106 кПа, $\Delta = \pm 0,2$ кПа
Швидкість аспірації	$(0,5 - 1,0)$ м/с	Анемометр, діапазон вимірювань 0,2 - 1,0 м/с, $\Delta = \pm (0,1 + 0,05V)$ м/с

Стандарти, калібровочні інструменти та ЗВТ повинні бути належним чином підготовлені до використання відповідно до вимог експлуатаційних інструкцій. Для скляних термометрів з поділкою від 0,2 до 0,1 °C і цифрових термометрів з похибкою менше 0,5 °C в якості РЕ необхідно використовувати платиновий резистивний датчик температури ТОЕ-115 [88]. При використанні термометра ТОЕ 115 як РЕ із частковим значенням 0,5 °C або більше та цифрових термометрів

із похибкою понад $0,5\text{ }^{\circ}\text{C}$ як РЕ використовується платиновий термометр опору Pt-1000.

Перед виконанням вимірювань слід переконатися, що в приміщенні, де виконується калібрування, немає вібрацій, джерел тепла та повітряних потоків, які можуть вплинути на роботу приладу. Також важливо зберігати менсор, який потрібно відкалібрувати, у лабораторії принаймні одну годину. Це дозволяє уникнути температурного дрейфу та усуває помилки, спричинені специфічними тепловими ефектами, присутніми в матеріалі термометра.

Після того, як термометри витримані у приміщенні, їх слід помістити у кліматичну камеру разом з робочим еталоном, використовуючи програмне забезпечення термостата. Термометри, які проходять калібрування, можна встановлювати як окремо, так і групами.

Після ввімкнення терморегулятора та встановлення певного значення температури, що відповідає першій точці калібрування, необхідно дочекатися, поки задана температура теплоносія стабілізується відповідно до показань на дисплеї термостата або значення еталонного термометра, зміна температури за 5 хв. не повинна перевищувати $1/3$ від допустимої похибки ЗВТ або $1/2$ від його одиниці молодшого розряду [89].

Перед початком процесу калібрування необхідно провести зовнішній огляд кожного засобу вимірювання температури (ЗВТ), під час якого слід перевірити наступні пункти:

- наявність та чіткість маркування;
- відсутність пошкоджень зовнішніх поверхонь та інших дефектів, які можуть впливати на правильну роботу термометра;
- відсутність тріщин та подряпин на оболонці, що можуть впливати на міцність або ускладнювати вимірювання;
- відсутність слідів рідини на поверхні;
- забезпечення сталого положення елементів;
- наявність відміток одиниць вимірювання температури;
- наявність товарного знаку виробника.

Зовнішні огляд зазвичай проводяться без додаткових ЗВТ. А термометри, які не відповідають хоча б одному з критеріїв зовнішнього випробування, не підлягають подальшому калібруванню [90]. Під час випробування ми уважно перевіряємо покази термометра, що калібрується – вони повинні відповідати температурі в лабораторії.

У разі виявлення якоїсь невідповідності вимог ЗВТ та документації під час випробувань та перевірки роботи, то прилад буде вважатися таким, що не відповідає встановленим вимогам, і калібрування такого приладу не буде проводитись.

Протокол калібрування

Метод калібрування: Калібрування проведено методом прямого порівняння.

■ Усі вимірювання простежуються до одиниць Міжнародної системи SI, які відтворюють національні еталони НМІ.

У протоколі подано результати калібрування, що узгоджуються з можливостями, вказаними в Додатку С до угоди МРА, розробленому СІРМ. Усі НМІ, що беруть участь у МРА, взаємно визнають дієвість своїх сертифікатів калібрувань та вимірювань сто вимірних величин, діапазонів та невизначеностей вимірювання, вказаних у Додатку (подробити див. <http://www.bipm.org>). Цей протокол може бути відтворений тільки повністю. Будь-яка публікація або часткове відтворення змісту сертифіката можливі тільки за письмового дозволу НМІ, який видав цей сертифікат.

Калібрування проведено за допомогою приладу для вимірювання параметрів довкілля типу СОПОС-1М №01	Сертифікат калібрування № UA 1166/C23 чинний до 24.04.2024
---	--

Умови калібрування:

Статичний тиск (кПа) / Static pressure (kPa)	(97,9 – 98,0) ± 0,15
Температура повітря (°C) / Air temperature (°C)	(20,1 – 22,3) ± 0,2
Відносна вологість повітря (%) / Relative humidity (%)	(42 – 45) ± 6

Результати калібрування, включно з непевністю:

Всі результати у °C

Таблиця 3.3.

Номер спостереження	Покази приладу	Покази приладу СОПОС- 1М	Розширена непевність приладу СОПОС-1 М	Різниця між показами
1	20	21,11	0,2	-1,11
2	20	21,12		-1,12

3	20	21,12	-1,12
4	20	21,13	-1,13
5	20,13	21,14	-1,01
6	20,13	21,15	-1,02
7	20,19	21,16	-0,97
8	20,19	21,17	-0,97
9	20,19	21,17	-0,98
10	20,19	21,18	-0,99
11	20,19	21,19	-1,00
12	20,25	21,20	-0,95
13	20,25	21,21	-0,96
14	20,31	21,22	-0,91
15	20,38	21,22	-0,84
16	20,44	21,23	-0,79
17	20,38	21,24	-0,86
18	20,38	21,25	-0,87
19	20,44	21,26	-0,82
20	20,44	21,27	-0,82
21	20,5	21,27	-0,77
22	20,5	21,28	-0,78
23	20,56	21,29	-0,73
24	20,56	21,43	-0,87
25	20,56	21,44	-0,88
26	20,56	21,44	-0,88
27	20,5	21,45	-0,95
28	20,56	21,45	-0,89
29	20,56	21,46	-0,90
30	20,56	21,46	-0,90
31	20,63	21,47	-0,84
32	20,69	21,47	-0,78
33	20,69	21,48	-0,79
34	20,69	21,48	-0,79
35	20,69	21,49	-0,80
36	20,63	21,49	-0,86
37	20,75	21,50	-0,75
38	20,75	21,50	-0,75
39	20,75	21,51	-0,76
40	20,75	21,52	-0,77
41	20,81	21,52	-0,71
42	20,75	21,53	-0,78
43	20,75	21,53	-0,78
44	20,75	21,54	-0,79
45	20,81	21,54	-0,73
46	20,88	21,55	-0,67
47	20,88	21,55	-0,67
48	20,88	21,56	-0,68
49	20,88	21,56	-0,68

Розширена невизначеність отримана множенням стандартної сумарної невизначеності на коефіцієнт охоплення $k = 2$, який відповідає рівню довіри приблизно рівному 95 % за припущення

нормального розподілу. Оцінка імовірності невизначеності проведена відповідно до ДСТУ Н РМГ 43:2006.

Додаткова інформація

Систематичне зміщення показів приладу становить мінус 0,86°C.

Для визначення абсолютного відхилення під час вимірювання температури застосовується такий підхід:

1. Розташувати референсний еталон (РЕ) та термометр, який калібрується, в термостаті таким чином, щоб вони були у безпосередній близькості один до одного, з резервуарами на одному рівні.

2. Увімкнути термостат, задати значення температури, що відповідає першій точці калібрування, та зачекати на стабілізацію температури теплоносія. Після стабілізації проводиться фіксація показів приладів кожну хвилину протягом десяти хвилин.

Для вимірювання показів термометрів спочатку зчитуються десяті долі градуса, а потім цілі градуси. Значення за шкалою аналогових термометрів слід зчитувати з точністю $\frac{1}{2}$ або, за можливістю, $\frac{1}{4}$ ціни поділки [91].

Після введення корекцій у вимірювані значення термометрів, які вказані в паспорті, та у значення, отримані на РЕ, проводиться їх порівняння для визначення абсолютної похибки.

3.1.2. Калібрування сенсору для вимірювання вологості ґрунту

Калібрування сенсорів вологості ґрунту полягає у встановленні відповідності між виміряними електричними сигналами, що надходять від сенсору, та фактичними вологостями ґрунту [92]. Цей процес вимагає спеціалізованого обладнання, методології та відповідності до стандартів.

Тому доцільно провести процес калібрування сенсорів для вимірювання вологості ґрунту, включаючи методи та процедури калібрування, вимоги до обладнання та стандартів, а також важливість цього процесу для отримання достовірних та точних даних про вологість ґрунту.

Засоби калібрування та допоміжне обладнання, що повинні бути застосовані під час проведення калібрування, наведені у табл. 3.4.

Таблиця 3.4.

Засоби та допоміжне обладнання для проведення процедури калібрування калібрування

Операції калібрування	Найменування, типи (умовні позначення) засобів калібрування та допоміжного обладнання	Метрологічні характеристики засобів калібрування
Зовнішній огляд	-	-
Випробування	-	-
Визначення основних параметрів	-	-
Калібрування шкали термометра	Термометр опору Pt-1000	$T = 0 - 100^{\circ}\text{C}$, $U = 0,1^{\circ}\text{C}$
	Кліматична камера Kambic КК-50СН	
Калібрування шкали гігрометра	Кліматична камера КК-50СН	$T = 0 - 50^{\circ}\text{C}$, $U = 0,5^{\circ}\text{C}$
	Вологомір еталонний Rotronic HP 22-A	$H = 50 - 95\%$, $U = 0,8\%$

Для виконання процедури калібрування можуть використовуватися альтернативні засоби калібрування, якщо їх метрологічні характеристики відповідають вимогам даного методу [93].

Під час здійснення калібрування необхідно дотримуватися встановлених умов та застосовувати засоби контролю, перелічені у табл. 3.5.

Таблиця 3.5.

Умови проведення процесу калібрування вологості

Параметр	Нормовані значення	Засоби контролю (найменування, типи ЗВТ, метрологічні характеристики)
Температура навколишнього середовища	$(20,1 - 22,3) \pm 0,2$ °C	Гігрометри психрометричні ВІТ-1, зав. діапазон вимірювань 0 - 25°C, 20 - 90%, $\Delta = \pm 0,2$ °C
Відносна вологість повітря	$(42 - 45) \pm 6$	
Атмосферний тиск	$(97,9 - 98,0) \pm 0,15$ кПа	Барометр-анероїд БАММ-1, діапазон вимірювань 80 - 106 кПа, $\Delta = \pm 0,2$ кПа
Швидкість аспірації	$(0,5 - 1,0)$ м/с	Анемометр, діапазон вимірювань 0,2 - 1,0 м/с, $\Delta = \pm (0,1 + 0,05V)$ м/с

Для забезпечення ефективності процесу калібрування можуть бути задіяні альтернативні засоби калібрування, якщо їхні метрологічні характеристики відповідають вимогам цієї методики [94].

Перед початком калібрування важливо переконатися, що всі еталони, робочі засоби вимірювання та обладнання готові до роботи відповідно до експлуатаційних вимог.

Треба також переконатися, що в приміщенні, де проводиться калібрування, немає вібрацій, джерел тепла та повітряних потоків, які можуть вплинути на функціонування приладів.

Для забезпечення стабільності вимірювань рекомендується попередньо витримати гігрометри та сенсори вимірювання у робочому приміщенні протягом не менше однієї години перед початком процесу калібрування.

Після цього необхідно встановити термометр PE та гігрометр, які підлягають калібруванню, у камері штучного клімату та запустити процес, очікуючи стабілізації температури теплоносія до значення, що відповідає першій точці калібрування.

Перед початком процесу калібрування, засоби вимірювання температури (ЗВТ) повинні пройти зовнішній огляд з урахуванням наступних критеріїв:

- Перевірка наявності та ясності маркування.
- Оцінка стану зовнішніх поверхонь для виявлення пошкоджень або дефектів, які можуть вплинути на їх нормальне функціонування.
- Визначення відсутності тріщин та подряпин на оболонці, що може вплинути на їх міцність або ускладнити вимірювання.
- Перевірка відсутності слідів рідини на оболонці.
- Забезпечення сталого положення та взаємної фіксації.
- Перевірка наявності товарного знаку виробника.

Під час проведення зовнішнього огляду не використовуються додаткові засоби та обладнання. Гігрометри, які не відповідають жодному з наведених критеріїв, вважаються непридатними для подальшого калібрування і відповідно не підлягають йому.

Під час проведення випробувань перевіряється відповідність показів термометра, який калібрується, температурі в лабораторії [95]. У випадку виявлення невідповідностей засобів вимірювання встановленим вимогам, вони вважаються непридатними для калібрування, і процедура калібрування не проводиться.

Протокол калібрування

Метод калібрування: Калібрування проведено методом прямого порівняння.

Усі вимірювання простежуються до одиниць Міжнародної системи SI, які відтворюють національні еталони НМІ.

У протоколі подано результати калібрування, що узгоджуються з можливостями, вказаним в Додатку С до угоди МРА, розробленому СІРМ. Усі НМІ, що беруть участь в МРА, взаємно визнають дієвість своїх сертифікатів калібрувань та вимірювань стосовно виміряних величин, діапазонів та невизначеностей вимірювання, вказаних у Додатку С (подробиці див. <http://www.bipm.org>). Цей протокол може бути відтворений тільки повністю. Будь-яка публікація або часткове відтворення змісту сертифіката можливі тільки з письмового дозволу НМІ, який видав цей сертифікат.

Калібрування проведено за допомогою приладу для вимірювання параметрів довкілля типу СОПОС-1М №01	Сертифікат калібрування № UA 1166/C23 чинний до 24.04.2024
---	--

Умови калібрування:

Статичний тиск (кПа) / Static pressure (kPa)	(97,9 – 98,0) ± 0,15
Температура повітря (°C) / Air temperature (°C)	(20,1 – 22,3) ± 0,2
Відносна вологість повітря (%) / Relative humidity (%)	(42 – 45) ± 6

Результати калібрування, включно з непевністю:

Всі результати у %

Таблиця 3.6.

Номер спостереження	Покази приладу	Покази приладу СОПОС- 1М	Розширена непевність приладу СОПОС-1М	Різниця між показами
1	9.2	9,32	0,2	-0,12
2	8.6	9,84		-1,24
3	9.2	9,42		-0,22
4	8.8	9,68		-0,88
5	8.6	9,18		-0,58
6	8.5	9,10		-0,6
7	9.6	10,32		-0,72
8	9.4	10,04		-0,64
9	9.4	9,94		-0,54
10	9.6	10,14		-0,54
11	9.5	10,22		-0,72
12	10.2	10,72		-0,52
13	10.7	11,34		-0,64
14	11.4	11,90		-0,5
15	10.4	11,10		-0,7
16	11.2	11,64		-0,44
17	10.7	11,30		-0,6

18	10.8	11,44	-0,64
19	10.8	11,40	-0,6
20	11.1	11,78	-0,68
21	10.2	10,86	-0,77
22	10.2	10,88	-0,66
23	10.6	11,20	-0,6
24	10.3	10,82	-0,52
25	11.2	11,70	-0,5
26	11.3	11,82	-0,52
27	9.8	10,16	-0,36
28	10.4	10,92	-0,82
29	10.1	10,70	-0,6
30	10.7	11,18	-0,48
31	10.4	10,98	-0,58
32	10.4	10,88	-0,48
33	11.3	11,84	-0,54
34	10.2	10,58	-0,38
35	10.6	11,02	-0,42
36	10.7	11,16	-0,46
37	10.2	10,70	-0,5
38	10.2	10,62	-0,42
39	10.4	11,04	-0,64
40	10.6	11,14	-0,54
41	10.4	10,78	-0,38
42	10.8	11,30	-0,5
43	10.4	10,90	-0,78
44	10.4	10,96	-0,56
45	10.6	11,08	-0,48
46	10.4	10,62	-0,22
47	10.8	11,24	-0,44
48	10.4	10,82	-0,42
49	10.4	11,00	-0,6

Розширена невизначеність отримана множенням стандартної сумарної невизначеності на коефіцієнт охоплення $k = 2$, який відповідає рівню довіри приблизно рівному 95 % за припущення нормального розподілу. Оцінка імовірності невизначеності проведена відповідно до ДСТУ Н РМГ 43:2006.

Додаткова інформація

Систематичне зміщення показів приладу становить мінус 0,56%.

Для визначення абсолютного відхилення показів при вимірюванні вологості застосовується наступний підхід:

1. На гігрометр, який калібрується, встановлюється гніт та резервуар для води, який заповнюється водою. Гігрометр залишається в робочому положенні протягом 20 хвилин, щоб гніт наситився вологою.

2. У камері штучного клімату встановлюються гігрометр РЕ (можливо використовувати гігрометр камери) та гігрометр, який калібрується, в робочому положенні.

3. Камера штучного клімату вмикається, а швидкість аспірації повітря встановлюється відповідно до значення, зазначеного у психрометричній таблиці гігрометра. Задається значення вологості повітря, яке відповідає першій точці калібрування, і чекається на стабілізацію цієї вологості в камері (приблизно 20 хвилин). Після стабілізації фіксуються покази приладів - гігрометра РЕ та температури на "сухому" та "вологодому" термометрах гігрометра, який калібрується, протягом 15 хвилин. Кожна точка вимірюється десять разів.

І в результаті, вводиться корекція в покази гігрометра РЕ, зазначена в паспорті або сертифікаті калібрування.

3.2. Верифікація підсистеми збору вимірювальної інформації

Основні завдання верифікації підсистеми КФС включають:

1. Визначення переліку та значень метрологічних характеристик вимірювальних каналів підсистеми.

2. Встановлення переліку та значень нормованих характеристик точності випробувального обладнання.

3. Перевірка відповідності метрологічних характеристик та нормованих значень метрологічних характеристик вимогам технічного завдання на розроблення або стандартів.

4. Визначення частоти метрологічного підтвердження підсистеми збору інформації.

5. Перевірка правильності вибору методів та засобів калібрування та верифікації.

6. Оцінка методик калібрування та верифікації.

7. Визначення придатності системи для певного застосування.

Структура проекту програми верифікації КФС включає наступні розділи:

1. Вступні відомості про КФС.

2. Основні вимоги до вимірювальних каналів.

3. Використання еталонних та допоміжних засобів вимірювальної техніки (ЗВТ).

4. Проведення експериментальних досліджень вимірювальних каналів.

5. Методика проведення процедури верифікації.

6. Аналіз отриманих результатів верифікації КФС.

7. Формування висновків.

На етапі планування та проведення експериментальних досліджень підсистеми верифікації КФС важливо виконати наступні кроки:

1. Визначення необхідного обсягу репрезентативної вибірки вимірювальних каналів.

2. Встановлення оптимальної кількості досліджуваних точок з діапазону вимірювань та методів обробки результатів.

3. Визначення необхідної кількості спостережень в досліджуваних точках з діапазону вимірювань.

4. Встановлення вимог до режимів вимірювань та послідовності їх проведення.

5. Дослідження вибраних еталонних засобів та допоміжних пристроїв.

6. Встановлення початкових даних та умов для оцінки похибок вимірювальних каналів.

7. Аналітичне відображення похибки вимірювальних каналів в нормальних умовах.

8. Аналітичне відображення похибки вимірювальних каналів в робочих умовах.

9. Визначення похибки вимірювальних каналів в нормальних умовах.

10. Визначення похибки вимірювальних каналів в робочих умовах.

11. Збір та обробка результатів спостережень.

12. Перевірка ефективності методики калібрування вимірювальних каналів.

13. Встановлення необхідної частоти метрологічного підтвердження вимірювальних каналів.

14. Формулювання зауважень та пропозицій на основі отриманих результатів експериментальних досліджень.

Було проведено оцінку підсистеми збору інформації для кібер-фізичної системи моніторингу агровиробництва на основі наступних вихідних даних:

- діапазон вимірювання температури: від 12 до 30 градусів Цельсія;
- нормоване значення точності згідно з конструкторською документацією: $\pm 0,045$ градусів Цельсія;
- допустиме значення похибки вимірювань: $\pm 0,033$ градусів Цельсія;
- кількість досліджуваних вимірювальних каналів: 1;
- середній термін експлуатації вимірювального каналу: 10 000 годин;
- допустиме значення похибки визначення часу до метрологічної відмови: 360 годин;
- довірна ймовірність $P_z(t) = 0,95$.

Був визначений обсяг репрезентативної вибірки для підсистеми збору інформації кібер-фізичної системи моніторингу агровиробництва, яка буде піддаватися метрологічним дослідженням. Критерії включають:

- кількість вимірювальних каналів (ВК), призначених для вимірювання температури: 1;
- похибка репрезентативності $\varepsilon = 10\%$;
- довірна ймовірність $P = 0,95$;
- $t = 1,96$.

Вимірювальні канали (ВК), що мають однакові функції перетворення, призначаються для системи. У випадку, якщо система включає в себе ВК з різними функціями перетворення, необхідно розподілити їх на групи з однотипними ВК [96].

Для розрахунку обсягу вибірки n , яка з заданою ймовірністю дозволяє оцінити метрологічні властивості вимірювальних каналів генеральної сукупності, використовується наступна формула.

Оскільки стандартне відхилення є невідомим, кількість вимірювальних каналів у репрезентативній вибірці знаходиться за такою формулою:

$$n = \frac{t^2 \cdot N}{4 \cdot \varepsilon^2 \cdot N + t^2} \quad (3.1)$$

де t - коефіцієнт, що визначається в залежності від обраної довірчої ймовірності; N - загальна кількість вимірювальних каналів; ε - допустима похибка репрезентативності, що визначається на основі даних з експлуатації вимірювальних каналів системи в реальних умовах об'єкта або на основі інформації від проектної організації чи замовника;

$$n = \frac{1.96^2 \cdot 1}{4 \cdot 0.1^2 \cdot 1 + 1.96^2} = 0,98 \quad (3.2)$$

Вважається, що критерій безвідмовної роботи (КБР) щодо метрологічних збоїв та критерій швидкості зміни похибки (КШЗП) є найоптимальнішими під час розрахунку міжкалібрувального інтервалу з точки зору експлуатаційно-технічного підґрунтя.

Щодо КБР, то цей підхід доцільно застосовувати в наступних ситуаціях:

перша – на основі аналізу результатів дослідного періоду використання на етапі первинного визначення міжкалібрувального інтервалу,

друга – на основі результатів довгого періоду використання КФС, коли настає необхідність чергового визначення міжкалібрувального інтервалу та його коригування.

Відповідно до методики реалізації КБР необхідно обчислити посередині періоду ймовірність безвідмовної роботи відповідно до виразу:

$$P(t') = P(0) - \frac{P(0) - P_3(t)}{2} \quad (3.3)$$

де $P(0)$ – значення ймовірності безвідмовної роботи на початку періоду;

$P_3(t)$ – значення ймовірності безвідмовної роботи в кінці періоду.

$$P(t') = 1 - \frac{1 - 0.95}{2} = 0.975 \quad (3.4)$$

Важливою є процедура оцінювання системи з погляду отримання вимірюваного значення вологості.

На основі вхідної інформації про гігрометр ІВТМ – 7М треба здійснити розрахунок міжкалібрувального інтервалу для нього. Вхідними даними є:

- діапазон вимірювання [35, 93]%;
- нормоване значення точності відповідно до конструкторської документації: $\Delta_H = \pm 2,0\%$;
- допустиме значення похибки вимірювань $\Delta_{\phi_H} = 1,5\%$;
- число N вимірювальних каналів, що досліджуються, яке рівне одиниці;
- τ - середній термін експлуатації вимірювальних каналів (10000год);
- Δt - допустиме значення похибки визначення моменту настання метрологічної відмови (чотириста годин);
- довірна ймовірність (0,95).

Варто зазначити, що результат обчислення вибірки n для вимірювання вологості буде співпадати з результатом обчислення вибірки n для вимірювання температури для тієї ж заданої ймовірності безвідмовної роботи:

$$n = \frac{1.96^2 \cdot 1}{4 \cdot 0.1^2 \cdot 1 + 1.96^2} = 0,98 \quad (3.5)$$

Подібна ситуація спостерігається і для ймовірності безвідмовної роботи всередині часового періоду оцінки як по параметру температури, так і по параметру вологості:

$$P(t') = 1 - \frac{1 - 0.95}{2} = 0.975 \quad (3.6)$$

За отримання позитивних результатів формується відповідний документ.

За отримання незадовільного результату в протоколі мають бути вказані коригувальні дії, застосування яких призведе до покращення властивостей вимірювальної системи.

Застосування розробленої програми верифікації КФС дасть можливість зменшити метрологічні ризики під час функціонування кібер-фізичної системи моніторингу ґрунтів в процесі сільськогосподарських робіт.

Закон України «Про метрологію та метрологічну діяльність» встановлює вимоги до визначення між калібрувальних та міжповірювальних інтервалів. З врахуванням положень закону та вище наведеної методики нами було встановлено орієнтовний його термін – 1 рік.

3.3. Дослідження непевності вимірювання параметрів ґрунту

Вимірювання параметрів ґрунту є фундаментальною складовою агрономічних досліджень, екологічного моніторингу та управління земельними ресурсами. Такі параметри, як щільність, кислотність, вологість, температура та провідність, відіграють ключову роль у визначенні родючості ґрунту, його фізичних та хімічних властивостей, а також здатності підтримувати ріст рослин. Однак, як і в будь-яких вимірюваннях, точність і надійність результатів можуть бути піддані різним видам непевності, що потребує детального дослідження та аналізу.

Непевність вимірювання параметрів ґрунту може виникати з різних джерел, включаючи методи відбору проб, характеристики вимірювальних приладів, умови проведення вимірювань, а також обробку та інтерпретацію даних. Відсутність належного контролю над цими аспектами може призвести до значних похибок, що, в свою чергу, впливає на прийняття агротехнічних рішень, екологічний менеджмент та наукові дослідження.

Цей підрозділ присвячений дослідженню непевності вимірювання параметрів ґрунту. У ньому будуть розглянуті основні джерела непевності та методи їх оцінки, а також сучасні підходи до мінімізації впливу непевності на результати вимірювань. Цей підрозділ надає ґрунтовну основу для розуміння та управління непевністю у вимірювальному процесі, що є ключовим для подальшого розвитку точного землеробства та сталого управління природними ресурсами.

3.3.1. Дослідження непевності вимірювання температури

Температура є одним з основних параметрів, який необхідно контролювати в багатьох галузях науки та промисловості. Від точності її вимірювання залежить

ефективність технологічних процесів, безпека експлуатації обладнання, якість продукції та інші важливі аспекти. Проте будь-яке вимірювання супроводжується певною непевністю, яка може впливати на остаточні результати та інтерпретацію даних.

Дослідження непевності вимірювання температури має на меті оцінку впливу різноманітних факторів на точність отриманих результатів, розробку методів мінімізації похибок та підвищення надійності вимірювальних систем. Це питання особливо актуальне в контексті сучасних вимог до якості та стандартизації продукції, а також у зв'язку зі зростаючими потребами в точних і достовірних даних для наукових досліджень та промислових застосувань.

У цьому підрозділі буде розглянуто основні аспекти непевності вимірювання температури, методи її оцінки та розрахунок бюджету.

Було здійснено експериментальне дослідження температури ґрунту, і отримано дані, які наведені у табл. 3.7.

Таблиця 3.7.

Номер досліду, №	Час	Температура ґрунту, °С
1	13.31	20
2	13.33	20
3	13.35	20
4	13.37	20
5	13.43	20,13
6	13.45	20,13
7	13.47	20,19
8	13.51	20,19
9	13.53	20,19
10	13.55	20,19
11	14.01	20,19
12	14.03	20,25
13	14.07	20,25
14	14.09	20,31
15	14.13	20,38
16	14.15	20,44
17	14.20	20,44
18	14.23	20,38
19	14.25	20,38

20	14.27	20,44
21	14.29	20,44
22	14.31	20,5
23	14.33	20,5
24	14.35	20,56
25	14.36	20,56
26	14.38	20,56
27	14.39	20,56
28	14.41	20,5
29	14.43	20,56
30	14.45	20,56
31	14.49	20,56
32	14.51	20,63
33	14.55	20,69
34	14.57	20,69
35	14.59	20,69
36	15.03	20,69
37	15.05	20,63
38	15.09	20,75
39	15.15	20,75
40	15.17	20,75
41	15.19	20,75
42	15.21	20,81
43	15.23	20,75
44	15.27	20,75
45	15.29	20,75
46	15.31	20,81
47	15.33	20,88
48	15.33	20,88
49	15.35	20,88
50	15.37	20,88

На основі вимірних значень розрахунок непевності за типом А:

$$U_A = \sqrt{\frac{(20-20.495)^2+(20-20.495)^2+(20-20.495)^2+(20-20.495)^2+(20.13-20.495)^2}{50(50-1)}}$$

$$\sqrt{\frac{(20.13-20.495)^2+(20.19-20.495)^2+(20.19-20.495)^2+(20.19-20.495)^2+(20.19-20.495)^2}{50(50-1)}}$$

$$\sqrt{\frac{(20.19-20.495)^2+(20.25-20.495)^2+(20.25-20.495)^2+(20.31-20.495)^2+(20.38-20.495)^2}{50(50-1)}}$$

$$\begin{aligned}
& \sqrt{\frac{(20.44-20.495)^2+(20.44-20.495)^2+(20.38-20.495)^2+(20.38-20.495)^2+(20.44-20.495)^2+}{50(50-1)}} \\
& \sqrt{\frac{(20.44-20.495)^2+(20.5-20.495)^2+(20.5-20.495)^2+(20.56-20.495)^2+(20.56-20.495)^2+}{50(50-1)}} \\
& \sqrt{\frac{(20.56-20.495)^2+(20.56-20.495)^2+(20.5-20.495)^2+(20.56-20.495)^2+(20.56-20.495)^2+}{50(50-1)}} \\
& \sqrt{\frac{(20.56-20.495)^2+(20.63-20.495)^2+(20.69-20.495)^2+(20.69-20.495)^2+(20.69-20.495)^2+}{50(50-1)}} \\
& \sqrt{\frac{(20.69-20.495)^2+(20.63-20.495)^2+(20.75-20.495)^2+(20.75-20.495)^2+(20.75-20.495)^2+}{50(50-1)}} \\
& \sqrt{\frac{(20.75-20.495)^2+(20.81-20.495)^2+(20.75-20.495)^2+(20.75-20.495)^2+(20.75-20.495)^2+}{50(50-1)}} \\
& \sqrt{\frac{(20.81-20.495)^2+(20.88-20.495)^2+(20.88-20.495)^2+(20.88-20.495)^2+(20.88-20.495)^2+}{50(50-1)}} \\
& = 0.037 \tag{3.7}
\end{aligned}$$

Відносна непевність за типом А:

$$U_{\text{від}} = \frac{0,037}{20.495} * 100\% = 0,0018\% \tag{3.8}$$

На основі вимірних значень розрахунок непевності за типом В:

$$U_{\text{CB}} = \sqrt{\sum_{i=1}^n (U_{B_i})^2} \tag{3.9}$$

На підставі співвідношення між вимірюваною величиною та вихідними параметрами складається такий перелік: вимірювальні вихідні параметри, впливові параметри, які не піддаються вимірюванню, враховані коригування для відомих систематичних похибок, коефіцієнти та сталі, додаткові невідомі похибки і таке інше.

$$U_{B_i} = \frac{\Delta}{\sqrt{3}} \tag{3.10}$$

Впливними факторами є вологість ґрунту, вологість повітря, температура повітря, швидкість руху повітря, інтенсивність теплового опромінення, кислотність ґрунту, щільність ґрунту, вміст азоту, фосфору та калію в ґрунті.

Швидкість руху повітря впливає на температурний режим ґрунту, бо інтенсивне перемішування повітря сприяє охолодженню або нагріванню поверхневих шарів ґрунту, залежно від сезону та температури самого повітря.

Термометр звичайний має похибку $\Delta = \pm 0,2^\circ\text{C}$, виходячи з цього, отримаємо:

$$U_{B_1} = \frac{\Delta}{\sqrt{3}} = \frac{0,2}{\sqrt{3}} = 0,115^\circ\text{C} \quad (3.11)$$

$$U_{B_1 \text{ від}} = \frac{0,115}{20} * 100\% = 0,005\% \quad (3.12)$$

Психрометр, який вимірює вологість повітря має похибку $\Delta = \pm 5\%$, виходячи з цього, отримаємо:

$$U_{B_2} = \frac{\Delta}{\sqrt{3}} = 2,886\% \quad (3.13)$$

$$U_{B_2 \text{ від}} = \frac{2,886}{62} * 100\% = 0,046\% \quad (3.14)$$

Анемометр, який вимірює швидкість руху повітря, має похибку $\Delta = \pm 0,1\text{м/с}$, виходячи з цього, отримаємо:

$$U_{B_3} = \frac{\Delta}{\sqrt{3}} = 0,057\text{м/с} \quad (3.15)$$

$$U_{B_3 \text{ від}} = \frac{0,057}{0,15} * 100\% = 0,384\% \quad (3.16)$$

Актинометр, який призначений для вимірювання інтенсивності теплового опромінення, має похибку $\Delta = \pm 5\text{Вт/м}^2$, виходячи з цього, отримаємо:

$$U_{B_4} = \frac{\Delta}{\sqrt{3}} = 2,886\text{Вт/м}^2 \quad (3.17)$$

$$U_{B_4 \text{ від}} = \frac{2,886}{25} * 100\% = 0,115\% \quad (3.18)$$

Отже, непевність з типом В:

$$U_B = \sqrt{(0,011)^2 + (0,005)^2 + (0,046)^2 + (0,384)^2 + (0,115)^2 + (0,107)^2}$$

$$\sqrt{(0,0006)^2 + (0,013)^2 + (0,011)^2 + (0,006)^2} = 0,417\% \quad (3.19)$$

Тоді, сумарна стандартна непевність:

$$U_c = \sqrt{U_A^2 + U_B^2} \quad (3.20)$$

$$U_c = \sqrt{0,0018^2 + 0,417^2} = 0,417\% \quad (3.21)$$

Розширену непевність визначають згідно з наступною формулою:

$$U = k \cdot U_c \quad (3.22)$$

$$U = 0,95 * 0,417 = 0,396\% \quad (3.23)$$

де k - представляє собою коефіцієнт охоплення, що залежить від обраного рівня довіри (P_d) та ефективного числа ступенів свободи.

Наприклад, при $P_d = 0,95$ за законом нормального розподілу ймовірностей, k дорівнює 1,96, а за законом рівномірного розподілу - 1,65.

На основі розрахованих непевностей можна скласти бюджет непевностей, що наведений в табл. 3.8.

Таблиця 3.8.

Бюджет непевності при вимірюванні температури ґрунту

№	Джерело непевності	Характеристика точності	Тип розподілу	Стандартна непевність	Коефіцієнт чутливості	Внесок
1	температура повітря	0,5	нормальний	0,005	1,00	0,005
2	вологість повітря	0,5	нормальний	0,046	1,00	0,046
3	інтенсивності теплового опромінення	0,5	нормальний	0,115	1,00	0,115
4	кислотність ґрунту (pH)	2	нормальний	0,107	1,00	0,107
5	вологість ґрунту	0,5	нормальний	0,011	1,00	0,011

6	щільність ґрунту	1.6	нормальний	0,0006	1,00	0,0006
7	швидкість руху повітря	1	нормальний	0,384	1,00	0,384
8	вміст фосфору в ґрунті	1	нормальний	0,006	1,00	0,006
9	вміст азоту в ґрунті	1	нормальний	0,011	1,00	0,011
10	вміст калію в ґрунті	1	нормальний	0,013	1,00	0,013
Непевність за типом А						0,0018
Непевність за типом Б						0,417
Сумарна стандартна непевність						0,417
Розширена непевність						0,396
Заявлена непевність						0.5

3.3.2. Дослідження непевності вимірювання вологості

Контроль вологості ґрунту є ключовим аспектом при визначенні потреби в догляді та поливі рослин. Важливо пам'ятати, що водний режим усіх рослин залежить не лише від рівня вологості ґрунту, але й від інших факторів, таких як характеристики ґрунту, температура повітря, рівень радіації, фізіологічний стан рослин тощо.

Було здійснено експериментальне дослідження вологості ґрунту, і отримано дані, які наведені у табл. 3.9.

Таблиця 3.9.

Номер досліду, №	Час	Вологість ґрунту, %
1	13.31	9.2
2	13.33	8.6
3	13.35	9.2
4	13.37	8.8
5	13.43	8.6
6	13.45	8.5
7	13.47	9.6
8	13.51	9.4
9	13.53	9.4

10	13.55	9.6
11	14.01	9.5
12	14.03	10.2
13	14.07	10.7
14	14.09	11.4
15	14.13	10.4
16	14.15	11.2
17	14.20	10.7
18	14.23	10.8
19	14.25	10.8
20	14.27	11.1
21	14.29	10.2
22	14.31	10.2
23	14.33	10.6
24	14.35	10.3
25	14.36	11.2
26	14.38	11.3
27	14.39	9.8
28	14.41	10.4
29	14.43	10.1
30	14.45	10.7
31	14.49	10.4
32	14.51	10.4
33	14.55	11.3
34	14.57	10.2
35	14.59	10.6
36	15.03	10.7
37	15.05	10.2
38	15.09	10.2
39	15.15	10.4
40	15.17	10.6
41	15.19	10.6
42	15.21	10.4
43	15.23	10.4
44	15.27	10.8
45	15.29	10.8
46	15.31	10.8
47	15.33	10.8
48	15.33	10.9
49	15.35	10.9
50	15.37	10.9

На основі вимірних значень розрахунок непевності за типом А:

$$\begin{aligned}
U_A = & \sqrt{\frac{(9.2-10.296)^2+(8.6-10.296)^2+(9.2-10.296)^2+(8.8-10.296)^2+(8.6-10.296)^2}{50(50-1)}} \\
& \sqrt{\frac{(8.5-10.296)^2+(9.6-10.296)^2+(9.4-10.296)^2+(9.4-10.296)^2+(9.6-10.296)^2+}{50(50-1)}} \\
& \sqrt{\frac{(9.5-10.296)^2+(10.2-10.296)^2+(10.7-10.296)^2+(11.4-10.296)^2+(10.4-10.296)^2+}{50(50-1)}} \\
& \sqrt{\frac{(11.2-10.296)^2+(10.7-10.296)^2+(10.8-10.296)^2+(10.8-10.296)^2+(11.1-10.296)^2+}{50(50-1)}} \\
& \sqrt{\frac{(10.2-10.296)^2+(10.2-10.296)^2+(10.6-10.296)^2+(10.3-10.296)^2+(11.2-10.296)^2+}{50(50-1)}} \\
& \sqrt{\frac{(11.3-10.296)^2+(9.8-10.296)^2+(10.4-10.296)^2+(10.1-10.296)^2+(10.7-10.296)^2+}{50(50-1)}} \\
& \sqrt{\frac{(10.4-10.296)^2+(10.4-10.296)^2+(11.3-10.296)^2+(10.2-10.296)^2+(10.6-10.296)^2+}{50(50-1)}} \\
& \sqrt{\frac{(10.7-10.296)^2+(10.2-10.296)^2+(10.2-10.296)^2+(10.4-10.296)^2+(10.6-10.296)^2+}{50(50-1)}} \\
& \sqrt{\frac{(10.6-10.296)^2+(10.4-10.296)^2+(10.4-10.296)^2+(10.8-10.296)^2+(10.8-10.296)^2+}{50(50-1)}} \\
& \sqrt{\frac{(10.8-10.296)^2+(10.8-10.296)^2+(10.9-10.296)^2+(10.9-10.296)^2+(10.9-10.296)^2+}{50(50-1)}} \\
& = 0.103 \tag{3.24}
\end{aligned}$$

Відносна непевність за типом А:

$$U_{A_{\text{від}}} = \frac{0,103}{10.296} * 100\% = 0,011\% \tag{3.25}$$

На основі вимірних значень розрахунок непевності за типом В:

$$U_{CB} = \sqrt{\sum_{i=1}^n (U_{B_i})^2} \tag{3.26}$$

На основі рівняння залежності вимірюваної величини від вихідних величин складають переліки таких елементів: вимірюваних вихідних величин, які безпосередньо вимірюються або спостерігаються; невимірюваних впливових вихідних величин, які впливають на результат вимірювань, але не можуть бути безпосередньо виміряні; введених поправок на відомі систематичні похибки для

усунення їх впливу; коефіцієнтів і констант, які використовуються у вихідних рівняннях або формулах; та додаткових похибок, які можуть впливати на точність вимірювань і які додають додаткову невизначеність до результатів. Ці елементи допомагають управляти і аналізувати вимірювання з метою забезпечення точності та достовірності результатів.

$$U_{B_i} = \frac{\Delta}{\sqrt{3}} \quad (3.27)$$

Впливними факторами є температура ґрунту, вологість повітря, температура повітря, швидкість руху повітря, інтенсивність теплового опромінення, кислотність ґрунту, щільність ґрунту, вміст азоту, фосфору та калію в ґрунті. Швидкість руху повітря впливає на рівень вологості ґрунту. Сильні вітри можуть прискорювати процес випаровування вологи з поверхні ґрунту, що призводить до зменшення його вологості.

Термометр звичайний, який вимірює температуру повітря має похибку $\Delta = \pm 0,2^\circ\text{C}$, виходячи з цього, отримаємо:

$$U_{B_1} = \frac{\Delta}{\sqrt{3}} = \frac{0,2}{\sqrt{3}} = 0,115^\circ\text{C} \quad (3.28)$$

$$U_{B_{1 \text{ від}}} = \frac{0,115}{20} * 100\% = 0,005\% \quad (3.29)$$

Психрометр, який вимірює вологість повітря має похибку $\Delta = \pm 5\%$, виходячи з цього, отримаємо:

$$U_{B_2} = \frac{\Delta}{\sqrt{3}} = 2,886\% \quad (3.30)$$

$$U_{B_{2 \text{ від}}} = \frac{2,886}{62} * 100\% = 0,046\% \quad (3.31)$$

Анемометр, який вимірює швидкість руху повітря, має похибку $\Delta = \pm 0,1 \text{ м/с}$, виходячи з цього, отримаємо:

$$U_{B_3} = \frac{\Delta}{\sqrt{3}} = 0,057 \text{ м/с} \quad (3.32)$$

$$U_{B_{3 \text{ від}}} = \frac{0,057}{0,15} * 100\% = 0,384\% \quad (3.33)$$

Актинометр, який призначений для вимірювання інтенсивності теплового опромінення, має похибку $\Delta = \pm 5 \text{ Вт/м}^2$, виходячи з цього, отримаємо:

$$U_{B_4} = \frac{\Delta}{\sqrt{3}} = 2,886 \text{ Вт/м}^2 \quad (3.34)$$

$$U_{B_4 \text{ від}} = \frac{2,886}{25} * 100\% = 0,115\% \quad (3.35)$$

Отже, непевність з типом В:

$$U_B = \sqrt{(0,0018)^2 + (0,005)^2 + (0,046)^2 + (0,384)^2 + (0,115)^2 + (0,107)^2} \\ \sqrt{+ (0,0006)^2 + (0,013)^2 + (0,011)^2 + (0,006)^2} = 0,417\% \quad (3.37)$$

Тоді, сумарна стандартна непевність:

$$U_C = \sqrt{U_A^2 + U_B^2} \quad (3.38)$$

$$U_C = \sqrt{0,011^2 + 0,417^2} = 0,417\% \quad (3.39)$$

Розширену непевність визначають згідно з наступною формулою:

$$U = k \cdot U_C \quad (3.40)$$

$$U = 0,95 * 0,417 = 0,396\% \quad (3.41)$$

де k - представляє собою коефіцієнт охоплення, що залежить від обраного рівня довіри (R_d) та ефективного числа ступенів свободи.

Наприклад, при $R_d = 0,95$ за законом нормального розподілу ймовірностей, k дорівнює 1,96, а за законом рівномірного розподілу - 1,65.

На основі розрахованих непевностей можна скласти бюджет непевностей, що наведений в табл. 3.10.

Таблиця 3.10.

Бюджет непевності при вимірюванні вологості ґрунту

№	Джерело непевності	Характеристика точності	Тип розподілу	Стандартна непевність	Коефіцієнт чутливості	Внесок
1	температура повітря	0,5	нормальний	0,005	1,00	0,005
2	вологість повітря	0,5	нормальний	0,046	1,00	0,046
3	інтенсивності теплового опромінення	0,5	нормальний	0,115	1,00	0,115
4	кислотність ґрунту (рН)	2	нормальний	0,107	1,00	0,107
5	температура ґрунту	0,5	нормальний	0,0018	1,00	0,0018
6	щільність ґрунту	1.6	нормальний	0,0006	1,00	0,0006
7	швидкість руху повітря	1	нормальний	0,384	1,00	0,384
8	вміст фосфору в ґрунті	1	нормальний	0,006	1,00	0,006
9	вміст азоту в ґрунті	1	нормальний	0,011	1,00	0,011
10	вміст калію в ґрунті	1	нормальний	0,013	1,00	0,013
Непевність за типом А						0,011
Непевність за типом Б						0,417
Сумарна стандартна непевність						0,417
Розширена непевність						0,396
Заявлена непевність						0.5

3.3.3. Дослідження непевності вимірювання кислотності

Кислотність ґрунту є критичним параметром, що впливає на ріст рослин, доступність поживних речовин та загальний стан екосистеми. Від точності вимірювання кислотності залежить прийняття важливих агротехнічних рішень, таких як вибір добрив, коригування рН балансу та прогнозування врожайності. Однак, як і будь-яке інше вимірювання, визначення кислотності супроводжується певною непевністю, яка може впливати на результати аналізу та подальші дії.

Дослідження непевності вимірювання кислотності ґрунту має на меті виявлення і оцінку різноманітних факторів, що впливають на точність і надійність результатів. Це включає в себе аналіз похибок, пов'язаних з методами відбору проб, використанням різних вимірювальних приладів, умовами проведення вимірювань та обробкою отриманих даних.

Тому доцільно розглянути основні джерела непевності під час вимірювання кислотності ґрунту, методи їх оцінки та шляхи мінімізації. Таким чином, дослідження непевності вимірювання кислотності дозволить покращити методики контролю цього важливого параметру та забезпечити більш надійні та точні аналізи.

Було здійснено експериментальне дослідження кислотності ґрунту, і отримано дані, які наведені у табл. 3.11.

Таблиця 3.11.

Номер досліджу, №	Час	Кислотність ґрунту, рН
1	13.31	6.6
2	13.33	6.6
3	13.35	7.2
4	13.37	7.8
5	13.43	7.9
6	13.45	8.6
7	13.47	9.0
8	13.51	9.0
9	13.53	3.8
10	13.55	7.0
11	14.01	7.2
12	14.03	7.8

13	14.07	8.2
14	14.09	8.9
15	14.13	9.0
16	14.15	9.0
17	14.20	9.0
18	14.23	9.0
19	14.25	9.0
20	14.27	9.0
21	14.29	9.0
22	14.31	9.0
23	14.33	9.0
24	14.35	9.0
25	14.36	9.0
26	14.38	9.0
27	14.39	9.0
28	14.41	9.0
29	14.43	9.0
30	14.45	9.0
31	14.49	9.0
32	14.51	9.0
33	14.55	9.0
34	14.57	9.0
35	14.59	9.0
36	15.03	9.0
37	15.05	9.0
38	15.09	9.0
39	15.15	9.0
40	15.17	9.0
41	15.19	9.0
42	15.21	9.0
43	15.23	9.0
44	15.27	9.0
45	15.29	9.0
46	15.31	9.0
47	15.33	9.0
48	15.33	9.0
49	15.35	9.0
50	15.37	9.0

На основі вимірних значень розрахунок непевності за типом А:

$$U_A = \sqrt{\frac{(6.6-8.592)^2 + (6.6-8.592)^2 + (7.2-8.592)^2 + (7.8-8.592)^2 + (7.9-8.592)^2}{50(50-1)}}$$

$$\begin{aligned}
& \sqrt{\frac{(8.6-8.592)^2+(9.0-8.592)^2+(9.0-8.592)^2+(3.8-8.592)^2+(7.0-8.592)^2+}{50(50-1)}} \\
& \sqrt{\frac{(7.2-8.592)^2+(7.8-8.592)^2+(8.2-8.592)^2+(8.9-8.592)^2+(9.0-8.592)^2+}{50(50-1)}} \\
& \sqrt{\frac{(9.0-8.592)^2+(9.0-8.592)^2+(9.0-8.592)^2+(9.0-8.592)^2+(9.0-8.592)^2+}{50(50-1)}} \\
& \sqrt{\frac{(9.0-8.592)^2+(9.0-8.592)^2+(9.0-8.592)^2+(9.0-8.592)^2+(9.0-8.592)^2+}{50(50-1)}} \\
& \sqrt{\frac{(9.0-8.592)^2+(9.0-8.592)^2+(9.0-8.592)^2+(9.0-8.592)^2+(9.0-8.592)^2+}{50(50-1)}} \\
& \sqrt{\frac{(9.0-8.592)^2+(9.0-8.592)^2+(9.0-8.592)^2+(9.0-8.592)^2+(9.0-8.592)^2+}{50(50-1)}} \\
& \sqrt{\frac{(9.0-8.592)^2+(9.0-8.592)^2+(9.0-8.592)^2+(9.0-8.592)^2+(9.0-8.592)^2+}{50(50-1)}} \\
& \sqrt{\frac{(9.0-8.592)^2+(9.0-8.592)^2+(9.0-8.592)^2+(9.0-8.592)^2+(9.0-8.592)^2+}{50(50-1)}} \\
& \sqrt{\frac{(9.0-8.592)^2+(9.0-8.592)^2+(9.0-8.592)^2+(9.0-8.592)^2+(9.0-8.592)^2+}{50(50-1)}} \\
& \sqrt{\frac{(9.0-8.592)^2+(9.0-8.592)^2+(9.0-8.592)^2+(9.0-8.592)^2+(9.0-8.592)^2+}{50(50-1)}} \\
& = 0.921 \tag{3.42}
\end{aligned}$$

Відносна непевність за типом А:

$$U_{\text{від}} = \frac{0,921}{8.592} * 100\% = 0,107\% \tag{3.43}$$

На основі вимірних значень розрахунок непевності за типом В:

$$U_{\text{св}} = \sqrt{\sum_{i=1}^n (U_{B_i})^2} \tag{3.44}$$

На основі рівняння залежності вимірюваної величини від вихідних величин складають переліки таких елементів: вимірюваних вихідних величин, які безпосередньо вимірюються або спостерігаються; невимірюваних впливових вихідних величин, які впливають на результат вимірювань, але не можуть бути безпосередньо виміряні; введених поправок на відомі систематичні похибки для усунення їх впливу; коефіцієнтів і констант, які використовуються у вихідних

рівняннях або формулах; та додаткових похибок, які можуть впливати на точність вимірювань і які додають додаткову невизначеність до результатів. Ці елементи допомагають управляти і аналізувати вимірювання з метою забезпечення точності та достовірності результатів.

$$U_{B_i} = \frac{\Delta}{\sqrt{3}} \quad (3.45)$$

Впливними факторами є вологість ґрунту, температура ґрунту, вологість повітря, температура повітря, швидкість руху повітря, інтенсивність теплового опромінення, щільність ґрунту, вміст азоту, фосфору та калію в ґрунті.

Термометр звичайний, який вимірює температуру повітря має похибку $\Delta = \pm 0,2^\circ\text{C}$, виходячи з цього, отримаємо:

$$U_{B_1} = \frac{\Delta}{\sqrt{3}} = \frac{0,2}{\sqrt{3}} = 0,115^\circ\text{C} \quad (3.46)$$

$$U_{B_1 \text{ від}} = \frac{0,115}{20} * 100\% = 0,005\% \quad (3.47)$$

Психрометр, який вимірює вологість повітря має похибку $\Delta = \pm 5\%$, виходячи з цього, отримаємо:

$$U_{B_2} = \frac{\Delta}{\sqrt{3}} = 2,886\% \quad (3.48)$$

$$U_{B_2 \text{ від}} = \frac{2,886}{62} * 100\% = 0,046\% \quad (3.49)$$

Анемометр, який вимірює швидкість руху повітря, має похибку $\Delta = \pm 0,1 \text{ м/с}$, виходячи з цього, отримаємо:

$$U_{B_3} = \frac{\Delta}{\sqrt{3}} = 0,057 \text{ м/с} \quad (3.50)$$

$$U_{B_3 \text{ від}} = \frac{0,057}{0,15} * 100\% = 0,384\% \quad (3.51)$$

Актинометр, який призначений для вимірювання інтенсивності теплового опромінення, має похибку $\Delta = \pm 5 \text{ Вт/м}^2$, виходячи з цього, отримаємо:

$$U_{B_4} = \frac{\Delta}{\sqrt{3}} = 2,886 \text{ Вт/м}^2 \quad (3.52)$$

$$U_{B_{4 \text{ від}}} = \frac{2,886}{25} * 100\% = 0,115\% \quad (3.53)$$

Отже, непевність з типом В:

$$U_B = \sqrt{(0,0018)^2 + (0,011)^2 + (0,005)^2 + (0,046)^2 + (0,384)^2 + (0,115)^2} \\ \sqrt{(0,0006)^2 + (0,013)^2 + (0,011)^2 + (0,006)^2} = 0,404\% \quad (3.54)$$

Тоді, сумарна стандартна непевність:

$$U_C = \sqrt{U_A^2 + U_B^2} \quad (3.55)$$

$$U_C = \sqrt{0,107^2 + 0,404^2} = 0,417\% \quad (3.56)$$

Розширену непевність визначають згідно з наступною формулою:

$$U = k \cdot U_C \quad (3.57)$$

$$U = 0,95 * 0,417 = 0,396\% \quad (3.58)$$

де k - представляє собою коефіцієнт охоплення, що залежить від обраного рівня довіри (R_d) та ефективного числа ступенів свободи.

Наприклад, при $R_d = 0,95$ за законом нормального розподілу ймовірностей, k дорівнює 1,96, а за законом рівномірного розподілу - 1,65.

На основі розрахованих непевностей можна скласти бюджет непевностей, що наведений в табл. 3.12.

Таблиця 3.12.

Бюджет непевності при вимірюванні кислотності ґрунту

№	Джерело непевності	Характеристика точності	Тип розподілу	Стандартна непевність	Коефіцієнт чутливості	Внесок
1	температура повітря	0,5	нормальний	0,005	1,00	0,005
2	вологість повітря	0,5	нормальний	0,046	1,00	0,046

3	інтенсивнос ті теплового опроміненн я	0,5	нормальн ий	0,115	1,00	0,115
4	температура грунту	0,5	нормальн ий	0,0018	1,00	0,0018
5	вологість грунту	0,5	нормальн ий	0,011	1,00	0,011
6	щільність грунту	1.6	нормальн ий	0,0006	1,00	0,0006
7	швидкість руху повітря	1	нормальн ий	0,384	1,00	0,384
8	вміст фосфору в грунті	1	нормальн ий	0,006	1,00	0,006
9	вміст азоту в грунті	1	нормальн ий	0,011	1,00	0,011
10	вміст калію в грунті	1	нормальн ий	0,013	1,00	0,013
Непевність за типом А						0,107
Непевність за типом Б						0,417
Сумарна стандартна непевність						0,417
Розширена непевність						0,396
Заявлена непевність						0.5

3.3.4. Дослідження непевності вимірювання щільності

Щільність ґрунту є одним із ключових параметрів, що впливають на його фізичні властивості, зокрема, на водопроникність, аерацію та здатність утримувати поживні речовини. Точне вимірювання щільності є критичним для розуміння поведінки ґрунту під час сільськогосподарських робіт та екологічного моніторингу. Однак, як і будь-яке фізичне вимірювання, визначення щільності ґрунту супроводжується певною непевністю, яка може вплинути на точність отриманих результатів та їх подальше використання.

Один із методів оцінки щільності ґрунту пов'язаний із вимірюванням його провідності. Провідність ґрунту, що залежить від його структури, вологомісткості

та хімічного складу, може бути інформативним показником, що відображає його щільність. Дослідження непевності вимірювання щільності ґрунту за допомогою провідності є важливим кроком до покращення точності та надійності агрономічних та екологічних оцінок.

Тому доцільно розглянути основні джерела непевності при вимірюванні щільності ґрунту через його провідність, методи оцінки та мінімізації цих непевностей. Дослідження непевності вимірювання щільності ґрунту через провідність дозволить розробити більш надійні та точні методики, які сприятимуть підвищенню ефективності агротехнічних заходів та забезпечать кращий контроль за станом ґрунтових ресурсів.

Було здійснено експериментальне дослідження щільності ґрунту, і отримано дані, які наведені у табл. 3.13.

Таблиця 3.13.

Номер досліду, №	Час	Щільність ґрунту, $\mu\text{s}/\text{cm}$
1	13.31	282
2	13.33	282
3	13.35	282
4	13.37	282
5	13.43	282
6	13.45	284
7	13.47	284
8	13.51	286
9	13.53	286
10	13.55	286
11	14.01	286
12	14.03	286
13	14.07	286
14	14.09	286
15	14.13	286
16	14.15	286
17	14.20	286
18	14.23	286
19	14.25	286
20	14.27	286
21	14.29	286
22	14.31	286

23	14.33	286
24	14.35	286
25	14.36	286
26	14.38	286
27	14.39	286
28	14.41	286
29	14.43	286
30	14.45	286
31	14.49	286
32	14.51	286
33	14.55	286
34	14.57	286
35	14.59	286
36	15.03	286
37	15.05	286
38	15.09	286
39	15.15	286
40	15.17	286
41	15.19	286
42	15.21	286
43	15.23	286
44	15.27	286
45	15.29	286
46	15.31	286
47	15.33	286
48	15.33	286
49	15.35	286
50	15.37	282

На основі вимірних значень розрахунок непевності за типом А:

$$\begin{aligned}
 U_A &= \sqrt{\frac{(282-285.44)^2+(282-285.44)^2+(282-285.44)^2+(282-285.44)^2+(282-285.44)^2}{50(50-1)}} \\
 &\sqrt{\frac{(284-285.44)^2+(284-285.44)^2+(286-285.44)^2+(286-285.44)^2+(286-285.44)^2+}{50(50-1)}} \\
 &\sqrt{\frac{(286-285.44)^2+(286-285.44)^2+(286-285.44)^2+(286-285.44)^2+(286-285.44)^2+}{50(50-1)}} \\
 &\sqrt{\frac{(286-285.44)^2+(286-285.44)^2+(286-285.44)^2+(286-285.44)^2+(286-285.44)^2+}{50(50-1)}} \\
 &\sqrt{\frac{(286-285.44)^2+(286-285.44)^2+(286-285.44)^2+(286-285.44)^2+(286-285.44)^2+}{50(50-1)}}
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
& \sqrt{\frac{(286-285.44)^2+(286-285.44)^2+(286-285.44)^2+(286-285.44)^2+(286-285.44)^2+}{50(50-1)}} \\
& \sqrt{\frac{(286-285.44)^2+(286-285.44)^2+(286-285.44)^2+(286-285.44)^2+(286-285.44)^2+}{50(50-1)}} \\
& \sqrt{\frac{(286-285.44)^2+(286-285.44)^2+(286-285.44)^2+(286-285.44)^2+(286-285.44)^2+}{50(50-1)}} \\
& \sqrt{\frac{(286-285.44)^2+(286-285.44)^2+(286-285.44)^2+(286-285.44)^2+(286-285.44)^2+}{50(50-1)}} \\
& \sqrt{\frac{(286-285.44)^2+(286-285.44)^2+(286-285.44)^2+(286-285.44)^2+(282-285.44)^2+}{50(50-1)}} \\
& = 0.189
\end{aligned} \tag{3.59}$$

Відносна непевність за типом А:

$$U_{A_{\text{від}}} = \frac{0,189}{285.44} * 100\% = 0,0006\% \tag{3.60}$$

На основі вимірних значень розрахунок непевності за типом В:

$$U_{CB} = \sqrt{\sum_{i=1}^n (U_{B_i})^2} \tag{3.61}$$

На основі рівняння залежності вимірюваної величини від вихідних величин складають переліки таких елементів: вимірюваних вихідних величин, які безпосередньо вимірюються або спостерігаються; невимірюваних впливових вихідних величин, які впливають на результат вимірювань, але не можуть бути безпосередньо виміряні; введених поправок на відомі систематичні похибки для усунення їх впливу; коефіцієнтів і констант, які використовуються у вихідних рівняннях або формулах; та додаткових похибок, які можуть впливати на точність вимірювань і які додають додаткову невизначеність до результатів. Ці елементи допомагають управляти і аналізувати вимірювання з метою забезпечення точності та достовірності результатів.

$$U_{B_i} = \frac{\Delta}{\sqrt{3}} \tag{3.62}$$

Впливними факторами є вологість ґрунту, температура ґрунту, вологість повітря, температура повітря, швидкість руху повітря, інтенсивність теплового опромінення, кислотність ґрунту, вміст азоту, фосфору та калію в ґрунті.

Термометр звичайний, який вимірює температуру повітря має похибку $\Delta = \pm 0,2^\circ\text{C}$, виходячи з цього, отримаємо:

$$U_{B_1} = \frac{\Delta}{\sqrt{3}} = \frac{0,2}{\sqrt{3}} = 0,115^\circ\text{C} \quad (3.63)$$

$$U_{B_1 \text{ від}} = \frac{0,115}{20} * 100\% = 0,005\% \quad (3.64)$$

Психрометр, який вимірює вологість повітря має похибку $\Delta = \pm 5\%$, виходячи з цього, отримаємо:

$$U_{B_2} = \frac{\Delta}{\sqrt{3}} = 2,886\% \quad (3.65)$$

$$U_{B_2 \text{ від}} = \frac{2,886}{62} * 100\% = 0,046\% \quad (3.66)$$

Анемометр, який вимірює швидкість руху повітря, має похибку $\Delta = \pm 0,1\text{м/с}$, виходячи з цього, отримаємо:

$$U_{B_3} = \frac{\Delta}{\sqrt{3}} = 0,057\text{м/с} \quad (3.67)$$

$$U_{B_3 \text{ від}} = \frac{0,057}{0,15} * 100\% = 0,384\% \quad (3.68)$$

Актинометр, який призначений для вимірювання інтенсивності теплового опромінення, має похибку $\Delta = \pm 5\text{Вт/м}^2$, виходячи з цього, отримаємо:

$$U_{B_4} = \frac{\Delta}{\sqrt{3}} = 2,886\text{Вт/м}^2 \quad (3.69)$$

$$U_{B_4 \text{ від}} = \frac{2,886}{25} * 100\% = 0,115\% \quad (3.70)$$

Отже, непевність з типом В:

$$U_B = \sqrt{(0,0018)^2 + (0,011)^2 + (0,005)^2 + (0,046)^2 + (0,384)^2 + (0,115)^2}$$

$$\sqrt{(0,107)^2 + (0,013)^2 + (0,011)^2 + (0,006)^2} = 0,417\% \quad (3.71)$$

Тоді, сумарна стандартна непевність:

$$U_c = \sqrt{U_A^2 + U_B^2} \quad (3.72)$$

$$U_c = \sqrt{0,0006^2 + 0,417^2} = 0,417\% \quad (3.73)$$

Розширену непевність визначають згідно з наступною формулою:

$$U = k \cdot U_c \quad (3.74)$$

$$U = 0,95 * 0,417 = 0,396\% \quad (3.75)$$

де k - представляє собою коефіцієнт охоплення, що залежить від обраного рівня довіри (P_d) та ефективного числа ступенів свободи.

Наприклад, при $P_d = 0,95$ за законом нормального розподілу ймовірностей, k дорівнює 1,96, а за законом рівномірного розподілу - 1,65.

На основі розрахованих непевностей можна скласти бюджет непевностей, що наведений в табл. 3.14.

Таблиця 3.14.

Бюджет непевності при вимірюванні щільності ґрунту

№	Джерело непевності	Характеристика точності	Тип розподілу	Стандартна непевність	Коефіцієнт т чутливості	Внесок
1	температура повітря	0,5	нормальний	0,005	1,00	0,005
2	вологість повітря	0,5	нормальний	0,046	1,00	0,046
3	інтенсивність теплового опромінення	0,5	нормальний	0,115	1,00	0,115
4	температура ґрунту	0,5	нормальний	0,0018	1,00	0,0018
5	вологість ґрунту	0,5	нормальний	0,011	1,00	0,011
6	щільність ґрунту	1.6	нормальний	0,0006	1,00	0,0006

7	швидкість руху повітря	1	нормальний	0,384	1,00	0,384
8	вміст фосфору в ґрунті	1	нормальний	0,006	1,00	0,006
9	вміст азоту в ґрунті	1	нормальний	0,011	1,00	0,011
10	вміст калію в ґрунті	1	нормальний	0,013	1,00	0,013
Непевність за типом А						0,0006
Непевність за типом Б						0,417
Сумарна стандартна непевність						0,417
Розширена непевність						0,396
Заявлена непевність						0.5

3.3.5. Дослідження непевності вимірювання вмісту основних компонентів ґрунту

3.3.5.1. Дослідження непевності вимірювання вмісту калію в ґрунті

Вміст калію в ґрунті є важливим показником його родючості та стану, оскільки калій відіграє ключову роль у розвитку рослин, зокрема в процесах фотосинтезу, транспортування води та синтезу білків. Точне визначення концентрації калію в ґрунті необхідне для планування агротехнічних заходів, оптимізації використання добрив та забезпечення стабільних врожаїв. Однак вимірювання вмісту калію може бути піддане значній непевності, що впливає на точність результатів та надійність агрохімічних аналізів.

Непевність вимірювання вмісту калію може виникати через різні фактори, включаючи методи відбору проб, використання різних лабораторних методик та приладів, а також умови проведення вимірювань. Відсутність належного контролю над цими аспектами може призвести до помилок, які, у свою чергу, можуть викликати неправильні агрономічні рішення та неефективне використання ресурсів.

Дослідження непевності вимірювання вмісту калію в ґрунті дозволить підвищити точність і надійність результатів аналізу, що є ключовим для ефективного управління земельними ресурсами та забезпечення високої продуктивності сільського господарства.

Було здійснено експериментальне дослідження вмісту калію в ґрунті, і отримано дані, які наведені у табл. 3.15.

Таблиця 3.15.

Номер досліджу, №	Час	Вміст калію в ґрунті, мг/кг
1	13.31	88
2	13.33	86
3	13.35	87
4	13.37	80
5	13.43	86
6	13.45	87
7	13.47	87
8	13.51	88
9	13.53	85
10	13.55	94
11	14.01	85
12	14.03	96
13	14.07	101
14	14.09	96
15	14.13	102
16	14.15	107
17	14.20	108
18	14.23	112
19	14.25	106
20	14.27	112
21	14.29	102
22	14.31	104
23	14.33	104
24	14.35	111
25	14.36	102
26	14.38	101
27	14.39	102
28	14.41	94
29	14.43	112
30	14.45	113

31	14.49	116
32	14.51	113
33	14.55	102
34	14.57	107
35	14.59	102
36	15.03	102
37	15.05	108
38	15.09	108
39	15.15	107
40	15.17	107
41	15.19	106
42	15.21	107
43	15.23	110
44	15.27	110
45	15.29	110
46	15.31	110
47	15.33	110
48	15.33	110
49	15.35	110
50	15.37	110

На основі вимірних значень розрахунок непевності за типом А:

$$\begin{aligned}
 U_A = & \sqrt{\frac{(88-102.06)^2+(86-102.06)^2+(87-102.06)^2+(80-102.06)^2+(86-102.06)^2}{50(50-1)}} \\
 & \sqrt{\frac{(87-102.06)^2+(87-102.06)^2+(88-102.06)^2+(85-102.06)^2+(94-102.06)^2+}{50(50-1)}} \\
 & \sqrt{\frac{(85-102.06)^2+(96-102.06)^2+(101-102.06)^2+(96-102.06)^2+(102-102.06)^2+}{50(50-1)}} \\
 & \sqrt{\frac{(106-102.06)^2+(108-102.06)^2+(112-102.06)^2+(106-102.06)^2+(112-102.06)^2+}{50(50-1)}} \\
 & \sqrt{\frac{(102-102.06)^2+(104-102.06)^2+(104-102.06)^2+(111-102.06)^2+(102-102.06)^2+}{50(50-1)}} \\
 & \sqrt{\frac{(101-102.06)^2+(102-102.06)^2+(94-102.06)^2+(112-102.06)^2+(113-102.06)^2+}{50(50-1)}} \\
 & \sqrt{\frac{(112-102.06)^2+(116-102.06)^2+(113-102.06)^2+(102-102.06)^2+(107-102.06)^2+}{50(50-1)}} \\
 & \sqrt{\frac{(102-102.06)^2+(102-102.06)^2+(108-102.06)^2+(108-102.06)^2+(107-102.06)^2+}{50(50-1)}}
 \end{aligned}$$

$$\sqrt{\frac{(107-102.06)^2+(106-102.06)^2+(107-102.06)^2+(110-102.06)^2+(110-102.06)^2}{50(50-1)}} \\ \sqrt{\frac{(110-102.06)^2+(110-102.06)^2+(110-102.06)^2+(110-102.06)^2+(110-102.06)^2}{50(50-1)}} \\ = 1.347 \quad (3.76)$$

Відносна непевність за типом А:

$$U_{A_{\text{від}}} = \frac{1,347}{102.06} * 100\% = 0,013\% \quad (3.77)$$

На основі вимірних значень розрахунок непевності за типом В:

$$U_{CB} = \sqrt{\sum_{i=1}^n (U_{B_i})^2} \quad (3.78)$$

На основі рівняння залежності вимірюваної величини від вихідних величин складають переліки таких елементів: вимірюваних вихідних величин, які безпосередньо вимірюються або спостерігаються; невимірюваних впливових вихідних величин, які впливають на результат вимірювань, але не можуть бути безпосередньо виміряні; введених поправок на відомі систематичні похибки для усунення їх впливу; коефіцієнтів і констант, які використовуються у вихідних рівняннях або формулах; та додаткових похибок, які можуть впливати на точність вимірювань і які додають додаткову невизначеність до результатів. Ці елементи допомагають управляти і аналізувати вимірювання з метою забезпечення точності та достовірності результатів.

$$U_{B_i} = \frac{\Delta}{\sqrt{3}} \quad (3.79)$$

Впливними факторами є вологість ґрунту, температура ґрунту, вологість повітря, температура повітря, швидкість руху повітря, інтенсивність теплового опромінення, щільність ґрунту, кислотність ґрунту, вміст азоту, фосфору в ґрунті.

Термометр звичайний, який вимірює температуру повітря має похибку $\Delta = \pm 0,2^\circ\text{C}$, виходячи з цього, отримаємо:

$$U_{B_1} = \frac{\Delta}{\sqrt{3}} = \frac{0,2}{\sqrt{3}} = 0,115^\circ\text{C} \quad (3.80)$$

$$U_{B_{1 \text{ від}}} = \frac{0,115}{20} * 100\% = 0,005\% \quad (3.81)$$

Психрометр, який вимірює вологість повітря має похибку $\Delta = \pm 5\%$, виходячи з цього, отримаємо:

$$U_{B_2} = \frac{\Delta}{\sqrt{3}} = 2,886\% \quad (3.82)$$

$$U_{B_{2 \text{ від}}} = \frac{2,886}{62} * 100\% = 0,046\% \quad (3.83)$$

Анемометр, який вимірює швидкість руху повітря, має похибку $\Delta = \pm 0,1 \text{ м/с}$, виходячи з цього, отримаємо:

$$U_{B_3} = \frac{\Delta}{\sqrt{3}} = 0,057 \text{ м/с} \quad (3.84)$$

$$U_{B_{3 \text{ від}}} = \frac{0,057}{0,15} * 100\% = 0,384\% \quad (3.85)$$

Актинометр, який призначений для вимірювання інтенсивності теплового опромінення, має похибку $\Delta = \pm 5 \text{ Вт/м}^2$, виходячи з цього, отримаємо:

$$U_{B_4} = \frac{\Delta}{\sqrt{3}} = 2,886 \text{ Вт/м}^2 \quad (3.86)$$

$$U_{B_{4 \text{ від}}} = \frac{2,886}{25} * 100\% = 0,115\% \quad (3.87)$$

Отже, непевність з типом В:

$$U_B = \sqrt{(0,0018)^2 + (0,011)^2 + (0,005)^2 + (0,046)^2 + (0,384)^2 + (0,115)^2} \\ \sqrt{(0,107)^2 + (0,0006)^2 + (0,011)^2 + (0,006)^2} = 0,417\% \quad (3.88)$$

Тоді, сумарна стандартна непевність:

$$U_C = \sqrt{U_A^2 + U_B^2} \quad (3.89)$$

$$U_C = \sqrt{0,0006^2 + 0,417^2} = 0,417\% \quad (3.90)$$

Розширену непевність визначають згідно з наступною формулою:

$$U = k \cdot U_C \quad (3.91)$$

$$U = 0,95 * 0,417 = 0,396\% \quad (3.92)$$

де k - представляє собою коефіцієнт охоплення, що залежить від обраного рівня довіри (P_d) та ефективного числа ступенів свободи.

Наприклад, при $P_d = 0,95$ за законом нормального розподілу ймовірностей, k дорівнює 1,96, а за законом рівномірного розподілу - 1,65.

На основі розрахованих непевностей можна скласти бюджет непевностей, що наведений в табл. 3.16.

Таблиця 3.16.

Бюджет непевності при вимірюванні вмісту калію в ґрунті

№	Джерело непевності	Характеристика точності	Тип розподілу	Стандартна непевність	Коефіцієнт чутливості	Внесок
1	температура повітря	0,5	нормальний	0,005	1,00	0,005
2	вологість повітря	0,5	нормальний	0,046	1,00	0,046
3	інтенсивності теплового опромінення	0,5	нормальний	0,115	1,00	0,115
4	кислотність ґрунту (pH)	2	нормальний	0,107	1,00	0,107
5	вологість ґрунту	0,5	нормальний	0,011		0,011
6	щільність ґрунту	1.6	нормальний	0,0006	1,00	0,0006
7	швидкість руху повітря	1	нормальний	0,384	1,00	0,384
8	температура ґрунту	0,5	нормальний	0,0018	1,00	0,0018
9	вміст фосфору в ґрунті	1	нормальний	0,006	1,00	0,006

1 0	вміст азоту в ґрунті	1	нормальн ий	0,011	1,00	0,011
Непевність за типом А						0,013
Непевність за типом Б						0,417
Сумарна стандартна непевність						0,417
Розширена непевність						0,396
Заявлена непевність						0.5

3.3.5.2. Дослідження непевності вимірювання вмісту азоту в ґрунті

Азот є одним з основних елементів, необхідних для росту та розвитку рослин. Він є ключовим компонентом білків, нуклеїнових кислот і хлорофілу, відіграючи вирішальну роль у фотосинтезі та метаболізмі. Тому точне визначення вмісту азоту в ґрунті є критичним для ефективного управління агротехнічними заходами, планування систем удобрення та забезпечення стабільних урожаїв. Однак вимірювання вмісту азоту в ґрунті супроводжується певною непевністю, що може впливати на точність і надійність результатів аналізу.

Непевність вимірювання вмісту азоту може виникати з різних джерел, включаючи методи відбору проб, аналітичні методи, стан і калібрування вимірювальних приладів, а також умови проведення лабораторних аналізів. Наприклад, нерівномірність розподілу азоту в ґрунті, вплив органічної речовини та різні форми азоту (нітратний, амонійний) додають складності до процесу вимірювання. Відсутність належного контролю над цими факторами може призвести до значних похибок, що негативно впливають на агрономічні рішення.

Дослідження непевності вимірювання вмісту азоту в ґрунті є важливим кроком до підвищення точності та надійності агрохімічних аналізів. Це, у свою чергу, сприятиме ефективнішому управлінню земельними ресурсами, оптимізації використання добрив та забезпеченню екологічно стійкого сільського господарства.

Було здійснено експериментальне дослідження вмісту азоту в ґрунті, і отримано дані, які наведені у табл. 3.17.

Таблиця 3.17.

Номер досліджу, №	Час	Вміст азоту в ґрунті, мг/кг
1	13.31	82
2	13.33	82
3	13.35	82
4	13.37	82
5	13.43	82
6	13.45	82
7	13.47	82
8	13.51	82
9	13.53	83
10	13.55	82
11	14.01	82
12	14.03	94
13	14.07	94
14	14.09	99
15	14.13	99
16	14.15	99
17	14.20	100
18	14.23	100
19	14.25	100
20	14.27	100
21	14.29	100
22	14.31	100
23	14.33	100
24	14.35	100
25	14.36	100
26	14.38	100
27	14.39	101
28	14.41	101
29	14.43	100
30	14.45	101
31	14.49	101
32	14.51	101
33	14.55	101
34	14.57	100
35	14.59	101
36	15.03	101
37	15.05	101
38	15.09	101

39	15.15	101
40	15.17	101
41	15.19	101
42	15.21	101
43	15.23	101
44	15.27	101
45	15.29	101
46	15.31	101
47	15.33	101
48	15.33	101
49	15.35	101
50	15.37	101

На основі вимірних значень розрахунок непевності за типом А:

$$\begin{aligned}
 U_A &= \sqrt{\frac{(82-96.2)^2+(82-96.2)^2+(82-96.2)^2+(82-96.2)^2+(82-96.2)^2}{50(50-1)}} \\
 &= \sqrt{\frac{(82-96.2)^2+(82-96.2)^2+(82-96.2)^2+(83-96.2)^2+(82-96.2)^2}{50(50-1)}} \\
 &= \sqrt{\frac{(82-96.2)^2+(94-96.2)^2+(94-96.2)^2+(99-96.2)^2+(99-96.2)^2}{50(50-1)}} \\
 &= \sqrt{\frac{(99-96.2)^2+(100-96.2)^2+(100-96.2)^2+(100-96.2)^2+(100-96.2)^2}{50(50-1)}} \\
 &= \sqrt{\frac{(100-96.2)^2+(100-96.2)^2+(100-96.2)^2+(100-96.2)^2+(100-96.2)^2}{50(50-1)}} \\
 &= \sqrt{\frac{(100-96.2)^2+(101-96.2)^2+(101-96.2)^2+(100-96.2)^2+(101-96.2)^2}{50(50-1)}} \\
 &= \sqrt{\frac{(101-96.2)^2+(101-96.2)^2+(101-96.2)^2+(100-96.2)^2+(101-96.2)^2}{50(50-1)}} \\
 &= \sqrt{\frac{(101-96.2)^2+(101-96.2)^2+(101-96.2)^2+(101-96.2)^2+(101-96.2)^2}{50(50-1)}} \\
 &= \sqrt{\frac{(101-96.2)^2+(101-96.2)^2+(101-96.2)^2+(101-96.2)^2+(101-96.2)^2}{50(50-1)}} \\
 &= \sqrt{\frac{(101-96.2)^2+(101-96.2)^2+(101-96.2)^2+(101-96.2)^2+(101-96.2)^2}{50(50-1)}} \\
 &= 1.088
 \end{aligned} \tag{3.93}$$

Відносна непевність за типом А:

$$U_{A_{\text{від}}} = \frac{1,088}{96.2} * 100\% = 0,011\% \quad (3.94)$$

На основі вимірних значень розрахунок непевності за типом В:

$$U_{\text{CB}} = \sqrt{\sum_{i=1}^n (U_{B_i})^2} \quad (3.95)$$

На основі рівняння залежності вимірюваної величини від вихідних величин складають переліки таких елементів: вимірюваних вихідних величин, які безпосередньо вимірюються або спостерігаються; невимірюваних впливових вихідних величин, які впливають на результат вимірювань, але не можуть бути безпосередньо виміряні; введених поправок на відомі систематичні похибки для усунення їх впливу; коефіцієнтів і констант, які використовуються у вихідних рівняннях або формулах; та додаткових похибок, які можуть впливати на точність вимірювань і які додають додаткову невизначеність до результатів. Ці елементи допомагають управляти і аналізувати вимірювання з метою забезпечення точності та достовірності результатів.

$$U_{B_i} = \frac{\Delta}{\sqrt{3}} \quad (3.96)$$

Впливними факторами є вологість ґрунту, температура ґрунту, вологість повітря, температура повітря, швидкість руху повітря, інтенсивність теплового опромінення, щільність ґрунту, кислотність ґрунту, вміст калію, фосфору в ґрунті.

Термометр звичайний, який вимірює температуру повітря має похибку $\Delta = \pm 0,2^\circ\text{C}$, виходячи з цього, отримаємо:

$$U_{B_1} = \frac{\Delta}{\sqrt{3}} = \frac{0,2}{\sqrt{3}} = 0,115^\circ\text{C} \quad (3.97)$$

$$U_{B_{1 \text{ від}}} = \frac{0,115}{20} * 100\% = 0,005\% \quad (3.98)$$

Психрометр, який вимірює вологість повітря має похибку $\Delta = \pm 5\%$, виходячи з цього, отримаємо:

$$U_{B_2} = \frac{\Delta}{\sqrt{3}} = 2,886\% \quad (3.99)$$

$$U_{B_{2 \text{ від}}} = \frac{2,886}{62} * 100\% = 0,046\% \quad (3.100)$$

Анемометр, який вимірює швидкість руху повітря, має похибку $\Delta = \pm 0,1 \text{ м/с}$, виходячи з цього, отримаємо:

$$U_{B_3} = \frac{\Delta}{\sqrt{3}} = 0,057 \text{ м/с} \quad (3.101)$$

$$U_{B_{3 \text{ від}}} = \frac{0,057}{0,15} * 100\% = 0,384\% \quad (3.102)$$

Актинометр, який призначений для вимірювання інтенсивності теплового опромінення, має похибку $\Delta = \pm 5 \text{ Вт/м}^2$, виходячи з цього, отримаємо:

$$U_{B_4} = \frac{\Delta}{\sqrt{3}} = 2,886 \text{ Вт/м}^2 \quad (3.103)$$

$$U_{B_{4 \text{ від}}} = \frac{2,886}{25} * 100\% = 0,115\% \quad (3.104)$$

Отже, непевність з типом В:

$$U_B = \sqrt{(0,0018)^2 + (0,011)^2 + (0,005)^2 + (0,046)^2 + (0,384)^2 + (0,115)^2} \\ \sqrt{(0,107)^2 + (0,0006)^2 + (0,013)^2 + (0,006)^2} = 0,417\% \quad (3.105)$$

Тоді, сумарна стандартна непевність:

$$U_C = \sqrt{U_A^2 + U_B^2} \quad (3.106)$$

$$U_C = \sqrt{0,011^2 + 0,417^2} = 0,417\% \quad (3.107)$$

Розширену непевність визначають згідно з наступною формулою:

$$U = k \cdot U_C \quad (3.108)$$

$$U = 0,95 * 0,417 = 0,396\% \quad (3.109)$$

де k - представляє собою коефіцієнт охоплення, що залежить від обраного рівня довіри (P_d) та ефективного числа ступенів свободи.

Наприклад, при $R_d = 0,95$ за законом нормального розподілу ймовірностей, k дорівнює 1,96, а за законом рівномірного розподілу - 1,65.

На основі розрахованих непевностей можна скласти бюджет непевностей, що наведений в табл. 3.18.

Таблиця 3.18.

Бюджет непевності при вимірюванні вмісту азоту в ґрунті

№	Джерело непевності	Характеристика точності	Тип розподілу	Стандартна непевність	Коефіцієнт чутливості	Внесок
1	температура повітря	0,5	нормальний	0,005	1,00	0,005
2	вологість повітря	0,5	нормальний	0,046	1,00	0,046
3	інтенсивності теплового опромінення	0,5	нормальний	0,115	1,00	0,115
4	кислотність ґрунту (pH)	2	нормальний	0,107	1,00	0,107
5	вологість ґрунту	0,5	нормальний	0,011	1,00	0,011
6	щільність ґрунту	1.6	нормальний	0,0006	1,00	0,0006
7	швидкість руху повітря	1	нормальний	0,384	1,00	0,384
8	вміст фосфору в ґрунті	1	нормальний	0,006	1,00	0,006
9	температура ґрунту	0,5	нормальний	0,0018	1,00	0,0018
10	вміст калію в ґрунті	1	нормальний	0,013	1,00	0,013
Непевність за типом А						0,011
Непевність за типом Б						0,417
Сумарна стандартна непевність						0,417
Розширена непевність						0,396

Заявлена непевність

0.5

3.3.5.3. Дослідження непевності вимірювання вмісту фосфору в ґрунті

Азот є одним з основних елементів, необхідних для росту та розвитку рослин. Він є ключовим компонентом білків, нуклеїнових кислот і хлорофілу, відіграючи вирішальну роль у фотосинтезі та метаболізмі. Тому точне визначення вмісту азоту в ґрунті є критичним для ефективного управління агротехнічними заходами, планування систем удобрення та забезпечення стабільних урожаїв. Однак вимірювання вмісту азоту в ґрунті супроводжується певною непевністю, що може впливати на точність і надійність результатів аналізу.

Непевність вимірювання вмісту азоту може виникати з різних джерел, включаючи методи відбору проб, аналітичні методи, стан і калібрування вимірювальних приладів, а також умови проведення лабораторних аналізів. Наприклад, нерівномірність розподілу азоту в ґрунті, вплив органічної речовини та різні форми азоту (нітратний, амонійний) додають складності до процесу вимірювання. Відсутність належного контролю над цими факторами може призвести до значних похибок, що негативно впливають на агрономічні рішення.

Дослідження непевності вимірювання вмісту азоту в ґрунті є важливим кроком до підвищення точності та надійності агрохімічних аналізів. Це, у свою чергу, сприятиме ефективнішому управлінню земельними ресурсами, оптимізації використання добрив та забезпеченню екологічно стійкого сільського господарства.

Було здійснено експериментальне дослідження вмісту фосфору в ґрунті, і отримано дані, які наведені у табл. 3.19.

Таблиця 3.19.

Номер досліджу, №	Час	Вміст фосфору в ґрунті, мг/кг
1	13.31	45
2	13.33	47
3	13.35	44

4	13.37	46
5	13.43	43
6	13.45	49
7	13.47	42
8	13.51	48
9	13.53	46
10	13.55	47
11	14.01	44
12	14.03	45
13	14.07	46
14	14.09	48
15	14.13	42
16	14.15	47
17	14.20	44
18	14.23	45
19	14.25	49
20	14.27	43
21	14.29	46
22	14.31	45
23	14.33	44
24	14.35	48
25	14.36	42
26	14.38	47
27	14.39	44
28	14.41	46
29	14.43	43
30	14.45	49
31	14.49	42
32	14.51	47
33	14.55	45
34	14.57	44
35	14.59	48
36	15.03	43
37	15.05	46
38	15.09	45
39	15.15	44
40	15.17	47
41	15.19	42
42	15.21	46
43	15.23	45
44	15.27	44
45	15.29	49

46	15.31	43
47	15.33	47
48	15.33	45
49	15.35	44
50	15.37	48

На основі вимірних значень розрахунок непевності за типом А:

$$\begin{aligned}
 U_A &= \sqrt{\frac{(45-45.36)^2+(47-45.36)^2+(44-45.36)^2+(46-45.36)^2+(43-45.36)^2}{50(50-1)}} \\
 &\sqrt{\frac{(49-45.36)^2+(42-45.36)^2+(48-45.36)^2+(46-45.36)^2+(47-45.36)^2}{50(50-1)}} \\
 &\sqrt{\frac{(44-45.36)^2+(45-45.36)^2+(46-45.36)^2+(48-45.36)^2+(42-45.36)^2}{50(50-1)}} \\
 &\sqrt{\frac{(47-45.36)^2+(44-45.36)^2+(45-45.36)^2+(49-45.36)^2+(43-45.36)^2}{50(50-1)}} \\
 &\sqrt{\frac{(46-45.36)^2+(45-45.36)^2+(44-45.36)^2+(48-45.36)^2+(42-45.36)^2}{50(50-1)}} \\
 &\sqrt{\frac{(47-45.36)^2+(44-45.36)^2+(46-45.36)^2+(43-45.36)^2+(49-45.36)^2}{50(50-1)}} \\
 &\sqrt{\frac{(42-45.36)^2+(47-45.36)^2+(45-45.36)^2+(44-45.36)^2+(48-45.36)^2}{50(50-1)}} \\
 &\sqrt{\frac{(43-45.36)^2+(46-45.36)^2+(45-45.36)^2+(44-45.36)^2+(47-45.36)^2}{50(50-1)}} \\
 &\sqrt{\frac{(42-45.36)^2+(46-45.36)^2+(45-45.36)^2+(44-45.36)^2+(49-45.36)^2}{50(50-1)}} \\
 &\sqrt{\frac{(43-45.36)^2+(47-45.36)^2+(45-45.36)^2+(44-45.36)^2+(48-45.36)^2}{50(50-1)}} \\
 &= 0.293
 \end{aligned} \tag{3.110}$$

Відносна непевність за типом А:

$$U_{A_{\text{від}}} = \frac{0.293}{45.36} * 100\% = 0,006\% \tag{3.111}$$

На основі вимірних значень розрахунок непевності за типом В:

$$U_{CB} = \sqrt{\sum_{i=1}^n (U_{B_i})^2} \tag{3.112}$$

На основі моделі взаємозв'язку між вимірюваною величиною та вихідними параметрами складають переліки таких елементів: вимірювані параметри, які безпосередньо вимірюються або спостерігаються; невимірювані впливові параметри, які впливають на результат вимірювань, але не можуть бути безпосередньо виміряні; коригувальні коефіцієнти та константи, які використовуються у вихідних рівняннях або формулах; а також додаткові похибки, які можуть впливати на точність вимірювань і які додають додаткову невизначеність до результатів. Ці елементи допомагають управляти та аналізувати вимірювання з метою забезпечення точності та достовірності результатів.

$$U_{B_i} = \frac{\Delta}{\sqrt{3}} \quad (3.113)$$

Впливними факторами є вологість ґрунту, температура ґрунту, вологість повітря, температура повітря, швидкість руху повітря, інтенсивність теплового опромінення, щільність ґрунту, кислотність ґрунту, вміст калію, азоту в ґрунті.

Термометр звичайний, який вимірює температуру повітря має похибку $\Delta = \pm 0,2^\circ\text{C}$, виходячи з цього, отримаємо:

$$U_{B_1} = \frac{\Delta}{\sqrt{3}} = \frac{0,2}{\sqrt{3}} = 0,115^\circ\text{C} \quad (3.113)$$

$$U_{B_{1 \text{ від}}} = \frac{0,115}{20} * 100\% = 0,005\% \quad (3.114)$$

Психрометр, який вимірює вологість повітря має похибку $\Delta = \pm 5\%$, виходячи з цього, отримаємо:

$$U_{B_2} = \frac{\Delta}{\sqrt{3}} = 2,886\% \quad (3.115)$$

$$U_{B_{2 \text{ від}}} = \frac{2,886}{62} * 100\% = 0,046\% \quad (3.116)$$

Анемометр, який вимірює швидкість руху повітря, має похибку $\Delta = \pm 0,1\text{ м/с}$, виходячи з цього, отримаємо:

$$U_{B_3} = \frac{\Delta}{\sqrt{3}} = 0,057\text{ м/с} \quad (3.117)$$

$$U_{B_{3 \text{ від}}} = \frac{0,057}{0,15} * 100\% = 0,384\% \quad (3.118)$$

Актинометр, який призначений для вимірювання інтенсивності теплового опромінення, має похибку $\Delta = \pm 5^{Вт/м^2}$, виходячи з цього, отримаємо:

$$U_{B_4} = \frac{\Delta}{\sqrt{3}} = 2,886 \text{ Вт/м}^2 \quad (3.119)$$

$$U_{B_4 \text{ від}} = \frac{2,886}{25} * 100\% = 0,115\% \quad (3.120)$$

Отже, непевність з типом В:

$$U_B = \sqrt{(0,0018)^2 + (0,011)^2 + (0,005)^2 + (0,046)^2 + (0,384)^2 + (0,115)^2} \\ \sqrt{(0,107)^2 + (0,0006)^2 + (0,013)^2 + (0,011)^2} = 0,417\% \quad (3.121)$$

Тоді, сумарна стандартна непевність:

$$U_C = \sqrt{U_A^2 + U_B^2} \quad (3.122)$$

$$U_C = \sqrt{0,0006^2 + 0,417^2} = 0,417\% \quad (3.123)$$

Розширену непевність визначають згідно з наступною формулою:

$$U = k \cdot U_C \quad (3.124)$$

$$U = 0,95 * 0,417 = 0,396\% \quad (3.125)$$

де k - представляє собою коефіцієнт охоплення, що залежить від обраного рівня довіри (R_d) та ефективного числа ступенів свободи.

Наприклад, при $R_d = 0,95$ за законом нормального розподілу ймовірностей, k дорівнює 1,96, а за законом рівномірного розподілу - 1,65.

На основі розрахованих непевностей можна скласти бюджет непевностей, що наведений в табл. 3.20.

Таблиця 3.20.

Бюджет непевності при вимірюванні вмісту фосфору в ґрунті

№	Джерело непевності	Характеристик а точності	Тип розподілу	Стандартна непевність	Коефіцієнт чутливості	Внесок
---	--------------------	--------------------------	---------------	-----------------------	-----------------------	--------

1	температура повітря	0,5	нормальний	0,005	1,00	0,005
2	вологість повітря	0,5	нормальний	0,046	1,00	0,046
3	інтенсивності теплового опромінення	0,5	нормальний	0,115	1,00	0,115
4	кислотність ґрунту (рН)	2	нормальний	0,107	1,00	0,107
5	вологість ґрунту	0,5	нормальний	0,011		0,011
6	щільність ґрунту	1.6	нормальний	0,0006	1,00	0,0006
7	швидкість руху повітря	1	нормальний	0,384	1,00	0,384
8	температура ґрунту	0,5	нормальний	0,0018	1,00	0,0018
9	вміст азоту в ґрунті	1	нормальний	0,011	1,00	0,011
10	вміст калію в ґрунті	1	нормальний	0,013	1,00	0,013
Непевність за типом А						0,006
Непевність за типом Б						0,417
Сумарна стандартна непевність						0,417
Розширена непевність						0,396
Заявлена непевність						0.5

3.4. Оцінювання ризиків функціонування КФС моніторингу ґрунтів як інформаційної системи

Оскільки КФС є інформаційно-вимірною системою, то важливим є оцінювання ризиків її функціонування з врахуванням основних властивостей інформації, а саме, її

- доступності (можливість отримати інформацію в будь-який час та з будь-якого місця авторизованому користувачу),
- конфіденційності (захист від несанкціонованого доступу),

- цілісності (відсутність змін та модифікації інформації в тому числі і вимірювальної).

З точки зору оцінювання ризиків КФС можна поділити на три рівні: фізичний, кібер-фізичний та кібер-рівень.

На кібер-рівні знаходиться засіб персонального сервісу - інтерфейс типу людина-машина (мобільний додаток), засоби прийняття рішень, засоби опрацювання інформації. Його функції містять опрацювання даних, керування генерацією команд (прийняття рішень), а також управління та оптимізацію процесів на високому рівні.

Фізичний рівень містить сенсори, що зазвичай представляють собою апаратну частину.

Кібер-фізичний рівень описує вбудовану мережеву інфраструктуру, що забезпечує обмін даними між фізичним та кібернетичним рівнями. Ця взаємодія покладається на протоколи зв'язку для безперебійного обміну. При оцінці та аналізі ризиків безпеки кібер-фізичних систем важливо враховувати всі три рівні, а саме обробку даних на кібернетичному рівні, передачу інформації у кібер-фізичному середовищі та зчитування вимірювальних даних на фізичному рівні.

У КФС кібер-рівень взаємодіє з фізичним, зчитуючи дані сенсорів та надсилаючи команди керування за допомогою кібер-фізичної взаємодії. Потік даних від сенсорів – це виміряні значення фізичних величин (в нашому випадку це вологість, температура, кислотність, щільність та вміст фосфору, азоту та калію). Компроментування (зміна, модифікація) даних сенсорів (або ж вихід їх метрологічних характеристик за допустимі межі) можуть спричинити спотворення інформації, що надходить на контролер, що в свою чергу призведе до некоректних результатів моніторингу та виконання неправильних управлінських дій (формування неправильних рекомендацій щодо процесу агровиробництва – вирощування зерна пшениці). Якщо порушення є навмисним, то у кіберпросторі у руках зловмисника така інформація може викликати небажані відхилення в роботі КФС.

У процесі проектування та подальшої експлуатації кібер-фізичних систем (КФС) було використано наступне апаратне забезпечення.:

- плата розробника Arduino WeMos D1 Wi-Fi (ESP8266),
- модуль перетворювача інтерфейсів Arduino TTL UART - RS485 на MAX485,
- 2 батареї Li-Ion 18650 3,7V 4200ma,
- водонепроникний температурний сенсор DS18B20,
- сенсор RS485 4-20mA Soil Temperature Humidity Moisture Conductivity EC PH Sensor NPKTHC-S (для вимірювання вологості, кислотності, щільності, вмісту фосфору, азоту, калію).

Таблиця 3.21.

Систематизація ризиків КФС моніторингу ґрунтів як інформаційної системи

КФС рівні	Об'єкт (Актив)	Назва ризику
Кібер-фізичний рівень	Мережа зв'язку між сенсорами та контролером	Переривання зв'язку між сенсорами та контролерами; маніпулювання або/та змінювання даних вимірювань, що надсилаються контролеру.
Кібер-рівень	Мережа зв'язку між контролером та мобільним телефоном	Переривання зв'язку між контролером та мобільним телефоном; маніпулювання або/та змінювання даних між контролером та мобільним телефоном.
	Контролер	Переривання нормального процесу керування, або надсилання спотворених даних в систему прийняття рішень.
	Мобільний телефон (мобільний застосунок)	Зміна конфігурації системи (налаштувань).

Фізичний рівень	Сенсори	Фізичне пошкодження сенсорів, амортизаційні процеси (порушення метрологічних характеристик).
-----------------	---------	--

Для оцінювання ризиків КФС доцільно використати метод Risk Analysis & Management Method (CRAMM). Метод оцінки ризиків CRAMM ідентифікує та розраховує рівні вразливостей P_v та їх вагові впливи V_v , на основі яких обчислюється рівень ризику. Шляхом ідентифікації та розробки коригуючих заходів здійснюється контроль та управління ризиками, що дозволяє знизити їх рівень до прийняттого рівня. Цей метод служить перевіркою того, наскільки система є захищеною, та ефективність усіх прийнятих заходів.

Використовуючи метод CRAMM, для отримання рівня ризику потрібно враховувати вагові впливи V_v кожної з властивостей інформації (доступності, конфіденційності та цілісності) КФС відповідно до шкали (табл. 3.22).

Таблиця 3.22.

Шкала для оцінювання вагових впливів V_v властивостей інформації КФС

Властивості інформації					
Доступність		Конфіденційність		Цілісність	
рівень	бали	рівень	бали	рівень	бали
низький	1-3	публічна	0	низький	1-3
середній	4-7	обмежена	1-5	середній	4-7
високий	7-8	конфіденційна	6-9	високий	8-9
дуже високий	9	захищена	10	дуже високий	10
обов'язковий	10				

Після аналізу кількості основних загроз, визначених у таблиці 3.25, стосовно "доступності", можна встановити максимальне значення вагового впливу цієї складової на рівні "10" - "обов'язковий" (див. табл. 3.22). Оскільки система

моніторингу ґрунтів не має справи з конфіденційною інформацією, для "конфіденційності" можна призначити значення вагового впливу "3", що вказує на "середньо-обмежений" рівень (див. табл. 3.22).

Таблиця 3.23.

Шкала рівнів вразливості P_v

№	Рівень вразливості	Числове значення
1	Вразливість відсутня	0
2	Низький рівень вразливості	1-4
3	Середній рівень вразливості	5-7
4	Високий рівень вразливості	8-9
5	Дуже високий рівень вразливості	10

Значення рівня загрози P_z (3.126) буде дорівнювати добутку вагового впливу V_v та рівня вразливості P_v

$$P_z = V_v \cdot P_v. \quad (3.126)$$

Отриманий рівень загрози набуватиме значень в діапазоні від 0 до 100, тому на основі цього значення доцільно ранжувати рівень ризику, як низький, середній та високий (табл. 3.24.).

Таблиця 3.24.

Шкала рівнів загрози P_z – рівнів ризику

№	Рівень ризику	Числове значення рівня загрози
1	Низький	0-33
2	Середній	34-67
3	Високий	68-100

Відповідно до виразу 3.126 та табл. 3.24 можна оцінити рівень ризику функціонування КФС моніторингу ґрунтів.

Таблиця 3.25.

Результати оцінювання рівня ризику функціонування КФС моніторингу ґрунтів

Властивість інформації	Ідентифікація ризику	Ваговий вплив Вв	Рівень вразливості Рв	Рівень загрози Рз	Рівень ризику
Конфіденційність	Витік інформації	3	5	15	Низький
	Захоплення контролю над системою	3	5	15	Низький
Цілісність	Помилки введення	9	7	63	Середній
	Спотворення інформації	9	8	72	Високій
	Зміна, або спотворення показів сенсорів	9	5	45	Середній
Доступність	Збій у роботі КФС	10	6	60	Середній
	Збої енергопостачання	10	5	50	Середній
	Збій мережі зв'язку	10	10	100	Високій
	Видалення інформації	10	3	30	Низький

	Фізичний, руйнівний вплив на апаратне забезпечення КФС	10	3	30	Низький
	Порушення роботи сенсорів (метрологічні ризики)	10	6	60	Середній

Запропонована методика оцінювання ризиків функціонування КФС на основі Risk Analysis & Management Method (CRAMM) з врахуванням основних властивостей інформації дозволяє визначити для кожного виду загрози відповідний рівень ризику. Після проведення цих етапів отримані результати (табл. 3.24.) необхідно проаналізувати та здійснити коригувальні дії [97] особливо для високого рівня ризику.

Коригувальні дії:

Для захисту системи від збоїв у системах електроживлення (2 батареї Li-Ion 18650 3,7V 4200ma) рекомендується передбачити процедуру, яка забезпечуватиме надсилання повідомлення-нагадування власнику системи про збій електроенергії, низький заряд батареї. Також рекомендується забезпечити постійне резервне живлення системи.

Щоб уникнути перешкод у мережі GSM, важливо використовувати SIM-карту перевіреного оператора з хорошим покриттям.

Для захисту КФС від зовнішнього навмисного чи випадкового пошкодження усіх компонентів і сенсорів необхідно помістити КФС в недоступних для злоумисника місцях [98]. Кабелі та компоненти КФС мають бути розміщені у герметичному водонепроникному корпусі.

Рекомендується використовувати КФС в кількості 1 шт. на 1 га – це забезпечить високий рівень достовірності моніторингу ґрунту у агрогосподарстві при існуючих технічних характеристиках КФС.

Система повинна забезпечувати своєчасне та безперебійне сповіщення власника про будь-які зміни в системі або виявлення можливих збоїв [99].

З метою забезпечення належного функціонування системи необхідно проводити своєчасні та регулярні тестування роботи КФС. У разі виявлення несправності необхідно своєчасно відлагодити систему, або замінити відповідні компоненти. Оновлення програмного забезпечення забезпечить безперебійну роботу КФС та дозволить доповнювати її новими складовими.

3.5. Аналіз метрологічних ризиків функціонування КФС моніторингу ґрунтів як вимірювальної системи

Оскільки КФС є інформаційно-вимірювальною системою, то не менш важливим є оцінювання її функціонування з урахуванням метрологічних ризиків (МР).

Метрологічні ризики доцільно класифікувати за різними ознаками (табл. 3.25.)

Таблиця 3.25.

Класифікація метрологічних ризиків КФС

Класифікаційна ознака	Назва ризику
за сутністю	<ul style="list-style-type: none"> ● природно-екологічні, ● технічні, ● людські
за здатністю управляти ризиками (контролювати, прогнозувати, коригувати)	<ul style="list-style-type: none"> ● керовані, ● некеровані
за характером прояву	<ul style="list-style-type: none"> ● систематичні, ● випадкові (поодинокі)
за сферою впливу	<ul style="list-style-type: none"> ● впливають на КФС, ● впливають на оточення
за джерелом виникнення	<ul style="list-style-type: none"> ● на етапі проектування ● на етапі експлуатації

за рівнем	<ul style="list-style-type: none"> ● низький, ● середній, ● високий
за характером управління ризиком	<ul style="list-style-type: none"> ● коригований (мінімізований), ● прийнятний, ● той, який можна уникнути, ● той, який можна передати іншому об'єкту

За сутністю основні метрологічні ризики КФС моніторингу ґрунтів можна віднести:

Природно-екологічні: збільшення похибки результату внаслідок проведення вимірювання за межами нормальних умов роботи сенсорів.

Технічні: неправильне встановлення та налаштування сенсорного блоку КФС та вимірювальних каналів, формування некоректних рішень нейромережі в результаті використання некоректних даних для її навчання та тестування.

Людські: відсутність, або несвоєчасне калібрування вимірювальних каналів, некоректне налаштування та експлуатація КФС персоналом, що призводить до недостовірності результатів вимірювання.

Відповідно до табл. 3.7 МР доцільно охарактеризувати з метою їх ідентифікації (табл. 3.26.).

Таблиця 3.26.

Характеристика метрологічних ризиків КФС

Метрологічні ризики КФС моніторингу ґрунтів	Характеристика МР
збільшення похибки результату внаслідок проведення вимірювання за межами нормальних умов роботи сенсорів	природно-екологічний, некерований, випадковий, впливають на КФС, коригований

неправильне встановлення та налаштування сенсорного блоку КФС та вимірювальних каналів	технічний, керований, випадковий, впливають на КФС, коригований
формування некоректних рішень нейромережі в результаті використання некоректних даних для її навчання та тестування	технічний, керований, випадковий, впливають на КФС, коригований
відсутність, або несвоєчасне калібрування вимірювальних каналів	людський, керований, випадковий, впливають на КФС, коригований
некоректне налаштування та експлуатація КФС персоналом	людський, керований, випадковий, впливають на КФС, коригований

Для оцінювання рівня метрологічних ризиків доцільно скористатись міжнародним стандартом, де містяться принципи, структура та процес управління ризиками, а саме ДСТУ ISO 31000:2018 «Менеджмент ризиків [100]. Принципи та настанови» (ISO 31000:2018, IDT). Відповідно до нього необхідно оцінити ймовірність виникнення події та важкість наслідків її настання згідно з табл. 3.27.

Для оцінки імовірності виникнення події пропонується скористатись підходом, зазначеним у табл. 3.23., тобто п'ять рівнів. А для оцінки важкості наслідків – градаціями табл. 3.22.

Таблиця 3.27.

Матриця метрологічних ризиків КФС

важкість наслідків	низький	середній	високий	дуже високий
	1	2	3	4
ймовірність виникнення події				
дуже мало ймовірно - 1	1	2	3	4
мало ймовірно - 2	2	4	6	8
швидше за все - 3	3	6	9	12

дуже ймовірно -4	4	8	12	16
стовідсотково -5	5	10	15	20
1- 5 – низький рівень ризику, 6 - 10 – середній рівень ризику, 11 - 20 – високий рівень ризику				

Відповідно до табл. 3.27. було оцінено рівень метрологічних ризиків КФС моніторингу ґрунтів (3.28).

Таблиця 3.28.

Оцінка метрологічних ризиків КФС

Метрологічні ризики КФС моніторингу ґрунтів	Рівень метрологічних ризиків КФС
збільшення похибки результату внаслідок проведення вимірювання за межами нормальних умов роботи сенсорів	4 - низький
неправильне встановлення та налаштування сенсорного блоку КФС та вимірювальних каналів	6 - середній
формування некоректних рішень нейромережі в результаті використання некоректних даних для її навчання та тестування	6 - середній
відсутність, або несвоєчасне калібрування вимірювальних каналів	9 - середній
некоректне налаштування та експлуатація КФС персоналом	9 - середній

Отже, щоб мінімізувати середній рівень ризику, необхідно зокрема для персоналу створити чітку інструкцію для користування, систему оповіщень та зручний і зрозумілий інтерфейс.

Висновки до розділу 3

1. Проведено дослідження метрологічних характеристик КФС моніторингу ґрунтів. Запропоновано методику верифікації КФС моніторингу ґрунтів та проведено дослідження непевностей результатів вимірювання основних параметрів ґрунту – температури, вологості, провідності (щільності) та вмісту азоту, фосфору і калію.

2. Здійснено оцінювання ризиків функціонування КФС. Запропоновано розділити їх на ризики інформаційного характеру та метрологічні ризики, оскільки КФС – це інформаційно-вимірювальна система. Запропоновано класифікаційні ознаки та здійснено структурування ризиків КФС як інформаційної системи.

3. На основі застосування методу CRAMM отримано результати оцінювання ризиків розробленої в роботі КФС моніторингу ґрунтів, серед яких виокремлено ризики з низьким, середнім та високим рівнем. З метою забезпечення інформаційної надійності системи було встановлено пріоритетність доступності інформації КФС в порівнянні з цілісністю та конфіденційністю. Для отриманих ризиків було запропоновано коригувальні дії, застосування яких дасть можливість мінімізувати ризики.

4. Під час аналізування метрологічних ризиків КФС запропоновано класифікаційні ознаки та проведено структурування метрологічних ризиків КФС. На основі застосування підходів, зазначених у ISO 31000:2018 «Менеджмент ризиків. Принципи та настанови», оцінено метрологічні ризики розробленої в роботі КФС моніторингу ґрунтів та розроблено рекомендації для їх зменшення.

РОЗДІЛ IV. ПРИКЛАДНІ АСПЕКТИ ФУНКЦІОНУВАННЯ КІБЕР-ФІЗИЧНОЇ СИСТЕМИ

4.1. Побудова прогнозної моделі зміни стану ґрунтів на основі використання нейромереж та хмарних технологій

Досягнення сільськогосподарських і біологічних наук, розкриття сутності багатьох біологічних явищ, розвиток методів організації і обліку сільськогосподарських культур дозволяють регулювати процеси формування рослин і якість продукції.

Наукові методи управління передбачають систематичне використання прогнозування, планування та організації виробництва з метою ефективного управління ресурсами та процесами. Ці методи базуються на аналізі даних, використанні наукових моделей та методів, а також впровадженні стратегічних та тактичних рішень для досягнення поставлених цілей. Вони сприяють оптимізації виробничих процесів, забезпечують підвищення ефективності та конкурентоспроможності підприємства. Це дає можливість перевести виробничий процес окремих видів продукції рослинництва на наукові та суворо контрольовані стандарти якості, що робить програмування рослинництва одним із найперспективніших напрямків науково-технічного прогресу, який може бути реалізований у рослинництві.

Програмування – це розробка програми, оптимальної пропорції нормативних елементів з урахуванням нерегульованих і нерегульованих метеорологічних умов з максимально економним використанням наявних ресурсів, що забезпечує планову виробітку в технологічних системах. Прогнозування як невід’ємна частина планування посівів передбачає прогнозування, вироблення ймовірного уявлення про теоретично можливі врожаї, що забезпечуються кліматичними факторами, родючістю ґрунту, добривами, пестицидами та іншими ресурсами.

Виробництво зерна є одним із секторів української економіки, який протягом останніх років дає стабільні прибутки завдяки потужному експорту. Прогнозування врожайності зерна є основою для планування довгострокової

стратегії експорту зерна. Сучасні концепції економіко-математичного моделювання в даний час використовуються для створення прогнозних моделей, а саме методи фрактального та інтелектуального аналізу розвитку систем, засоби нечіткої логіки та штучні нейронні мережі. Іншими словами, прогноз визначає потенціал урожаю зерна в конкретних ґрунтово-кліматичних умовах, а програма реалізує потенціал прогнозу через управління. Завданням моніторингу ґрунтів є контроль за динамікою найважливіших фізичних, хімічних, біологічних та інших процесів у ґрунті в природних умовах і за антропогенних навантажень.

Згідно з концепцією моніторингу ґрунтів, головною метою є отримання інформації, яка сприятиме у прийнятті управлінських рішень для стабілізації і поліпшення якості ґрунтів і землеробства.

Моніторинг ґрунтів має надавати об'єктивні вихідні, поточні і регулярні дані щодо основних характеристик ґрунтового покриву для ефективного прийняття рішень. Враховуючи глобальні зміни клімату, особливо актуальним стає дослідження впливу температури ґрунту на ріст рослинних екосистем.

Недавні дослідження і моніторинг підтверджують ефективність використання моделей штучних нейронних мереж для прогнозування довгострокових нестационарних випадкових процесів, зокрема, врожайності озимої пшениці. Оптимальний варіант прогнозованої моделі представлений нижче:

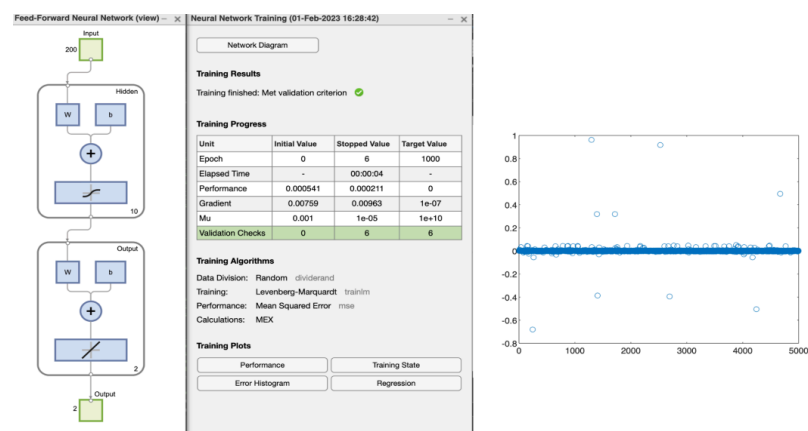


Рис. 4.1. Модель штучної нейронної мережі, яка використовується для передбачення урожайності зернових культур, входить до складу КФС моніторингу агровиробництва

Встановлено, що для розробки прогностичних математичних моделей якості ґрунтів потрібна оцінка їх стану на основі негайного моніторингу основних параметрів. Це дозволяє приймати належні управлінські рішення стосовно збереження параметрів ґрунту на відповідному рівні та вчасного впровадження коригувальних заходів. Кіберфізичні системи (КФС) інтегрують дані від інтелектуальних датчиків, розташованих у фізичному середовищі, для глибшого розуміння оточуючого середовища та забезпечення більш точних дій. У фізичному контексті вони забезпечують взаємодію з виконавчими елементами, що, базуючись на отриманих даних, впливають на середовище користувачів. У віртуальному контексті КФС використовуються для збору даних про дії користувачів у віртуальних середовищах, таких як соціальні мережі, блоги і сайти електронної комерції. Потім ці системи реагують на отримані дані, передбачаючи дії або потреби користувачів в цілому. Таким чином, розроблено підсистему, яка дозволяє оперативно проводити тести у відкритому ґрунті та негайно реагувати на зміну його ключових параметрів. У поєднанні з прогнозуванням на основі нейронних мереж ця система може допомогти користувачеві приймати належні управлінські рішення з метою стабілізації і покращення якості врожаю.

На основі значення контролю стану ґрунту, розроблено кіберфізичну систему для моніторингу агровиробництва, що включає вимірювання ключових параметрів, таких як вологість, температура, кислотність, щільність та вміст поживних речовин у ґрунті. Система забезпечує візуалізацію вимірювальної інформації у зручному для користувача форматі, поєднуючи програмне та апаратне забезпечення, а також застосовує прогнозування на основі нейронної мережі.

Досягнення сільськогосподарських і біологічних наук, розкриття сутності багатьох біологічних явищ, розвиток методів організації і обліку сільськогосподарських культур дозволяють регулювати процеси формування рослин і якість продукції [101]. Наукові методи управління передбачають прогнозування, планування та організацію виробництва. Це дає можливість перевести виробничий процес окремих видів продукції рослинництва на наукові

та суворо контрольовані стандарти якості, що робить програмування рослинництва одним із найперспективніших напрямків науково-технічного прогресу, який може бути реалізований у рослинництві. Програмування – це розробка програми, оптимальної пропорції нормативних елементів з урахуванням нерегульованих і нерегульованих метеорологічних умов з максимально економним використанням наявних ресурсів, що забезпечує планову виробітку в технологічних системах. Прогнозування як невід’ємна частина планування посівів передбачає розробку прогнозу, вироблення ймовірного уявлення про теоретично можливі врожаї, що забезпечуються кліматичними факторами, родючістю ґрунту, добривами, пестицидами та іншими ресурсами.

Найперспективнішим доступним на даний момент методом прогнозування є використання нейронних мереж. Нейронні мережі мають багато переваг перед іншими алгоритмами. Ось дві основні переваги: Нейронні мережі дозволяють легко перевірити залежність прогнозованих значень від незалежних змінних. Так, бажаною характеристикою є можливість побудови системи, яка натуральним чином враховуватиме всі важливі параметри та здатна будувати короткострокові прогнози. Це дозволить користувачам отримувати актуальну інформацію та оперативно реагувати на зміни у стані ґрунту, сприяючи покращенню урожайності та оптимізації процесів агровиробництва.

У такому середовищі застосування більшості традиційних методів прогнозування стає абсолютно неможливим. Навіть з найпростішою архітектурою нейронної мережі (персептрон із прихованими шарами) і базою даних (що містить продажі та всі параметри) легко отримати працюючу систему прогнозування. Точно, можливість включення або виключення зовнішніх параметрів у системі буде ключовою для її гнучкості та адаптивності до конкретних умов та потреб користувачів. Це дозволить налаштовувати систему з урахуванням конкретних завдань і вимог, забезпечуючи оптимальні результати управління агровиробництвом. Тому ми використали алгоритм визначення значущості, щоб миттєво визначити значущість вхідних змінних і виключити з розгляду параметри з несуттєвими ефектами. Ще однією великою перевагою нейронних мереж є те,

що вони не залежать від вибору математичної моделі поведінки часових рядів. Побудова моделі нейронної мережі відбувається адаптивно під час навчання без безпосереднього залучення експертів. У той же час нейронна мережа представлена прикладами бази даних і адаптується до цих даних. Недоліком нейронних мереж є те, що вони не детерміновані. Це означає, що, хоча існує «чорна скринька», яка якимось чином функціонує після навчання, логіка, за якою приймається рішення нейронної мережі, залишається повністю прихованою від експертів. Узагальнено, існують методи "вилучення знань з нейронних мереж", які перетворюють навчену нейронну мережу на набір логічних правил і створюють експертну систему на основі цієї мережі. На жаль, ці методи не входять до складу стандартних пакетів нейронних мереж, і набори правил, що формуються цими методами, можуть бути досить об'ємними.

В процесі вирощування зернових культур відкритого ґрунту використовують такі види прогнозів:

- дуже короткочасні — протягом одного вегетаційного періоду;
- короткочасні — на 1—2 роки;
- середньострокові — на 3—5 років.

Прогнозування вирощування зернових культур є складним завданням, яке вимагає урахування різних факторів, таких як біологічні особливості рослин, стан погоди, якість ґрунту, економічні чинники і зміни клімату. Ці фактори відрізняються за значимістю в залежності від тривалості прогнозу. Методи прогнозування засновані на принципах, що ґрунтуються на законах землеробства та біологічних особливостях культур. Результати прогнозів використовуються для розробки операційних карт технології вирощування зернових культур і стратегій експорту зерна, використовуючи сучасні методи економіко-математичного моделювання. Такий підхід дозволяє забезпечити стабільність та ефективність зернового виробництва, сприяючи позитивній динаміці експорту.

Для реалізації процесу прогнозування як складова кібер-фізичні системи моніторингу у агропромисловому секторі, було доцільно невеликі поля розділити цифровим способом на 1-метрові квадрати. Тим часом, комп'ютер отримував дані

з сенсорів про параметри ґрунту, норму внесення добрив та погодні умови, отримані з сайту погоди <https://www.accuweather.com>. Щоб завершити свій аналіз, було доцільно створити згорткову нейронну мережу (CNN). CNN — це тип машинного навчання або штучного інтелекту. Хоча деякі типи машинного навчання змушують комп'ютери додавати нові дані до існуючих шаблонів, згорткові нейронні мережі не враховують існуючі шаблони. CNN переглядає дані та вивчає шаблони, які відповідають за їх упорядкування, і це працює подібно до того, як люди організовують інформацію за допомогою нейронних мереж у мозку. Підхід CNN зміг передбачити врожайність із високою точністю, і його порівняли з іншими алгоритмами машинного навчання та традиційними статистичними методами.

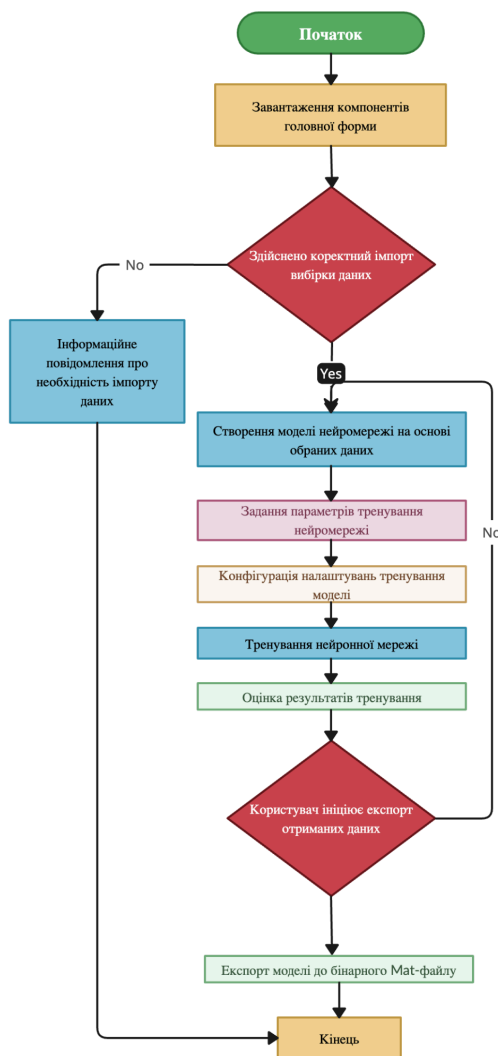


Рис. 4.2. Розроблений алгоритм побудови нейронної мережі

Після ґрунтовних досліджень було прийнято рішення про створення нейронної мережі на мові *Python*. *Python* є однією з найпопулярніших мов програмування останнього десятиліття.

Завдяки безкоштовним інструментам розробки та потужним бібліотекам *Python* широко використовується для розробки прикладного програмного забезпечення та вирішення наукових проблем. Зокрема, різні потужні бібліотеки *Python* для моделювання нейронних мереж і розпізнавання образів дозволяють розв'язувати задачі штучного інтелекту та інтелектуального аналізу даних.

Python, створений Гвідо ван Россумом у 1991 році, є мовою програмування з високим рівнем інтерпретації. Він відзначається простим і лаконічним синтаксисом, що сприяє швидкості написання коду та мінімізації помилок. Основні характеристики *Python* включають:

- Могутню підтримку об'єктно-орієнтованого програмування: *Python* дозволяє створювати класи, об'єкти та інші об'єктно-орієнтовані конструкції для управління складними програмами.

- Інтерпретовану мову: *Python* компілюється під час виконання, що робить його більш гнучким у виборі платформи та прискорює розробку.

- Розширені можливості стандартної бібліотеки: *Python* має велику стандартну бібліотеку з численними функціями і модулями, які допомагають вирішувати різноманітні завдання і скорочують час розробки.

- Динамічні типи даних: *Python* не вимагає явного вказання типів змінних, що дозволяє швидко писати код і уникати помилок.

- Портативність: *Python* працює на різних операційних системах і архітектурах, що дозволяє створювати кросплатформні програми.

Python знаходить застосування в різних сферах, від скриптів та інструментів до веб-додатків, машинного навчання та науки про дані. Його популярність серед розробників зумовлена його функціональністю та зручністю, що робить його однією з найважливіших мов програмування у сучасному світі.

PyCharm - ідеальне середовище розробки для професійного програміста, особливо в контексті мови програмування *Python*. Ця IDE дозволяє легко

підключати необхідні модулі та бібліотеки, працювати з різними типами файлів, включаючи .txt, .html, .css та .py. PyCharm також надає зручні інструменти для написання Unit-тестів і створення власних бібліотек, які можна легко використовувати в різних проектах.

Багатофункціональність і гнучкість PyCharm дозволяють налаштувати його згідно з особистими потребами розробника, а також використовувати різноманітні модифікації та плагіни для покращення продуктивності та швидкості написання коду. Наявність інтерактивних консолей для *Python* і Django забезпечує зручну роботу з інспекцією синтаксису в реальному часі, автодоповненням та іншими корисними функціями. Підсумовуючи, PyCharm - це повноцінне середовище розробки, яке не залишає бажань під час роботи над проектами.

Повнофункціональний інтегрований термінал працює на платформах Windows, Linux і macOS. PyCharm виконує повсякденні завдання замість вас, тож ви можете зосередитися на більш важливих речах. Робота з PyCharm економить ваш час. Для більшості завдань не потрібно відривати руки від клавіатури.

Інтелектуальний механізм аналізу коду забезпечує точне автозаповнення, виявлення помилок і швидке їх виправлення, зручну навігацію по коду та інші корисні функції. PyCharm має інструменти, які допоможуть вам знайти та виправити помилки. Численні шаблони надаються для різних проектів, щоб спростити вашу архітектуру. Він має стільки функцій, орієнтованих на *Python*, що є чудовим IDE для проектів *Python*.

4.1.1. Формування навчального набору даних

Для підготовки навчальної вибірки призначений клас `SoilAnalysisData` (рис. 4.3.).

```

using System;
using System.Collections.Generic;
using System.Globalization;
using System.Linq;
using System.Threading.Tasks;

namespace ServerMaster
{
    public class SoilAnalysisData
    {
        public SoilData SoilData { get; set; }
        public AirData AirData { get; set; }
        public EnvironmentData EnvironmentData { get; set; }
        public CultureData CultureData { get; set; }
    }
}

```

Рис. 4.3. Скріншот класу SoilAnalysisData

Цей клас призначений для обробки навчального набору даних з файлу, відокремлення даних від міток, видалення непідтримуваних символів і знаків пунктуації, а також перетворення даних у послідовності фіксованої довжини, використовуючи заповнювачі слів. Крім того, цей клас готує питання для мережі та обробляє відповіді. Навчальний набір даних зчитується з файлу, де вже зберігаються оброблені дані. Крім того, будується гістограма розмірів даних, яка також зберігається. Для підготовки навчального набору даних зі зазначеного набору даних потрібно передати відповідне ім'я файлу методу “SoilAnalysisData”.

У нашій системі моніторингу стану ґрунтів важливу роль відіграє збирання та обробка даних, що надходять з різних сенсорів та приладів. Ці дані включають вимірювання таких параметрів, як вологість, температура, кислотність, щільність ґрунту та інші. Для забезпечення точного прогнозування та прийняття рішень, ці дані передаються до нейронної мережі, яка обробляє їх та надає відповідні прогнози.

Для наочності роботи системи та демонстрації типових даних, що використовуються для навчання та прогнозування, нижче наведено скріншоти з набором даних, отриманих з приладу та сенсорів (рис. 4.4.). Ці дані є критично важливими для тренування моделі нейронної мережі, а також для її подальшого тестування та валідації. Вони ілюструють різноманітність умов і параметрів, що


```

"observations_Nitrogen": [
  {"observation_number": 1, "instrument_reading": 82},
  {"observation_number": 2, "instrument_reading": 82},
  {"observation_number": 3, "instrument_reading": 82},
  {"observation_number": 4, "instrument_reading": 82},
  {"observation_number": 5, "instrument_reading": 82},
  {"observation_number": 6, "instrument_reading": 82},
  {"observation_number": 7, "instrument_reading": 82},
  {"observation_number": 8, "instrument_reading": 82},
  {"observation_number": 9, "instrument_reading": 83},
  {"observation_number": 10, "instrument_reading": 82},
  {"observation_number": 11, "instrument_reading": 82},
  {"observation_number": 12, "instrument_reading": 84},
  {"observation_number": 13, "instrument_reading": 94},
  {"observation_number": 14, "instrument_reading": 99},
  {"observation_number": 15, "instrument_reading": 99},
  {"observation_number": 16, "instrument_reading": 99},
  {"observation_number": 17, "instrument_reading": 100},
  {"observation_number": 18, "instrument_reading": 100},
  {"observation_number": 19, "instrument_reading": 100},
  {"observation_number": 20, "instrument_reading": 100},
  {"observation_number": 21, "instrument_reading": 100},
  {"observation_number": 22, "instrument_reading": 100},
  {"observation_number": 23, "instrument_reading": 100},
  {"observation_number": 24, "instrument_reading": 100},
  {"observation_number": 25, "instrument_reading": 100},
  {"observation_number": 26, "instrument_reading": 100},
  {"observation_number": 27, "instrument_reading": 101},
  {"observation_number": 28, "instrument_reading": 101},
  {"observation_number": 29, "instrument_reading": 100},
  {"observation_number": 30, "instrument_reading": 101},
  {"observation_number": 31, "instrument_reading": 101},
  {"observation_number": 32, "instrument_reading": 101},
  {"observation_number": 33, "instrument_reading": 101},
  {"observation_number": 34, "instrument_reading": 100},
  {"observation_number": 35, "instrument_reading": 101},
  {"observation_number": 36, "instrument_reading": 101},
  {"observation_number": 37, "instrument_reading": 101},
  {"observation_number": 38, "instrument_reading": 101},
  {"observation_number": 39, "instrument_reading": 101},
  {"observation_number": 40, "instrument_reading": 101},
  {"observation_number": 41, "instrument_reading": 101},
  {"observation_number": 42, "instrument_reading": 101},
  {"observation_number": 43, "instrument_reading": 101},
  {"observation_number": 44, "instrument_reading": 101},
  {"observation_number": 45, "instrument_reading": 101},
  {"observation_number": 46, "instrument_reading": 101},
  {"observation_number": 47, "instrument_reading": 101},
  {"observation_number": 48, "instrument_reading": 101},
  {"observation_number": 49, "instrument_reading": 101}
]

```

```

"observations_pH": [
  {"observation_number": 1, "instrument_reading": 6.6},
  {"observation_number": 2, "instrument_reading": 7.2},
  {"observation_number": 3, "instrument_reading": 7.8},
  {"observation_number": 4, "instrument_reading": 7.9},
  {"observation_number": 5, "instrument_reading": 8.6},
  {"observation_number": 6, "instrument_reading": 9.0},
  {"observation_number": 7, "instrument_reading": 9.0},
  {"observation_number": 8, "instrument_reading": 9.0},
  {"observation_number": 9, "instrument_reading": 3.8},
  {"observation_number": 10, "instrument_reading": 7.0},
  {"observation_number": 11, "instrument_reading": 7.2},
  {"observation_number": 12, "instrument_reading": 7.8},
  {"observation_number": 13, "instrument_reading": 8.2},
  {"observation_number": 14, "instrument_reading": 8.9},
  {"observation_number": 15, "instrument_reading": 9.0},
  {"observation_number": 16, "instrument_reading": 9.0},
  {"observation_number": 17, "instrument_reading": 9.0},
  {"observation_number": 18, "instrument_reading": 9.0},
  {"observation_number": 19, "instrument_reading": 9.0},
  {"observation_number": 20, "instrument_reading": 9.0},
  {"observation_number": 21, "instrument_reading": 9.0},
  {"observation_number": 22, "instrument_reading": 9.0},
  {"observation_number": 23, "instrument_reading": 9.0},
  {"observation_number": 24, "instrument_reading": 9.0},
  {"observation_number": 25, "instrument_reading": 9.0},
  {"observation_number": 26, "instrument_reading": 9.0},
  {"observation_number": 27, "instrument_reading": 9.0},
  {"observation_number": 28, "instrument_reading": 9.0},
  {"observation_number": 29, "instrument_reading": 9.0},
  {"observation_number": 30, "instrument_reading": 9.0},
  {"observation_number": 31, "instrument_reading": 9.0},
  {"observation_number": 32, "instrument_reading": 9.0},
  {"observation_number": 33, "instrument_reading": 9.0},
  {"observation_number": 34, "instrument_reading": 9.0},
  {"observation_number": 35, "instrument_reading": 9.0},
  {"observation_number": 36, "instrument_reading": 9.0},
  {"observation_number": 37, "instrument_reading": 9.0},
  {"observation_number": 38, "instrument_reading": 9.0},
  {"observation_number": 39, "instrument_reading": 9.0},
  {"observation_number": 40, "instrument_reading": 9.0},
  {"observation_number": 41, "instrument_reading": 9.0},
  {"observation_number": 42, "instrument_reading": 9.0},
  {"observation_number": 43, "instrument_reading": 9.0},
  {"observation_number": 44, "instrument_reading": 9.0},
  {"observation_number": 45, "instrument_reading": 9.0},
  {"observation_number": 46, "instrument_reading": 9.0},
  {"observation_number": 47, "instrument_reading": 9.0},
  {"observation_number": 48, "instrument_reading": 9.0},
  {"observation_number": 49, "instrument_reading": 9.0}
]

```

Рис. 4.4. Скріншоти з набором даних, отриманих з приладу та сенсорів

Представлені скріншоти, які надають детальний огляд вхідних даних для нашої системи прогнозування.

4.1.2. Процес тренування нейромережі

Наступним етапом у розробці є тренування нейромережі. Тренування нейронної мережі є важливим етапом у розробці, але вимагає значних обчислювальних ресурсів і обсягу даних, що може перевищувати можливості локальних систем. Використання хмарного середовища для тренування нейромереж дозволяє ефективно розв'язати ці проблеми, забезпечуючи масштабованість і гнучкість обчислень. Такий підхід забезпечує доступ до потужних обчислювальних ресурсів та забезпечує ефективність процесу навчання.

Перше, що необхідно зробити для тренування нейронної мережі в хмарі, – це вибрати відповідну хмарну платформу. Найпопулярніші платформи включають AWS, Google Cloud Platform та Microsoft Azure. Вибір платформи залежить від конкретних вимог проекту, включаючи обсяг даних, необхідні обчислювальні ресурси та бюджет.

Дані є ключовим елементом у тренуванні нейронної мережі. Першим кроком є збір та підготовка даних для тренування. Це включає очищення даних,

нормалізацію, обробку пропущених значень та розподіл даних на тренувальний, валідаційний та тестовий набори. У хмарному середовищі дані можуть зберігатися в об'єктних сховищах, таких як Amazon S3, Google Cloud Storage або Azure Blob Storage, що забезпечує надійність та доступність даних.

Для тренування нейронної мережі потрібні потужні обчислювальні ресурси, такі як GPU або TPU. Хмарні платформи надають можливість орендувати ці ресурси на вимогу. Наприклад, AWS пропонує інстанси типу EC2 P3 з графічними процесорами NVIDIA Tesla, Google Cloud – інстанси з TPU, а Microsoft Azure – інстанси з GPU серії N. Важливо правильно налаштувати обчислювальні ресурси, щоб забезпечити ефективне тренування моделі.

Наступним кроком є встановлення середовища розробки в хмарі. Це включає встановлення необхідних бібліотек і фреймворків для машинного навчання, таких як TensorFlow, PyTorch або Keras. У хмарному середовищі це можна зробити за допомогою готових віртуальних машин або контейнерів з попередньо налаштованим програмним забезпеченням. Наприклад, у Google Cloud можна використовувати AI Platform Notebooks, а в AWS – SageMaker.

Після підготовки даних та налаштування обчислювальних ресурсів можна приступати до тренування моделі. Процес тренування включає в себе:

1. Дані завантажуються з об'єктного сховища у віртуальну машину або контейнер для подальшого використання в процесі тренування.
2. Визначення архітектури нейронної мережі: Вибір і налаштування архітектури нейронної мережі, включаючи кількість шарів, кількість нейронів у кожному шарі, активаційні функції та інші параметри.
3. Налаштування гіперпараметрів: Визначення і налаштування гіперпараметрів моделі, таких як швидкість навчання, розмір батчу, кількість епох та інші.
4. Запуск процесу тренування: Процес тренування моделі включає проходження через дані багато разів (епохи), коригування ваг за допомогою алгоритму зворотного поширення помилки і оптимізаційного алгоритму (наприклад, Adam або SGD).

5. Валідація моделі: Під час тренування модель періодично перевіряється на валідаційному наборі даних для оцінки її продуктивності та запобігання перенавчанню.

Після завершення тренування модель необхідно зберегти для подальшого використання. Модель зберігається в об'єктному сховищі у вигляді файлів, що містять структуру нейронної мережі та її ваги. У хмарному середовищі модель може бути деплоїрована на сервері для інференсу або використана для подальшого тренування.

На даному етапі модель “tf.keras.Sequential” піддається навчанню з використанням заздалегідь підготовлених даних. За цей процес відповідає модуль “train.py”. Цей модуль забезпечує навчання мережі, збереження моделі та вагових коефіцієнтів і спрощує взаємодію з навченою моделлю. Для навчання потрібен файл векторних даних, які були отримані на попередньому етапі. Під час процесу навчання проміжні результати кожної першої доби (це значення можна змінити) зберігаються у файлі. За замовчуванням загальна кількість ітерацій становить 1000.

Після завершення навчання мережі її якість оцінюється шляхом подачі всіх запитань на вхід навченої мережі та порівняння отриманих відповідей з еталонними відповідями навчальних зразків. Якщо точність оцінюваної моделі перевищує 75%, неправильні відповіді мережі зберігаються у окремому файлі.

Візуалізація процесу навчання нейронної мережі може бути представлена у вигляді графіків, де відображається залежність номеру епохи від значення похибки. Наступне зображення, яке представляє результати тренування нейронної мережі, демонструє точність розпізнавання об'єктів після завершення процесу тренування (рис. 4.5.).

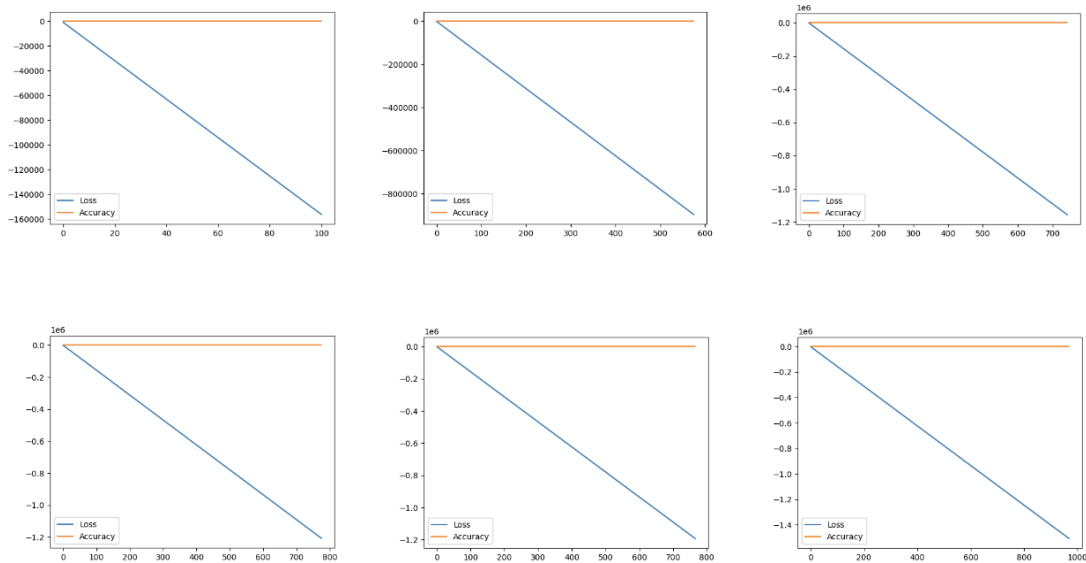


Рис. 4.5. Візуальне представлення тренування нейромережі

Повний структурований код розробленої нейронної мережі буде представлено в Додатку А. Таким чином, аналізуючи отримані результати, можна твердити, що використання нейронних мереж для прогнозування у сфері агровиробництва дає непогані результати. Навчена мережа здатна відтворити основні закономірності зміни часового ряду.

Використання штучного інтелекту для аналізу даних точного землеробства - це нова, активно розвиваючися галузь. Сільське господарство, як одна з ключових сфер промисловості, відчутно зміниться завдяки застосуванню штучного інтелекту, і його використання надалі зростатиме.

4.2. Надійність результатів вимірювань в кібер-фізичній системі

З погляду метрології, КФС володіє низкою параметрів, які відрізняють їх від звичних вимірювальних систем, які досить широко застосовуються сьогодні. По-перше, ці відмінності зазначено в таблиці 4.1.

Таблиця 4.1.

Характерні відмінності КФС

№	Відмінності	Коментарі
1.	Число вимірювальних каналів.	- в межах однієї кібер-фізичної системи це число може змінюватись в межах 100 – 100000.

2.	Вимірювальні канали.	- матимуть можливість здійснювати вимірювання різних типів величин за допомогою сенсорів, розпорощених просторово.
3.	Первинні перетворювачі (сенсори).	- здебільшого умови функціонування є жорсткими та нечіткими.
4.	КФС.	- під час функціонування кібер-фізичні системи будуть вдосконалюватися, диверсифікація вимірювальних величин буде збільшуватись.
5.	Хмарне середовище.	- хмарне середовище стає обов'язковою складовою КФС.
6.	Вимірювальна інформація.	- потребує передачі на значні відстані, як дротово, так і бездротово.
7.	Вимірювальні результати.	- потребують передачі згідно з протоколами передачі даних, а також забезпечується їх погодження з одиницями SI.
8.	Опрацювання інформації.	- потребує виконання дій у реальному часі.
9.	Можливість доступу до дачачів	- дуже часто ця можливість є обмеженою.

Зазначені вище характеристики КФС кидають нові виклики перед фахівцями в сфері вимірювань. Якщо не буде запропоновано рішень, то наступний рівень розвитку інформаційно-вимірювальних систем принесе ще більше проблем.

Особливістю КФС є надання вагомості алгоритмам обробки вимірювальної інформації (або, точніше, віртуальній моделі об'єкта/ситуації, яка реалізується за допомогою розглянутих алгоритмів).

Поряд з тим пропагується думка зменшення втручання людини в збирання та опрацювання даних, бо число вимірювальних каналів росте з такою швидкістю, що обслуговувати їх буде мало можливим. Варто зазначити, що основна інформація, яка піддається обробці, має вимірювальний характер.

Товаром в даній ситуації виступає вимірювальна інформація, для якої встановлюється вартість та ставляться вимоги споживача. Однією з найвагоміших вимог є рівень точності (невизначеність вимірювань та їх метрологічна надійність).

Вірогідність є оцінкою інформаційної метрологічної достовірності, що характеризує надійність. Метрологічна достовірність характеризує вимірювальні дані, які поступають для подальшого опрацювання під час процесу калібрування чи метрологічної перевірки. За умови не перевищення значення невизначеності результату вимірювань допустимих меж (зазначених в методиці вимірювань) вимірювальна інформація вважається надійною.

Умови функціонування сенсорів дуже складно чітко та строго встановити. В період між калібруваннями умови експлуатації можуть виходити за допустимі межі. Поза тим, характеристики засобів вимірювальної техніки можуть набувати зміни не співпадати з заявленими в ході метрологічної перевірки (табл. 4.2).

Таблиця 4.2.

Джерела зміни характеристик засобів вимірювальної техніки

№	Джерело	Пояснення
1.	Зміна характеристик вимірювального сенсора, чи каналу загалом	Амортизаційні процеси
2.	Зміна характеристик середовища, тобто умов вимірювання	Наприклад, зросла температура середовища
3.	Зміна характеристик досліджуваного об'єкта	Зміна електромагнітних характеристик об'єкта
4.	Комбінація різних джерел	

Отже, інформація, яку ми отримуємо з засобу вимірювальної техніки, буде недостовірною. В свою чергу, ця ситуація потенційно може призвести до виготовлення невідповідної продукції, чи настання небезпечної ситуації на виробництві.

За результатами досліджень встановлено, що 60% небезпечних ситуацій, які стаються на виробництві, спричинені джерелами, зазначеними у таблиці вище, та являють собою поступові збої. Звичкі підходи до процедури калібрування чи метрологічної перевірки не дають очікуваного ефекту, щоб позбутися типових помилок. Як виявилось, для 12% засобів вимірювальної техніки, які проходять процедуру метрологічної перевірки під час експлуатації, похибка виходить за допустимі значення.

Варто зазначити, що аспект метрологічної надійності засобів вимірювальної техніки є вужчим за аналогічний для вимірювальної інформації загалом. Навіть, використавши метрологічно надійний ЗВТ можна отримати недостовірну вимірювальну інформацію.

Найкращим виходом з ситуації є роботизація процесів вимірювання, виробничих процедур, тобто активне впровадження Промисловості 4.0., яка і покликана для впровадження нового покоління інформаційно-вимірювальних систем, тобто КФС.

Втрачають актуальність існуючі підходи, такі як:

- використання традиційних методів метрологічної перевірки для оцінки метрологічних характеристик засобу вимірювань,
- зменшення калібрувальних інтервалів для забезпечення точності результатів.

З точки зору досягнення високого рівня безпеки необхідно забезпечити стабільний неперервний процес функціонування КФС на протязі великого часового проміжку (наприклад, 10 років). В зв'язку з цим зараз ведуться активні роботи щодо зменшення рівня складності процедури метрологічної перевірки.

Розроблення кібер-фізичних систем веде до зростання часових періодів між технічною підтримкою вбудованих засобів вимірювань та обладнання для

опрацювання даних. В зв'язку з цим з'являються нові вимоги до забезпечення достовірності вимірювальних даних а отже, інтенсифікується діяльність щодо розроблення методів їх реалізації. Результати метрологічних невідповідностей можуть бути не виправними.

Дуже часто розробники вимірювальної техніки наголошують на тому, що виробники сенсорів дають гарантії на метрологічні характеристики своєї продукції. Отже, вагомий внесок у зниження метрологічної надійності вносять процедури опрацювання вимірювальної інформації.

Отже, сьогодення вимагає нових підходів до забезпечення достовірності вимірювальних даних. Сучасний стан забезпечення єдності вимірювань повинен брати до уваги стрімке зменшення ціни та пришвидшення ступення втрати актуальності сенсорної бази.

Передбачається, що строк служби кібер-фізичних систем може досягати 10-ків років, отже, виникає потреба осучаснювати їх в процесі функціонування. Таке поняття, як періодична метрологічна перевірка під час експлуатації, стане неактуальним. Його замінить процес перманентного послідовного вилучення неактуальних складових та заміна їх на сучасні метрологічно перевірені складові.

Відповідно, метрологічна надійність складових кібер-фізичних систем має зрости [102]. Саме політика виробництва організації і пришвидшені випробування мають стати ключовим пунктом у забезпеченні високих вимог до метрологічної надійності.

Специфікації підприємства-виробника мають обов'язково містити вимоги до метрологічної надійності вимірювального обладнання, зокрема сенсорної бази. Це дозволить уникнути появи браку, небезпечних ситуацій та економічних збитків через вихід з ладу та погіршення метрологічних характеристик вимірювального обладнання. Як наслідок, ступінь відповідальності розробників кібер-фізичних систем збільшиться.

Без сумніву, встановлення високих вимог до надійності вимірювальних компонентів та підвищення її точності є надзвичайно вагомим. Але оцінювання та контроль надійності вимірювальних даних і надалі є невирішеною задачею.

До виникнення збоїв у функціонуванні КФС можуть призвести не лише метрологічні невідповідності. Тому КФС треба розглядати загалом з точки зору забезпечення єдності вимірювань (його метрологічного забезпечення).

Характерні відмінності кібер-фізичної системи з точки зору забезпечення єдності вимірювань.

Кібер-фізичні системи оперують великими об'ємами інформації, яка має не лише вимірювальний характер, але й описує процеси передавання, опрацювання, зберігання даних та властивості роботи системи.

Вище зазначалося, що вимірювальні дані можуть мати недостовірний характер та бути неточними, але попередні дослідження окремих сенсорів дали можливість зробити висновок, що існують великі ресурси для розроблення КФС, яка оперуватиме високим ступенем достовірності даних. Такі системи мають відповідні параметри, а саме:

- ідентифікація та локалізація відхилень на початкових етапах їх зародження, що дасть можливість здійснити предиктивний аналіз стану системи (виявлення тенденцій зниження чутливості, погіршення рівня сприйняття тощо);
- впровадження технологій паралельного резервування вимірювальних компонентів КФС;
- врахування інформації з інших джерел та компонент кібер-фізичної системи.

Для досліджуваних об'єктів різної природи, первинних перетворювачів, систем передачі інформації та її опрацювання важливою задачею є передбачення та прогноз їх характеристик та режиму функціонування. При цьому вагомою проблемою є розвиток коригувальних алгоритмів та процедур, які забезпечать безперебійну роботу КФС. Для цього пропонується реалізувати наступний алгоритм дій:

- дескриптивний аналіз того, що відбулося;
- з'ясування причин та джерел виникнення невідповідності;
- предиктивний аналіз, тобто які можуть бути наслідки;
- формування рекомендацій щодо виправлення ситуації.

Вищенаведений алгоритм можна адаптувати до метрологічних об'єктів, а саме сенсорів, первинних перетворювачі тощо:

- забезпечення способів ідентифікації та локалізації джерел збільшення невизначеності результатів шляхом розвитку нових способів та процедур, які можуть бути імплементовані в вимірювальне обладнання;

- встановлення джерел збільшення невизначеності;

- розрахунок часового періоду, через який значення невизначеності результатів може перейти встановлені в документації границі;

- оцінка ресурсів та ступеня важливості коригування отриманих результатів, а саме:

- ✓ застосування процедур коригування за умови, що вони є необхідними і можливими;

- ✓ застосування процедур оповіщення користувачів про прогнозовану метрологічну невідповідність за умови, що коригування є неможливим через певні причини.

На основі наведених аргументів доцільно обґрунтувати створення теорії самоперевіряння та самокалібрування вимірювального обладнання, які полягають у автоматизованому перевірянні спроможності її належного функціонування з метрологічної точки зору. Такий підхід дасть можливість ідентифікувати та контролювати вихід метрологічних параметрів за допустимі межі, встановлені на основі раніше здійснених процедур метрологічних перевірок. Прогнозування часового періоду, в межах якого метрологічні параметри вимірювальних каналів знаходитимуться в допустимих межах відповідно до нормативних документів, є можливим на основі опрацювання результатів самоперевіряння та самокалібрування вимірювального обладнання під час його використання. В певних ситуаціях застосування самоперевіряння та самокалібрування дає можливість скоригувати джерело невизначеності, а в інших - змінити алгоритм функціонування КФС з метою покращення параметрів точності. Застосування такого підходу дозволяє довести правомірність зростання терміну роботи КФС,

(не замінюючи сенсорний блок) в порівнянні з КФС, яка немає можливостей метрологічної самоперевірки.

4.3. Оцінювання екологічних аспектів вирощування зернових культур за допомогою технології SimaPro

Результати моніторингу стану ґрунтів за допомогою КФС можуть бути доповнені оцінкою впливу агровиробництва на довкілля, що в свою чергу може стати важливою опцією під час прийняття важливих управлінських рішень [103]. Для оцінювання екологічних аспектів виробництва доцільно використовувати технологію аналізу життєвого циклу, що й реалізовано для виробництва зернової продукції за допомогою програмного забезпечення SimaPro.

Виробництво їжі має збільшуватися, щоб прогодувати зростаюче населення світу, що веде до збільшення негативного впливу виробництва харчових продуктів на навколишнє середовище.

Щоб подолати ці наслідки, потрібно вживати кардинальних заходів щодо розвитку агровиробництва, що в свою чергу може бути забезпечене шляхом формування управлінських рішень за результатами оцінювання життєвого циклу (Life Cycle Assessment, LCA). Важливими впливами, пов'язаними з агровиробництвом, є втрата біорізноманіття від зменшення площ агропромислового призначення; збільшення шкідливих викидів за рахунок здійснення робіт в агровиробничому секторі, температурне забруднення та полютанти, які з'являються в результаті внесення хімічних добрив, а також отрутохімікатів, які необхідні для оберігання рослин від хвороб та шкідників

Методика проведення аналізу за допомогою SimaPro містить наступні кроки :

- 1) Вибір типу дослідження – збирання і життєвий цикл.
- 2) Формування назви Life Cycle Assessment – Зерно.
- 3) Встановлення числа об'єктів – один.
- 4) Встановлення та структурування ресурсів, які необхідні для продукування об'єкта дослідження – зерна пшениці (200-250кг/га).

5) Здійснення процедури вибору серед представлених альтернатив, саме тих компонентів, які необхідні під час вирощування зерна пшениці:

- агротранспорт – трактор та комбайн з відповідною кількістю пального (13л/га);
- машина для перевезення зерна з відповідною кількістю пального (10л/100км);
- внесені добрива для продукування зернової продукції (селітра – 300кг/га, $MnSO_4$ – 90кг/га), чи по кожному компоненту: азот - 160-190кг/га, фосфор - 55-70кг/га, калій - і 80 - 100кг/га;
- отрутохімікати (Tribenuron metyl 18-35г/га).

6) Після здійснення процедури вибору усіх ресурсів зі вказанням їх кількості, треба вибрати необхідні процеси для поставленого завдання – вирощування зерна пшениці.

Проаналізувавши основні технологічні етапи вирощування пшениці, встановили основні види робіт, їх часову послідовність, та джерела і кількість засобів, які необхідні для реалізації процесу. Зокрема, вирощування зерна пшениці передбачає процедуру транспортування.

7) Тип відходів – органічні відходи.

8) Вхідна інформація, необхідна для здійснення дослідження життєвого циклу, міститься на рис. 4.6.

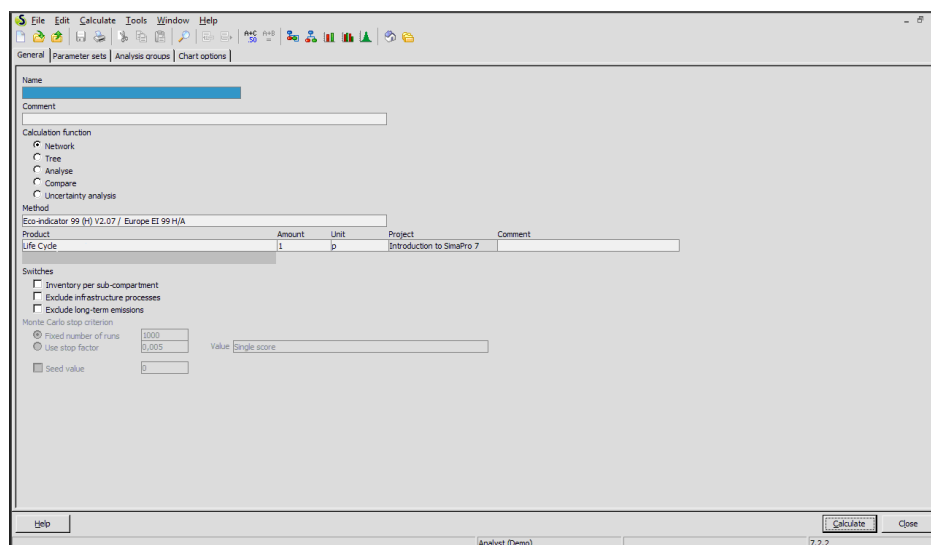


Рис. 4.6. Вхідна інформація

9) Далі здійснюється перевіряння коректності усієї вхідної інформації. Наступним кроком є побудова дерева процесів з метою встановлення критичних місць дослідження (рис. 4.7.). На рисунку можна відслідкувати інтенсивність впливу на навколишнє середовище під дією встановлених технологічних етапів (смуги червоним кольором).

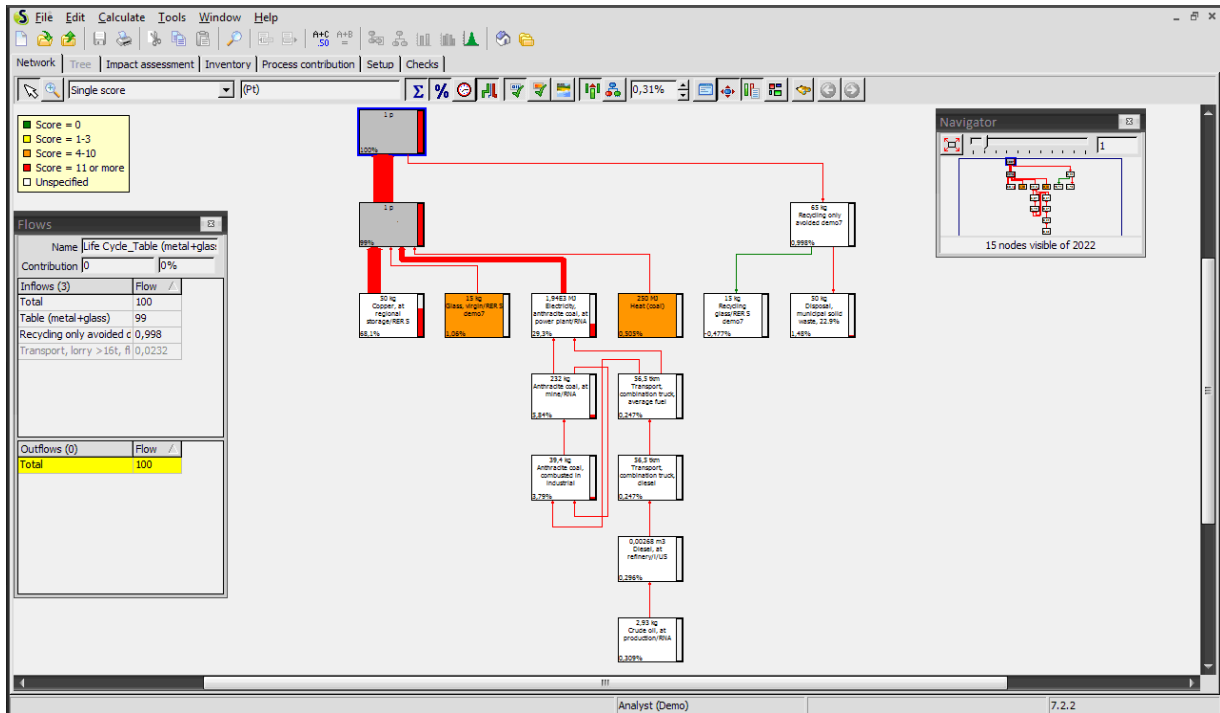


Рис. 4.7. Вирощування зерна пшениці - дерево процесів

Програмний ресурс SimaPro дозволяє ідентифікувати вагомість процесів та структурувати їх ступенем впливу на довкілля. Отже, критичними точками у процесі вирощування пшениці є внесення добрив та отрутохімікатів (pesticides). Така ситуація складається внаслідок хімічної природи застосованих добрив та отрутохімікатів. Далі ми можемо розрахувати екологічний індекс на основі відсотків та екологічних балів шляхом вмикання та вимикання процентної функції. В такий спосіб за результатами досліджень задіяних процесів було сформовано життєвий цикл вирощування пшениці [104]. Розлогість дерева процесів дозволяє візуалізувати варіанти життєвого циклу.

10) Наступним кроком після аналітичного дослідження життєвого циклу є оцінювання ступеня впливу нашого об'єкта та виробничих етапів на параметри

довкілля. Процедура оцінювання передбачає п'ять кроків: встановлення вагомості, характеризування, нормування та оцінку нанесеного збитку

Процес аналізу складається з таких п'яти етапів: зважування, характеризування, нормалізація, оцінювання шкоди та визначення екологічного індексу (рис. 4.8 - 4.12).

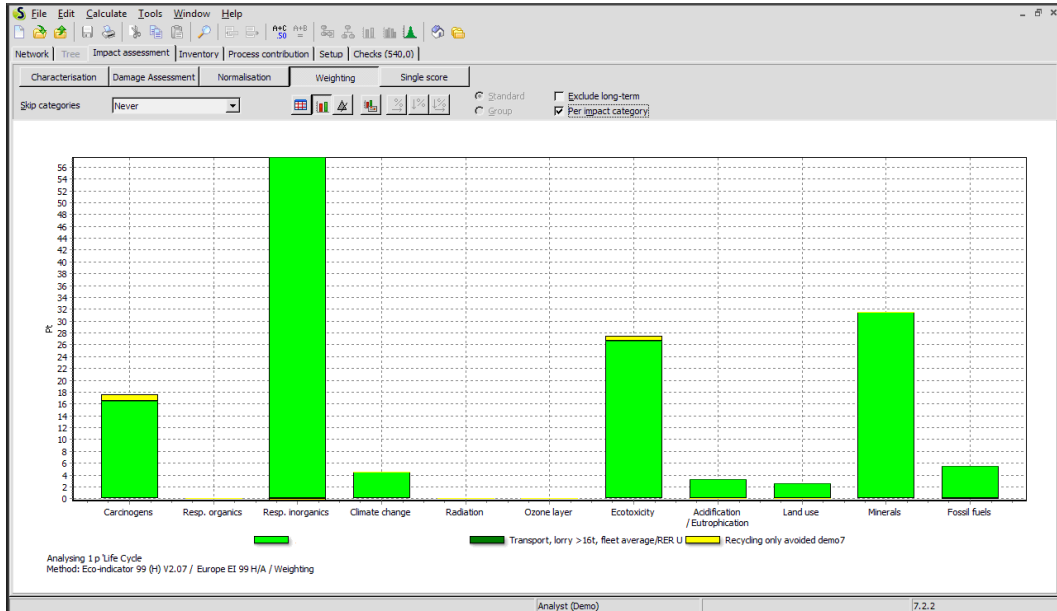


Рис. 4.8. Встановлення вагомості

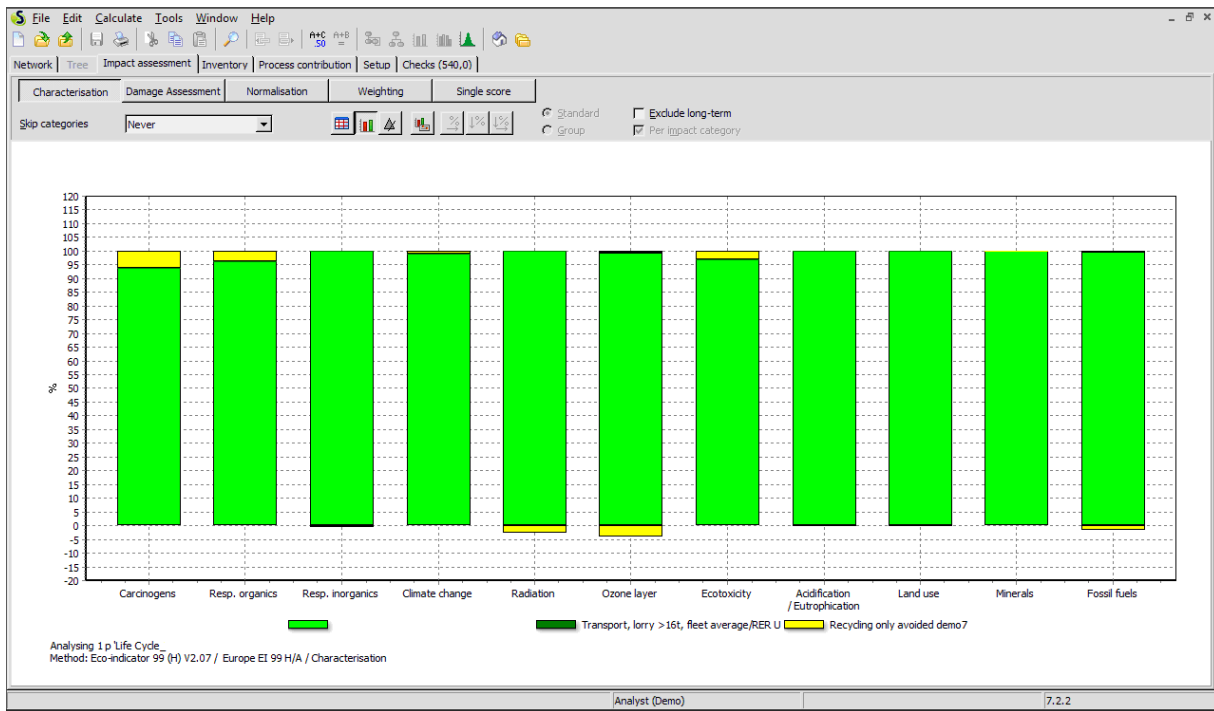


Рис. 4.9. Характеризування

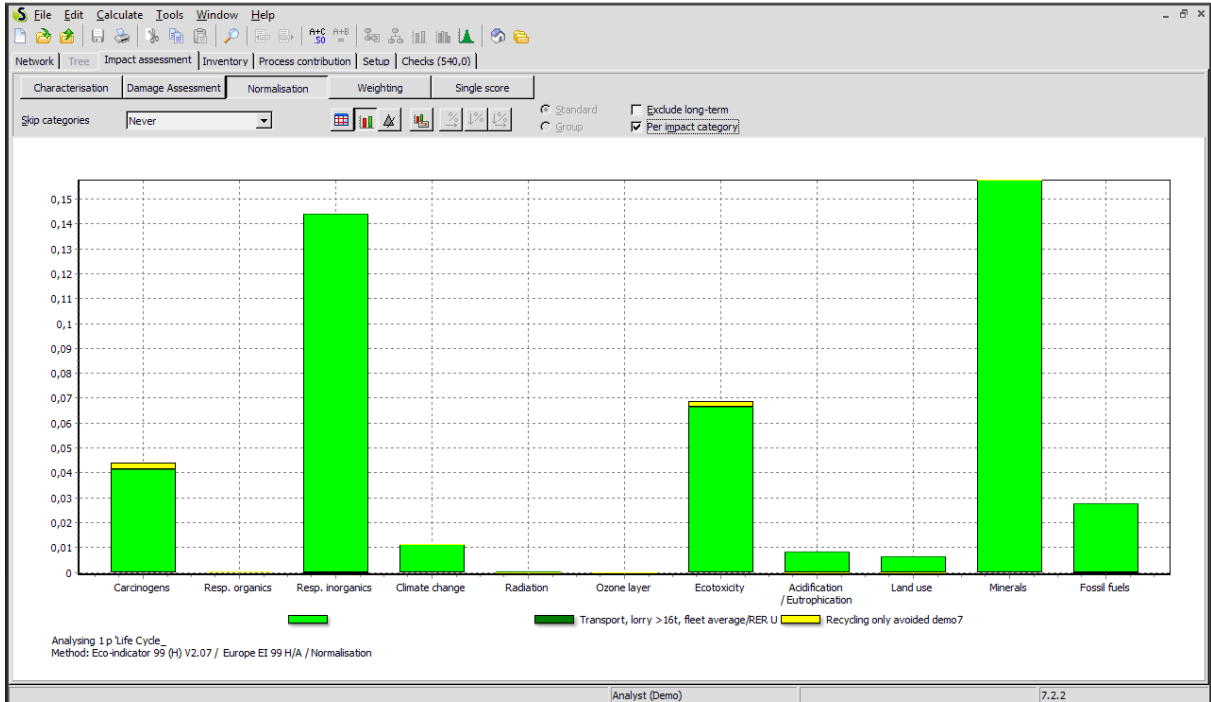


Рис.4.10. Нормування

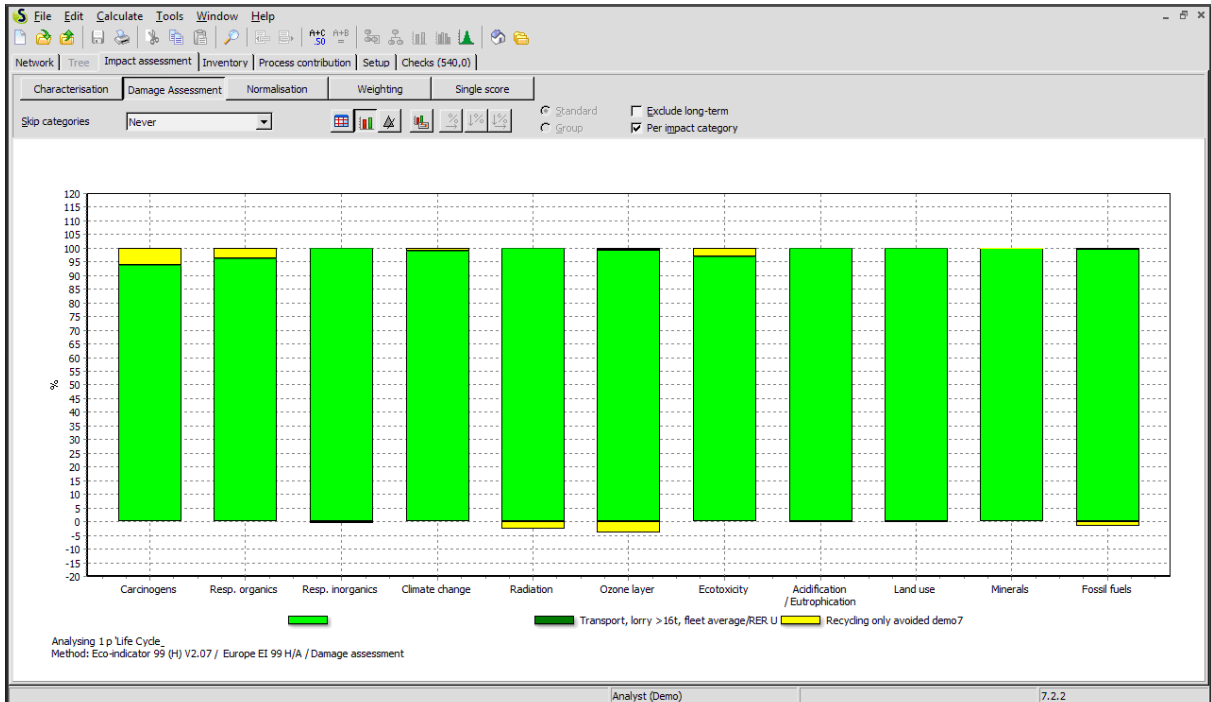


Рис. 4.11. Оцінка нанесеного збитку

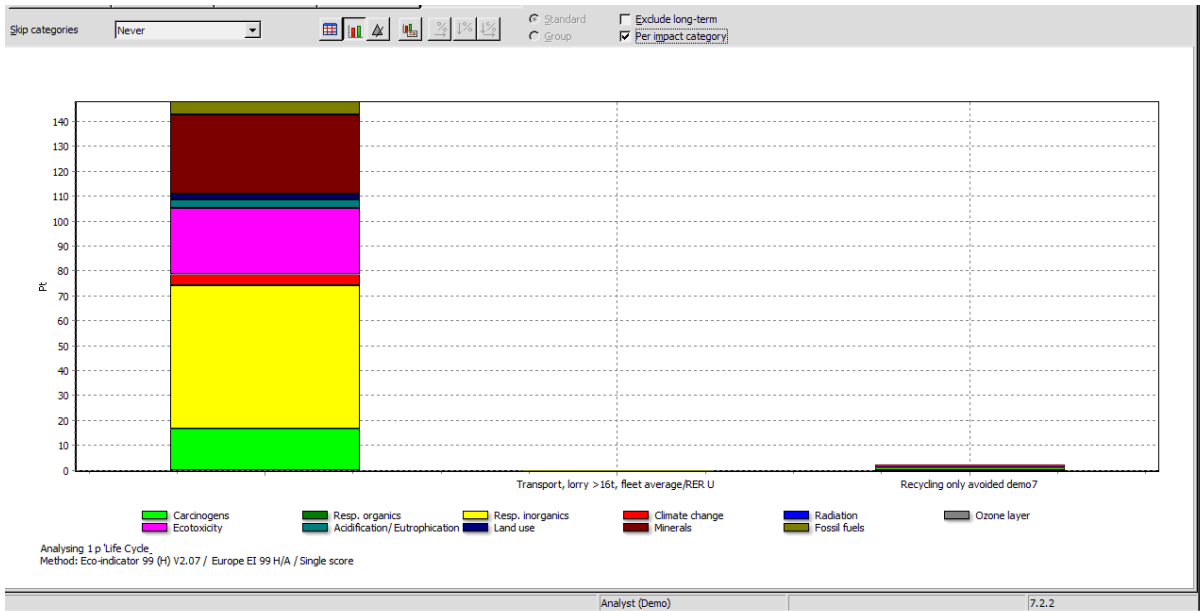


Рис. 4.12. Екологічний індекс

11) Кількісний вміст компонентів, розрахованих відповідно до нашої задачі, міститься у таблиці (рис. 4.13 – 4.14).

No	Substance	Compartment	Unit	Total	Wood table	Transport, lorry >16t, fleet	Recycling only avoided demo7
1	Aluminium, 24% in bauxite, 11% in crude ore, in ground	Raw	mg	669	141	188	341
2	Anhydrite, in ground	Raw	µg	3,16	3,3	4,4	-4,54
3	Barite, 15% in crude ore, in ground	Raw	mg	759	200	267	292
4	Baryte, in ground	Raw	mg	713	713	x	x
5	Basalt, in ground	Raw	mg	904	14,8	19,8	869
6	Bauxite, in ground	Raw	mg	109	109	x	x
7	Borax, in ground	Raw	µg	6,87	0,753	1	5,11
8	Cadmium, 0.30% in sulfide, Cd 0.18%, Pb, Zn, Ag, In, in ground	Raw	mg	1,42	0,608	0,81	x
9	Calcite, in ground	Raw	g	-225	6,09	8,12	-239
10	Carbon dioxide, in air	Raw	lb	135	135	0,00167	0,00656
11	Carbon, in organic matter, in soil	Raw	µg	312	134	178	x
12	Chromium, 25.5% in chromite, 11.6% in crude ore, in ground	Raw	mg	159	12	15,9	131
13	Chromium, in ground	Raw	mg	4,84	4,84	x	x
14	Chrysotile, in ground	Raw	µg	-77,1	3,5	4,66	-85,2
15	Cinnabar, in ground	Raw	µg	-1,69	0,309	0,412	-2,41
16	Clay, bentonite, in ground	Raw	g	-39,6	0,187	0,126	-39,9
17	Clay, unspecified, in ground	Raw	g	20,2	2	2,33	15,9
18	Coal, 18 MJ per kg, in ground	Raw	g	29,6	29,6	x	x
19	Coal, 26.4 MJ per kg, in ground	Raw	kg	5,1	5,1	x	x
20	Coal, 29.3 MJ per kg, in ground	Raw	kg	183	183	x	x
21	Coal, brown, 8 MJ per kg, in ground	Raw	g	35,6	35,6	x	x
22	Coal, brown, in ground	Raw	g	-14,8	3,61	4,81	-23,2
23	Coal, hard, unspecified, in ground	Raw	g	-829	7,56	10,1	-846
24	Cobalt, in ground	Raw	µg	5,32	1,27	1,68	2,38
25	Colemanite, in ground	Raw	mg	16,8	0,324	0,433	16,1
26	Copper, 0.99% in sulfide, Cu 0.36% and Mo 8.2E-3% in crude ore, in ground	Raw	mg	19,4	2,27	3,02	14,1
27	Copper, 1.18% in sulfide, Cu 0.39% and Mo 8.2E-3% in crude ore, in ground	Raw	mg	107	12,4	16,5	78,3
28	Copper, 1.42% in sulfide, Cu 0.81% and Mo 8.2E-3% in crude ore, in ground	Raw	mg	28,4	3,28	4,37	20,7
29	Copper, 2.19% in sulfide, Cu 1.83% and Mo 8.2E-3% in crude ore, in ground	Raw	mg	142	16,6	22,1	103
30	Copper, in ground	Raw	mg	54,4	54,4	x	x

Analysing 1 p Life Cycle, Method: Eco-indicator 99 (H) V2.07 / Europe EI 99 H/A

Рис. 4.13. Кількісний вміст компонентів

No	Process	Project	DQI	Unit	Total	Wood table	Transport, lorry >16t, fleet	Recycling only avoided demo7
	Total of all processes			Pt	30,7	29,6	0,0232	1,1
1	Electricity, anthracite coal, at power plant/RNA	USLCl		Pt	20,6	20,6	x	x
2	Anthracite coal, combusted in industrial boiler/RNA	USLCl		Pt	2,9	2,9	x	x
3	Anthracite coal, at mine/RNA	USLCl		Pt	1,95	1,95	x	x
4	Slack wax, at plant, US SE/US	USLCl		Pt	1,66	1,66	x	x
5	Disposal, municipal solid waste, 22.9% water, to sanitary landfill/CH 5 demo7	Introduction to SimaPro 7		Pt	1,37	x	x	1,37
6	Crude oil, at production/RNA	USLCl		Pt	0,717	0,717	x	x
7	Steel, billets, at plant/US	USLCl		Pt	0,525	0,525	x	x
8	Natural gas, at extraction site/US	USLCl		Pt	0,423	0,423	x	x
9	Electricity, bituminous coal, at power plant/US	USLCl		Pt	0,194	0,194	x	x
10	Transport, train, diesel powered/US	USLCl		Pt	0,113	0,113	x	x
11	Transport, combination truck, diesel powered/US	USLCl		Pt	0,102	0,102	x	x
12	Natural gas, processed, at plant/US	USLCl		Pt	0,0888	0,0888	x	x
13	Chemicals inorganic	LCA Food DK		Pt	0,051	0,051	x	x
14	Bituminous coal, at mine/US	USLCl		Pt	0,0412	0,0412	x	x
15	Natural gas, combusted in industrial boiler/US	USLCl		Pt	0,0301	0,0301	x	x
16	Diesel, combusted in industrial equipment/US	USLCl		Pt	0,0301	0,0301	x	x
17	Transport, ocean freighter, residual fuel oil powered/US	USLCl		Pt	0,0275	0,0275	x	x
18	Oriented strand board product, US SE/kg/US	USLCl		Pt	0,0213	0,0213	x	x
19	Diesel, at refinery/US	USLCl		Pt	0,0208	0,0208	x	x
20	Diesel, combusted in industrial boiler/US	USLCl		Pt	0,0168	0,0168	x	x
21	Electricity, natural gas, at power plant/US	USLCl		Pt	0,0157	0,0157	x	x
22	Residual fuel oil, combusted in industrial boiler/US	USLCl		Pt	0,0156	0,0156	x	x
23	Operation, lorry >16t, fleet average/RER U	Ecoinvent unit processes		Pt				
24	Dry veneer, at plywood plant, US PNW/kg/US	USLCl		Pt	0,0105	0,0105	x	x
25	Electricity, lignite coal, at power plant/US	USLCl		Pt	0,00789	0,00789	x	x
26	Crude oil, at production onshore/RAF U	Ecoinvent unit processes		Pt				
27	Gasoline, combusted in equipment/US	USLCl		Pt	0,00537	0,00537	x	x
28	Electricity, residual fuel oil, at power plant/US	USLCl		Pt	0,00415	0,00415	x	x
29	Crude oil, at production onshore/RME U	Ecoinvent unit processes		Pt				

Рис. 4.14. Кількісний вміст компонентів (продовження)

12) Ще одним важливим етапом дослідження життєвого циклу став процес характеризування. Його реалізація полягає у аналізі входів та виходів, що розпорошуються між 12-ма впливними категоріями згідно з Ця групи входів та виходів, які розділяються між дванадцятьма категоріями впливу відповідно до методу - Есо-індикатор 99. Процес характеризування демонструє відносний ступінь впливу шкідливих факторів на навколишнє середовище та ваговий вклад в екологічні небезпеки. Передбачається врахування 11-ти впливних категорій, кожен з яких пов'язаний з етапами вирощування зернової продукції, та встановлення їх питомого внеску. Сюди відносять кліматичні зміни, рівень радіації, ступінь руйнування озонового шару, наявність токсикантів, вплив на землеустрій, ступінь окислення ґрунтів, радіаційний фон, пошкодження озонового шару, концентрація канцерогенів.

Важливим етапом аналізу життєвого циклу вирощування зерна пшениці є окрема оцінка рівня його впливу на здоров'я населення, стан довкілля та ступінь використання ресурсів (рис. 4.15).

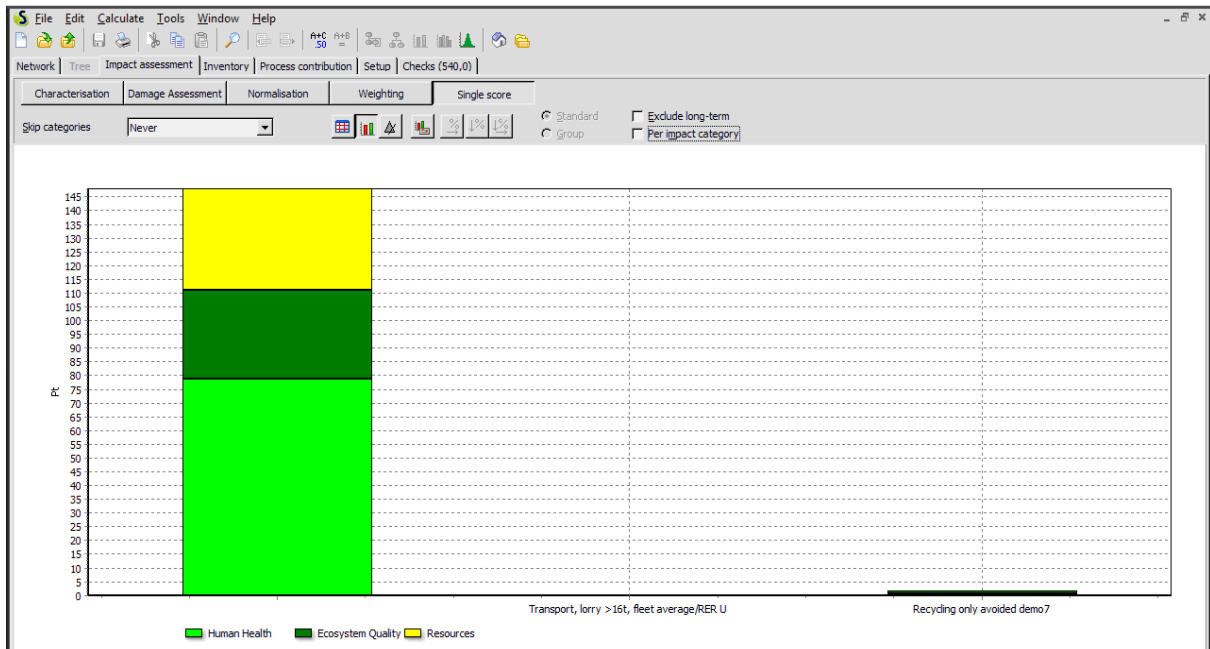


Рис. 4.15. Оцінка рівня впливу процесів на здоров'я населення (Human Health), стан довкілля (Ecosystem Quality), та ступінь використання ресурсів (Resources)

З метою агрегації інформації у впливі на окремі опції-категорії, застосовуються розрахункові алгоритми. Останні враховують екологічні моделі з ціллю порівняння різноманітних внесків у виникнення тих самих екологічних небезпек. Екологічні моделі використовують принцип еквівалентності факторів для досягнення мети моделювання.

Далі маємо подібну процедуру оцінювання ступеня впливів для таких етапів методики, як оцінювання нанесених збитків (шкоди), нормування, розрахунок екологічного індексу.

З метою нормалізування результатів та кращого їх сприйняття доцільно всі впливні фактори згрупувати у вигляді трьох категорій:

- 1) здоров'я населення (сюди відносяться кліматичні зміни, рівень радіації, пошкодження озонового шару, екологічна токсичність, канцерогенні та респіраторні компоненти);
- 2) стан екосистеми (умови використання земель, ступінь підкислення ґрунтів);
- 3) рівень використання природних ресурсів (викопне паливо та мінерали).

Запропоноване вище структурування є умовним, проте воно оптимізує аналітичну процедуру. Тобто відповідно до рис. 4.15 є можливість здійснити оцінювання життєвого циклу вирощування пшениці на основі показників, згрупованих у три групи.

Перевагою використання методології оцінки еко-індикатора є формування єдиного комплексного показника (екологічного індексу) для оцінювання життєвого циклу. Екологічний індекс розраховується шляхом додавання частинних індексів.

На основі аналізу отриманих результатів можна сформулювати висновок, а саме: на здоров'я людей та довкілля найбільший вплив мають неправильна стратегія поведінки з відходами та неоптимальне витрачання природо ресурсів.

Висновки до розділу 4

1. Розроблено прогностичну модель зміни стану ґрунтів на основі використання нейромереж та хмарних технологій, яка передбачає прогнозування здійснення основних етапів агровиробництва на прикладі вирощування зерна пшениці та можливої його врожайності, яка забезпечується ресурсами кліматичних факторів, властивостей ґрунту, добрив, засобів захисту посівів тощо.

2. Виокремлено особливості КФС, які відрізняють їх від звичайних багатоканальних вимірювальних систем. Досліджено поняття «метрологічної надійності вимірювальної інформації», що є ширшим за поняття «метрологічної надійності засобу вимірювальної техніки».

3. Здійснено аналіз екологічної складової процесу вирощування пшениці. З використанням спеціальної програми SimaPro проведено дослідження життєвого циклу агровиробництва зерна, на основі якого розраховано екологічний індекс такої діяльності та встановлено найвпливовіші фактори впливу на довкілля, врахування яких дозволить оптимізувати процес прийняття рішень кібер-фізичною системою моніторингу ґрунтів та мінімізувати вплив на еко-системи.

ВИСНОВКИ

1. За результатами аналітичного дослідження впливних факторів на параметри ґрунтів сформовано найважливіші показники, оціночні критерії та процеси, що контролюються при проведенні оперативного моніторингу ґрунту, та впливають на зростання ступеня їх продуктивності.

2. Здійснено дослідження характеристик сучасного інструментарію для моніторингу стану ґрунтів та запропоновано шляхи їх вдосконалення для малих агрогосподарств в сучасних умовах шляхом розроблення недорогої кібер-фізичної системи моніторингу ґрунтів, використання якої підвищить ефективність агровиробництва малих господарств.

3. Запропоновано класифікаційні ознаки та здійснено класифікацію кібер-фізичних систем та ризиків, пов'язаних з їх функціонуванням. Запропоновано визначення терміну «кібер-фізичні системи» та доведено доцільність його імплементування у вітчизняну нормативну базу.

4. Проаналізовано технологію виробництва агропродукції (на прикладі вирощування зерна пшениці) з позицій створення кібер-фізичної системи, структуровано показники та тип інформації, яка необхідна для роботи кібер-фізичної системи на кожному етапі, на основі опрацювання якої повинні прийматись управлінські рішення щодо моніторингу стану ґрунтів під час агровиробництва.

5. Запропоновано та реалізовано апаратне та програмне забезпечення кібер-фізичної системи моніторингу основних параметрів ґрунтів.

6. Проведено дослідження метрологічних характеристик КФС моніторингу ґрунтів. Запропоновано методику верифікації КФС моніторингу ґрунтів та проведено дослідження непевностей результатів вимірювання основних параметрів ґрунту – температури, вологості, провідності (щільності) та вмісту азоту, фосфору і калію.

7. Здійснено оцінювання ризиків функціонування КФС. Запропоновано розділити їх на ризики інформаційного характеру та метрологічні ризики, оскільки КФС – це інформаційно-вимірювальна система. Запропоновано

класифікаційні ознаки та здійснено структурування ризиків КФС як інформаційної системи та її метрологічних ризиків. Було розроблено рекомендації щодо коригувальних дій, застосування яких дасть можливість мінімізувати ризики.

8. Розроблено прогностичну модель зміни стану ґрунтів на основі використання нейромереж та хмарних технологій, яка передбачає прогнозування здійснення основних етапів агровиробництва на прикладі вирощування зерна пшениці та можливої його врожайності, яка забезпечується ресурсами кліматичних факторів, властивостей ґрунту, добрив, засобів захисту посівів тощо.

9. На основі параметрів виробництва зернової продукції здійснено дослідження його життєвого циклу за допомогою програмного забезпечення SimaPro, долучення ресурсів якого до КФС моніторингу стану ґрунтів дасть можливість прогнозувати вплив діяльності людини на довкілля в агросекторі.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ЛІТЕРАТУРНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Бортник К.Я., Ольшевський О.В., Пащук В.Ю. Інтернет речей та як він змінить наше життя у майбутньому. Комп'ютерно-інтегровані технології: освіта, наука, вир-во. 2018. № 30/31. С. 14–18.
2. Koohang, C. S. Sargent, J. H. Nord, and J. Paliszkievicz, “Internet of things (IOT): From Awareness to continued use,” *International Journal of Information Management*, вип. 62, с. 102442, 2022. [Електронний ресурс]. Режим доступу:doi:10.1016/j.ijinfomgt.2021.102442. Дата звернення: 13 черв. 2023.
3. Коваль В.В., Замлинський В.А. Ринок послуг Інтернету речей (IoT): сучасний стан та обмеження розвитку. Трансформація економіки та права в умовах системних реформ України : зб. наук. пр. за матеріалами всеукр. наук.-практ. конф. (м. Одеса, 27 жовтня 2017 року) / МОН України, Одес. торг.-екон. ін-т [та ін.]; редкол.: Квач Я.П. [та ін.]. Одеса, 2017. С. 35–37.
4. Рябошлик В. Огляд сучасних технологічних проривів і нових перспектив (від інтернету людей до інтернету речей). *Економіст*. 2017. № 6. С. 17–22.
5. Смолин О.І., Олексюк В.П. Інтернет речей як технологічний феномен ХХІ століття. Сучасні інформаційні технології та інноваційні методики навчання: досвід, тенденції, перспективи : матеріали IV міжнар. наук.-практ. інтернет-конф. (м. Тернопіль, 30 квітня 2020 року). Тернопіль, 2020. С. 147–149.
6. Антонова Г.В., Кедич А.В., Ковирьова О.В. Інтернет речей та бездротові смарт-мережі в точному землеробстві. Комп'ютерні засоби, мережі та системи. 2019. № 18. С. 119–127.
7. Баранов О.А. Інтернет речей і охорона здоров'я. Інтернет речей: теоретико-методологічні основи правового регулювання : монографія. 2-ге вид. Харків, 2018. Т. 1: Сфери застосування, ризики і бар'єри, проблеми правового регулювання. С. 24–36.
8. Баранов О.А. Інтернет речей і сільське господарство. Інтернет речей: теоретико-методологічні основи правового регулювання : монографія. 2-ге вид. Харків, 2018. Т. 1: Сфери застосування, ризики і бар'єри, проблеми правового регулювання. С. 65–71.

9. Баранов О.А. Интернет речей і транспорт. Интернет речей: теоретико-методологічні основи правового регулювання : монографія. 2-ге вид. Харків, 2018. Т. 1. С. 92–96.

10. Гненний А.П., Гордієнко Ю.Г. Интернет речей як головний чинник впровадження ІТ-технологій на сучасному підприємстві. Вимірювальна та обчислювальна техніка в технол. процесах. 2018. № 1. С. 94–98.

11. Дідич З. «Інтернет речей»: можливості та перспективи його використання у сільському господарстві України. Аграрна економіка. 2018. Т. 11, № 1/2. С. 88–93.

12. Журавель В.І., Ткачук Т.Ю., Борковський Д.С. Интернет речей у системі медичної допомоги: можливості та безпека. Актуальні проблеми клініч. та профілакт. медицини. 2019. Т. 3, № 1/2. С. 5–12.

13. Коцюбівська К., Прісич В., Яворський О. Впровадження технологій інтернету речей під час створення системи «Розумний дім». Цифрова платформа. Інформаційні технології в соціокультурній сфері. 2019. Т. 2, № 2. С. 136–143.

14. L. Hou, S. Zhao, X. Xiong, K. Zheng, P. Chatzimisios, M. S. Hossain, and W. Xiang, “Internet of Things cloud: Architecture and implementation,” *IEEE Commun. Mag.*, vol. 54, no. 12, pp. 32–39, Dec. 2016.

15. G. Manogaran, R. Varatharajan, D. Lopez, P. M. Kumar, R. Sundarasekar, and C. Thota, “A new architecture of Internet of Things and big data ecosystem for secured smart healthcare monitoring and alerting system,” *Future Gener. Comput. Syst.*, vol. 82, pp. 375–387, May 2018.

16. A. Arslan, N. McCarthy, L. Lipper, S. Asfaw, A. Cattaneo, and M. Kokwe, “Climate smart agriculture? Assessing the adaptation implications in Zambia,” *J. Agricult. Econ.*, vol. 66, no. 3, pp. 753–780, 2015.

17. M. Taylor, “Climate-smart agriculture: What is it good for?” *J. Peasant Stud.*, vol. 45, no. 1, pp. 89–107, 2018.

18. T. B. Long, V. Blok, and I. Coninx, “Barriers to the adoption and diffusion of technological innovations for climate-smart agriculture in Europe: Evidence from

The Netherlands, France, Switzerland and Italy,” *J. Cleaner Prod.*, vol. 112, pp. 9–21, Jan. 2016.

19. Dong, T.; Xiao, S.; He, Y.; Tang, Y.; Nie, P.; Lin, L.; Qu, F.; Luo, S. Rapid and Quantitative Determination of Soil Water-Soluble Nitrogen Based on Surface-Enhanced Raman Spectroscopy Analysis. *Appl. Sci.* 2018; 8 (5), 701.

20. Xing, Z.; Du, C.; Tian, K.; Ma, F.; Shen, Y.; Zhou, J. Application of FTIR-PAS and Raman Spectroscopies for the Determination of Organic Matter in Farmland Soils. *Talanta.* 2016;158, 262–269.

21. Yingzheng Fan, Xingyu Wang, Thomas Funk, Ishrat. A Critical Review for Real-Time Continuous Soil Monitoring: Advantages, Challenges, and Perspectives. *Environ. Sci. Technol.* 2022; 56(19), 13546–13564.

22. M. A. Mashud, Md. Shamim Hossain, M. Nurul Islam, Md. Serajul Islam. Design and Development of PC Based Data Acquisition System for Radiation Measurement. *International Journal of Image, Graphics and Signal Processing(IJIGSP)*, 2013; 5(7).

23. Studying the condition of soil protection agro-landscape in Ukraine using remote sensing methods. / S. Truskavetsky, T. Byndych, A. Sherstyuk [et al.]. *Journal of Agricultural Science and Technology A.* 2015. Vol.5, №4. P. 235-240.

24. Byndych T. Using Multispectral Satellite Imagery for Parameterisation of Eroded Chernozem. *Soil Science Working for a Living: Applications of soil science to present-day problems. Part II.* 2017. P. 57-65. [Електронний ресурс]. URL http://link.springer.com/chapter/10.1007/978-3-319-45417-7_5

25. National Soil Information System (NASIS) [Електронний ресурс]. URL https://www.nrcs.usda.gov/wps/portal/nrcs/detail/soils/survey/geo/?cid=nrcs142p2_053 552

26. Floreano Dario, Wood Robert, J. Science, technology and the future of small autonomous drones. *Nature.* 2015. № 521 (7553). P. 460–466. doi:10.1038/nature14542.

27. Гичка М.М. Дистанційне зондування в системі моніторингу ґрунтів України / М.М. Гичка // *Вісник аграрної науки.*– 2005.–№12.– С. 72–75.

28. Reza Andrea, Ade Irma Wahyuni, Nur Fadila Safitri, Supryani. Android Based Forest Fire Monitoring System. *International Journal of Information Engineering and Electronic Business(IJIEEB)*, 2022: 14(3).
29. Ahmet Ali Süzen, Remzi Gürfidan, Kıyas Kayaalp, Mehmet Ali Şimşek. Real-Time Tree Counting Android Application and Central Monitoring System. *International Journal of Information Technology and Computer Science(IJITCS)*, 2020: 12(2).
30. K Srinivasa Rao, G. Lavanya Devi, N. Ramesh. Air Quality Prediction in Visakhapatnam with LSTM based Recurrent Neural Networks. *International Journal of Intelligent Systems and Applications(IJISA)*, 2019: 11(2).
31. Nguyen Xuan Thao. Evaluating Water Reuse Applications under Uncertainty: A Novel Picture Fuzzy Multi Criteria Decision Making Method. *Evaluating Water Reuse Applications under Uncertainty: A Novel Picture Fuzzy Multi Criteria Decision Making Method*. *International Journal of Information Engineering and Electronic Business(IJIEEB)*, 2018: 10(6).
32. Cyber-Physical Systems. Metrological Issues, Editors S. Yatsyshyn, B. Stadnyk, Spane: Barcelona, IFSA Publishing, 2016.
33. А. О. Мельник, “Кіберфізичні системи: проблеми створення та напрями розвитку”, *Вісник Національного університету Львівська політехніка Комп’ютерні системи та мережі*, № 806, с. 154–161, 2014.
34. V. Yatsuk, T. Bubela, Ye. Pokhodylo, Yu. Yatsuk, R. Kochan, “Improvement of data acquisition system of objects physic-chemical properties”, in *Proc. of the 9th IEEE International Conference on “Intelligent Data Acquisition and Advanced Computing Systems: Technology and Applications”*, Bucharest, Romania, pp. 41–46, 2017.
35. Guidance “The key principles of vehicle cyber security for connected and automated vehicles”, 6 August 2017 [Online]. Available: www.gov.uk.

36. О. М. Колодчак, “Універсальна структурна модель засобів прийняття рішення в кіберфізичних системах”, Моделювання та інформаційні технології, т. 79, с. 107–113, 2017.

37. Cyber Physical Systems Public Working Group “Framework for Cyber-Physical Systems Release 1.0”, May 2016 [Online]. Available: www.nist.gov.

38. J. C. Trappey, (Senior Member, IEEE), Charles V. Trappey Usharani Hareesh Govindarajan, John J. Sun, Allen C. Chuang “A Review of Technology Standards and Patent Portfolios for Enabling Cyber-Physical Systems in Advanced Manufacturing”, 2016. [Online]. Available: <https://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?tp=&arnumber=7600420>.

39. Про основні засади забезпечення кібербезпеки України. Закон України від 05.10.2017 р. [Online]. Available: <http://zakon.rada.gov.ua/laws/show/2163-19>.

40. Держспоживстандарт України ДСТУ ISO/IEC 74981:2004. Інформаційні технології. Взаємозв’язок відкритих систем. Базова еталонна модель. Частина 1. Еталонна модель, Київ, Україна, 2004.

41. ДСТУ ISO 7498-2:2004 Системи оброблення інформації. Взаємозв’язок відкритих систем. Базова еталонна модель. Частина 2. Архітектура захисту інформації; Київ, Україна, 2006.

42. ISO/IEC 27033-1:2009. Information technology. Security techniques. Network security. Part 1: Overview and concepts (Інформаційна технологія. Методи захисту. Захист мережі. Частина 1. Огляд та концепції); ISO/IEC JTC 1/SC 27 Information security, cybersecurity and privacy protection, 2009 [Online]. Available: <https://www.iso.org/standard/51580.html>

43. ISO/IEC 27033-2:2012. Information technology. Security techniques. Guidelines for the design and implementation of network security (Інформаційна технологія. Методи захисту. Керівництво для розробки та впровадження захисту мережі). Information security, cybersecurity and privacy protection, 2012 [Online]. Available: <https://www.iso.org/standard/51581.html>

44. Бубела Т. З., Федішин Т. І. Аналіз потенціалу кіберфізичних систем для застосування у агросекторі // Вимірювальна техніка та метрологія : міжвідомчий науково-технічний збірник. – 2019. – Вип. 80, № 4. – С. 23–30.

45. Федішин Т. І., Бубела Т. З., Шпак О. В. Функціонування кібер-фізичних систем та формування їх нормативного забезпечення // Управління якістю в освіті та промисловості: досвід, проблеми та перспективи : тези доповідей V Міжнародної науково-практичної конференції (Львів, 20–21 травня 2021 р.). – 2021. – С. 189–191.

46. Бубела Т. З. Засади побудови кіберфізичних систем контролю та управління виробництвом зернових культур / Т. Бубела, В. Ванько, П. Столярчук // Комп'ютерні системи та мережі. – Львів: НУ ЛП, 2015, № 830. – С. 12-18.

47. Bubela T., Yatsuk V., Fedyshyn T., Krachunov H., Ivakh R. Study of the primary converter-object system for electrochemical devices // Вимірювальна техніка та метрологія : міжвідомчий науково-технічний збірник. – 2021. – Вип. 82, № 4. – С. 18–25. <https://doi.org/10.23939/istcmtm2021.04.018>,

48. Бубела Т.З. Програмне забезпечення етапу збору інформації для кібер-фізичної системи контролю органічного виробництва / Т.З. Бубела, Т.І. Федішин // Technical Using of Measurement – 2017: матеріали Всеукраїнської науково-технічної конференції молодих вчених у царині метрології, 24-29 січня 2017 р., - Славське, 2017. - С. 26-28.

49. 4. Haluschak, P. (2006). Laboratory Methods of Soil Analysis. Canada–Manitoba Soil Survey, 132.

50. 5. Philip, C., Juan, C., Aciego, P., Wu Yuping, Xu Jianming. (2012). Microbial Indicators of Soil Quality in Upland Soils. Chapter: Molecular Environmental Soil Science Part of the series Progress in Soil Science, 413–428.

51. 6. Zornoza, R., Acosta, J., Bastida, F., Domínguez, S., Toledo, D., Faz A. (2015). Identification of sensitive indicators to assess the interrelationship between soil quality, management practices and human health. Soil, 1, 173–185. doi:10.5194/soil-1-173-2015

52. 7. Doolittle, J.A.; Brevik, E.C. The use of electromagnetic induction techniques in soils studies. *Geoderma* 2014, 223225, 33–45.
53. 8. Dorigo, W., Wagner, W., Hohensinn, R., Hahn, S., Paulik, C., Xaver, A. (2011). The International Soil Moisture Network: a data hosting facility for global in situ soil moisture measurements. *Hydrol. Earth Syst. Sci*, 15, 1675–1698. doi:10.5194/hess-15-1675-2011
54. 9. Закон України “Про метрологію та метрологічну діяльність”, №1314-VII від 05.06.2014р. / Верховна Рада України. – Офіц. вид. – К.: Парлам. вид-во, 2014 – (Бібліотека офіційних видань). – 28 с. – (Закон України).
55. Hellinger A., Seege H., *German Agenda Cyber physical systems*. Berlin, 2011: 23-26.
56. Yatsuk V., Bubela T., Pokhodylo Ye., Yatsuk Yu., Kochan R. Improvement of data acquisition system of objects physic-chemical properties, in *Proc. of the 9th IEEE International Conference on Intelligent Data Acquisition and Advanced Computing Systems: Technology and Applications (IDAACS '2017)*. Bucharest, Romania, 2017: 41-46.
57. ISO/IEC 7498–1:2004 Information Technology. The interconnection of open systems. Basic reference model. Part 1. The reference model.
58. Zhengbing Hu, Roman Odarchenko, Sergiy Gnatyuk, Maksym Zaliskyi, Anastasia Chaplits, Sergiy Bondar, Vadim Borovik. Statistical Techniques for Detecting Cyberattacks on Computer Networks Based on an Analysis of Abnormal Traffic Behavior. *International Journal of Computer Network and Information Security (IJCNIS)*, 2020, 12(6): 1-13.
59. SO/IEC 27033–1:2009 Information technology. Security techniques. Network security. Part 1: Overview and concepts: ISO/IEC JTC 1/SC 27 Information security, cybersecurity and privacy protection.
60. Lee J., Bagheri B., Kao H. A Cyber-physical Systems architecture for Industry 4.0-based manufacturing asystems, *Manufacturing Letters*, 2015, (3): 18-23.
61. Zhengbing Hu, Ivan Dychka, Yevgeniya Sulema, Yevhen Radchenko. Graphical Data Steganographic Protection Method Based on Bits Correspondence

Scheme. *International Journal of Intelligent Systems and Applications (IJISA)*, 2017, 9(8): 34-40.

62. Hoang, Dat Dac, Hye-Young Paik, Chae-Kyu Kim. Service-oriented middleware architectures for cyber-physical system. *International Journal of Computer Science and Network Security*, 2012, 12(1): 79-87.

63. Melnyk A. Cyber-physical Systems: Problems of creation and direction of development. *Journal of Lviv Polytechnic National University: Computing Systems and Networks*, 2014, 806: 154-161.

64. Kochan R., Kochan O., Chyrka M., Jun S., & Bykovyy P. Approaches of voltage divider development for metrology verification of ADC. *IEEE 7th International Conference on Intelligent Data Acquisition and Advanced Computing Systems (IDAACS)*, 2013, (1): 70-75.

65. Kvaterniuk S., Petruk V., Kochan O., & Frolov V. Multispectral ecological control of parameters of water environments using a quadrocopter. *Sustainable Production: Novel Trends in Energy, Environment and Material Systems*, 2020: 75-89.

66. Chen J., Su J., Kochan O., & Levkiv M. Metrological software test for simulating the method of determining the thermocouple error in situ during operation. *Measurement Science Review*, 2018, 18(2): 52-58.

67. Twardowski P., Legutko S., Krolczyk G. M., & Hloch, S. Investigation of wear and tool life of coated carbide and cubic boron nitride cutting tools in high speed milling. *Advances in Mechanical Engineering*, 2015, 7(6).

68. Khanna N., Pusavec F., Agrawal C., & Krolczyk G. M. Measurement and evaluation of hole attributes for drilling CFRP composites using an indigenously developed cryogenic machining facility. *Measurement*, 2020: 154.

69. Joanna Michałowska, Arkadiusz Tofil, Jerzy Józwick, Jarosław Pytka, Stanisław Legutko, Zbigniew Siemiątkowski and Andrzej Łukaszewicz. Monitoring the Risk of the Electric Component Imposed on a Pilot During Light Aircraft Operations in a High-Frequency Electromagnetic Field, *Sensors*, 2019, 19(24).

70. Przystupa K. Reliability assessment method of device under incomplete observation of failure. 18th International Conference on Mechatronics-Mechatronika (ME), 2018: 1-6.
71. Przystupa K. Selected methods for improving power reliability. Przegląd Elektrotechniczny, 2018, 94(12): 270-273.
72. Lee, Jay; Bagheri, Behrad; Kao, Hung-An (January 2015). "A Cyber-physical Systems architecture for Industry 4.0-based manufacturing asystems". Manufacturing Letters 3.
73. ISO/IEC 30101:2014 Information technology -- Sensor networks: Sensor network and its interfaces for smart grid system. 16. ISO/IEC 20005:2013 Information technology -- Sensor networks -- Services and interfaces supporting collaborative information processing in intelligent sensor networks.
74. ISO/IEC 20005:2013 Information technology -- Sensor networks -- Services and interfaces supporting collaborative information processing in intelligent sensor networks.
75. ISO/IEC 29182-1:2013 Information technology -- Sensor networks: Sensor Network Reference Architecture (SNRA) -- Part 1: General overview and requirements.
76. ISO/IEC 30128:2014 Information technology -- Sensor networks -- Generic Sensor Network Application Interface.
77. Fedyshyn T., Przystupa K., Bubela T., Petrovska I. Data acquisition system for monitoring soil parameters // Lecture Notes on Data Engineering and Communications Technologies. 2023. Vol. 181 : Advances in computer science for engineering and education VI. Proceedings of the 6th International conference on computer science, engineering, and education applications (ICCSEEA2023), Warsaw, Poland, March17–19, 2023. P. 499–513.
78. T. Bubela, T. Fedyshyn, "Cyber-Physical System as a Tool of Monitoring, Control, and Management" in Cyber-Physical Systems and Metrology 4.0 Publishing, 2021.–160-185с.
79. Бубела Т. З., Феदिшин Т. І. Підсистема збирання даних для кіберфізичної системи моніторингу агровиробництва та її верифікація //

Вимірювальна техніка та метрологія : міжвідомчий науково-технічний збірник. – 2018. – Вип. 79, № 1. – С. 28–33.

80. Керування ризиком. Словник термінів, ДСТУ ISO Guide 73:2013 (ISO Guide 73:2009, IDT), 2013.

81. EA- 4/02 M:2013 Expression of uncertainty in measurement for calibration. European cooperation for Accreditation. [Електронний ресурс] / European cooperation for Accreditation // European cooperation for Accreditation. – 2013. – Режим доступу до ресурсу: https://naau.org.ua/wpcontent/uploads/2015/06/EA-4_02.pdf. ДП 7102 40.408.45.001 ПЗ Аркуш 90 Зм.. Арк. № документа Підпис Дата

82. COOMET R/GM/31:2016. Методики калібрування засобів вимірювання.

83. COOMET R/GM/32:2017. Калібрування засобів вимірювання. Алгоритми обробки результатів вимірювань та оцінювання невизначеності.

84. ISO 31000:2018 Управління ризиками - Керівництво;

85. ISO 31010:2019 Risk managment - Risk assessment techniques.

86. ДП «Український науково-дослідний і навчальний центр проблем стандартизації, сертифікації та якості», «Менеджмент ризиків. Настанова з впровадження ISO 31000,» ДСТУ ISO/TR 31004:2018 (ISO/TR 31004:2013, IDT), чинний від 01.01.2019.

87. Микийчук М. «Метрологічні ризики контролю якості продукції на стадії виготовлення. Методи та прилади контролю якості,» Науково-технічний журнал Івано-Франківського національного технічного університету нафти та газу, № 26, с 120-123, 2011.

88. Дядюк М., Управління ризиками, консп. лекц. Харків, Україна: Форт, 2017, с. 165. [Електронний ресурс]. Режим доступу: <http://elib.hduht.edu.ua/jspui/handle/123456789/1893> . Дата звернення: 23.04.2021.

89. Григор'єва О. «Проблеми ризиків, що виникають під час реалізації інноваційних проектів, та методи їхнього кількісного вимірювання,» Проблеми економіки та управління, вид-во Нац. ун-ту «Львів. політехніка», с. 64-71, 2008.

Микийчук М. Метрологічне забезпечення якості продукції на етапі виготовлення, Львів, Україна: вид-во «Львівська політехніка», 2014, 265 с.

90. Мінеконом розвитку України, «Керування ризиком. Методи загального оцінювання ризику,» ДСТУ ІЕС/ISO 31010:2013 (ІЕС/ISO 31010:2009, IDT), чинний від 11.12.2013).

91. Гут Т., Микийчук М. Ідентифікація ризиків процесів системи управління якістю калібрувальної лабораторії, Вісник Вінницького політехнічного інституту. 2023. № 1, с. 6-12.

92. Ярощук І.В. Ризик-орієнтований підхід для розробки безпечних кіберфізичних систем на базі Arduino / І. В. Ярощук, Ю. Л. Скоренький // Збірник тез доповідей VIII Науково-технічної конференції „Інформаційні моделі, системи та технології“, 9-19 грудня 2020 року. — Т. : ТНТУ, 2020. — С. 73.

93. Yazar Z. A Qualitative Risk Analysis and Management Tool – CRAMM / Z. Yazar - SANS Institute Information Security Reading Room, 2020, 14 p.

94. El Fray, I., Kurkowski, M., Pejas, J., Mackow, W.: A New Mathematical Model for Analytical Risk Assessment and Prediction in IT Systems. Control and Cybernetics 41(2012) 1-28

95. Y. Ashibani and Q. H. Mahmoud, "Cyber physical systems security: Analysis, challenges and solutions," Computers & Security, vol. 68, pp. 81–97, 2017.

96. S. C. Genge B L, Fovino I N, et al., "A cyber-physical experimentation environment for the security analysis of networked industrial control systems," Computers & Electrical Engineering, vol. 38, pp. 1146–1161, 2012.

97. Ярощук І.В., Скоренький Ю.Л. Ризик-орієнтований підхід для розробки безпечних кіберфізичних систем на базі Arduino. VIII науково-технічна конференція „Інформаційні моделі, системи та технології“ (2020). С. 73.

98. ДСТУ ISO 10381-2:2004 Якість ґрунту. Відбирання проб. Частина 2. Настанови з методів відбирання проб".

99. Гут Т., Микийчук М. Ідентифікація ризиків процесів системи управління якістю калібрувальної лабораторії //Вісник Вінницького політехнічного інституту. 2023. № 1.

100. Корчинська О. І., Микийчук М. М. Джерела метрологічних ризиків як фактори впливу на технологічний процес // Вісник Черкаського державного технологічного університету. Технічні науки. 2023. № 1. С. 61–71.

101. Федашин Т. І., Бубела Т. З. Процес прогнозування як складова кібер-фізичні системи моніторингу у агропромисловому секторі // Інформаційно-вимірювальні технології ІВТ-2022 : тези доповідей міжнародної науково-практичної конференції, 09-10 листопада 2022р., Львів. – 2022. – С. 130–131.

102. SimaPro database manual. Електронний ресурс: <chrome-extension://efaidnbnmnnibpcajpcgclclefindmkaj/https://simapro.com/wp-content/uploads/2022/07/DatabaseManualMethods.pdf>

103. Gao J. The impact of crisis on enterprise life-cycle / J. Gao, R. Alas // Problems and Perspectives in Management. – 2010. – Vol. 8. – Issue 2. – P. 9–20.

104. Мілінчук О. В. Методичні аспекти визначення стадії життєвого циклу організації / О. В. Мілінчук // Вісник Запорізького національного університету. – 2012. – № 4 (16). – С. 90–100.

ДОДАТКИ

ДОДАТОК А. Програмний код реалізації програмного забезпечення, як невід’ємна складова кібер-фізичної системи

Посилання на репозиторій, який містить повну версію коду:

<https://github.com/TanyaFedyshyn/g.sense.git>

.prettierrc.js

```
@@ -4,4 +4,5 @@ module.exports = {
```

```
  singleQuote: true,
```

```
  trailingComma: 'all',
```

```
  printWidth: 90
```

```
};
```

src/App.tsx

```
@@ -14,7 +14,9 @@ const Stack =
```

```
createNativeStackNavigator<RootStackParamList>();
```

```
function App(): React.JSX.Element {
```

```
  useEffect(() => {
```

```
    setTimeout(() => {
```

```
      BootSplash.hide();
```

```
      BootSplash.hide({
```

```
        fade: true,
```

```
      });
```

```
    }, 500);
```

```
  }, []);
```

src/Common/constants.ts

```
@@ -1,7 +1,6 @@
```

```
import { SelectItem } from '../Components/Form/SelectField';
```

```
export const API_ENDPOINT =
```

```
  'https://api.thingspeak.com/channels/265855/feeds.json';
```

```
export const API_ENDPOINT =
```

```
'https://api.thingspeak.com/channels/265855/feeds.json';
```

```
export const API_ENDPOINT = http://109.235.12.163:5454/SoilTest
```

```
export const CROPS_SELECT_ITEMS: SelectItem[] = [
```

```
{
```

```
src/Common/model.ts
```

```
@@ -79,9 +79,7 @@ export interface ResultScreenBasicPayload {
```

```
  results?: string[];
```

```
}
```

```
export type ResultScreenPayload =
```

```
  | ResultScreenCustomPayload
```

```
  | ResultScreenBasicPayload;
```

```
export type ResultScreenPayload = ResultScreenCustomPayload |
```

```
ResultScreenBasicPayload;
```

```
export type RootStackParamList = {
```

```
  MainScreen: undefined;
```

```
src/Common/utils.ts
```

```
@@ -1,6 +1,4 @@
```

```
export const parseUserNumber = (
```

```
  input?: string | number,
```

```
): number | undefined => {
```

```
export const parseUserNumber = (input?: string | number): number | undefined => {
```

```
  if (typeof input === 'number' && !isNaN(input)) {
```

```
    return input;
```

```
  } else if (typeof input === 'string') {
```

```
src/Components/ActionScreenWrap.tsx
```

```
@@ -54,20 +54,15 @@ export const ActionScreenWrap = (props: IProps) => {
```

```
  behavior={Platform.OS === 'ios' ? 'padding' : 'height'}
```

```
  style={styles.parentWrap}>
```

```
<View
```

```
  style={
```

```

styles.wrap,
  { paddingBottom: bottom + (isKeyboardVisible ? 80 : 0) },
]]>
style={[styles.wrap, { paddingBottom: bottom + (isKeyboardVisible ? 80 : 0) }]}>
<View style={styles.contentWrap}>
  <ActionHeader {...actionData} />
  <ScrollView contentContainerStyle={styles.scrollContentWrap}>
    {children}
  </ScrollView>
</View>
<View>
  {formError !== null && (
    <Text style={styles.errorDisplay}>{formError}</Text>
    {formError !== null && <Text style={styles.errorDisplay}>{formError}</Text>}
  )}
  <Button
    isDisabled={formError !== null}
    style="primary"

```

src/Components/Form/Button.tsx

```

@@ -31,18 +31,14 @@ export const Button = (props: IProps) => {
  <Text
    style={[
      styles.text,
      isDisabled
        ? { color: AppColor.TextGray }
        : { color: AppColor.White },
      isDisabled ? { color: AppColor.TextGray } : { color: AppColor.White },
    ]}>
    {text}
  </Text>
</LinearGradient>

```



```

): (
  <View style={[styles.btn, { backgroundColor: AppColor.InputBG }]}>
    <Text style={[styles.text, { color: AppColor.TextGray }]}>
      {text}
    </Text>
    <Text style={[styles.text, { color: AppColor.TextGray }]}>{text}</Text>
  </View>
)}
</TouchableOpacity>

```

src/Components/Form/SelectField.tsx

```

@@ -31,8 +31,7 @@ interface IProps {
export const SelectField = (props: IProps) => {
  const { placeholder, label, items, onChange } = props;
  const { top: safeTopPadding, bottom: safeBottomPadding } =
    useSafeAreaInsets();
  const { top: safeTopPadding, bottom: safeBottomPadding } = useSafeAreaInsets();
  const [selectedValue, setSelected] = useState<SelectItem>();
  const [modalVisible, setModalVisible] = useState(false);
@@ -105,10 +104,7 @@ export const SelectField = (props: IProps) => {
  }}
  style={itemWrapStyles}>
  {item.iconName && (
    <Image
      style={styles.modalItemIcon}
      source={item.iconName}
    />
    <Image style={styles.modalItemIcon} source={item.iconName} />
  )}
  <Text
    style={

```

src/Components/StackScreenHeader.tsx

@@ -1,21 +1,19 @@

```
import React from 'react';
import {StyleSheet, TouchableOpacity, View} from 'react-native';
import {useNavigation} from '@react-navigation/native';
import {useSafeAreaInsets} from 'react-native-safe-area-context';
import { StyleSheet, TouchableOpacity, View } from 'react-native';
import { useNavigation } from '@react-navigation/native';
import { useSafeAreaInsets } from 'react-native-safe-area-context';
import {ArrowIcon} from '../Icons/ArrowIcon';
import {AppColor} from '../Common/constants';
import { ArrowIcon } from '../Icons/ArrowIcon';
import { AppColor } from '../Common/constants';
export const StackScreenHeader = () => {
  const navigation = useNavigation();
  const {top: safeTopPadding} = useSafeAreaInsets();
  const { top: safeTopPadding } = useSafeAreaInsets();
  return (
    <View style={[styles.wrap, {paddingTop: safeTopPadding}]}>
    <View style={[styles.wrap, {paddingTop: safeTopPadding}]}>
    <View style={styles.btnWrap}>
      <TouchableOpacity
        style={styles.btn}
        onPress={() => navigation.goBack()}>
      <TouchableOpacity style={styles.btn} onPress={() => navigation.goBack()}>
        <ArrowIcon opacity={1} />
      </TouchableOpacity>
    </View>
  );
}
```

ДОДАТОК Б. Програмний код реалізації прогновної моделі зміни стану ґрунтів на основі використання нейромереж та хмарних технологій

Посилання на репозиторій, який містить повну версію коду:

<https://github.com/TanyaFedyshyn/G.SenseAI.git>

```
analyze.py
```

```
import tensorflow as tf
```

```
import numpy as np
```

```
from model import create_model
```

```
from model import features
```

```
from model import normalize_data
```

```
import json
```

```
with open('sensor_data.json', 'r') as file:
```

```
    sensor_data = json.load(file)
```

```
new_X = np.array([sensor_data[feature] for feature in features]).reshape(1, -1)
```

```
model = create_model()
```

```
model.load_weights('soil_neural_network_weights.weights.h5')
```

```
new_X_normalized, _ = normalize_data(new_X)
```

```
prediction = model.predict(new_X_normalized)
```

```
print("Prediction:", prediction[0][0])
```

```
if prediction[0][0] > 0.5:
```

```
    print("This soil is suitable for growing plants.")
```

```
else:
```

```
    print("This soil is not suitable for growing plants.")
```

```
model.py
```

```

import tensorflow as tf
from sklearn.preprocessing import MinMaxScaler

features = ["ParticleSize", "Density", "Temperature", "Humidity", "Conductivity",
"Acidity", "Nitrogen", "Phosphorus", "Potassium", "AirMoistureContent",
"AirTemperature", "CloudCover", "UVindex", "ProbabilityofPrecipitation",
"RainfallAmount", "CultureData"]

def create_model():
    model = tf.keras.Sequential([
        tf.keras.layers.Dense(64, activation='relu', input_shape=(len(features),)),
        tf.keras.layers.Dense(32, activation='relu'),
        tf.keras.layers.Dense(1, activation='sigmoid')
    ])
    model.compile(optimizer='adam',
                  loss='binary_crossentropy',
                  metrics=['accuracy'])
    return model

def normalize_data(data):
    scaler = MinMaxScaler()
    data_normalized = scaler.fit_transform(data)
    return data_normalized, scaler

sensor_data.json
{
    "ParticleSize": 150,
    "Density": 1.6,
    "Temperature": 20,
    "Humidity": 60,
    "Conductivity": 1200,
    "Acidity": 6.0,
    "Nitrogen": 45,
    "Phosphorus": 18,

```

```

    "Potassium": 28,
    "AirMoistureContent": 70,
    "AirTemperature": 18,
    "CloudCover": 40,
    "UVindex": 4,
    "ProbabilityofPrecipitation": 40,
    "RainfallAmount": 10,
    "CultureData": 70
}

```

```
train.py
```

```
import tensorflow as tf
```

```
import numpy as np
```

```
from model import create_model, features, normalize_data
```

```
import joblib
```

```
import json
```

```
import matplotlib.pyplot as plt
```

```
from pathlib import Path
```

```
with open('training_data.json', 'r') as file:
```

```
    training_data = json.load(file)
```

```

X = np.array([[sample["EnvironmentInfo"][feature]["Value"] for feature in
features]

```

```
                for sample in training_data])
```

```
y = np.array([sample["SuitableForGrowingPlants"] for sample in training_data])
```

```
X_normalized, scaler = normalize_data(X)
```

```
model = create_model()
```

```
epoch_loss = []
```

```
epoch_acc = []
```

```
epoch_metrics = []
```

```
for epoch in range(1000):
```

```
    model.fit(X_normalized, y, epochs=1, verbose=0)
```

```

epoch_loss.append(model.history.history['loss'][-1])
epoch_acc.append(model.history.history['accuracy'][-1])
    try:
        epoch_metrics.append(model.history.history['recall_1'][-1])
except KeyError:
    pass
plt.figure()
plt.plot(epoch_loss, label='Loss')
plt.plot(epoch_acc, label='Accuracy')
if len(epoch_metrics):
    plt.plot(epoch_metrics, label='Recall')
plt.legend()
plt.savefig(Path('output') / f'epoch_{epoch}.png')
plt.figure()
plt.plot(epoch_loss, label='Loss')
plt.plot(epoch_acc, label='Accuracy')
plt.plot(epoch_metrics, label='Recall')
plt.legend()
plt.savefig('output/training_progress.png')
model.save_weights('soil_neural_network_weights.weights.h5')
training_data.json
[
    {
        "SuitableForGrowingPlants": 0,
        "EnvironmentInfo": {
            "ParticleSize": {
                "Value": 0.0
            },

```

```
"Density": {  
  "Value": 0.0  
},  
"Temperature": {  
  "Value": 0.0  
},  
"Humidity": {  
  "Value": 0.0  
},  
"Conductivity": {  
  "Value": 0.0  
}
```

ДОДАТОК В. Акт впровадження



«Затверджую»

Професор з наукової роботи

Навчального університету

«Львівська політехніка»

Іван ДЕМИДОВ

«_____» _____ 2024 р.

АКТ ВПРОВАДЖЕННЯ

результатів дисертаційної роботи

на здобуття вченого ступеня доктора філософії

Федишин Тетяни Ігорівни

в Національному університеті «Львівська політехніка», Україна

Даним актом підтверджується, що Національний університет «Львівська політехніка» використав результати дисертаційної роботи аспірантки Львівської політехніки Федишин Тетяни Ігорівни за темою «Метрологічне забезпечення кібер-фізичної системи моніторингу ґрунтів», у навчальному процесі на кафедрі «Інформаційно-вимірювальні технології» Національного університету «Львівська політехніка» для підготовки фахівців за спеціальністю 152 «Метрологія та інформаційно-вимірювальна техніка» та за спеціальністю 175 «Інформаційно-вимірювальні технології», в тому числі при викладанні дисциплін «Вимірювання в промисловості», та «Системи екологічного управління та сталий розвиток».

Завідувачка кафедри ІВТ,

д.т.н., професор

Тетяна БУБЕЛА