

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
«ДНІПРОВСЬКА ПОЛІТЕХНІКА»

Кваліфікаційна наукова
праця на правах рукопису

КРЕМНЬОВ Володимир Володимирович

УДК 004.75:631.5

ДИСЕРТАЦІЯ

**КОМП'ЮТЕРНА ТЕХНОЛОГІЯ ПРЕДИКАТИВНОГО КОНТРОЛЮ
РЕЖИМІВ ЗВОЛОЖЕННЯ ЗЕРНОВИХ КУЛЬТУР**

Спеціальність: 122 Комп'ютерні науки
Галузь знань: 12 Інформаційні технології

Подається на здобуття наукового ступеня доктора філософії

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

В.В. Кремньов

(підпис, ініціали та прізвище здобувача)

Науковий керівник: АЛЕКСЄЄВ Михайло Олександрович, д-р техн. наук,
професор

Дніпро – 2026

АНОТАЦІЯ

Кремньов В.В. Комп'ютерна технологія предикативного контролю режимів зволоження зернових культур. – Кваліфікаційна робота на правах рукопису.

Дисертація на здобуття наукового ступеня доктора філософії за спеціальністю 122 – Комп'ютерні науки. – Національний технічний університет «Дніпровська політехніка», МОН України, Дніпро, 2026.

У дисертації розв'язано актуальну науково-прикладну задачу подальшого розвитку теоретичних положень і практичних напрацювань зі створення, вдосконалення та використання комп'ютерних технологій прогнозного контролю режимів зволоження зернових культур з урахуванням комплексного впливу специфічних для українських аграрних підприємств агрокліматичних умов, фізико-хімічних властивостей ґрунту, типів і фаз зростання вирощуваних зернових культур, а також техніко-технологічної бази ведення сільськогосподарської діяльності рослинництва на відкритому ґрунті.

Дисертаційна складається зі вступу, чотирьох розділів, загальних висновків, списку використаних літературних джерел зі 151 найменування та 3 додатків на 32 сторінках. Загальний обсяг дисертації становить 192 сторінки, із яких основний текст – 132 сторінки, включаючи 54 рисунки та 15 таблиць.

У вступі обґрунтовано актуальність теми дисертаційного дослідження, зазначено мету, основні завдання, об'єкт, предмет і використані методи досліджень, сформульовано наукову новизну та практичну цінність одержаних результатів, наведено особистий внесок здобувача, описано структуру дисертаційної роботи, а також надано інформацію щодо публікацій і результатів апробації, використання й упровадження результатів досліджень.

У першому розділі дисертації викладено результати досліджень щодо аналізу та узагальнення сучасного стану теоретико-практичних розробок і досліджень у галузі комп'ютерного контролю режимів зволоження зернових культур, що дозволило обґрунтувати мету і дослідницькі задачі дисертації.

У другому розділі дисертації наведено результати розв'язання дослідницьких завдань щодо розробки структурно-компонентного й алгоритмічної забезпечення та інформаційної й математичної моделей комп'ютерної технології прогнозного контролю режимів зволоження зернових культур, що дозволило обґрунтувати сукупність техніко-функціональних вимог до її апаратно-програмного забезпечення.

Третій розділ дисертації присвячено розробці та валідації комп'ютерно-орієнтованого методу предикативного контролю режимів зволоження зернових культур із обліком інформативних і дестабілізуючих параметрів, що дозволило обґрунтувати характеристики оптимізованої стратегії поливу для різних ґрунтокліматичних умов вирощування та видів і фаз вегетації зернових культур.

Четвертий розділ присвячено створенню й тестуванню імітаційних моделей побудови апаратно-програмного забезпечення досліджуваної комп'ютерної технології прогнозного контролю режимів зволоження зернових культур, що дозволило встановити та оцінити її основні характеристики та параметри. Також у цьому розділі сформульовано рекомендацій з подальшого прикладного використання й упровадження розробленої комп'ютерної технології, а також обґрунтовано перспективні напрямки її подальшого розвитку.

У загальних висновках викладено узагальнені якісні та кількісні результати досліджень дисертаційної роботи.

Додатки містять список наукових публікацій за темою дисертації, документи, що підтверджують використання й упровадження результатів досліджень дисертації, а також програмні компоненти розробленої комп'ютерної технології предикативного контролю режимів зволоження зернових культур.

Наукова новизна одержаних результатів полягає в розробці нових та вдосконаленні й розвитку існуючих моделей, методів, підходів і засобів створення комп'ютерних технологій прогнозного контролю режимів зволоження зернових культур, а саме: синтезовано структурно-функціональне забезпечення комп'ютерної технології предикативного контролю режимів зволоження зернових культур за критерієм мінімізації відхилення відносної вологості від її цільового

рівня під час диференціації шарів ґрунту; дістали подальшого розвитку підходи до формалізованого опису процесу комплексної трансформації агромоніторингових даних; дістали подальшого розвитку методологічні засади проєктування комп'ютерних агротехнологій; вдосконалено апаратно-програмне забезпечення комплексів цифровізації сільськогосподарських підприємств рослинництва; удосконалено теоретико-прикладні аспекти методів створення програмно-технічних рішень сільськогосподарського спрямування на основі розробки та валідації імітаційної моделі серверної частини комп'ютерної технології предикативного контролю режимів зволоження зернових культур.

Практичне значення одержаних результатів полягає в реалізації програмно-технічних рішень, комп'ютерних моделей та алгоритмів побудови й функціонування комп'ютерної технології предикативного контролю режимів зволоження зернових культур, а саме: алгоритмічне та структурно-компонентне забезпечення досліджуваної комп'ютерної технології; програмні компоненти інтегральної вбудованої мікропроцесорної статистичної обробки результатів детектування ґрунтокліматичних параметрів та техніко-функціональних характеристик поливної системи, а також мікрокомп'ютерної інтелектуальної прогностичної аналітики стану зволоження ґрунту на різних глибинах; Matlab-застосунок із користувацьким інтерфейсом задля предикативного аналізу режимів зволоження зернових культур, а також графічний інтерфейс із можливістю віддаленого доступу до результатів детектування інформативних показників стану зволоження зернових культур під час повного циклу їх вирощування.

У дисертації обґрунтовано подальші напрямки та підходи до перспективних досліджень розробленої комп'ютерної технології прогностичного контролю режимів зволоження зернових культур, які дозволять покращити стан цифровізації та комп'ютеризації технологічних і виробничих процесів аграрних підприємств рослинництва задля підвищення їх ефективності та продуктивності.

Ключові слова: прогностичний контроль, комп'ютерна технологія, дані, зернові культури, агрокліматичні умови, мікрокомп'ютерний пристрій, система, вологість, модель, комп'ютерно-орієнтований метод, оптимізація.

ABSTRACT

Kremnov V.V. Computer technology for predictive control of moisture modes of grain crops. – Manuscript.

Dissertation for the degree of Doctor of Philosophy in Specialty 122 – Computer Science. – Dnipro University of Technology, Ministry of Education and Science of Ukraine, Dnipro, 2026.

In the dissertation, the actual scientific and applied problem of further development of theoretical provisions and practical developments on the creation, improvement and utilization of computer technologies for the predictive control of grain crop moisture modes is solved, taking into account the complex influence of agroclimatic conditions specific to Ukrainian agricultural enterprises, physical and chemical properties of the soil, types and phases of growth of grain crops, as well as the technical and technological base of agricultural activities in open field crop production.

The dissertation consists of an introduction, four chapters, general conclusions, a list of references of 151 sources and 3 appendices on 32 pages. The total volume of the dissertation is 192 pages, including the main text of 132 pages, with 54 figures and 15 tables.

In the introduction, the relevance of the topic of the dissertation research is justified, the aim, main objectives, object, subject and methods of research used are indicated, the scientific novelty and practical value of the results obtained are formulated, the personal contribution of the applicant is presented, the structure of the dissertation work is described, and information on publications and results of approbation, use and implementation of research results is provided.

In the first chapter of the dissertation, the results of research on the analysis and generalization of the state-of-the-art of theoretical and practical developments and research in the field of computer control of grain crop moisture modes are presented, which allowed justifying the aim and main research objectives of the dissertation.

In the second chapter of the dissertation, the results of solving the research objectives of developing structural-component and algorithmic provision, as well as

information and mathematical models of the computer technology for predictive control of moisture modes of grain crops are presented, which allowed substantiating the set of technical and functional requirements for the hardware and software of the developed computer technology.

The third chapter of the dissertation is devoted to the development and validation of a computer-oriented method for predictive control of moisture modes of grain crops, taking into account informative and destabilizing parameters, which allowed substantiating the characteristics of an optimized irrigation strategy for different soil and climatic conditions of cultivation and types and phases of vegetation of grain crops.

The fourth chapter is devoted to the creation and testing of simulation models for the creation of hardware and software of the studied computer technology for predictive control of grain crop moisture modes, which allowed establishing and evaluating its main characteristics and parameters. Also in this chapter, recommendations for further applied use and implementation of the developed computer technology are formulated, and promising directions for its further development are substantiated.

The general conclusions summarize the qualitative and quantitative results of the dissertation research.

The appendices contain a list of scientific publications on the topic of the dissertation, documents confirming the use and implementation of the results of the dissertation research, as well as software components of the developed computer technology for predictive control of moisture modes of grain crops.

The scientific novelty of the results obtained lies in the development of new and improvement and advancement of existing models, methods, approaches and means of creating computer technologies for predictive control of moisture modes of grain crops, namely: the structural and functional provision of computer technology for predictive control of moisture modes of grain crops according to the criterion of minimizing the deviation of relative humidity from its target level during the differentiation of soil layers was synthesized; approaches to the formalized description of the process of complex transformation of agromonitoring data were further developed; methodological principles of designing computer agrotechnologies were further developed; hardware

and software of complexes for digitalization of agricultural enterprises of crop production were improved; theoretical and applied aspects of methods for creating software and hardware solutions for agricultural purposes were enhanced on the basis of development and validation of the simulation model of the server part of the computer technology for predictive control of moisture modes of grain crops.

The practical value of the obtained results lies in the implementation of software and hardware solutions, computer models and algorithms for the construction and functioning of computer technology for predictive control of moisture modes of grain crops, namely: algorithmic and structural component provision of the studied computer technology; software components of the integral embedded microprocessor statistical processing of the results of detection of soil and climatic parameters and technical and functional characteristics of the irrigation system, as well as microcomputer intelligent predictive analytics of soil moisture at different depths; Matlab application with a user interface for predictive analysis of grain moisture modes, as well as a graphical interface with the ability to remotely access the results of detecting informative indicators of the moisture status of crops during the full cycle of their cultivation.

In the dissertation, further directions and approaches to prospective research of the developed computer technology for predictive control of moisture modes of grain crops are substantiated, which will improve the digitalization and computerization of technological and production processes of agricultural crop production enterprises to increase their efficiency and productivity.

Keywords: predictive control, computer technology, data, grain crops, agroclimatic conditions, microcomputer device, system, humidity, model, computer-oriented method, optimisation.

СПИСОК ПУБЛІКАЦІЙ ЗДОБУВАЧА ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

Наукові праці, в яких опубліковано основні наукові результати

1. Кремньов В.В. Результати комп'ютерного експерименту з архітектурної інтеграції апаратно-програмних компонент багаторівневої трансформації вимірюваних даних предикативного контролю вологості ґрунту. *Наукові праці Донецького національного технічного університету. Серія: «Інформатика, кібернетика та обчислювальна техніка»*. 2025. № 1 (40). С. 89–96. doi.org/10.31474/1996-1588-2025-1-40-89-96. (Стаття в науковому фаховому періодичному виданні України).

2. Кремньов В., Дяченко Г. Комп'ютеризований метод оптимізації зрошення сільськогосподарських культур на основі предикативного контролю вологості ґрунту. *Вимірювальна та обчислювальна техніка в технологічних процесах*. 2025. № 1. С. 310–315. doi.org/10.31891/2219-9365-2025-81-38. (Стаття в науковому фаховому періодичному виданні України. Особистий внесок здобувача: локалізація задач дослідження, розробка та тестування користувацького інтерфейсу щодо реалізації досліджуваного методу оптимізації зрошення, розробка Use-case та UML діаграм, обґрунтування висновків. Внесок Дяченка Г.: формулювання підходів і обґрунтування методики досліджень, уточнення термінології в тексті статті).

3. Кремньов В., Шаматрін А. Імітаційна модель системи комп'ютерного контролю технологічних процесів аграрних виробництв. *Information Technology: Computer Science, Software Engineering and Cyber Security*. 2024. Вип. 2. С. 68–78. doi.org/10.32782/IT/2024-2-9. (Стаття в науковому фаховому періодичному виданні України. Особистий внесок здобувача: обґрунтування мети і формулювання задач досліджень, синтез структури досліджуваної системи, створення та тестування комп'ютерної моделі системи, аналіз отриманих результатів і обґрунтування висновків. Внесок Шаматріна А.: оптимізація програмного коду, створення графічного матеріалу).

4. Дяченко Г., Кремньов В. Математичне та комп'ютерне моделювання процесу комп'ютеризованого предикативного контролю режимів зрошення ґрунту під час вирощування зернових культур. *Вимірювальна та обчислювальна техніка в технологічних процесах*. 2024. № 3. С. 136–141. doi.org/10.31891/2219-9365-2024-79-18. (Стаття в науковому фаховому періодичному виданні України. Особистий внесок здобувача: локалізація задач дослідження, розробка та тестування програмного забезпечення мовою Python щодо дослідження динамічних процесів розповсюдження вологи в ґрунті, аналіз отриманих результатів і обґрунтування висновків. Внесок Дяченка Г.: уточнення проблеми дослідження, обґрунтування підходів досліджень, редагування термінології в тексті статті).

5. Diachenko G., Kremnov V., Koval V., Yevstratiev M. Information analysis and systematisation of the state of the art in research and development of technologies for computer control of grain crops moistening modes. *Herald of Khmelnytskyi Nat. University. Technical Sciences*. 2024. V. 339 (4). P. 458–469. doi.org/10.31891/2307-5732-2024-339-4-68. (Стаття в науковому фаховому періодичному виданні України. Особистий внесок здобувача: проведення бібліографічного пошуку, аналіз і систематизація результатів бібліографічних досліджень зі створення комп'ютерних технологій та інтелектуальних алгоритмів контролю вологості ґрунту, графічне оформлення, формулювання висновків. Внесок Дяченка Г.: уточнення проблеми дослідження, аналіз одержаних результатів і обґрунтування перспектив подальших досліджень. Внесок Ковалю В.: критеріальний відбір інформаційних джерел та їх апіорний аналіз. Внесок Євстрат'єва М.: редагування та структуризація тексту статті).

Опубліковані праці апробаційного характеру

6. Aleksieiev M., Kremnov V. Results of synthesis of a simulation-based computer technology for predictive control of grain crop moisture modes // XX Міжнародна конференція з проблем використання інформаційних технологій в освіті, науці та промисловості № 10 (частина 2), 05 грудня 2025: Дніпро, 2025. С.

4–7. URL: https://pzks.nmu.org.ua/ua/science/conf2025_2.pdf (*Тези доповіді. Особистий внесок здобувача: розробка комп'ютерної технології та підходів до її тестування, аналіз отриманих результатів і формулювання висновків. Внесок Алексєєва М.: постановка проблеми досліджень*).

7. Алексєєв М.О., Дяченко Г.Г., Кремньов В.В. Результати розробки серверного інфокомунікаційного забезпечення комп'ютерної технології прогнозного агроконтролю // XV Міжнародна науково-практична конференція «Комплексне забезпечення якості технологічних процесів та систем»: Том 2, 22–23 травня 2025: Чернігів, 2025. С. 290 – 292. URL: https://drive.google.com/file/d/1LZk8Efz_0OsYSOPtmLeR8y3PuVnIJays/view (*Тези доповіді. Особистий внесок здобувача: обґрунтування стеку використовуваних інформаційних технологій, розробка структурно-функціональної моделі. Внесок Алексєєва М.О.: постановка проблеми досліджень. Внесок Дяченка Г.Г.: локалізація та формулювання задач дослідження, аналіз результатів*).

8. Алексєєв М.О., Кремньов В.В. Алгоритмічне забезпечення комп'ютеризованого методу предикативного контролю вологості ґрунту // XV Міжнародна науково-технічна конференція аспірантів та молодих вчених «Наукова весна», 26–28 березня 2025: Дніпро, 2025. С. 194 – 195. URL: https://rmv.nmu.org.ua/ua/arkhiv-zbirok-konferentsiy/naukova-vesna-2025/Scientific_Spring_2025.pdf (*Тези доповіді. Особистий внесок здобувача: обґрунтування математичного забезпечення методу предикативного контролю вологості ґрунту, реалізація засобів графічної інтерпретації результатів комп'ютерного тестування розробленого методу. Внесок Алексєєва М.О.: постановка проблеми досліджень, уточнення одержаних результатів*).

9. Дяченко Г.Г., Алексєєв М.О., Кремньов В.В., Євстратьєв М.А. Обґрунтування методів і засобів побудови інформаційних технологій комп'ютерного предикативного контролю режимів зволоження зернових культур // VI Міжнародна науково-практична інтернет-конференція «Integration of Education, Science and Business in Modern Environment: Summer Debates», 01–02 August 2024: Dnipro, 2024. С. 125–127. URL: <http://www.wayscience.com/wp->

content/uploads/2024/08/Conference-Proceedings-August-1-2-2024.pdf. (Тези доповіді. Особистий внесок здобувача: аналіз і узагальнення техніко-функціональних складових процесу адаптивного комп'ютерного контролю характеристик об'єктів рослинництва під час оптимізації режимів зрошення ґрунту, формулювання висновків. Внесок Дяченка Г.Г.: апріорний аналіз і систематизація літературних джерел. Внесок Алексєєва М.О.: постановка проблеми досліджень. Внесок Євстрат'єва М.А.: опис актуальності досліджень).

10. Кремньов В.В., Коваль В.С., Євстрат'єв М.А. Компонентно-структурне забезпечення комп'ютерної технології предикативного контролю агротехнічних процесів вирощування зернових культур // Міжнародна науково-практична конференція «Теоретико-практичні аспекти розвитку науки, освіти, технологій і суспільства», 10 серпня 2024: Кременчук, 2024. С. 45–47. URL: <https://www.economics.in.ua/2024/08/10.html>. (Тези доповіді. Особистий внесок здобувача: розробка та опис принципу дії схеми компонентно-структурного забезпечення комп'ютерної технології предикативного контролю режимів зволоження ґрунту. Внесок Ковалю В.С.: підбір літературних джерел і їх апріорний аналіз. Внесок Євстрат'єва М.А.: обґрунтування підходів до дослідження, редагування тексту).

11. Шаматрін А.М., Кремньов В.В. Розробка архітектури комп'ютерної системи адаптивного контролю зрошення ґрунту // XII Міжнародна науково-технічна конференція студентів, аспірантів та молодих вчених «Молодь: наука та інновації», 13–15 листопада 2024: Дніпро, 2024. С. 146–147. URL: <https://rmv.nmu.org.ua/ua/arkhiv-zbirok-konferentsiy/molod-nauka-ta-innovatsii-2024/molod-2024-vol2.pdf>. (Тези доповіді. Особистий внесок здобувача: синтез архітектури системи моніторингу вологості ґрунту, формулювання висновків. Внесок Шаматріна А.М.: підбір літературних джерел, оформлення графічного матеріалу).

ЗМІСТ

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ.....	14
ВСТУП.....	15
РОЗДІЛ 1. СУЧАСНИЙ СТАН ТЕОРЕТИКО-ПРАКТИЧНИХ РОЗРОБОК І ДОСЛІДЖЕНЬ У ГАЛУЗІ КОМП'ЮТЕРНОГО КОНТРОЛЮ РЕЖИМІВ ЗВОЛОЖЕННЯ ЗЕРНОВИХ КУЛЬТУР.....	23
1.1 Загальна характеристика провадження сільськогосподарської діяльності з вирощування зернових культур.....	23
1.2 Аналіз технологій, методів і моделей комп'ютерного контролю режимів зволоження сільськогосподарських культур.....	32
1.3 Аналіз програмно-технічного забезпечення отримання, передачі та обробки даних щодо режимів зволоження сільськогосподарських культур.....	44
1.4 Мета, задачі та напрямки досліджень.....	52
1.5 Висновки за першим розділом.....	54
РОЗДІЛ 2. ФОРМАЛІЗОВАНИЙ ОПИС КОМП'ЮТЕРНОЇ ТЕХНОЛОГІЇ ПРЕДИКАТИВНОГО КОНТРОЛЮ РЕЖИМІВ ЗВОЛОЖЕННЯ ЗЕРНОВИХ КУЛЬТУР.....	56
2.1 Структурне та компонентне забезпечення досліджуваної комп'ютерної технології.....	56
2.2 Алгоритмічне забезпечення досліджуваної комп'ютерної технології.....	63
2.3 Інформаційна модель досліджуваної комп'ютерної технології.....	67
2.4 Математична модель процесу комп'ютерного контролю динаміки ґрунтової вологи.....	75
2.5 Висновки за другим розділом.....	89
РОЗДІЛ 3. КОМП'ЮТЕРНО-ОРІЄНТОВАНИЙ МЕТОД ПРЕДИКАТИВНОГО КОНТРОЛЮ РЕЖИМІВ ЗВОЛОЖЕННЯ ЗЕРНОВИХ КУЛЬТУР.....	92

3.1 Підходи до розробки досліджуваного комп'ютерно-орієнтованого методу.....	92
3.2 Алгоритмічне та програмне забезпечення досліджуваного комп'ютерно-орієнтованого методу.....	96
3.3 Результати тестування та валідації досліджуваного комп'ютерно-орієнтованого методу.....	102
3.4 Висновки за третім розділом.....	115
РОЗДІЛ 4. РЕЗУЛЬТАТИ РОЗРОБКИ ПРОГРАМНО-ТЕХНІЧНОГО РІШЕННЯ КОМП'ЮТЕРНОЇ ТЕХНОЛОГІЇ ПРЕДИКАТИВНОГО КОНТРОЛЮ РЕЖИМІВ ЗВОЛОЖЕННЯ ЗЕРНОВИХ КУЛЬТУР.....	117
4.1 Імітаційна модель підсистеми збору та мережевого обміну даними.....	117
4.2 Імітаційна модель підсистеми інтелектуальної предикативної обробки даних.....	126
4.3 Результати розробки серверної частини комп'ютерної технології предикативного контролю режимів зволоження зернових культур.....	130
4.4 Практична цінність одержаних результатів та перспективні напрямки подальших досліджень.....	138
4.5 Висновки за четвертим розділом.....	141
ВИСНОВКИ.....	143
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ.....	146
ДОДАТОК А. Список публікацій здобувача за темою дисертації.....	161
ДОДАТОК Б. Акти впровадження та використання результатів дисертаційного дослідження.....	165
ДОДАТОК В. Програмне забезпечення розробленої та дослідженої комп'ютерної технології предикативного контролю режимів зволоження зернових культур.....	169

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ

ADS – автоматична підтримка прийняття рішень;
FAO – Продовольча та сільськогосподарська організація ООН;
GIS – геоінформаційна система;
GRU – закритий рекурентний блок;
IEEE – Інститут інженерів електротехніки та електроніки;
IETF – Інженерна рада Інтернету;
ІІС – Консорціум промислового Інтернету;
ІоТ – Інтернет речей;
ITU – Міжнародний союз електрозв’язку;
ІWF – Всесвітній форум Інтернету речей;
KNN – K-найближчі сусіди;
LSTM – довготривала короткочасна пам’ять;
MPC – модель предикативного управління;
NB – байєсівський підхід;
RNN – рекурентна нейронна мережа;
SAR – питома швидкість поглинання;
SVM – опорно-векторний апарат;
UART – універсальний асинхронний приймач-передавач;
UI – користувацький інтерфейс;
UML – уніфікована мова моделювання;
WoT – мережа речей;
WSN – бездротова сенсорна мережа;
АППАУ – Асоціація підприємств промислової автоматизації України;
ПЛК – програмований логічний контролер;
ШІМ – широтно-імпульсна модуляція.

ВСТУП

Актуальність дослідження. У сучасних умовах глобальної динамічної трансформації в аграрній галузі спостерігається все більша кількість викликів екологічного, соціального, економічного та технологічного характеру. Зміни клімату, зростання населення планети, порушення логістичних ланцюгів, скорочення природних ресурсів суттєво негативно впливають на сталість та продуктивність сільськогосподарських виробництв як на світовому, так і на національному рівнях. Попри вагомі здобутки й досягнення в галузі аграрних наук, зокрема біотехнологій, селекції та генетики рослин, позитивна динаміка врожайності сільськогосподарських культур залишається нестабільною і чутливою до значної кількості дестабілізуючих чинників різної природи, в тому числі через зниження рівня ґрунтових вод унаслідок глобального потепління, деградації ґрунтів, надмірне використання хімічних добрив, зниження біорізноманіття мікрофлори ґрунту та надмірне навантаження антропогенного характеру на аграрні екосистеми.

Враховуючи сукупний вплив цих негативних чинників, значної актуальності набувають питання своєчасного та достовірного планування агротехнічних процедур щодо посівів, раціонального використання ресурсів та збереження врожаю під час усіх етапів вирощування сільськогосподарських культур. Поряд із цим світова науково-технічна практика довела значну ефективність використання комп'ютерних, цифрових і інформаційних технологій у процесі планування та реалізації агропроцедур, зокрема під час масштабного збору та адаптивної і прецизійної обробки просторово-часових агрокліматичних даних із автоматизованою підтримкою прийняття рішень щодо покращення аграрної практики з вирощування зернових культур.

Наукові праці вітчизняних і закордонних дослідників, зокрема Білинського Й.Й., Лактіонова І.С., Кожушко О.Д., Вовни О.В., Matula S., Batkova K., Xu J., Liu Y., Abioye A.E. та інших, присвячено вирішенню проблеми розробки та впровадження комп'ютерних технологій та інформаційних систем до

аграрних підприємств для моніторингу й контролю процесів, що протікають у агроєкосистемах, в тому числі під час неруйнівного онлайн-детектування вологості ґрунту. Приймаючи до уваги значні напрацювання в галузі комп'ютерних технологій інформаційно-вимірювального контролю аграрного спрямування, варто зазначити, що на сьогоднішній день релевантними залишаються питання, які пов'язані з розробкою сервісних апаратно-програмних архітектур таких технологій, що здатні в реальному часі здійснювати інтелектуалізований аналіз значних обсягів даних та реалізовувати засади автоматизованого впливу на технологічні процеси сільськогосподарських підприємств, зокрема зрошення ґрунту агроугідь.

Таким чином, наведений вище узагальнений виклад доводить, що на сьогоднішній день актуальною є **науково-прикладна задача** подальшого розвитку теоретичних положень і практичних напрацювань зі створення, вдосконалення та використання комп'ютерних технологій прогностичного контролю режимів зволоження зернових культур з урахуванням специфічних для українських аграрних підприємств агрокліматичних умов, фізико-хімічних властивостей ґрунту, типів і фаз зростання вирощуваних зернових культур, а також техніко-технологічної бази ведення сільськогосподарської діяльності рослинництва на відкритому ґрунті.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами. Тема дисертації корелює із загальнодержавними пріоритетними напрямками стратегічного розвитку, що зокрема зазначені в: Закон України «Про пріоритетні напрями розвитку науки і техніки» (№ 2623-III від 11.07.2001 р. зі змінами № 3534-IX від 21.12.2023 р.), Постанова КМ України «Про затвердження переліку пріоритетних тематичних напрямів наукових досліджень і науково-технічних розробок на період до 31 грудня року, наступного після припинення або скасування воєнного стану в Україні» (№ 476 від 30.04.2024 р.), Розпорядження КМ України «Про схвалення Стратегії розвитку сфери інноваційної діяльності на період до 2030 року» (№ 526-р від 10.07.2019 р.) та Розпорядження КМ України «Про схвалення Стратегії цифрового розвитку інноваційної діяльності України на

період до 2030 року та затвердження операційного плану заходів з її реалізації у 2025-2027 роках» (№ 1351-р від 31.12.2019 р.). Результати досліджень цієї дисертації одержано в рамках виконання науково-дослідних робіт НТУ «Дніпровська політехніка», а саме: «Розвиток програмно-апаратного забезпечення інтелектуальних технологій для сталого вирощування сільськогосподарських культур у воєнний та повоєнний час (№ державної реєстрації 0124U000289)» та «Методи, моделі та технології обробки і аналізу даних в комп'ютеризованих системах (№ державної реєстрації 0124U004583)».

Основною **метою** дисертаційної роботи є підвищення ефективності агротехнічних процедур під час вирощування зернових культур завдяки розробці методів і апаратно-програмних компонент побудови комп'ютерних технологій предикативного контролю режимів зрошення ґрунту. Для досягнення поставленої мети необхідно вирішити такі **дослідницькі задачі**:

- комплексний аналіз і логічна систематизація інформації щодо сучасного стану науково-прикладних розробок і досліджень у галузі комп'ютерного контролю режимів зволоження зернових культур;

- обґрунтування структурно-алгоритмічної будови досліджуваної комп'ютерної технології з урахуванням критеріїв точного зонального збору, достовірної периферійної обробки та надійної мережевої взаємодії функціональних компонент технології;

- розробка інформаційної та математичної моделей досліджуваної комп'ютерної технології для обґрунтування техніко-функціональних вимог до її апаратно-програмного забезпечення;

- розробка комп'ютерно-орієнтованого методу предикативного контролю режимів зволоження зернових культур із обліком інформативних і дестабілізуючих параметрів;

- створення та тестування імітаційних моделей побудови апаратно-програмного забезпечення досліджуваної комп'ютерної технології для оцінки її основних характеристик і параметрів;

- створення та валідація архітектури комп'ютерної технології прогнозного

контролю режимів зволоження зернових культур для формулювання рекомендацій з її подальшого прикладного використання і впровадження;

– аналіз отриманих результатів досліджень і обґрунтування перспективних напрямків розвитку створеної комп'ютерної технології.

Об'єкт дослідження – інформаційні процеси отримання, мережевого обміну та предикативної обробки сукупності розподілених даних щодо режимів зволоження зернових культур.

Предмет дослідження – моделі, методи та апаратно-програмні компоненти побудови комп'ютерних технологій прогнозного контролю режимів зволоження зернових культур.

Методи досліджень. Теоретико-методологічну основу досліджень цієї дисертаційної роботи становить комплексний підхід із використанням таких методів і концептуальних напрямків: бібліографічний пошук, аналіз і узагальнення відомих науково-прикладних напрацювань; математичне, інформаційне й комп'ютерне моделювання; об'єктно-орієнтоване програмування; теорія алгоритмів і прогнозного контролю; системний аналіз і синтез архітектур апаратно-програмних рішень комп'ютерних технологій; Інтернет речей; статистичний та інтелектуальний аналіз просторово-часових результатів комп'ютеризованих вимірювань; комп'ютерний експеримент.

Наукова новизна одержаних результатів. Під час досліджень цієї дисертаційної роботи запропоновано нові та вдосконалено й розвинуто існуючі моделі, методи, підходи та засоби створення комп'ютерних технологій прогнозного контролю режимів зволоження зернових культур, а саме:

1. Уперше синтезовано структурно-функціональне забезпечення комп'ютерної технології предикативного контролю режимів зволоження зернових культур за критерієм мінімізації відхилення відносної вологості від її цільового рівня під час диференціації шарів ґрунту з урахуванням сукупного впливу характеристик ґрунтокліматичних умов вирощування, видів і фаз зростання зернових культур та обмежень, що накладаються на технічні параметри засобів поливу, що дозволяє реалізувати оптимізоване використання водних ресурсів.

2. Дістали подальшого розвитку підходи до формалізованого опису процесу комплексної трансформації агромоніторингових даних завдяки розробці інформаційної й математичної моделей комп'ютерної технології предикативного контролю режимів зволоження зернових культур, які, на відміну від відомих, враховують сукупний вплив добової динаміки температури й вологості повітря, температури, відносної вологості й типу ґрунту, а також локацію кореневмісного шару, що дозволило обґрунтувати вимоги до варіювання інтенсивності подачі поливної води під час повного циклу вирощування пшениці та ячменю.

3. Дістали подальшого розвитку методологічні засади проєктування комп'ютерних агротехнологій завдяки розробці комп'ютерно-орієнтованого методу прогнозного контролю режимів зволоження зернових культур, який відрізняється від відомих тим, що програмно в реальному часі реалізує вбудовані до периферійних засобів алгоритми нелінійної оптимізації з обліком показників водного балансу ґрунту та параметрів систем поливу, що дозволяє забезпечити показник витрат поливної води в усталеному режимі від 0,8 л/год до 1,5 л/год.

4. Удосконалено апаратно-програмне забезпечення комплексів цифровізації сільськогосподарських підприємств рослинництва шляхом розробки децентралізованої архітектури комп'ютерної технології прогнозного контролю режимів зволоження зернових культур, яка контрастує з існуючими тим, що алгоритми агрегування даних та статистичних й інтелектуальних обчислень імplementовано до ланки низькорівневої обробки даних на основі серійних мікропроцесорних і мікрокомп'ютерних пристроїв, що дозволяє підвищити автономність, адаптивність і оперативність корегування агротехнічних процесів.

5. Удосконалено теоретико-прикладні аспекти методів створення програмно-технічних рішень сільськогосподарського спрямування на основі розробки та валідації імітаційної моделі серверної частини комп'ютерної технології предикативного контролю режимів зволоження зернових культур, яка реалізує потокову подієву інтелектуалізовану обробку агрокліматичних даних на основі інтеграції стеку інформаційних технологій до єдиного мікрокомп'ютерного

пристрою, що дозволяє впровадити стратегію віддаленого адаптивного керування засобами поливу з показником витрати води не більше 5 л/год на 1 м² агроугідь.

Практичне значення одержаних результатів. У цій дисертаційній роботі запропоновано та реалізовано програмно-технічні рішення, комп'ютерні моделі та алгоритми побудови й функціонування комп'ютерної технології предикативного контролю режимів зволоження зернових культур, які інтегрально забезпечують наступні положення практичного ефекту:

1. Розроблено алгоритмічне та структурно-компонентне забезпечення досліджуваної комп'ютерної технології агротехнічного призначення.

2. Реалізовано та валідовано програмні компоненти інтегральної вбудованої мікропроцесорної статистичної обробки результатів детектування ґрунтокліматичних параметрів та техніко-функціональних характеристик поливної системи, а також мікрокомп'ютерної інтелектуальної прогнозної аналітики стану зволоження ґрунту на різних глибинах.

3. Створено та протестовано Matlab-застосунок із користувацьким інтерактивним інтерфейсом задля предикативного аналізу режимів зволоження зернових культур, а також графічний інтерфейс із можливістю віддаленого доступу до результатів детектування динаміки інформативних показників стану зволоження зернових культур під час повного циклу їх вирощування.

4. Запропоновано децентралізовану архітектуру програмно-технічної організації досліджуваної комп'ютерної технології агротехнічного призначення.

Впровадження та використання результатів досліджень. Прикладну цінність одержаних результатів досліджень підтверджено використанням у виробничій діяльності науково-практикуючої установи аграрного спрямування «Донецька державна сільськогосподарська дослідна станція Національної аграрної академії наук України» під час модернізації та оптимізації агротехнічних процесів вирощування зернових культур у агрокліматичних умовах північного степу України, технологічних умовах ТОВ «БВС+» для оперативного планування та виконання агротехнічних процедур зрошення ґрунту під час повного циклу вирощування зернових культур, а також у навчальному процесі

НТУ «Дніпровська політехніка» під час підготовки здобувачів вищої освіти за освітньо-науковим рівнем «Доктор філософії» за спеціальністю 122 Комп'ютерні науки.

Особистий внесок здобувача. Всі результати теоретичних і прикладних досліджень, що становлять наукову новизну та практичну цінність цієї дисертації, отримані автором особисто. Результати дисертації висвітлено в наукових працях, які зазначено в додатку А. Ідеї співавторів наукових публікацій не були використані в дисертації. В наукових працях, які написано та опубліковано в співавторстві, здобувачу належить: [2] – локалізація задач дослідження, розробка та тестування користувацького інтерфейсу щодо реалізації досліджуваного методу оптимізації зрошення, розробка Use-case та UML діаграм, обґрунтування висновків; [3] – обґрунтування мети і формулювання задач досліджень, синтез структури досліджуваної системи, створення та тестування комп'ютерної моделі системи, аналіз отриманих результатів і обґрунтування висновків; [4] – локалізація задач дослідження, розробка та тестування програмного забезпечення мовою Python щодо дослідження динамічних процесів розповсюдження вологи в ґрунті, аналіз отриманих результатів і обґрунтування висновків; [5] – проведення бібліографічного пошуку, аналіз і систематизація результатів бібліографічних досліджень зі створення комп'ютерних технологій та інтелектуальних алгоритмів контролю вологості ґрунту, графічне оформлення, формулювання висновків; [6] – розробка комп'ютерної технології та підходів до її тестування, аналіз отриманих результатів і формулювання висновків; [7] – обґрунтування стеку використовуваних інформаційних технологій, розробка структурно-функціональної моделі; [8] – обґрунтування математичного забезпечення методу предикативного контролю вологості ґрунту, реалізація засобів графічної інтерпретації результатів комп'ютерного тестування розробленого методу; [9] – аналіз і узагальнення техніко-функціональних складових процесу адаптивного комп'ютерного контролю характеристик об'єктів рослинництва під час оптимізації режимів зрошення ґрунту, формулювання висновків; [10] – розробка та опис принципу дії схеми компонентно-структурного забезпечення

комп'ютерної технології предикативного контролю режимів зволоження ґрунту; [11] – синтез архітектури системи моніторингу вологості ґрунту, формулювання висновків.

Апробація результатів дисертаційного дослідження. Науково-прикладні результати досліджень цієї дисертації висвітлено та обговорено під час VI Міжнародна науково-практична інтернет-конференція «Integration of Education, Science and Business in Modern Environment: Summer Debates» (Дніпро, Україна, 2024), Міжнародна науково-практична конференція «Теоретико-практичні аспекти розвитку науки, освіти, технологій і суспільства» (Кременчук, Україна, 2024), XII Міжнародна науково-технічна конференція студентів, аспірантів та молодих вчених «Молодь: наука та інновації» (Дніпро, Україна, 2024), XV Міжнародна науково-технічна конференція аспірантів та молодих вчених «Наукова весна» (Дніпро, Україна, 2025), XV Міжнародна науково-практична конференція «Комплексне забезпечення якості технологічних процесів та систем» (Чернігів, Україна, 2025), XX Міжнародна конференція з проблем використання інформаційних технологій в освіті, науці та промисловості (Дніпро, Україна, 2025), а також наукових семінарів кафедри програмного забезпечення комп'ютерних систем НТУ «Дніпровська політехніка».

Публікації. За темою дисертації опубліковано 11 наукових праць, із яких: 5 статей у наукових фахових періодичних виданнях України (у т.ч. 1 – одноосібна) та 6 тез доповідей у матеріалах міжнародних конференцій.

Структура та обсяг дисертації. Дисертаційна робота викладена за такою структурою: вступ, чотири розділи, висновки, список використаних літературних джерел зі 151 найменування та 3 додатки. Загальний обсяг дисертації становить 192 сторінки, із яких основний текст – 132 сторінки, включаючи 54 рисунки та 15 таблиць. Додатки на 32 сторінках включають список наукових публікацій здобувача за темою дисертації, документи, що підтверджують упровадження результатів дисертації, а також програмні компоненти розробленої комп'ютерної технології предикативного контролю режимів зволоження зернових культур.

РОЗДІЛ 1

СУЧАСНИЙ СТАН ТЕОРЕТИКО-ПРАКТИЧНИХ РОЗРОБОК І ДОСЛІДЖЕНЬ У ГАЛУЗІ КОМП'ЮТЕРНОГО КОНТРОЛЮ РЕЖИМІВ ЗВОЛОЖЕННЯ ЗЕРНОВИХ КУЛЬТУР

1.1 Загальна характеристика провадження сільськогосподарської діяльності з вирощування зернових культур

Сьогоденні глобальні проблеми екологічного та соціального характеру (зростання населення на планеті, війни та нестабільність логістичних маршрутів транспортування сільськогосподарської (с/г) продукції, негативна зміна клімату та інше) обумовлюють значні труднощі та виклики під час виробництва с/г продукції як у світовому, так і в національному масштабах. Зважаючи на значні успіхи в селекції рослин варто зазначити факт того, що темпи питомої врожайності с/г культур не характеризуються сталою позитивною динамікою. На глобальному рівні це обумовлено ерозією територій с/г призначення та зменшенням рівня ґрунтових вод через посуху і надмірне використання [1]. В Україні значні виклики щодо негативної динаміки стану с/г територій, окрім зазначеного вище, обумовлені війною, що призвела до забруднення водних ресурсів і ґрунтів та зменшення аграрних угідь, що призначені для с/г використання.

Оскільки земельні ресурси для горизонтального масштабування під час вирощування с/г культур є обмеженими, то зростає потреба в раціоналізації використання земельних ресурсів без зменшення обсягів виробництва с/г продукції. Графічну інтерпретацію динаміки оброблюваних с/г площ у світовому та національному форматах наведено на рисунку 1.1. Світовий досвід значної кількості країн із розвиненими аграрними виробництвами доводить, що розробка та впровадження ефективних механізмів моніторингу та контролю стану земельних ресурсів може обумовлювати позитивний ефект сталого розвитку сільського господарства у коротко- і довгостроковій перспективі.

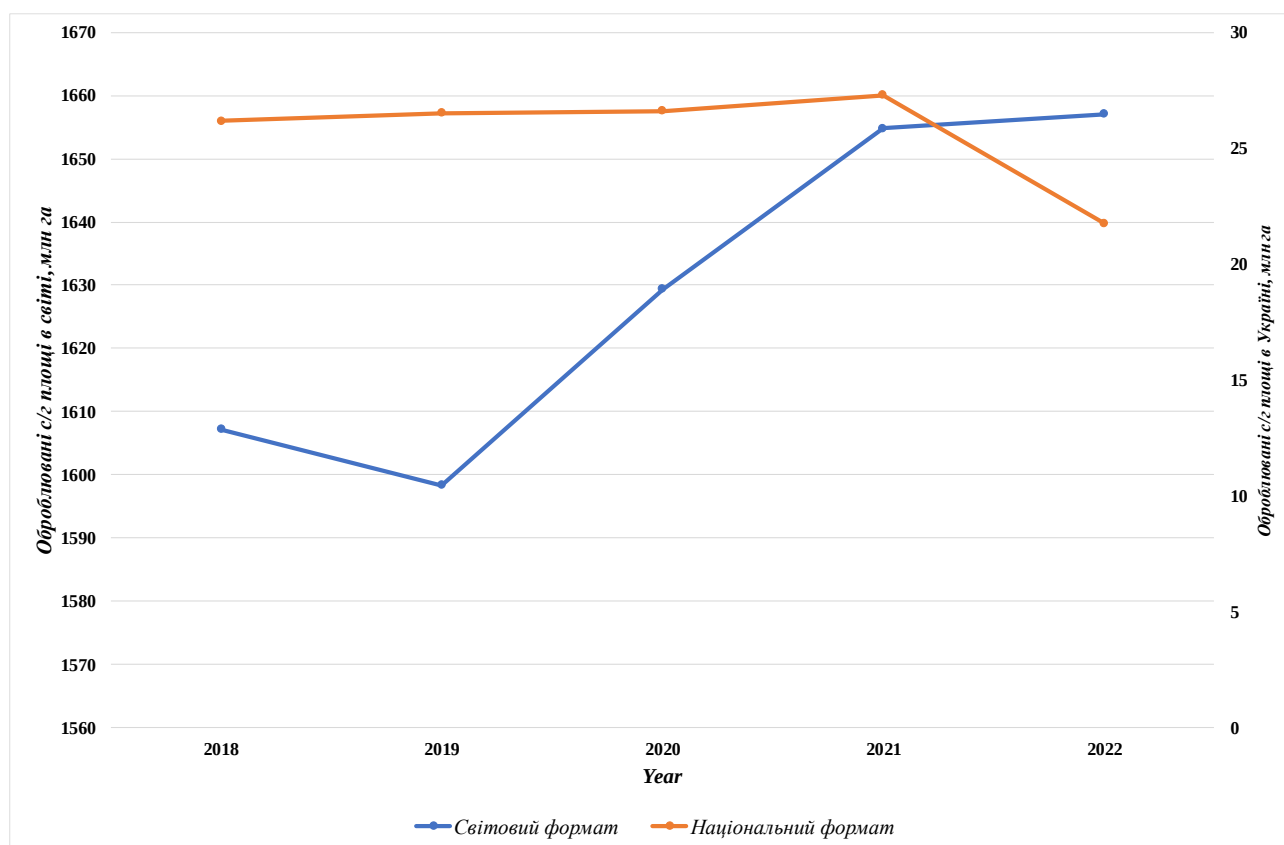


Рисунок 1.1 – Статистичні показники динаміки оброблюваних с/г площ за офіційними даними FAO [2]

З аналізу даних (див. рис. 1.1) за період із 2018 р. по 2022 р. (остання актуалізація даних), які систематизовано організацією FAO на інформаційно-аналітичному ресурсі [2], встановлено наступне:

– у період із 2019 р. по 2021 р. в світі спостерігалась позитивна динаміка збільшення оброблюваних с/г площ: в абсолютних одиницях з 1598,3 млн га до 1654,8 млн га, що у відносній формі становить +3,5 %;

– у період із 2018 р. по 2021 р. в Україні динаміка оброблюваних с/г площ залишалась майже незмінною, відповідно, 26,2 млн га та 27,3 млн га, що у відносній формі становить +1,1 %;

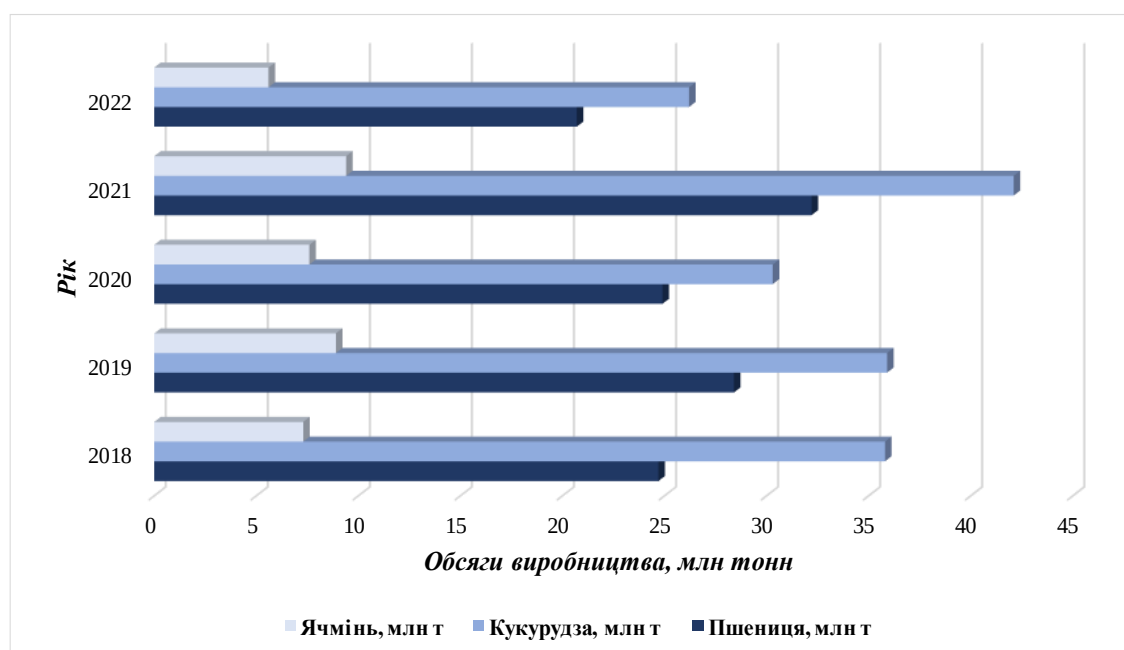
– за 2022 р. в світі спостерігалась незначна позитивна динаміка оброблюваних с/г площ (+0,2 %), у той самий час в Україні через війну спостерігалось значне скорочення земельних ресурсів с/г призначення на 20,5 %.

Систематизуючи зазначені вище статистичні факти можна зробити

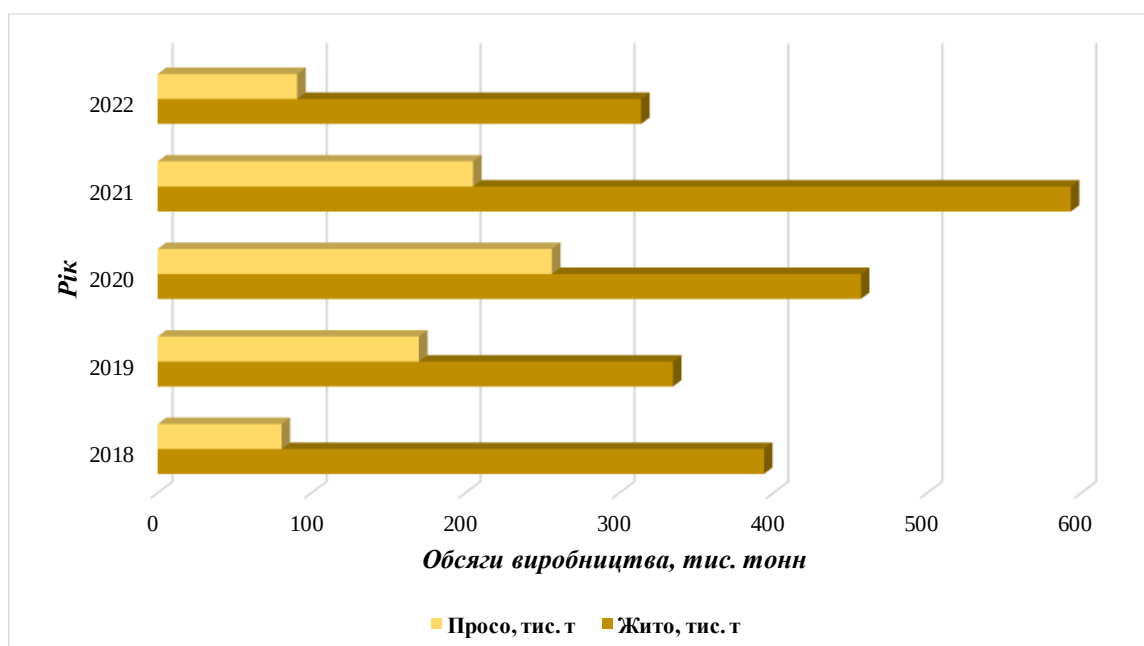
висновок, що світова інтенсифікація використання земельних ресурсів для с/г цілей та одночасна негативна динаміка площ агроугідь в Україні обумовлюють необхідність обґрунтування ефективних технологій та механізмів контролю критичних параметрів та загального стану земельних ресурсів під час вирощування польових агрокультур в умовах відкритого ґрунту.

З обліком цього також варто акцентувати увагу на тому, що вологість ґрунту є одним із вирішальних факторів під час обґрунтування і реалізації заходів щодо підвищення продуктивності ґрунту та покращення стресостійкості агрокультур. У свою чергу, ефективний контроль вологості ґрунту дозволяє запобігти ерозії ґрунту та покращити регулярність річкового стоку, що обумовлює значний екологічний та економічний ефект під час провадження с/г діяльності рослинництва відкритого ґрунту [1].

В Україні найбільшої популярності та стратегічного значення під час формування національної продовольчої безпеки та експортного потенціалу набули наступні зернові культури: пшениця, кукурудза, ячмінь, просо та жито [2, 3]. Статистичні показники динаміки обсягів виробництва зазначених зернових культур в Україні за період із 2018 по 2022 рр. наведено на рисунку 1.2.



а) обсяги виробництва ячменю, кукурудзи та пшениці



б) обсяги виробництва проса та жита

Рисунок 1.2 – Статистичні показники виробництва основних зернових культур в Україні за період з 2018 по 2022 рр.

На підставі аналізу статистичних показників вирощування зернових культур в Україні за період 2018 – 2022 рр. встановлено наступне:

– основний питомий вклад у загальних обсягах виробництва зернових агрокультур вносять: пшениця (середній обсяг виробництва за аналізований період – 26,2 млн т), кукурудза (34,1 млн га) та ячмінь (7,8 млн га);

– обсяги виробництва стратегічних зернових культур через повномасштабну війну в Україні (починаючи з 2022 р.) значно зменшились: у результаті порівняння аналогічних показників за 2022 р. з 2021 р. у відносних одиницях зменшення становить: пшениця (–35,7 %), кукурудза (–37,8 %), ячмінь (–40,4 %), просо (–55,6 %) та жито (–47,1 %).

Отже, науково-прикладна задача обґрунтування та впровадження дієвих підходів до оптимізації використання земельних і матеріальних ресурсів, у тому числі водних, під час провадження агротехнічної діяльності з вирощування зернових культур в польових умовах є актуальною як в Україні, так і у світі.

На сьогоднішній день відома достатня кількість результатів аналітичних і наукових досліджень, які присвячено встановленню рекомендованих норм

зволоження ґрунту під час вирощування зернових культур у залежності від агрокліматичних умов та стадій зростання.

Наприклад, у наукових дослідженнях [4, 5] встановлено тренд загального споживання водних ресурсів, що використовуються під час виробництва с/г продукції у світі, як у графічному вигляді інтерпретовано на рисунку 1.3.

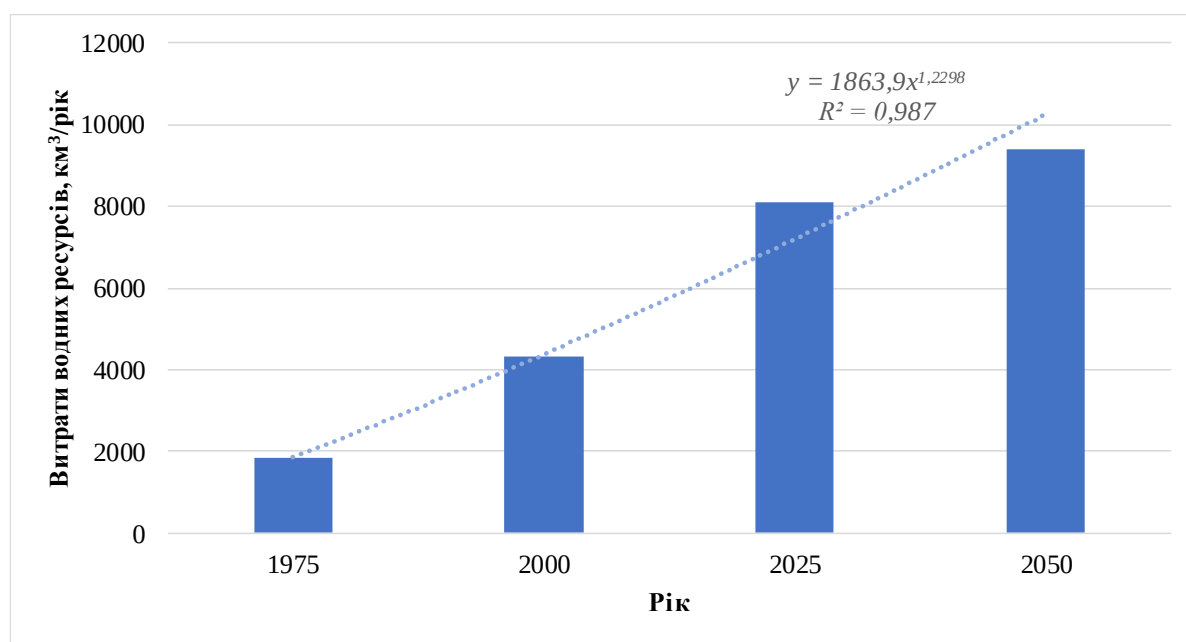


Рисунок 1.3 – Оціночні значення витрат водних ресурсів на виробництво с/г продукції у світовому масштабі

У аналітичному джерелі [6] встановлено оціночні значення коефіцієнтів споживання вологи для основних типів сільськогосподарських культур, що є типовими під час вирощування в агрокліматичних умовах України (див. табл. 1.1). Додатково авторами дослідження [6] встановлено оціночні значення водоспоживання зернових культур (див. табл. 1.2) та орієнтовні значення нижньої межі допустимого діапазону вологості ґрунту (див. табл. 1.3). Автори цієї статті зазначають, що сумарне споживання вологи є динамічним показником та може варіюватись у широкому діапазоні, межі якого обумовлено типами і стадіями вегетації вирощуваних с/г культур, кліматичними факторами, рівнем автоматизації агротехніки та інше.

Таблиця 1.1 – Оціночні значення норм споживання води зерновими культурами [6]

Тип с/г культури	Показник водоспоживання, м ³ /т		
	Степ	Лісостеп	Полісся
Ярі зернові	від 900 до 1000	від 550 до 700	від 425 до 500
Озимі зернові	від 1000 до 1100	від 600 до 800	від 435 до 550
Кукурудза на зелену масу	від 140 до 160	від 125 до 135	від 110 до 115
Кукурудза на зерно	від 550 до 700	від 400 до 500	дані відсутні

Таблиця 1.2 – Оціночні значення коефіцієнтів водоспоживання зернових культур у агрокліматичних умовах України [6]

Тип с/г культури	Коефіцієнт споживання води, мм/ц		
	Посушливий рік	Середній рік	Вологий рік
Пшениця озима	від 500 до 525	від 450 до 500	від 350 до 450
Пшениця яра	від 465 до 500	від 435 до 465	від 400 до 435
Жито озиме	від 450 до 550	від 425 до 450	від 400 до 425
Кукурудза на зерно	від 300 до 325	від 275 до 300	від 250 до 275
Ячмінь	від 500 до 530	від 435 до 500	від 375 до 425

Таблиця 1.3 – Орієнтовні значення нижньої межі допустимого діапазону вологості ґрунту [6]

Тип с/г культури	Орієнтовні значення нижньої межі допустимого діапазону вологості ґрунту у % від гранично-польової вологоємкості		
	Легкі ґрунти	Середні ґрунти	Важкі ґрунти
Кукурудза	70	70	75
Пшениця, просо, овес	65	70	75
Зернобобові	65	70	75

Інформаційний аналіз аналітичного джерела [7] дозволив встановити, що на підставі даних щодо вологості ґрунту може бути оцінене значення продуктивної вологи в конкретному шарі (глибині) ґрунту, як показано в таблиці 1.4.

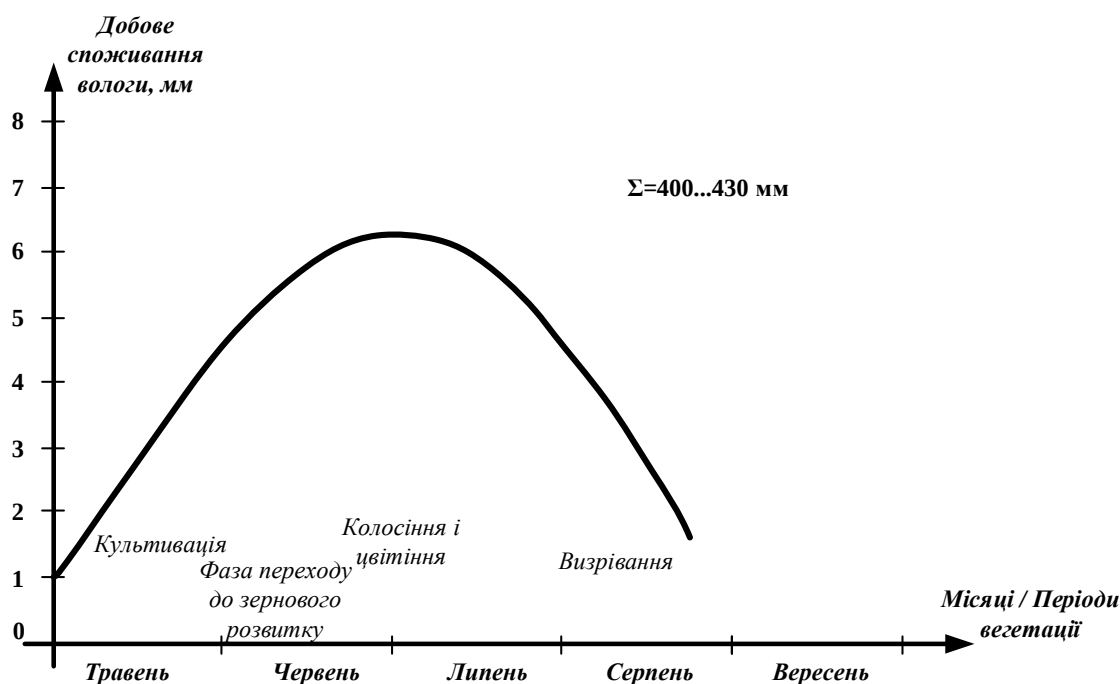
Таблиця 1.4 – Якісна градація запасів продуктивної вологи в ґрунті під час вирощування зернових культур [7]

Якісна оцінка запасів продуктивної вологи в ґрунті	Вологість ґрунту, мм
<i>шар від 0 м до 0,2 м</i>	
висока	більше 40
задовільна	від 20 до 40
низька	менше 20
<i>шар від 0 м до 1 м</i>	
дуже висока	більше 160
висока	від 130 до 160
задовільна	від 90 до 130
низька	від 60 до 90
дуже низька	менше 60

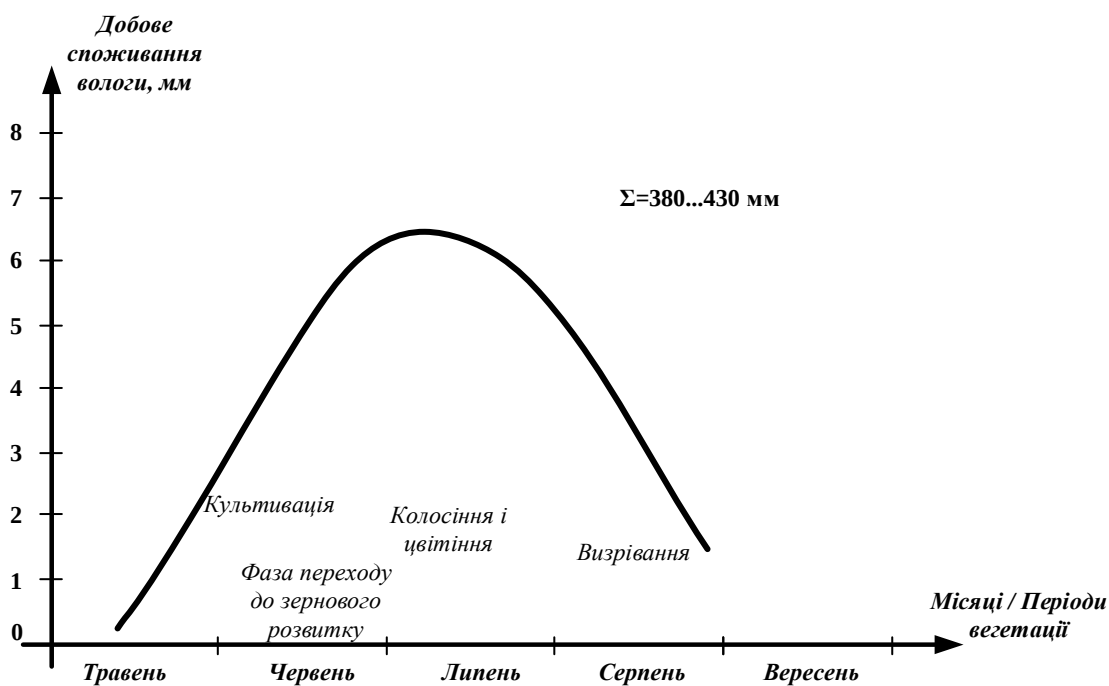
Глибина (шар) контролю запасів продуктивної вологи в ґрунті залежить від типів і стадії вегетації с/г культур, а також від задач агротехнічного аналізу. Рекомендованими шарами контролю вологості ґрунту є: поверхневий шар, на глибині 0,2 м та 1 м [7], проте має враховуватись інформація щодо поточної локації кореневмісного шару вирощуваних с/г культур.

У наукових дослідженнях [8–10] встановлено, що потреби зернових культур у споживанні вологи з ґрунту значною мірою залежать від стадії їх вегетації. Графічні залежності потреб у добовому споживанні вологи ярої пшениці та ячменю наведено на рисунку 1.4. Як видно з аналізу цих залежностей, то добове споживання вологи з ґрунту є динамічною величиною. Найменше споживання води спостерігається на початкових і фінальних етапах життєвого циклу зернових

культур, а найбільше – під час колосіння і цвітіння, що в основному обумовлено збільшенням площі листової поверхні, з якої випаровується волога.



а) пшениця



б) ячмінь

Рисунок 1.4 – Графіки добового споживання води зерновими культурами [8, 10]

Варто зазначити, що залежності, які наведено на рисунку 1.4, у цьому дослідженні носять якісний характер, адже кількісні оцінки, отримані в роботах [8–10], характерні для агрокліматичних умов, які є відмінними від України. Проте вони дозволяють зробити висновок щодо необхідності постійного контролю вологості ґрунту під час повного циклу вирощування зернових культур у польових умовах. Важливим фактором, який має бути обов’язково врахований під час розробки та дослідження методів і засобів комп’ютерного збору та обробки даних щодо вологості ґрунту є агрокліматичні умови, в яких вирощуються певні типи с/г культур. На теперішній час в Україні прийнято виділяти три основні агрокліматичні зони (див. рис. 1.5), а саме [11, 12]:

- Степ (південний і північний): орієнтовна річна сума опадів становить від 350 мм до 540 мм, вірогідність посух змінюється від 40 % до 70 %;
- Лісостеп: орієнтовна річна сума опадів становить від 575 мм до 650 мм, вірогідність посух змінюється від 15 % до 40 %;
- Полісся: орієнтовна річна сума опадів становить від 596 мм до 760 мм, вірогідність посух змінюється від 0 % до 10 %.



	Зони, підзони, райони	Гідротермічний коефіцієнт	Сума температур (у градусах)
I	Волога, помірно тепла зона	2,0–1,3	2400–3100
I'	Підзона достатнього зволоження ґрунту	2,0–1,3	2400–2800
Ia	Закарпатський вологий, теплий район із м'якою зимою	1,8–1,3	2600–3100
Ib	Передкарпатський вологий, теплий район	1,8–1,3	2600–2900
II	Недостатньо волога, тепла зона	1,3–1,0	2500–2900
III	Посушлива, дуже тепла зона	1,0–0,7	2900–3300
IIIa	Донецький недостатньо вологий, дуже теплий район	1,0–1,1	3000
IV	Дуже посушлива, помірно жарка зона з м'якою зимою	0,7–0,5	3300–3400
IVa	Передгірний Кримський посушливий, дуже теплий район із м'якою зимою	0,7–0,8	2800–3300
A	Карпатський район вертикальної кліматичної зональності		
B	Кримський район вертикальної кліматичної зональності		

Рисунок 1.5 – Агрокліматичні зони України [12]

Найбільш інформативним фактором, який обумовлює відповідне агрокліматичне зонування території України є співвідношення ресурсів вологи і тепла, що, в свою чергу, визначається кліматичними параметрами температури (повітря і ґрунту) та кількості опадів, які обумовлюють поточний рівень вологості

грунту.

Таким чином, на підставі проведеного аналізу загальної характеристики провадження с/г діяльності з вирощування зернових культур у глобальному та національному масштабах встановлено необхідність наукового обґрунтування та практичної реалізації ефективних шляхів оптимізації агротехнічних процедур і використовуваних ресурсів під час повного циклу вирощування польових зернових культур, у тому числі, за рахунок створення, дослідження й використання комп'ютерних технологій предикативного контролю стану фізичних і біологічних середовищ аграрних об'єктів.

1.2 Аналіз технологій, методів і моделей комп'ютерного контролю режимів зволоження сільськогосподарських культур

Науково-прикладним задачам розробки і використання технологічного забезпечення оптимального зрошення польових культур у сьогоденній практиці присвячено значну увагу. Це обумовлено наступними прикладними проблемами агроекологічного та економічного характеру [13]:

- перезволоження призводить до значного нецільового використання водних ресурсів, що значно погіршує економічні показники провадження с/г діяльності рослинництва, а також призводить до вимивання поживних елементів і речовин з прикореневого шару с/г культур;

- недостатнє та/або несвоєчасне зволоження ґрунту в процесі вирощування с/г культур призводить до надмірного накопичення поживних речовин у шарі гумусу та робить ґрунти лужними, що значно погіршує якість і врожайність зернових культур.

На сьогоднішній день методологічною основою побудови систем контролю вологості ґрунту для провадження с/г діяльності рослинництва є наступні підходи [13, 14]:

- оцінка водного балансу з урахуванням дестабілізуючого впливу ґрунтокліматичних факторів;

- онлайн моніторинг (наземний сенсорний і супутниковий) поточної вологості ґрунту та відповідних похідних показників;

- безпосереднє (пряме) детектування поточного стану с/г культур.

У свою чергу, зазначені вище принципи контролю вологості ґрунту є функціонально-алгоритмічною основою побудови систем автоматизованого зрошення с/г територій. На сьогоднішній день у світовій агротехнічній практиці найбільшої популярності набули наступні системи та технології поливу [14]:

- системи розподілу води під тиском: вода транспортується і розподіляється вздовж ґрунтового покриву в мережах труб під високим тиском;

- технологія самопливного розподілу: вода транспортується завдяки гравітаційному потоку і розподіляється на рівні поля через наземний режим вільного поверхневого потоку;

- системи на основі дренажного потоку: використовується контроль дренажу – субзрошення.

Основною метою розробки й упровадження зрошувальних систем на основі алгоритмів адаптивного та прогнозного комп'ютерного контролю є оптимізація агротехнічних процедур із урахуванням критеріїв мінімізації потреб у праці та ресурсах і максимізації обсягів/якості вирощування с/г культур [15]. Ефективність застосування програмно-технічних моделей і засобів комп'ютерного контролю залежать від типів та конструкції використовуваних зрошувальних технологій і систем з урахуванням часу й тривалості зрошення ґрунту, оптимальної кількості води та можливості підвищення енергетичної ефективності. Під час створення й упровадження програмно-технічних засобів комп'ютерного контролю зрошувальних систем мають бути обов'язково враховані наступні фактори: типи і стадії вегетації вирощуваних с/г культур, кліматичні умови, форми і розміри полів, рівень механізації/автоматизації та інше [14, 16]. Все це обумовлює значне технологічне різноманіття відомих систем зрошення агроугідь. Деталізовану інтерпретацію технічних рішень зрошення ґрунту, які набули популярності в світовій і вітчизняній агротехнічній практиці під час провадження с/г діяльності рослинництва в польових умовах, наведено на рисунку 1.6 [13].



Рисунок 1.6 – Технології зрошення ґрунту під час вирощування с/г культур у польових умовах

Для оптимізації використання ресурсів, у першу чергу водних, під час виконання агротехнічних процедур із вирощування зернових культур необхідно постійно детектувати сукупність параметрів і факторів, що обумовлюють якість і обсяги виробництва с/г продукції рослинництва. Комп'ютерний контроль адаптивного зрошення ґрунту передбачає збір, накопичення та обробку фактичних вимірювальних даних про стан рослин і ґрунту, а також кліматичні умови за допомогою новітніх інформаційних, сенсорних, комунікаційних і комп'ютерних технологій, як показано на рисунку 1.7 [17–19].



Рисунок 1.7 – Функціональні складові комп'ютерного контролю інтегрального стану с/г об'єктів під час оптимізації режимів зрошення ґрунту

У свою чергу, функціонально-алгоритмічним базисом процесу реалізації програмно-технічного забезпечення засобів і систем комп'ютерного контролю режимів зрошення с/г територій є неруйнівний зональний (на різних глибинах і локаціях поля) моніторинг вологості в режимі реального часу. З обліком того факту, що вологість ґрунту є динамічною величиною, як у часі, так і в просторі, то обов'язковою умовою є її постійний контроль із обліком дестабілізуючих факторів (див. рис. 1.7). На сьогоднішній день у світовій науково-технічній практиці відома значна кількість методів та відповідних засобів прецизійного онлайн-моніторингу вологості ґрунту. Глобально ці методи можуть бути поділені на дві великі групи: лабораторні (прямі) – вологість ґрунту оцінюється як різниця мас вологого й сухого ґрунту; опосередковані (польові, дистанційні) – вологість ґрунту оцінюється на підставі даних про зміну будь-якого фізико-хімічного параметру, який пов'язаний із нею [20–24]. Графічний вид результатів аналізу та логічної систематизації відомих методів неруйнівного моніторингу вологості ґрунту представлено на рисунку 1.8, а також детально описано їх основні переваги й обмеження в таблиці 1.5.

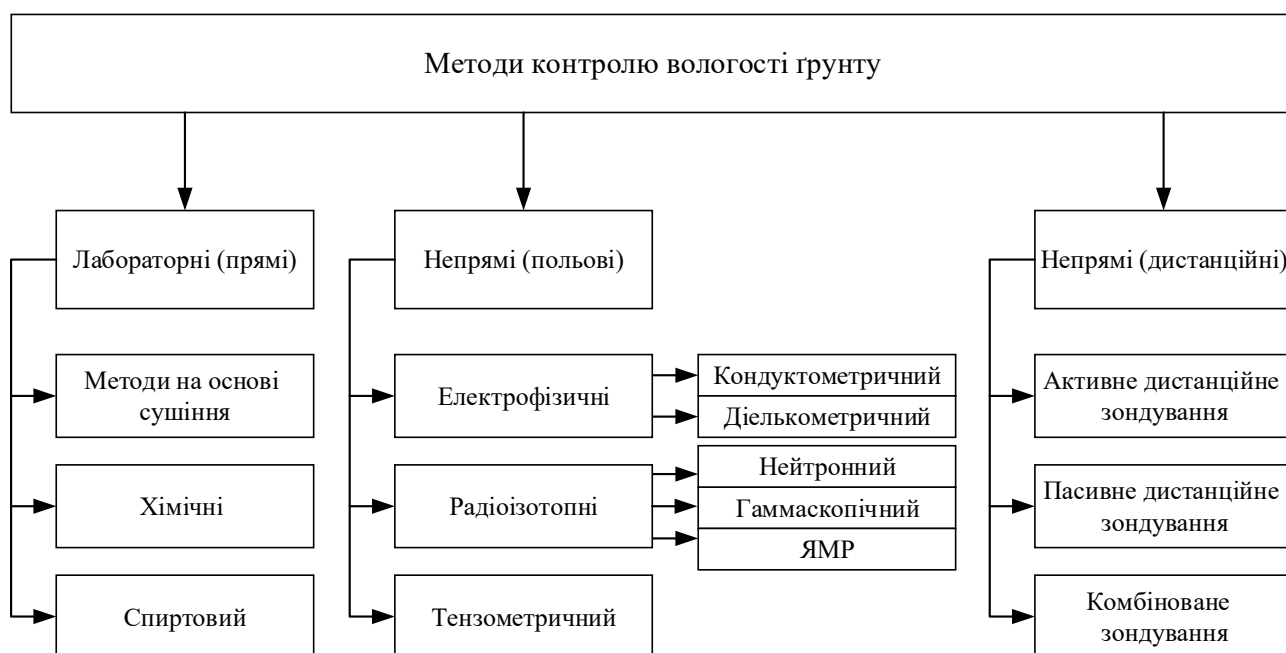


Рисунок 1.8 – Існуючі методи контролю вологості ґрунту

Таблиця 1.5 – Характеристика існуючих методів контролю вологості ґрунту

Метод	Характерні особливості
Прямі методи: сушіння, хімічні, спиртовий	Характеризуються найвищими показниками точності (порогове значення відносної невизначеності не перевищує $\pm 5\%$ у діапазоні контролю відносної вологості ґрунту від 0% до 100%). Потребують складного і довготривалого лабораторного аналізу з використанням спеціалізованої контрольно-діагностичної апаратури. Не придатні для неруйнівного моніторингу вологості ґрунту в польових умовах у режимі реального часу.
<i>Непрямі (польові)</i>	
Кондуктометричний	Функціональною основою є залежність між вологістю ґрунту та питомим електричним опором (провідністю). Під час інструментального контролю детектується вагова вологість ґрунту. Існує можливість масштабованого зондування вологості на різних глибинах і локаціях поля в режимі реального часу. Абсолютна невизначеність змінюється від $\pm 5\%$ до $\pm 10\%$ у діапазоні контролю вологості від 5% до 95% .
Дієлькометричний	Функціональною основою є залежність між вологістю ґрунту та діелектричною проникністю. У процесі контролю детектується об'ємна вологість ґрунту. Існує можливість масштабованого зондування вологості на різних глибинах і локаціях поля в реальному часі. Абсолютна невизначеність змінюється від $\pm 5\%$ до $\pm 10\%$ у діапазоні контролю вологості від 5% до 95% .

Продовження табл. 1.5

Нейтронний	Вологість ґрунту визначається на основі явища сповільнення швидкості нейтронів під час їх зіткнення з атомами водню. Метод призначений для детектування об'ємної вологості та є вузькоспеціалізованим експериментальним.
Гаммаскопічний	Вологість ґрунту визначається на основі явища послаблення потоку гамма-випромінювання зі зростанням відносної вологості.
Ядерний магнітний резонанс (ЯМР)	Функціональним базисом є явище поглинання енергії електромагнітного поля високої частоти атомами водню. Потребує попередніх процедур відбору і підготовки ґрунтових проб, а також може чинити негативний ефект на кореневу систему вирощуваних с/г культур.
<i>Непрямі (дистанційні)</i>	
Активне зондування	В основу цієї групи методів покладено використання електромагнітного випромінювання з довжиною хвилі від 0,5 см до 100 см для моніторингу характеристик ґрунту. Сенсор SAR (specific absorption rate) є найбільш широко використовуваним сенсором під час моніторингу вологості ґрунту через його здатність генерувати зображення з високою роздільною здатністю для визначення вологості ґрунту на основі її просторової варіації. Технології, що базуються на цій групі методів є нечутливими до погодних умов, проте мають низькі показники частоти повторних зйомок та високу чутливість до дестабілізуючого впливу наявності рослинного покриву і нерівностей ґрунту.
Пасивне зондування	Ця група методів генерує вимірювальну інформацію про вологість ґрунту незалежно від наявності рослинного покриву і нерівностей ґрунту. Технології, що базуються на пасивному мікрохвильовому зондуванні характеризуються можливістю охоплювати великі площі поверхні з низькою просторовою роздільною здатністю. До цієї групи методів відносяться: метод універсального трикутного зв'язку, технології статистичного аналізу і застосування нейронних мереж, моделі яскравості.
Комбіноване зондування	Інтеграція вимірювальної інформації з високою просторовою роздільною здатністю, що генерується засобами активного дистанційного зондування, з даними з високою часовою роздільною здатністю, що генеруються засобами пасивного дистанційного зондування на великій території, покращує точність, масштаби і достовірність під час оцінки вологості ґрунту.

На підставі проведеного інформаційного аналізу даних, які наведено на рисунку 1.8 і в таблиці 1.5, встановлено факт значного розвитку методів контролю вологості ґрунту, які обумовлено широким спектром цілей відповідного аналізу. З урахуванням необхідності програмно-технічної інтеграції методів контролю та моніторингу вологості ґрунту до комп'ютерної технології контролю режимів зволоження зернових культур у польових умовах у реальному часі, варто зазначити наступне: найбільш доцільними за результатами попереднього аналізу апріорних даних є кондуктометричний та/або діелькометричний методи польового контролю. Цей факт обумовлено можливістю реалізації масштабованого зонального (за глибиною та локаціями поля) комп'ютерного контролю вологості ґрунту в режимі реального часу, а також програмно-апаратною сумісністю з використовуваними технологічними рішеннями автоматизованого зрошення ґрунту.

Як зазначалось вище, кондуктометричний і діелькометричний методи аналізу ґрунту є непрямыми (опосередкованими), а отже, потребують встановлення функціональних зв'язків між безпосередньо детектованими фізико-хімічними параметрами (питомий електричний опір або діелектрична проникність, відповідно) та відносною вологістю ґрунту. Відповідно до цього було проведено аналіз відомих теоретичних моделей, які описують зазначені функціональні зв'язки [19]. Результати проведеного аналізу у відповідності до типів моделей (статичні та динамічні) наведено в таблицях 1.6 і 1.7.

Таблиця 1.6 – Результати аналізу статичних моделей контролю вологості ґрунту

Характеристика моделі	Математична основа	Посилання
Визначено характеристику перетворення між вихідною напругою ємнісного сенсора вологості ґрунту та відносною вологістю на базі гравіметричного методу. Середня абсолютна невизначеність апроксимації дорівнює 10,1 %±0,1 %.	$W = 34,23 \cdot V^2 - 182,24 \cdot V + 249,45,$ де W – вологість ґрунту, %; V – вихідна напруга сенсора, В.	[25]

Продовження табл. 1.6

Проведено експериментальні дослідження п'яти дієлькометричних сенсорів вологості ґрунту ThetaProbe ML2х. Проведено тестування на різних типах ґрунтів. Показник R^2 під час апроксимації даних для різних сенсорів і типів ґрунтів змінюється в діапазоні від 0,949 до 0,999.	$W = \frac{(4,7 \cdot V^3 - 6,4 \cdot V^2 + 6,4 \cdot V + 1,07) - 1,6}{8,4},$ де W – вологість ґрунту, %; V – вихідна напруга сенсора, В.	[26]
Встановлено емпіричні залежності сумарного водоспоживання та норм поливу в залежності від умов вирощування польових культур.	$E = 0,1 \cdot K_B \cdot U_{II},$ де E – сумарне споживання води за період вегетації, м³/га; K_B – коефіцієнт водоспоживання (залежить від типів вирощуваних с/г культур), м³/т; U_{II} – запрограмований врожай, ц/га. $II_H = \frac{100 \cdot h \cdot V \cdot (B_r - B_\phi)}{K_{II}},$ де II_H – норма поливу, м³/га; h – глибина шару ґрунту, що зволожується, м; V – маса ґрунту (об'ємна) для аналізованого шару h, г/см³; B_r – граничне значення польової вологоємності для шару ґрунту h, % від сухої маси ґрунту; B_ϕ – фактична вологість аналізованого шару ґрунту h до зрошення, % від сухої маси ґрунту; K_{II} – коефіцієнт використання води (залежить від погодних умов, технології поливу та фізико-хімічних характеристик ґрунту).	[6]
Встановлено функціональну основу комп'ютеризованого пристрою контролю вологості ґрунту на основі градувальної характеристики економічного сенсору ECH2O-5TE з урахуванням дестабілізуючого впливу типу (фізико-хімічних властивостей) і температури ґрунту, що аналізується.	$W_A = \frac{W_s}{(a \cdot EC^2 + b \cdot EC + c)} + \frac{W_s}{(b \cdot T^2 + e \cdot T + f)},$ де W_A – актуальний об'ємний вміст води в аналізованому ґрунті, %; W_s – виміряне значення об'ємного вмісту води в аналізованому ґрунті, %; EC – електропровідність насиченого ґрунтового розчину, См/м; T – поточна температура ґрунту, °C; a, b, c, d, e, f – константи, що визначаються типом ґрунту.	[27]

З аналізу інформації щодо типових статичних моделей комп'ютерного контролю режимів зрошення ґрунту під час вирощування польових с/г культур [19], яку представлено в таблиці 1.6, встановлено наступне:

– найбільш популярними сенсорами, які становлять апаратну основу комп'ютерних технологій контролю вологості різних за фізико-хімічними властивостями типів ґрунту є дієлькометричні (ємнісні) сенсори;

– більшість встановлених статичних характеристик перетворення засобів контролю вологості ґрунту носять поліноміальний характер;

– основними факторами, що враховуються під час розробки комп'ютерних засобів контролю вологості ґрунту є тип (гранулометричний склад і солоність) та температура;

– статичні моделі, що присвячені оцінці норм поливу носять емпіричний характер та враховують типи ґрунту та вирощуваних культур.

Таблиця 1.7 – Результати аналізу динамічних моделей контролю вологості ґрунту

Характеристика моделі	Математична основа	Посилання
Досліджено динамічну модель, яка описує зміну вологості ґрунту на основі рівняння Річардса, що встановлює закономірності масопереносу води в зоні аерації. В запропонованій моделі додатково враховано функціональну складову теплопередачі в процесі руху води в ґрунті.	$\frac{\partial W(x,t)}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left(k(h) \frac{\partial h}{\partial x} - k_T \frac{\partial T}{\partial x} \right) - \frac{\partial k(h)}{\partial x} - S(x,t,h)$ де W – абсолютна вологість ґрунту; h – тиск; T – температура ґрунту; k – гідравлічна провідність ґрунту (обумовлена гранулометричним складом); k_T – теплова складова гідравлічної провідності ґрунту; S – коренева поглинаюча здатність рослин, що вирощуються в аналізованих умовах; x – координата відстані; t – час.	[28]
Запропоновано та досліджено двовірну модель розповсюдження води в зоні аерації ґрунту на основі рівняння масопереносу речовини в частинних похідних.	$\frac{\partial W}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left(K \frac{\partial W}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(K \frac{\partial W}{\partial z} \right),$ де W – об'ємний вміст води в ґрунті; K – гідравлічна провідність ґрунту; x, z – координати розповсюдження води в ґрунті; t – час.	[29]

Розроблено та досліджено модель на основі рівняння гідрологічного балансу з обліком процесів накопичення, споживання та випаровування ґрунтової вологи.	$W(t) = ir(t) + cr(t) + rf(t) - et(t) - ro(t) - dp(t),$ де W – вологість ґрунту в кореневій зоні рослин; ir – кількість вологи, що надходить через полив; cr – кількість вологи, що надходить через капілярний підйом ґрунтових вод; rf – кількість вологи, що надходить через опади; et – кількість вологи, що випаровується; ro – показник втрати вологи внаслідок стікання; dp – показник втрат вологи внаслідок всмоктування за глибиною ґрунту; t – час.	[30]
Запропоновано та досліджено методами комп'ютерного експерименту імітаційну модель прогнозного контролю вологості ґрунту. Під час побудови моделі враховано характеристики вологості ґрунту на різних глибинах. У процесі вирішення оптимізаційної задачі враховано показники витрати води та електроенергії, а також характеристики процесу транспірації с/г культур.	$\frac{\partial W_i}{\partial t} = \frac{1}{D_i} \left(Q_i(W_i, W_{i+1}) - \frac{T}{3\rho_w} \right),$ $\forall i = 2 \dots N - 1$ де W_i – об'ємна вологість ґрунту в кожному аналізованому шарі; D_i – товщина аналізованого шару ґрунту; Q_i – потік води між аналізованими шарами ґрунту; T – показник транспірації з рослинного покриву; ρ_w – густина води; N – кількість аналізованих шарів ґрунту; t – час.	[31]
Розроблено математичну та комп'ютерну моделі для прогнозного контролю характеристик системи крапельного зрошення ґрунту в тепличних умовах. Проведено оптимізаційні дослідження на підставі цільової функції, що враховує інтегральні економічні показники. В основу моделі покладено залежність швидкості евапотранспірації вологи.	$ET_0 = \frac{0,408\Delta(R_n) + \frac{900}{T + 273}\gamma U_2(e_2)}{\Delta + (1 + 0,34U_2)\gamma},$ $ET_C = ET_0 \cdot K_C,$ де ET_0 – еталонне значення евапотранспірації ґрунтової вологи, мм/год.; R_n – показник короткохвильового випромінювання, Вт/м²; Δ – кутовий коефіцієнт нахилу кривої тиску насиченої пари, кПа/°C; T – температура повітря, °C; U_2 – середня добова / годинна швидкість вітру на висоті 2 м, м/с; e_2 – тиск потоку насиченої пари, кПа; γ – показник, що відповідає за швидкість випаровування, кПа/°C; ET_C – актуальне значення евапотранспірації, мм/год.; K_C – коефіцієнт, що відповідає за вид с/г культур.	[32]

На підставі аналізу відомих математичних моделей, що описують динамічні характеристики режимів зволоження ґрунту (див. табл. 1.7), встановлено наступне:

– формалізованою основою більшості розроблюваних математичних і комп’ютерних моделей систем контролю вологості ґрунту є нелінійне диференційне рівняння Річардса в частинних похідних, яке описує процеси масопереносу вологи в зоні аерації з одночасним обліком дестабілізуючих факторів і процесів;

– на сьогоднішній день під час розробки комп’ютерних засобів і інтелектуалізованих методів контролю режимів зволоження під час вирощування с/г культур набули методи прогнозного контролю на підставі вимірювальних даних про вологість ґрунту з урахуванням впливних параметрів.

Окремої уваги під час аналізу відомих методів комп’ютерного контролю режимів зволоження с/г культур та відповідних їм технологій заслуговують ті, які базуються на інтелектуальних алгоритмах обробки вимірювальних даних. Цей факт пов’язаний з їх високою ефективністю під час інтеграції до локальних комп’ютеризованих обчислювальних пристроїв у вигляді вбудованого програмного забезпечення задля контролю різних фізико-хімічних процесів, у тому числі, прогнозного контролю вологості ґрунту. Систематизовані результати аналізу відомих методів інтелектуального контролю вологості ґрунту наведено в таблиці 1.8 [19].

Таблиця 1.8 – Результати аналізу відомих розробок систем контролю вологості ґрунту на основі інтелектуальних алгоритмів

Характеристика моделі	Функціонально-логічна основа	Посилання
Створено і досліджено модель контролю стану ґрунту і посівів с/г культур, що визначає необхідні параметри поливу з урахуванням даних онлайн-моніторингу вологості ґрунту, температури й вологості повітря, часовий регламент поливу та поточні погодні умови.	Синтезована база правил на основі нечіткої логіки. Вхідні змінні: вологість ґрунту, температура повітря. Вихідна змінна – інтенсивність поливу.	[33]

Продовження табл. 1.8

Запропоновано та проведено дослідження нелінійної прогнозної моделі оптимального зволоження с/г культур у тепличних умовах. Система, що базується на розробленій моделі, реалізує онлайн детектування фізико-хімічних характеристик ґрунту та обчислює прогнозне значення наступного циклу поливу.	Програмне забезпечення на основі методів машинного навчання, а саме: LSTM (Long Short-Term Memory), RNN (Recurrent Neural Network), GRU (Gated recurrent unit). Вхідні змінні: температура і вологість ґрунту, температура і вологість повітря, інтенсивність освітлення та кількість опадів. Вихідна змінна: прогнозне значення часу наступного поливу.	[34]
Розроблено модель на основі положень Інтернету речей та штучного інтелекту, що призначена для адаптивного керування зрошенням з урахуванням цільової функції максимізації врожайності с/г культур та мінімізації споживання водних ресурсів, відповідно до концептуальних принципів Agriculture 4.0.	Програмне забезпечення на основі методів машинного навчання, а саме: KNN (K-Nearest Neighbors), SVM (Support Vector Machine), NB (Naive Bayes). Вхідні змінні: вологість ґрунту, температура і вологість повітря. Вихідна змінна: сигнали керування поливним насосом.	[35]
Розроблено програмно-апаратне забезпечення комп'ютерного методу інтелектуального контролю режимів поливу тепличних культур з урахуванням їх стадій вегетації та дестабілізуючої дії факторів мікроклімату теплиць.	Комп'ютерна модель адаптивного керування поливним насосом на основі нечіткої логіки. Вхідні параметри: вологість ґрунту, доба після висадки культур (глибина кореневої системи с/г культур). Вихідна змінна: широтно-імпульсно модульований (ШИМ) сигнал керування поливним насосом.	[36–38]

Як видно з аналізу типових результатів досліджень із розробки моделей і методів інтелектуального прогнозного контролю вологості ґрунту під час вирощування с/г культур (див. табл. 1.8), то найбільшої популярності набули алгоритми машинного навчання та нечіткої логіки. Проаналізовані результати відомих досліджень [33–38] доводять високі показники ефективності інтелектуальних алгоритмів у порівнянні з класичними під час реалізації функціональних компонент обробки вимірювальних даних щодо поточного фізико-хімічного стану ґрунту з метою оптимізації режимів зволоження с/г культур, що вирощуються в різних агрокліматичних зонах. Такі алгоритми дозволяють програмно реалізувати засади прогнозного адаптивного контролю вологості ґрунту з урахуванням значної кількості інформативних характеристик та параметрів об'єктів комп'ютерного контролю і дестабілізуючих факторів.

1.3 Аналіз програмно-технічного забезпечення отримання, передачі та обробки даних щодо режимів зволоження сільськогосподарських культур

У сьогоденній науково-технічній практиці під час вирішення задач розробки та використання комп'ютерних технологій задля інтелектуального контролю та моніторингу значного спектру виробничих процесів, у тому числі аграрних, набули концептуальні підходи Інтернету речей (IoT) та Індустрії 4.0. Системи та технології, що реалізують зазначені вище концептуальні напрямки, в більшості випадків є мережевими багаторівневими програмно-технічними організаціями, які мають функціонувати як завершений сервіс із автоматичним прийняттям рішень [39, 40].

У свою чергу, ці концепції вплинули на активний розвиток таких аграрних напрямків як «Точне землеробство», «Розумне сільське господарство», «Сільське господарство 4.0», «Цифрове сільське господарство» та інше [41–43]. У системних і мережових рішеннях агротехнічного контролю й моніторингу на основі IoT біологічні (рослини і тварини) та фізичні (грунт, агротехнічні механізми, пристрої, техніка та ін.) об'єкти мають оснащуватись пристроями детектування інформативних параметрів і характеристик, а також поєднуватись між собою за відповідними технологіями й протоколами задля масштабного обміну даними, в тому числі в мережі Інтернет. Цей підхід призначений для практичної реалізації адаптивної цифрової ідентифікації, моніторингу та контролю об'єктів і процесів сільськогосподарської діяльності в реальному часі [44, 45].

Розробкою та впровадженням програмно-технічних засобів і систем IoT займається значна кількість провідних фірм-виробників як на світовому (Intel, Cisco, Eurotech, Siemens та інші), так і на національному рівні (Lifecell, Atiko, IT Enterprise та інші). Також варто зазначити, що розробкою та обґрунтуванням перспектив розвитку таких систем займаються не тільки промислові виробники, але й науково-практичні та експертні об'єднання та організації, як наприклад: ITU (Міжнародний союз електрозв'язку), IETF (Інженерна рада Інтернету), IEEE

(Інститут інженерів електротехніки та електроніки), ІІС (Консорціум промислового Інтернету), АППАУ (Асоціація підприємств промислової автоматизації України) та інше. У результаті діяльності зазначених організацій і об'єднань із розробки нормативних і науково-аналітичних документів у галузі Інтернету речей та Індустрії 4.0 було синтезовано еталонні моделі, які рекомендуються до використання під час розробки архітектури IoT систем і мереж для різних сфер застосування, в тому числі, сільськогосподарської. Серед відомих моделей побудови IoT систем і технологій можна виділити дві, які набули найбільшого розповсюдження серед науковців і практикуючих експертів, а саме: еталонна модель Y.2060 від ITU (Міжнародний союз електрозв'язку) [46] та еталонна модель від IWF (Всесвітній форум Інтернету речей) [47]. Архітектурні рішення цих моделей наведено на рисунках 1.9 і 1.10.

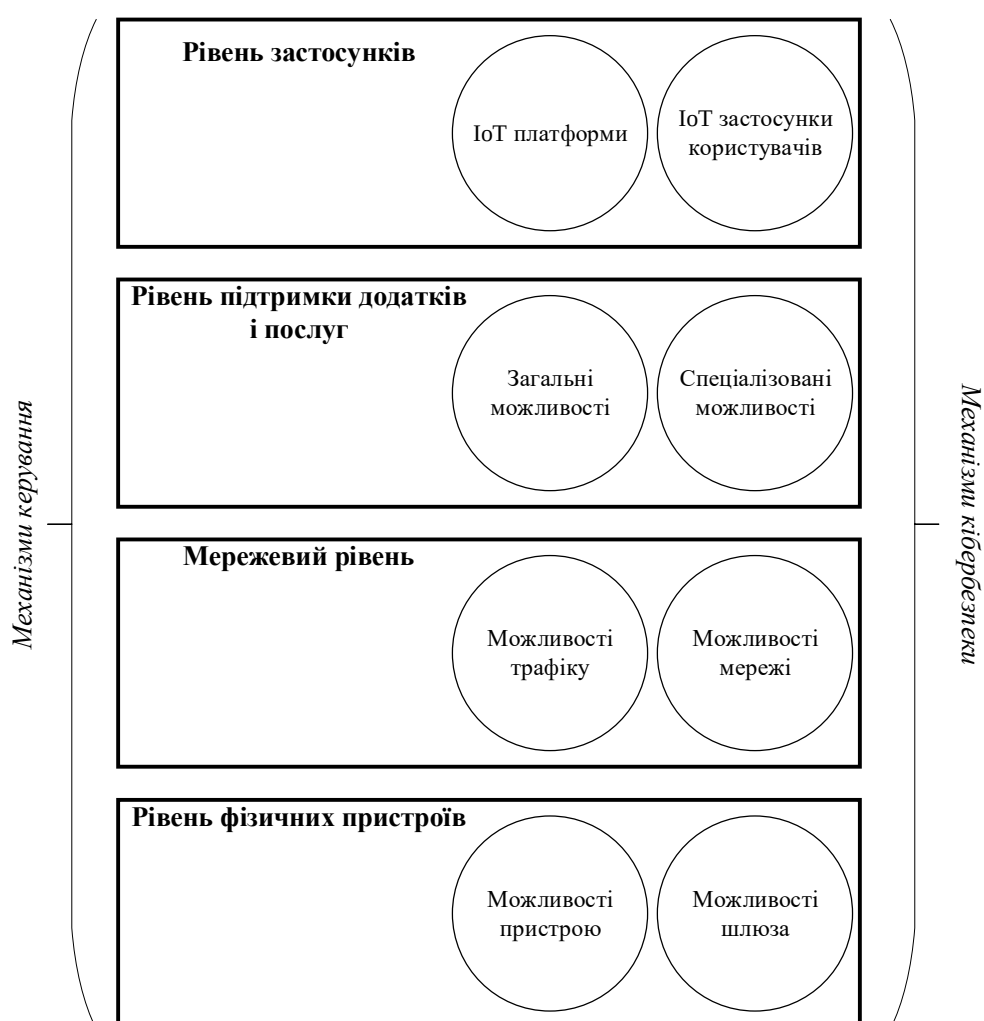


Рисунок 1.9 – Архітектура еталонної моделі IoT систем від Y.2060

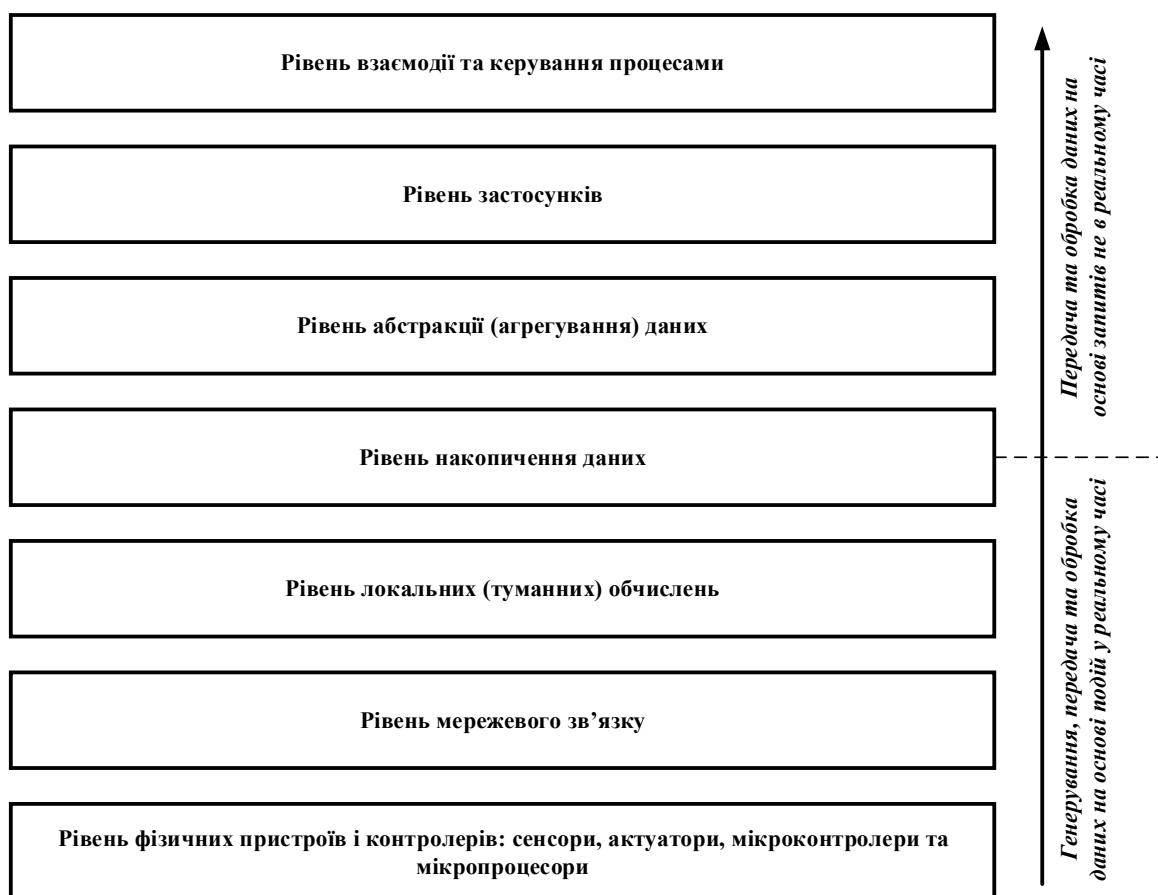


Рисунок 1.10 – Архітектура еталонної моделі IoT систем від IWF

Як видно з аналізу архітектури еталонних моделей IoT систем, які представлено на рисунках 1.9 і 1.10, то модель IWF (див. рис. 1.10) є більш деталізованою у порівнянні з моделлю Y.2060 (див. рис. 1.9), а отже, може вважатись її логічним доповненням. Ключова відмінна риса цих двох моделей полягає в наступному. В моделі IWF головна увага експертів-розробників приділена вирішенню проблем розробки користувацьких застосунків і програмних компонент IoT систем і технологій, а також підтримці промислового Інтернету речей. У свою чергу, під час розробки моделі Y.2060 основну увагу приділено рівням генерування та мережевого обміну вимірювальними даними, що має на меті стандартизувати програмно-технічні рішення двох нижніх рівнів під час мережевої взаємодії різних функціональних пристроїв, що входять до складу розроблюваних IoT мереж і систем для різних галузей використання. Детальну порівняльну характеристику еталонних IoT моделей, що зазначені вище, представлено в таблиці 1.9.

Таблиця 1.9 – Порівняльна характеристика еталонних IoT моделей: Y.2060 і IWF

Модель	Ключові характеристики	Посилання
Y.2060	Ця еталонна модель складається з чотирьох основних рівнів, а також двох крос-рівнів (кібербезпека і керування), що розгортаються між основними рівнями. Головною характерною рисою моделі Y.2060 є деталізація фактичних фізичних компонент структурно-алгоритмічної будови IoT мереж і систем. Основні акценти зроблено на апаратно-програмній сумісності пристроїв під час побудови двох нижніх рівнів (фізичного і мережевого).	[46, 48]
IWF	Основною ідеєю створення цієї моделі було стимулювання взаємодії різних фірм-виробників IoT компонент і пристроїв до створення відтворюваних і уніфікованих моделей і мереж Інтернету речей. Модель складається з семи основних рівнів і визначає механізми й моделі транспортування та обробки даних між рівнями. Розробники моделі IWF основну увагу приділили питанням створення рівнів застосунків, проміжного програмного забезпечення, а також функціональному забезпеченню підтримки промислового Інтернету речей.	[48, 49]

У процесі проєктування програмно-апаратних рішень систем і мереж IoT із використанням еталонних моделей (див. рис. 1.9 і 1.10) значної популярності в сьогоденній практиці набула Web of Things (WoT) технологія. Ця технологія є підмножиною IoT, що створена на основі сучасних стандартів мережесих протоколів і програмного забезпечення (HTTP, API, REST, URIs та ін.). На теперішній час широкого впровадження набули три основні моделі клієнт-серверної взаємодії у рамках технології WoT: пряма взаємодія (за допомогою простих API), підключення з використанням мережевого або IoT шлюзу, взаємодія з використанням хмарного сервера [50, 51].

Вибір моделі побудови прикладного програмно-апаратного забезпечення на основі конкретної WoT моделі визначається сферою застосування, вимогами до алгоритмічного забезпечення та функціональними характеристиками пристроїв і компонент, що входять до структури створюваної системи. Зважаючи на специфічні характеристики задачі агромоніторингу (можливість віддаленого інтелектуального контролю розподіленого в просторі та часі об'єкту), найбільш універсальною є модель зі залученням хмарних технологій (див. рис. 1.11).

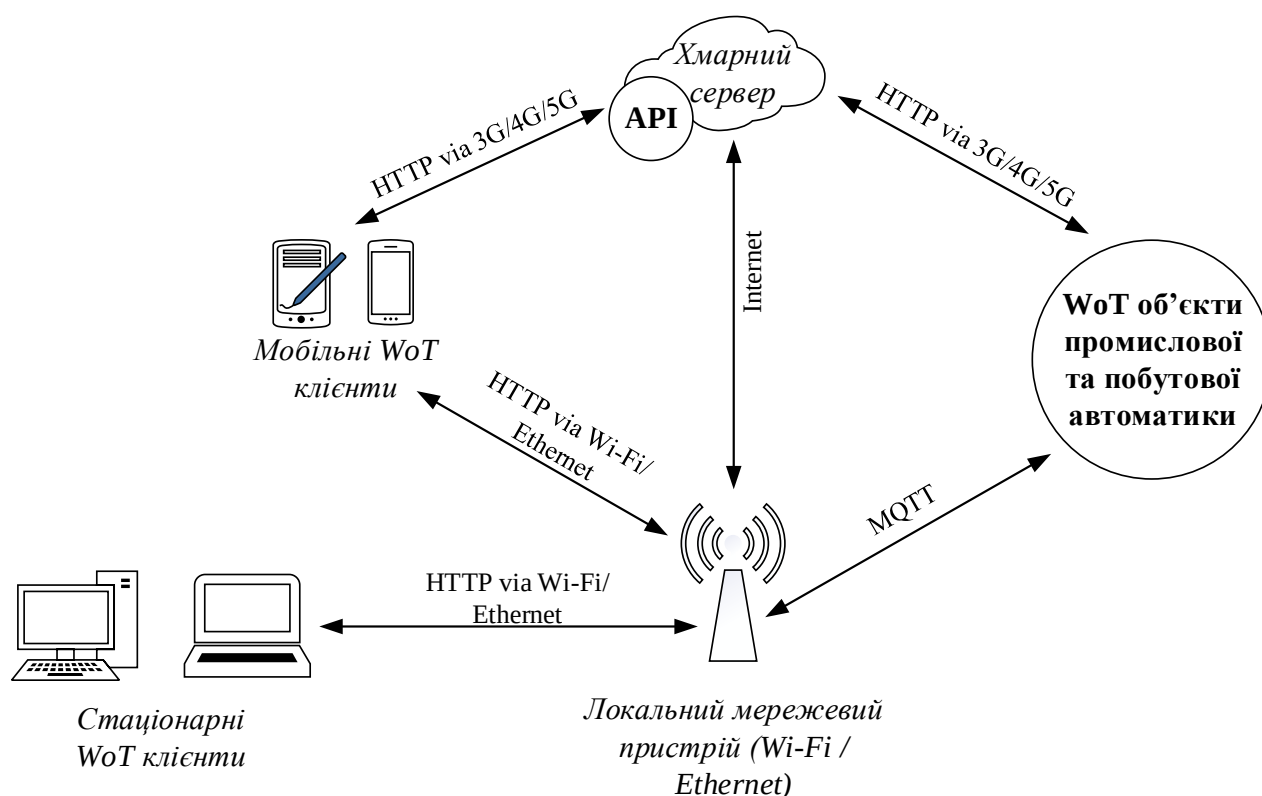


Рисунок 1.11 – Структурна схема комп'ютерного мережевого контролю технологічних (виробничих) процесів на основі WoT технології

Варто зазначити, що WoT технологія є функціонально-алгоритмічним доповненням до IoT та працює як прикладний рівень, а також дозволяє встановлювати механізми мережевої взаємодії між апаратними й програмними компонентами комп'ютерних систем контролю та забезпечує сумісність генерування та обміну даними та інформацією в мережі між пристроями [50, 51].

Також варто зазначити, що сучасні системи й технології, які базуються на WoT і IoT та спрямовані на вирішення задач інтелектуального контролю агротехнічних режимів вирощування с/г культур відповідають типовій структурі та мають виконувати наступні функції: масштабний (у різних точках поля та на різних глибинах у онлайн режимі) збір інформативних даних, периферійна обробка даних, локальний і глобальний мережевий обмін, інтелектуальний аналіз даних, надійне зберігання, адаптивне сповіщення користувачів, автоматичне прийняття рішень, генерування керуючих сигналів агротехнічними об'єктами та процесами [14, 52, 53].

На підставі попереднього критичного аналізу (див. рис. 1.9–1.11, табл. 1.9) та з урахуванням відомих результатів досліджень із розробки моделей контролю агротехнічних процесів та сучасних сенсорних, програмних і мережевих засобів [45] узагальнено архітектуру [18], яка задовольняє вимогам до мережевого комп'ютерного контролю режимів зволоження с/г культур, вирощуваних у полі, як показано на рисунку 1.12.

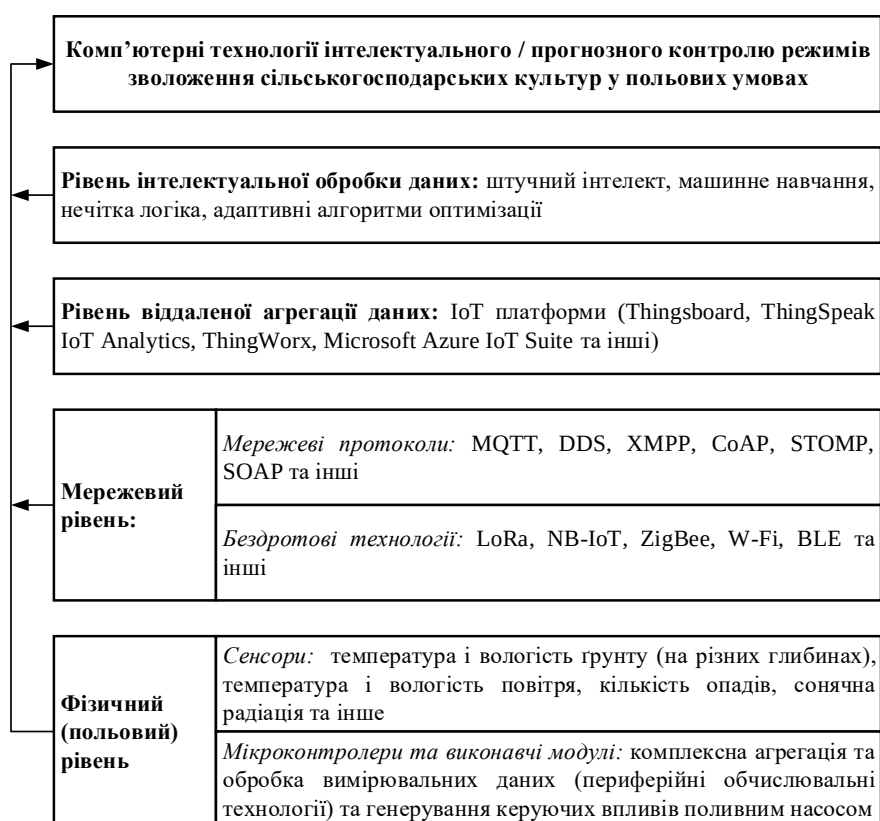


Рисунок 1.12 – Систематизована архітектура технологій комп'ютерного мережевого контролю режимів зволоження с/г культур

Ця архітектура (див. рис. 1.12) враховує сьогоденні світові тренди й досягнення в галузі проектування багаторівневих інтелектуальних комп'ютерних технологій і систем сільськогосподарського призначення. Вона може слугувати функціональною, структурною та алгоритмічною основою розроблюваної комп'ютерної технології за умови проведення додаткових дисертаційних досліджень щодо розробки та тестування програмних і апаратних компонент, а також принципів їх системної взаємодії.

У світовій науково-технічній практиці відома значна кількість розробок щодо алгоритмів, систем і технологій комп'ютерного (інтелектуального, адаптивного, прогнозного) контролю режимів зволоження польових культур. Результати критичного аналізу основних із них наведено в таблиці 1.10 [18].

Таблиця 1.10 – Результати критичного аналізу існуючих досліджень із розробки технологій комп'ютерного контролю режимів зволоження рослин

Об'єкт дослідження	Результат дослідження	Посилання
Модель ідентифікації вхідних і вихідних параметрів прогнозного зонального контролю агрогідрологічного стану сільськогосподарських територій.	Розроблено та досліджено динамічну модель контролю вологості ґрунту, що описується диференційними рівняннями в частинних похідних та враховує необхідність підтримання вологості ґрунту в допустимих межах.	[54]
Імітаційна модель для економного використання водних ресурсів для фермерських господарств.	Запропоновано та протестовано модель прогнозного контролю вологості ґрунту для масштабів фермерського господарства. Модель враховує дані про вологість ґрунту, оперативні обмеження, економічні показники та характеристики динаміки вологості в ґрунті.	[55]
Предикативна модель контролю агрогідрологічного стану ґрунту на основі алгоритмів нейронних мереж.	Досліджено динамічну модель контролю агрогідрологічного стану ґрунту на основі двохшарової нейронної мережі. Запропонована модель реалізує багатозональний моніторинг вологості в прикореневій ділянці ґрунту, а також лінійну корекцію похибки прогнозування.	[56]
Прогнозна модель та комп'ютерна система для оптимізації режимів зволоження вирощуваних культур.	Розроблено та протестовано в середовищі Matlab & Simulink комп'ютерну модель прогнозного контролю вологості ґрунту зі залученням мікрокомп'ютерних технологій на базі Raspberry Pi.	[32]
Процеси автоматизованого керування вологозабезпеченістю польових культур із використанням інтелектуальних технологій.	Розроблено моделі й методи інтелектуального керування процесами забезпечення вологою с/г культур зі залученням алгоритмів нейронних і фаззі-нейронних мереж.	[57]
Методи та засоби комп'ютеризованого контролю вологості ґрунту в тепличних умовах.	Розроблено та досліджено інформаційно-вимірювальну технологію комп'ютеризованого контролю вологості тепличного ґрунту в реальному часі з компенсацією дестабілізуючих впливів.	[58]
Структура, алгоритми роботи та компонента база систем автоматичного поливу.	Розроблено та обґрунтовано структуру та алгоритми роботи кіберфізичної системи дистанційного автоматичного поливу рослин.	[59]

Продовження табл. 1.10

Структурно-алгоритмічна будова системи автоматизованого поливу рослин.	Розроблено та досліджено структурно-алгоритмічну будову та імітаційну модель системи автоматизованого поливу на основі серійної мікропроцесорної платформи Arduino.	[60]
Алгоритми та апаратно-програмна реалізація системи контролю вологості ґрунту в парковій зоні.	Створено та досліджено апаратно-програмну розробку контролю вологості ґрунту в парковій зоні на основі програмованого логічного контролера (ПЛК) SIMATIC S7-300	[61]
Відмовостійкі алгоритми машинного навчання для оцінки та прогнозування вмісту вологи в ґрунті.	Розвинуто теорію відмовостійкого контролю під час побудови моделей аналізу вмісту вологи в ґрунті на різних глибинах на основі дистанційного зондування й машинного навчання.	[62]
Методи та алгоритми надійної статистичної обробки часових рядів даних для прогнозування вмісту вологи в ґрунті.	Розроблено та досліджено статистичну модель прогнозування вмісту вологи в ґрунті на основі польових даних про температуру повітря та кількість опадів.	[63]
Методи та системи інтелектуального зрошення посушливих територій.	Проаналізовано традиційні та інтелектуальні методи й технології планування поливу сільськогосподарських територій. Встановлено переваги від інтеграції алгоритмів машинного навчання та штучного інтелекту до технологій планування та реалізації агротехнічних процедур зрошення ґрунту.	[64]

На підставі аналізу існуючих результатів досліджень із розробки та тестування комп'ютерних технологій контролю режимів зволоження рослин зроблено наступні проміжні висновки:

- з точки зору використання апаратних засобів наземного контролю найбільш популярними є: бездротові системи інтелектуальних сенсорів та мікропроцесорні (Arduino) і мікрокомп'ютерні платформи (Raspberri Pi);

- з точки зору використання програмних засобів і обчислювальних технологій: моделі прогнозного контролю, штучні нейронні мережі, нечітка логіка, периферійні обчислення на рівні мікроконтролерів і мікрокомп'ютерів із двостороннім обміном інформацією з IoT сервером;

- клієнт-серверна архітектура є основою апаратно-програмних рішень для цілей прикладного аграрного контролю;

- існуючі системи в більшості випадків фрагментарно враховують

параметри й характеристики стану контрольованих с/г об'єктів (поточна вологість на різних глибинах, кліматичні фактори, процеси всмоктування та випаровування вологи з ґрунту, технічні характеристики систем поливу);

– техніко-функціональні характеристики систем комп'ютерного контролю режимів зволоження польових культур є чутливими до конкретних агрокліматичних та ґрунтових характеристик об'єктів контролю.

Все це обумовлює доцільність та важливість проведення досліджень із розвитку теоретико-прикладних положень створення, вдосконалення, валідації та використання комп'ютерних технологій прогнозного контролю режимів зволоження сільськогосподарських культур.

1.4 Мета, задачі та напрямки досліджень

На підставі проведено інформаційного аналізу, результати якого наведено в попередніх пунктах цього розділу (див. пп. 1.1–1.3), можна зазначити, що спостерігаються певні обмеження в науково-практичній проробленості науково-прикладних питань, які пов'язані зі створенням і впровадженням комп'ютерних засобів і технологій прогнозного контролю зволоженості с/г культур, а саме:

– недостатність результатів із синтезу програмно-апаратної будови комп'ютерних технологій зволоження ґрунту з урахуванням критеріїв точності контролю та надійності мережевої взаємодії компонент досліджуваної технології;

– обмеженість результатів досліджень ефективності інтеграції алгоритмів комплексної обробки ґрунтокліматичних даних щодо прогнозного контролю режимів зволоження зернових культур до периферійної ланки комп'ютерних технологій, що розгортаються і функціонують у польових умовах;

– недостатність результатів досліджень щодо оптимізації стратегії комп'ютеризованого контролю агротехнічного процесу зволоження зернових культур із обліком сукупного впливу інформативних параметрів та дестабілізуючих процесів і факторів, зокрема у віддаленому режимі.

Також варто акцентувати увагу на тому, що більшість існуючих систем і

технологій не враховують: специфічні для агрокліматичних умов України види і періоди вегетаційного розвитку зернових культур; фізико-хімічні властивості ґрунту; техніко-технологічні аспекти провадження сільськогосподарської діяльності рослинництва зернових культур у польових умовах.

Таким чином, актуальною є **науково-прикладна задача** подальшого розвитку теоретичних положень і практичних напрацювань зі створення, вдосконалення та використання комп'ютерних технологій прогнозного контролю режимів зволоження зернових культур з урахуванням специфічних для українських аграрних підприємств агрокліматичних умов, фізико-хімічних властивостей ґрунту, типів і фаз зростання вирощуваних зернових культур, а також техніко-технологічної бази ведення сільськогосподарської діяльності рослинництва на відкритому ґрунті. Під час розробки досліджуваної комп'ютерної технології мають бути враховані сучасні світові тенденції щодо структурно-алгоритмічної будови прикладних комп'ютерних систем і технологій контролю сільськогосподарського спрямування, а саме: точне зональне (за глибиною та локаціями поля) отримання даних вимірювального контролю вологості ґрунту та дестабілізуючих параметрів в реальному часі, адаптивна інтелектуальна обробка даних на периферійному рівні, алгоритмічно-програмне врахування негативного впливу дестабілізуючих процесів і параметрів, локальний і глобальний обмін вимірювальною інформацією, автоматичне прийняття рішень щодо корегування стратегії зрошення ґрунту на основі інтерпретованих даних.

Основною **метою** дисертаційної роботи є підвищення ефективності агротехнічних процедур під час вирощування зернових культур завдяки розробці методів і апаратно-програмних компонент побудови комп'ютерних технологій предикативного контролю режимів зрошення ґрунту.

Для досягнення поставленої мети необхідно вирішити такі **задачі**:

- комплексний аналіз і логічна систематизація інформації щодо сучасного стану науково-прикладних розробок і досліджень у галузі комп'ютерного контролю режимів зволоження зернових культур;

- обґрунтування структурно-алгоритмічної будови досліджуваної

комп'ютерної технології з урахуванням критеріїв точного зонального збору, достовірної периферійної обробки та надійної мережевої взаємодії функціональних компонент технології;

– розробка інформаційної та математичної моделей досліджуваної комп'ютерної технології для обґрунтування техніко-функціональних вимог до її апаратно-програмного забезпечення;

– розробка комп'ютерно-орієнтованого методу предикативного контролю режимів зволоження зернових культур із обліком інформативних і дестабілізуючих параметрів;

– створення та тестування імітаційних моделей побудови апаратно-програмного забезпечення досліджуваної комп'ютерної технології для оцінки її основних характеристик і параметрів;

– створення та валідація архітектури комп'ютерної технології прогнозного контролю режимів зволоження зернових культур для формулювання рекомендацій з її подальшого прикладного використання і впровадження;

– аналіз отриманих результатів досліджень і обґрунтування перспективних напрямків розвитку створеної комп'ютерної технології.

Об'єкт дослідження – інформаційні процеси отримання, мережевого обміну та предикативної обробки сукупності розподілених даних щодо режимів зволоження зернових культур.

Предмет дослідження – моделі, методи та апаратно-програмні компоненти побудови комп'ютерних технологій прогнозного контролю режимів зволоження зернових культур.

1.5 Висновки за першим розділом

1. Проведено інформаційний аналіз загальних тенденцій провадження с/г діяльності з вирощування зернових культур, що дозволило встановити характерні особливості споживання водних ресурсів у національному та світовому масштабах. На підставі проведеного аналізу встановлено основні типи зернових

культур, що є критично важливими під час формування економіки, експортного потенціалу та продовольчої безпеки України, а також специфічні фактори, що впливають на ефективність їх вирощування у мінливих агрокліматичних умовах.

2. Встановлено необхідність проведення науково-прикладних досліджень із обґрунтування ефективних підходів до оптимізації агротехнічної практики під час повного циклу вирощування зернових культур завдяки створенню і впровадженню інформаційних і комп'ютерних технологій прогнозного контролю стану біологічних і фізичних середовищ аграрних об'єктів рослинництва відкритого ґрунту.

3. Детально проаналізовано програмно-технологічні особливості, а також використовувані моделі, засоби та методи комп'ютерного контролю режимів зволоження ґрунту під час вирощування зернових культур. Це дозволило обґрунтувати базові методи та апаратно-програмні компоненти, які можуть слугувати структурно-алгоритмічною основою під час розробки та досліджень комп'ютерної технології предикативного контролю режимів зволоження зернових культур.

4. Проаналізовано та узагальнено світовий досвід у розрізі створення та використання програмно-технічного забезпечення систем комп'ютерного контролю режимів зрошення сільськогосподарських територій. Це дозволило локалізувати базові архітектурні рішення та підходи до побудови прикладних систем контролю агротехнологічних процесів, що, в свою чергу, потребують додаткового розвитку під час досліджень цієї дисертаційної роботи.

5. Сформульовано мету, задачі, об'єкт і предмет дисертаційного дослідження, що дозволить розробити комп'ютерну технологію прогнозного контролю режимів зволоження зернових культур з урахуванням специфічних особливостей провадження сільськогосподарської діяльності в агрокліматичних умовах України та сучасних досягнень і трендів розвитку комп'ютерних, інформаційних та комунікаційних технологій агротехнічного спрямування задля модернізації техніко-технологічної бази та підвищення ефективності вітчизняних аграрних підприємств із вирощування зернових культур на відкритому ґрунті.

РОЗДІЛ 2

ФОРМАЛІЗОВАНИЙ ОПИС КОМП'ЮТЕРНОЇ ТЕХНОЛОГІЇ ПРЕДИКАТИВНОГО КОНТРОЛЮ РЕЖИМІВ ЗВОЛОЖЕННЯ ЗЕРНОВИХ КУЛЬТУР

2.1 Структурне та компонентне забезпечення досліджуваної комп'ютерної технології

На підставі інформаційного аналізу предметної галузі дослідження з побудови комп'ютерних технологій предикативного контролю режимів зволоження зернових культур, результати якого наведено в першому розділі дисертаційної роботи, встановлено наступне:

- об'єкт комп'ютерного контролю (грунт сільськогосподарських територій) є диференційованим за поверхнею та глибиною;

- інформативним параметром, що контролюється в реальному часі з використанням засобів комп'ютеризованою інформаційно-вимірювальної техніки, є відносна вологість ґрунту на різних глибинах у залежності від фаз вегетації вирощуваних зернових культур;

- дестабілізуючі параметри, які мають бути враховані, методами і засобами комп'ютеризованого контролю: температура повітря і ґрунту, кількість опадів, вологість повітря;

- інформативні фактори, які мають бути враховані, під час трансформації даних комп'ютерних вимірювань: тип і фаза вегетації вирощуваних с/г культур, агрофізичні особливості ґрунту та техніко-технологічні параметри систем зрошення ґрунту.

- базова архітектура апаратно-програмних засобів комп'ютерного контролю вологості ґрунту з урахуванням дестабілізуючих параметрів і інформативних факторів: клієнт-серверна архітектура зі залученням IoT і WoT технології.

- базова обчислювальна технологія: периферійні обчислення на локальному (мікропроцесорному та мікрокомп'ютерному) рівні з ретрансляцією оброблених

даних у вигляді інформаційних повідомлень на IoT сервер.

Таким чином, зважаючи на зазначене вище, а також враховуючи той факт, що досліджувана комп'ютерна технологія є функціональною складовою масштабних систем польових систем цифровізації та автоматизації с/г підприємств рослинництва, то в якості базового підходу в процесі розробки структурної схеми досліджуваної технології застосовано метод структурного моделювання зі залученням підходу декомпозиції загальної структури розроблюваної комп'ютерної технології [65].

Отже, використовуючи метод декомпозиції під час розробки структурної схеми досліджуваної комп'ютерної технології, на першому етапі необхідно проаналізувати її функціонально-алгоритмічні зв'язки з іншими компонентами систем зрошення польових с/г культур. Узагальнену структуру сучасних цифровізованих систем зрошення с/г культур, яку отримано шляхом аналізу й систематизованого узагальнення відомих наукових публікацій у досліджуваній предметній області [66, 67], наведено на рисунку 2.1 [68].

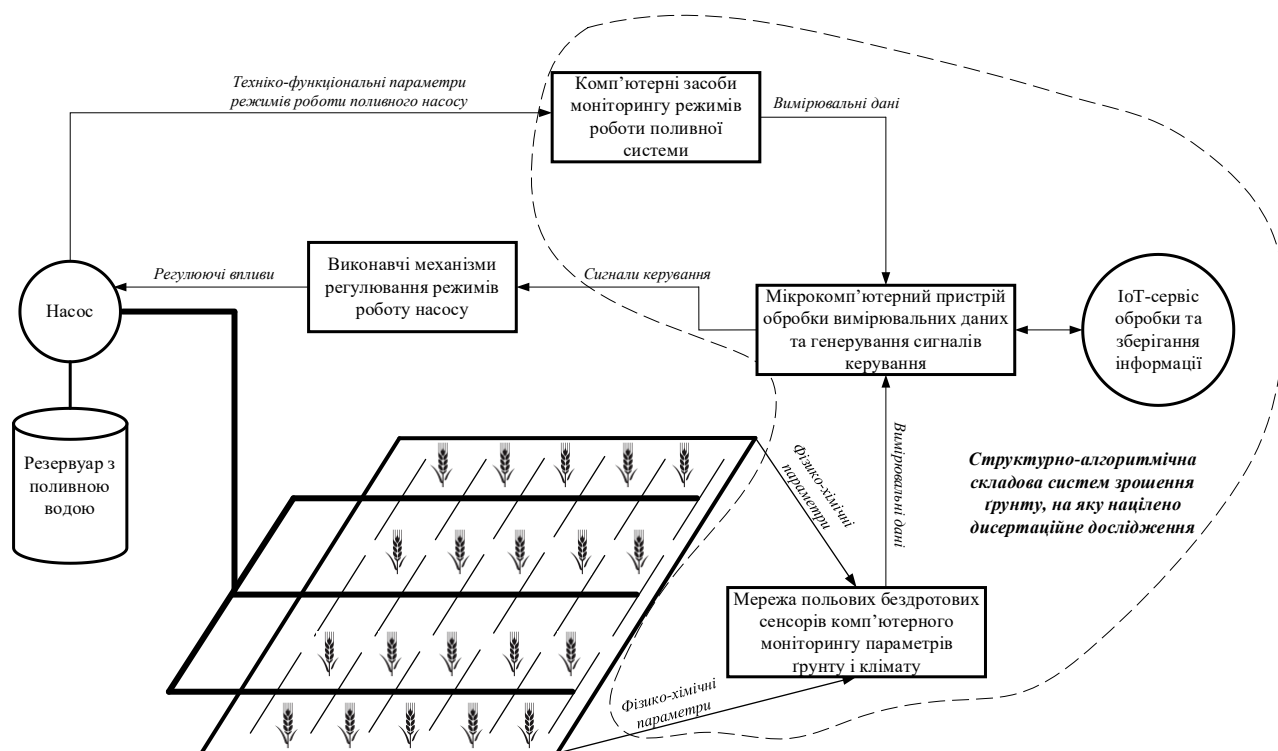


Рисунок 2.1 – Узагальнена структура сучасних систем зрошення агроугідь, оснащених комп'ютерними технологіями моніторингу і контролю

Як видно з аналізу структури, яку наведено на рисунку 2.1, то сучасні системи зрошення ґрунту під час вирощування с/г польових культур, в тому числі зернових, являють собою комплексні рішення, що оснащуються комп'ютерними технологіями моніторингу й контролю фізико-хімічних параметрів ґрунтокліматичних умов вирощування, а також техніко-функціональних параметрів режимів роботи поливних систем. Вимірювальні дані агрегуються та обробляються цифровими (мікропроцесорними та мікрокомп'ютерними) компонентами комп'ютерних технологій контролю режимів зрошення в реальному часі, в тому числі на основі предикативних алгоритмів.

В свою чергу, такі комп'ютерні технології, входять до складу комплексів автоматизації та цифровізації агротехнічних процесів на правах функціональних підсистем і основною метою їх упровадження є комплексна інтелектуальна обробка вимірювальних даних із подальшим генеруванням сигналів адаптивного керування виконавчими механізмами систем зрошення.

Виходячи з поставленої мети та обґрунтованих об'єкту і предмету досліджень цієї дисертації (див. п. 1.4), то основний інтерес цих досліджень представляє структурно-функціональна складова, яка реалізує комплексний збір, предикативну обробку та мережевий обмін, у тому числі з IoT-сервісом, вимірювальними даними та обробленою інформацією (див. рис. 2.1, фрагмент, що виділений пунктирною лінією).

Комплексний зональний збір вимірювальних даних щодо агрокліматичних умов вирощування зернових культур може бути реалізований на основі технології бездротових мереж польових сенсорів із подальшим їх агрегуванням і обробкою на локальному мікрокомп'ютерному пристрої та наступною ретрансляцією на IoT сервіс [69–72], як показано на рисунку 2.2. Такий підхід дозволяє збирати дані з різних локацій поля на різних глибинах та передавати їх до пристроїв локального мережевого агрегування за допомогою бездротових технологій, що є обов'язковою умовою під час провадження с/г діяльності рослинництва в польових умовах.

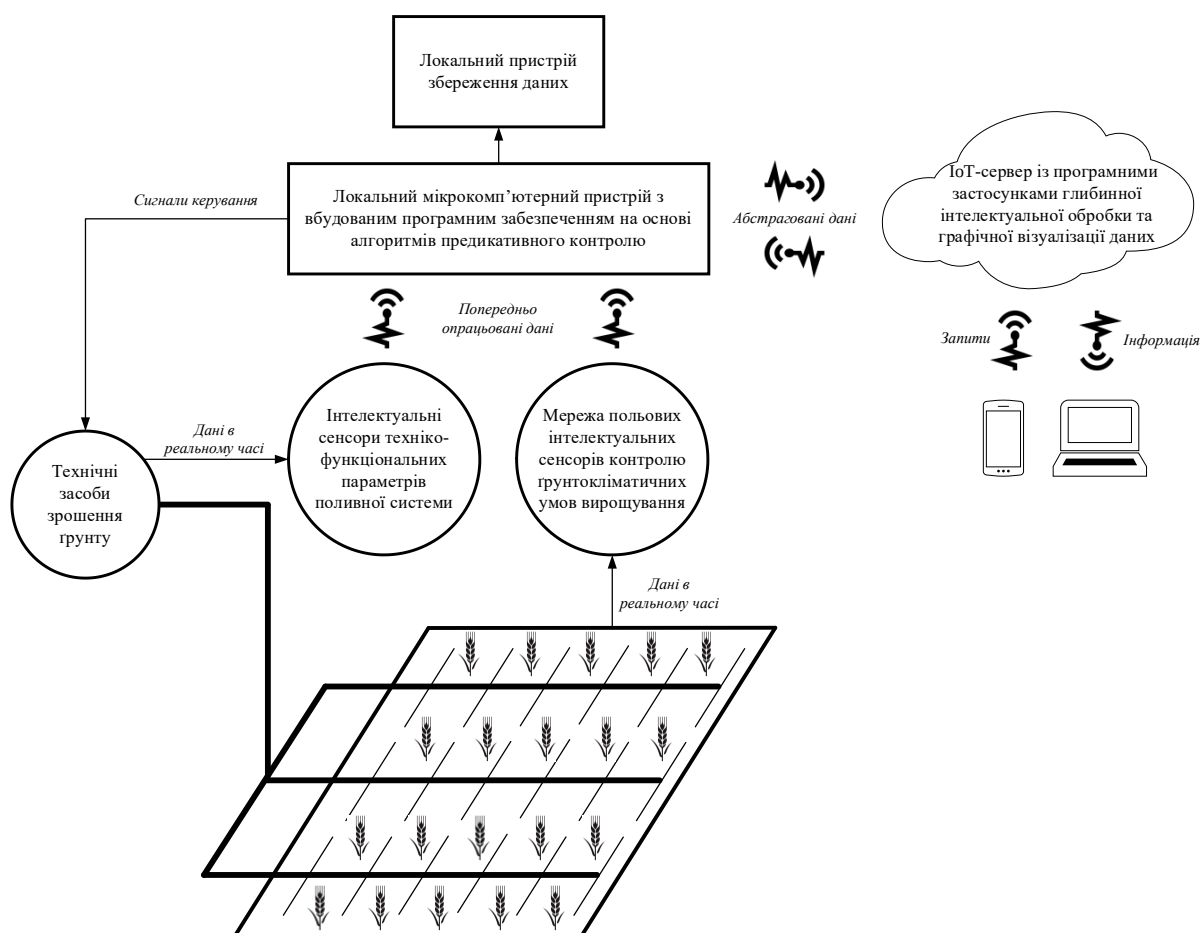


Рисунок 2.2 – Структурна схема процесу комп'ютерного збору та обробки даних щодо агротехнічних процедур зрошення зернових культур

Після збору вимірювальні дані проходять процедури інтелектуальної програмної обробки на основі предикативних алгоритмів та ретрансляції обробленої інформації на IoT-сервер із можливістю надання доступу до них користувачам у віддаленому режимі. Як видно з аналізу структурної схеми процесу комп'ютерного збору та обробки даних щодо агротехнічних процедур зволоження зернових культур, яку наведено на рисунку 2.2, інтегральний предикативний контроль режимів зрошення потребує багаторівневої архітектурної інтеграції апаратних і програмних компонент агрегування, передачі та інтелектуальної трансформації значних обсягів часово-просторових даних із урахуванням різних сценаріїв роботи [73–77]. Отже, запропонована деталізована структурна схема досліджуваної комп'ютерної технології має вигляд, як показано на рисунку 2.3 [68].

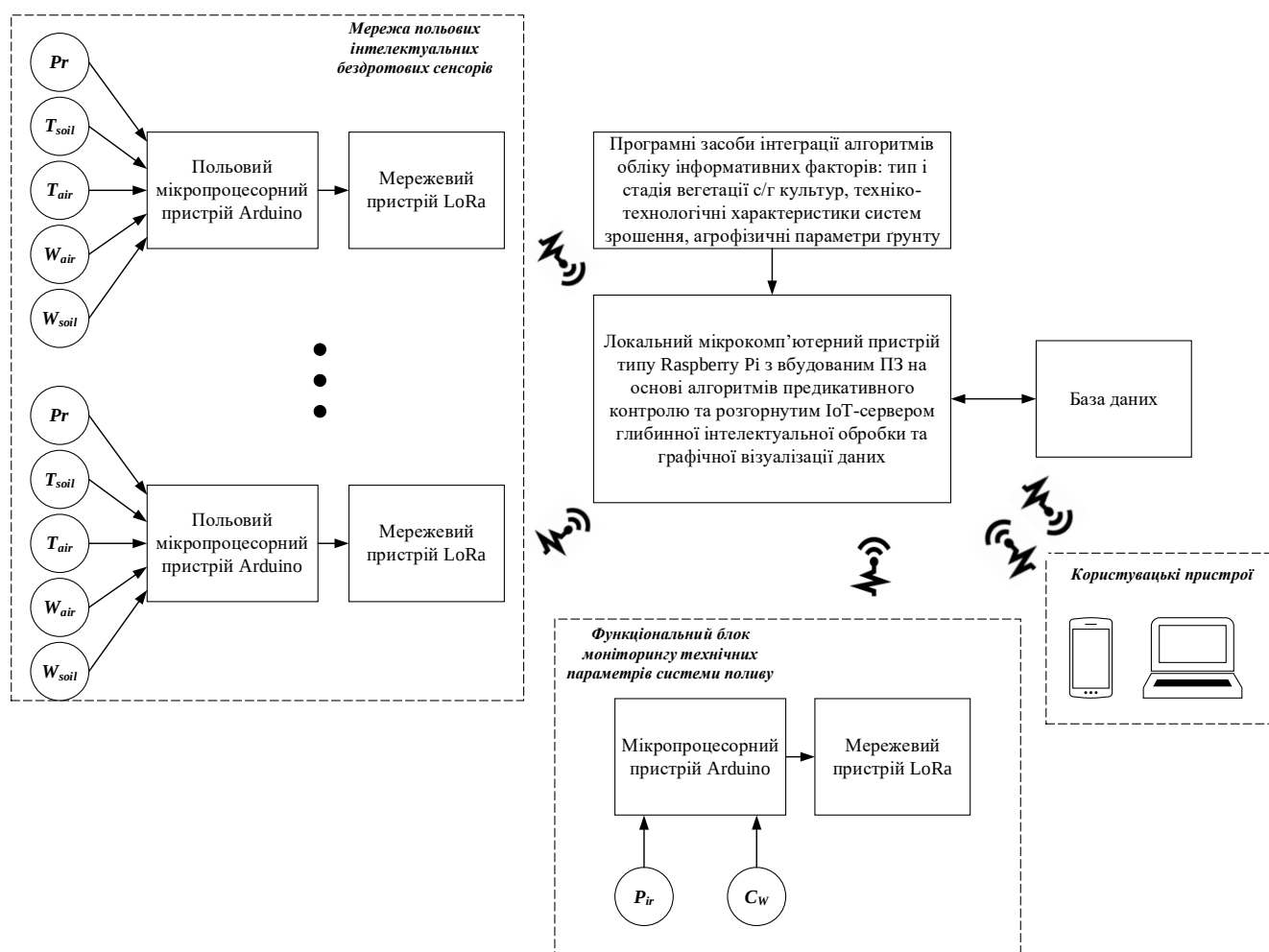


Рисунок 2.3 – Деталізована структурна схема досліджуваної комп'ютерної технології предикативного контролю режимів зволоження зернових культур

На рисунку 2.3 введено наступні позначення: Pr – сенсор кількості опадів, T_{soil} – сенсор температури ґрунту, T_{air} – сенсор температури повітря, W_{soil} – сенсор температури ґрунту, W_{air} – сенсор температури повітря, P_{ir} – сенсор тиску в поливній системі, C_w – сенсор витрати поливної води, ПЗ – програмне забезпечення.

Вибір типів апаратних (мікрокомп'ютерних, мікропроцесорних і мережевих) компонент та інформаційного сервісу (засобів розгортання IoT-серверу) здійснено шляхом апіорного аналізу світового досвіду створення комп'ютерних систем і технологій агропризначення [44, 78–86] категорії DIY (do-it-yourself) на підставі наступних критеріїв: функціональна і конструктивна сумісність із польовими сенсорами (Arduino), ергономічність програмування

(Arduino і Raspberry Pi), доступність та масштабільність використання (Arduino і Raspberry Pi), енергоспоживання та дальність передачі даних у бездротовому режимі (LoRa), можливість передачі / приймання даних через мережу Інтернет за відсутності доступу до мережі Wi-Fi, а також програмна сумісність зі стеком інформаційних технологій адаптивної математичної обробки, надійного зберігання й графічної інтерпретації даних із наданням доступу у віддаленому режимі.

Виходячи з аналізу структурних схем апаратно-програмних засобів побудови комп'ютерної технології контролю режимів зрошення ґрунту (див. рис. 2.1–2.3) обґрунтовано багаторівневу компонентну будову, що може являти собою основу подальших досліджень зі створення відповідної комп'ютерної технології (див. табл. 2.1).

Таблиця 2.1 – Компонентна будова досліджуваної комп'ютерної технології

Рівень комп'ютерної технології	Компонентна база	Функціональне призначення
Фізичні (польові) пристрої	Сенсори: параметри ґрунту і клімату (вологість і температура ґрунту та повітря, кількість опадів), техніко-функціональні параметри поливної системи (тиск на виході насоса й витрата поливної води). Мікропроцесорні пристрої для польового збору даних.	Генерування вимірювальних даних щодо динаміки характеристик і параметрів контрольованих процесів і об'єктів у реальному часі.
Мережевий зв'язок	Технології локального (польового) бездротового обміну даними та передачі даних через Інтернет.	Надійний мережевий обмін вимірювальними даними між інтелектуальними сенсорами та мікрокомп'ютерним пристроєм
Локальні обчислення	Мікрокомп'ютерні обчислювальні пристрої.	Реалізація інтелектуальних алгоритмів обчислень щодо предикативного контролю режимів зволоження зернових культур на периферійному (польовому) рівні.

Продовження табл. 2.1

Накопичення даних	Засоби локального (польового) збереження даних та віддалені сервери баз даних.	Збереження та надання швидкого доступу з різних локацій, у тому числі з віддалених пристроїв до архіву даних, а також використання передісторії даних у регресійних динамічних моделях прогнозного контролю зрошення ґрунту.
Абстракція даних	Засоби агрегації та абстракції даних за різними ознаками	Реалізація функцій і процедур для взаємодії з програмними системами, а саме форматування даних відповідно до вимог рівня застосунків.
Застосунки	Програмні засоби глибинної інтелектуальної обробки вимірювальної інформації та її інтерпретація в графічному вигляді.	Відпрацювання функцій обробки вимірювальної інформації на основі інтелектуальних алгоритмів та надання доступу до графічної інтерпретації результатів у віддаленому режимі у відповідності до прав користувачів.
Взаємодія	Засоби інтеграції та узгодження декількох користувацьких застосунків.	Реалізація механізмів мережевого обміну інформацією із використанням протоколів персональних і локальних мереж, а також мережі Інтернет.

Таким чином, можна зазначити, що запропонована структурна організація (див. рис. 2.1–2.3) та відповідна компонента ієрархічна будова (див. табл. 2.1) враховують актуальні світові тенденції розвитку комп'ютерних і інформаційних технологій аграрного призначення та вимоги до розроблюваної комп'ютерної технології (див. п. 1.4), що свідчить про можливість їх використання під час подальших досліджень зі створення та тестування комп'ютерної технології предикативного контролю режимів зволоження зернових культур у польових умовах.

2.2 Алгоритмічне забезпечення досліджуваної комп'ютерної технології

Аналогічно до досліджень із обґрунтування структурного та компонентного забезпечення комп'ютерної технології (див. п. 2.1) під час розробки алгоритмічного забезпечення використано принцип декомпозиції дослідницького завдання [65]. Запропонований перелік функцій, що встановлений з урахуванням відомих підходів [87–89], які мають відпрацьовуватись розроблюваною комп'ютерною технологією, що, в свою чергу, являє собою базис алгоритмічного забезпечення, полягає в наступному:

- ініціалізація активного режиму роботи апаратно-програмних компонент комп'ютерної технології;
- діагностування коректності підключення функціональних компонент комп'ютерної технології;
- виконання підготовчих процедур і функцій перед початком основного циклу функціонування, а саме: підключення бібліотек, ініціалізація змінних та присвоєння їм початкових значень, синхронізація режимів роботи з реальним часом, розподілення черги опитування функціональних вузлів та обробки потоків даних;
- відпрацювання процедур і функцій основного циклу роботи комп'ютерної технології, які полягають у комплексному зборі, обробці та мережевому обміні даними та інформацією;
- перехід у пасивний режим роботи.

Варто зазначити, що представлений вище перелік основних функцій комп'ютерної технології, яка досліджується в дисертаційній роботі, має відпрацьовуватись циклічно в реальному часі у форматі переходів із активного до пасивного стану. Це дозволяє реалізувати засади оптимізації енергоспоживання, адже більшість апаратних компонент досліджуваної технології розміщуються в польових умовах і живляться від автономних джерел енергії. Перелічені функції в межах одного циклу відпрацьовуються в послідовному форматі, як це показано на рисунку 2.4.

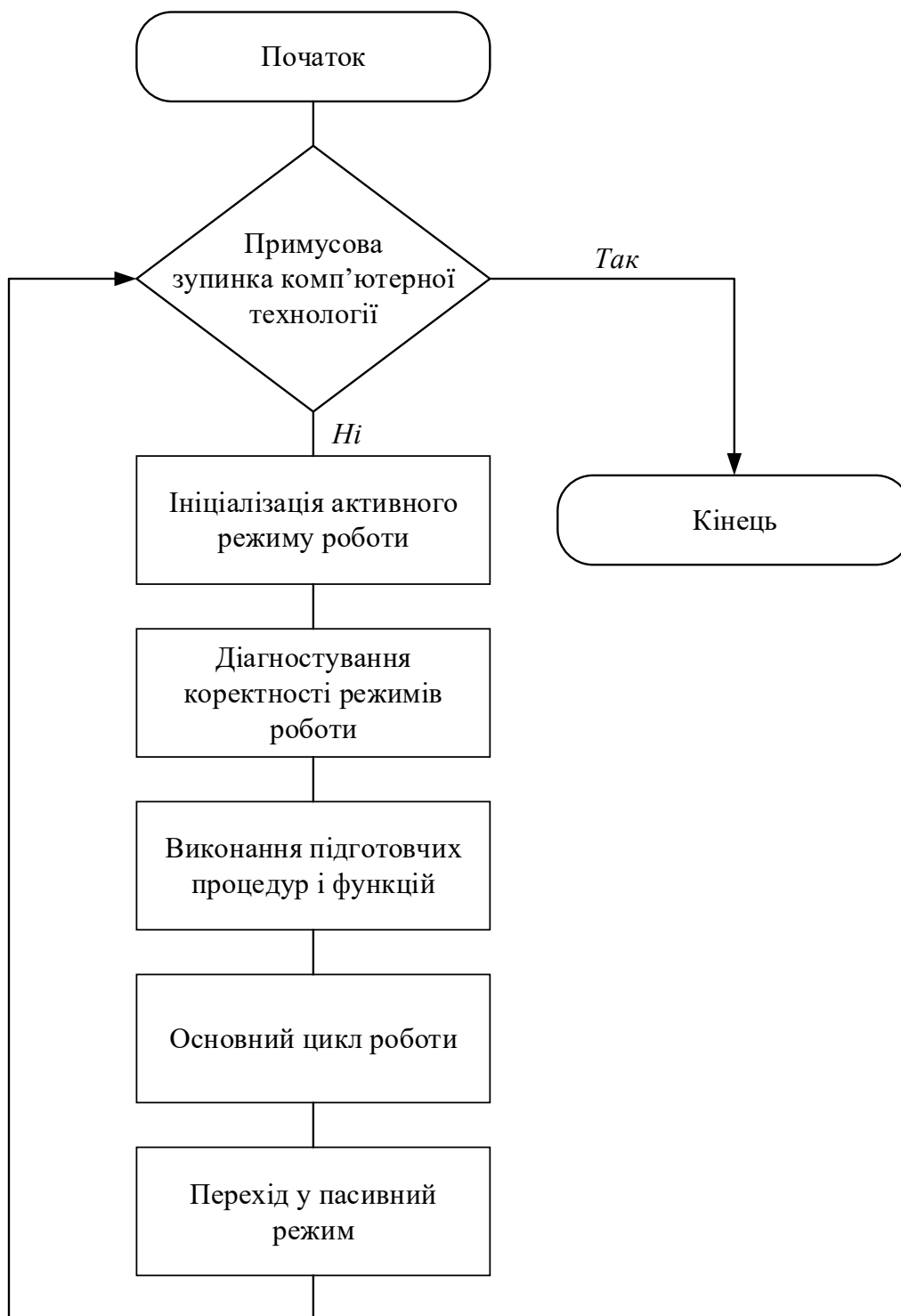


Рисунок 2.4 – Узагальнена блок-схема роботи комп'ютерної технології предикативного контролю режимів зволоження зернових культур

Як видно з аналізу блок-схеми, яку наведено на рисунку 2.4, то з урахуванням специфіки об'єкту та предмету дослідження цієї дисертаційної роботи, найбільший інтерес дослідницького характеру являє блок основного

циклу роботи комп'ютерної технології, який, у свою чергу, є алгоритмічною основою програмних компонент розроблюваної технології предикативного контролю. Отже, з урахуванням деталізованої структурної схеми досліджуваної комп'ютерної технології (див. рис. 2.3), обґрунтований перелік базових процедур і функцій, які реалізуються в цьому алгоритмічному блоці, є наступним:

- паралельний зональний збір вимірювальних даних щодо фізико-хімічних параметрів ґрунту та клімату в різних локаціях поля;
- паралельна зональна статистична обробка вимірювальних даних на рівні польових мікропроцесорних пристроїв: аналого-цифрове перетворення вихідних сигналів сенсорів, фільтрація даних, присвоєння часових міток результатам спостережень, осереднення в часі вимірювальних даних;
- передача попередньо оброблених даних до локального мікрокомп'ютерного пристрою з присвоєнням міток отриманих даним щодо часу та локацій, з яких вони надійшли;
- комп'ютерний моніторинг (детектування та попередня обробка) у реальному часі техніко-функціональних характеристик поливної системи з подальшою відправкою даних до локального мікрокомп'ютерного пристрою;
- локальний інтелектуальний програмний аналіз отриманих даних за алгоритмами предикативного контролю вологості ґрунту з обліком інформативних і дестабілізуючих факторів;
- генерування сигналів керування виконавчими механізмами поливної системи на основі опрацьованих даних за алгоритмами предикативного контролю;
- абстракція та локальне збереження оброблених результатів предикативного контролю;
- відправка даних на IoT-сервер глибинної інтелектуальної обробки (ідентифікація та аналіз регресійних моделей предикативного контролю режимів зволоження зернових культур, автоматична підтримка прийняття рішень щодо оптимізації агротехнічних процедур протягом повного етапу вирощування);
- надання доступу до оброблених результатів користувачам у віддаленому форматі у відповідності до диференційованих прав доступу.

Отже, на підставі наведеного вище опису щодо деталізації процедур і функцій основного циклу роботи досліджуваної комп'ютерної технології розроблено відповідний алгоритм, блок-схему якого наведено на рисунку 2.5.

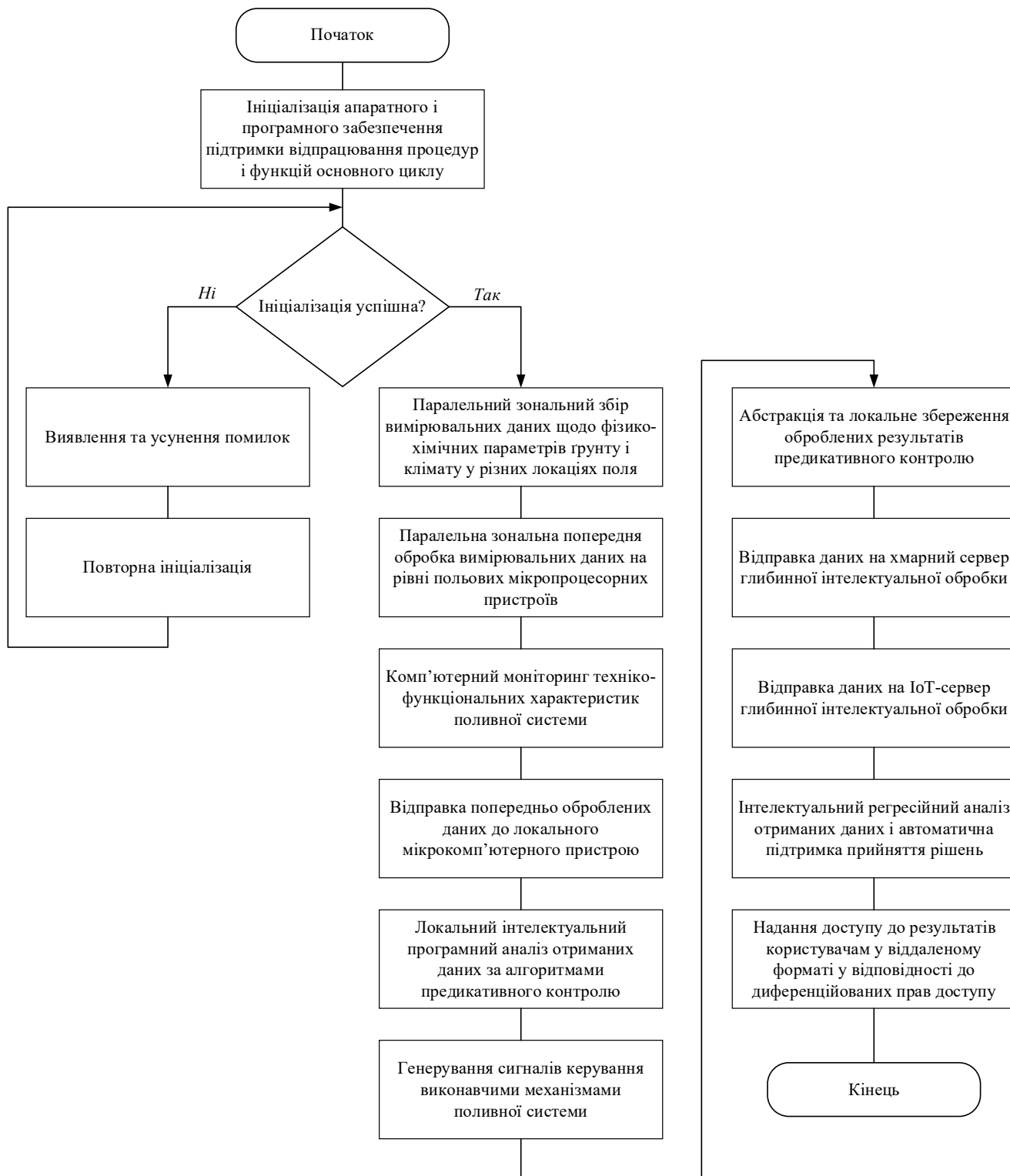


Рисунок 2.5 – Деталізована блок-схема алгоритму основного циклу роботи комп'ютерної технології предикативного контролю режимів зрошення ґрунту

Таким чином, можна зазначити, що запропоноване узагальнене та деталізоване алгоритмічне забезпечення (див. рис. 2.4 і 2.5, відповідно) розроблюваної комп'ютерної технології предикативного контролю режимів зволоження зернових культур враховує актуальні світові тенденції розвитку прикладних комп'ютерних і інформаційних технологій щодо комплексності етапів збору, мережевого обміну та інтелектуальної обробки (розподіленої – периферійної та централізованої – серверної) розподілених в просторі і часі вимірювальних даних [90, 91]. Отже, це алгоритмічне забезпечення може бути використане як базове під час проведення подальших дисертаційних досліджень із розробки і тестування програмно-апаратних компонент комп'ютерної технології предикативного контролю режимів зволоження зернових культур, що вирощуються в польових умовах.

2.3 Інформаційна модель досліджуваної комп'ютерної технології

Основною задачею розробки цієї інформаційної моделі є опис поведінки досліджуваної комп'ютерної технології під час системної взаємодії (збір, мережевий обмін і багаторівнева обробка розподілених в просторі і часі даних) її апаратних і програмних компонент з урахуванням запропонованого структурного і алгоритмічного забезпечення (див. пп. 2.1 і 2.2). На підставі цього в даному підрозділі була обґрунтована інформаційна модель комп'ютерної технології предикативного контролю режимів зволоження зернових культур, що наведена нижче у вигляді формалізованого опису.

У загальному вигляді процес комп'ютерного контролю зрошення ґрунту с/г територій у режимі реального часу може бути описаний наступним функціоналом [92, 93]:

$$\frac{dX_w}{dt} = f(X_w, U_{AS}, Q_S, R_{IS}, V_S, C_S, t), \quad (2.1)$$

де $X_W=X_W(t)$ – вектор змінних стану поточної вологості ґрунту; $U_{AS}=U_{AS}(t)$ – вектор вхідних параметрів (фізико-хімічні параметри повітря й ґрунту); $Q_S=Q_S(t)$ – вектор впливів на об’єкт контролю; $R_{IS}=R_{IS}(t)$ – вектор техніко-функціональних параметрів поливної системи; $V_S=V_S(t)$ – вектор системних змінних, що характеризують техніко-функціональні характеристики комп’ютерної технології контролю; C_S – вектор системних констант (тип ґрунту, тип с/г культур, фаза вегетації); t – час; f – нелінійна функція, що базується на диференційних рівняннях розповсюдження вологи в ґрунті.

В свою чергу, предикативний контроль передбачає можливість прогнозування динаміки стану контрольованого параметру (вологість ґрунту) на заданий часовий період у відповідності до формули [94]:

$$X_W(k+i+1) = A \cdot X_W(k+i) + B \cdot Q_S(k+i), \quad i = 0, 1, \dots, N-1, \quad (2.2)$$

де X_W – дискретні значення стану поточної вологості ґрунту; Q_S – дискретизовані значення впливів на об’єкт контролю; k – дискретні часові відліки; i – крок дискретизації; N – прогнозний період часу; A, B – матриці системних параметрів.

Обов’язковим є врахування обмежень, що накладаються на стани контрольованого параметру (вологість ґрунту) та на впливи, які чиняться комп’ютерною технологією на об’єкт контролю, на підставі виразів [94]:

$$\begin{cases} X_{W_{\min}} \leq X_W(k+i) \leq X_{W_{\max}}; \\ Q_{S_{\min}} \leq Q_S(k+i) \leq Q_{S_{\max}}, \end{cases} \quad (2.3)$$

де $X_{W_{\min}}$ та $X_{W_{\max}}$ – обмеження, що накладаються на допустимий стан зволоженості ґрунту знизу і зверху, відповідно; $Q_{S_{\min}}$ та $Q_{S_{\max}}$ – обмеження, що накладаються на граничні значення впливів, що можуть генеруватись комп’ютерною технологією контролю, знизу і зверху, відповідно.

У відповідності до розробленої структурної схеми (див. рис. 2.3) та

деталізованого алгоритму роботи (див. рис. 2.5) досліджуваної комп'ютерної технології можна виділити наступні основні тракти трансформації вимірювальних даних щодо режимів зволоження ґрунту в процесі вирощування зернових культур, як це описано нижче.

Етап 1: багатозональний (за глибиною та локаціями поля) збір вимірювальних даних щодо параметрів ґрунту: відносна вологість (W_{soil}) та температура (T_{soil}). Цей етап може бути описаний наступним функціональним ланцюгом інформаційних перетворень:

$$\left\{ \begin{array}{l} S_{W_{soil}}(t, l, h) \rightarrow ADC(S_{W_{soil}}(t, l, h)) \rightarrow W_{soil}(t, l, h) \rightarrow \\ \rightarrow f_1(W_{soil}(t, l, h)) \rightarrow \overline{W_{soil_k}}(l, h) \rightarrow \overline{\overline{W_{soil_k}}}(h); \\ S_{T_{soil}}(t, l, h) \rightarrow ADC(S_{T_{soil}}(t, l, h)) \rightarrow T_{soil}(t, l, h) \rightarrow \\ \rightarrow f_1(T_{soil}(t, l, h)) \rightarrow \overline{T_{soil_k}}(l, h) \rightarrow \overline{\overline{T_{soil_k}}}(h), \end{array} \right. \quad (2.4)$$

де $S_{W_{soil}}$ та $S_{T_{soil}}$ – вихідні сигнали сенсорів вологості та температури ґрунту в неперервній формі; ADC – функція перетворення аналогових вихідних сигналів сенсорів у цифрову форму; W_{soil} та T_{soil} – результати багатозонального комп'ютерного моніторингу вологості та температури ґрунту в одиницях вимірювання фізичних величин; f_1 – функція фільтрації та присвоєння часових міток результатам комп'ютерного моніторингу; $\overline{W_{soil_k}}$ та $\overline{T_{soil_k}}$ – осереднені в часі результати багатозонального комп'ютерного моніторингу вологості та температури ґрунту за аналізований період (у промислових рішеннях систем агромоніторингу приймається рівним одній годині [95]); $\overline{\overline{W_{soil_k}}}$ та $\overline{\overline{T_{soil_k}}}$ – осереднені за показниками часу та локаціями поля (методом розбиття поля на оптимальні сегменти [96, 97]) результати комп'ютерного моніторингу; t – час; l – локація поля; h – глибина контролю вологості та температури в залежності від розташування кореневмісного шару; k – дискретизовані періоди часу.

Етап 2: збір вимірювальних даних щодо параметрів клімату: відносна

вологість (W_{air}) і температура (T_{air}) повітря та кількість опадів (Pr). Цей етап може бути описаний наступним ланцюгом інформаційних перетворень:

$$\begin{cases} S_{W_{air}}(t) \rightarrow ADC(S_{W_{air}}(t,l)) \rightarrow W_{air}(t,l) \rightarrow f_1(W_{air}(t,l)) \rightarrow \overline{W_{air_k}}(l) \rightarrow \overline{\overline{W_{air_k}}}; \\ S_{T_{air}}(t) \rightarrow ADC(S_{T_{air}}(t,l)) \rightarrow T_{air}(t,l) \rightarrow f_1(T_{air}(t,l)) \rightarrow \overline{T_{air_k}}(l) \rightarrow \overline{\overline{T_{air_k}}}; \\ S_{Pr}(t) \rightarrow ADC(S_{Pr}(t,l)) \rightarrow Pr(t,l) \rightarrow f_1(Pr(t,l)) \rightarrow Pr_{\Sigma_k}(l), \end{cases} \quad (2.5)$$

де $S_{W_{air}}$, $S_{T_{air}}$ та S_{Pr} – вихідні сигнали сенсорів вологості повітря, температури повітря та кількості опадів у неперервній формі, відповідно; ADC – функція перетворення аналогових вихідних сигналів сенсорів у цифрову форму; W_{air} , T_{air} та Pr – результати комп'ютерного моніторингу вологості повітря, температури повітря та кількості опадів у одиницях вимірювання фізичних величин, відповідно; f_1 – функція фільтрації та присвоєння часових міток результатам комп'ютерного моніторингу; $\overline{W_{air_k}}$ та $\overline{T_{air_k}}$ – осереднені в часі результати комп'ютерного моніторингу вологості та температури повітря за аналізований проміжок часу (одна година [95]); $\overline{\overline{W_{air_k}}}$ та $\overline{\overline{T_{air_k}}}$ – осереднені за показниками часу та локаціями поля результати комп'ютерного моніторингу вологості та температури повітря; Pr_{Σ_k} – диференційоване за локаціями кумулятивне значення кількості опадів за аналізований проміжок часу (одна година [95]); t – час; k – дискретизовані періоди часу.

Етап 3: збір вимірювальних даних щодо техніко-функціональних характеристик поливної системи. Цей етап може бути описаний наступним функціональним ланцюгом інформаційних перетворень:

$$\begin{cases} S_{P_r}(t) \rightarrow ADC(S_{P_r}(t)) \rightarrow P_r(t) \rightarrow f_1(P_r(t)) \rightarrow P_{ir_k}; \\ S_{C_w}(t) \rightarrow ADC(S_{C_w}(t)) \rightarrow C_w(t) \rightarrow f_1(C_w(t)) \rightarrow C_{w_k}, \end{cases} \quad (2.6)$$

де $S_{P_{ir}}$ та S_{C_w} – вихідні сигнали сенсорів тиску в поливній системі та витрат поливної води, відповідно; ADC – функція перетворення аналогових вихідних сигналів сенсорів у цифрову форму; P_{ir} та C_w – результати комп'ютерного моніторингу тиску в поливній системі та витрат поливної води в одиницях вимірювання фізичних величин; f_1 – функція фільтрації та присвоєння часових міток результатам комп'ютерного моніторингу; P_{ir_k} та C_{w_k} – дискретизовані значення техніко-функціональних параметрів поливної системи за аналізований період часу; t – час; k – дискретизовані періоди часу.

Етап 4: бездротова передача даних від мережі польових мікропроцесорних пристроїв моніторингу агрокліматичних параметрів та мікропроцесорного пристрою контролю техніко-функціональних параметрів поливної системи до локального мікрокомп'ютерного пристрою інтелектуальної обробки даних. Цей етап повинен враховувати функціональні можливості локальних мережеских пристроїв обміну даними [98, 99] і може бути описаний наступним функціональним ланцюгом інформаційних перетворень:

$$\begin{aligned} & MUX \left(\overline{\overline{W_{soil_k}}}(h), \overline{\overline{T_{soil_k}}}(h), \overline{\overline{W_{air_k}}}, \overline{\overline{T_{air_k}}}, Pr_{\Sigma_k}(l), P_{ir_k}, C_{w_k}, V_{data_j}, B_{data_j} \right) \rightarrow \\ & \rightarrow f_2 \left(\overline{\overline{W_{soil_k}}}(h), \overline{\overline{T_{soil_k}}}(h), \overline{\overline{W_{air_k}}}, \overline{\overline{T_{air_k}}}, Pr_{\Sigma_k}(l), P_{ir_k}, C_{w_k} \right) \rightarrow Data_{agr_k} \end{aligned} \quad (2.7)$$

де MUX – процедура мультиплексування (часової ініціалізації та синхронізації) мережеских каналів передачі вимірювальних даних; $\overline{\overline{W_{soil_k}}}$, $\overline{\overline{T_{soil_k}}}$, $\overline{\overline{W_{air_k}}}$, $\overline{\overline{T_{air_k}}}$, Pr_{Σ_k} – попередньо оброблені польовими мікропроцесорними пристроями параметри ґрунту і клімату; P_{ir_k} та C_{w_k} – попередньо оброблені мікропроцесорним пристроєм параметри поливної системи; V_{data_j} – обсяг даних, що передається мережеским пристроєм; B_{data_j} – пропускна здатність відповідного мережеского каналу передачі даних; j – кількість мережеских каналів передачі даних; f_2 – функція агрегування вимірювальних даних; $Data_{agr_k}$ – агрегований пакет

вимірювальних даних за фактором періоду отримання попередньо оброблених вимірювальних даних.

Етап 5: локальний інтелектуальний програмний аналіз отриманих даних. Цей етап ґрунтується на результатах мережевого комп'ютерного моніторингу (етапи 1–4) та повинен враховувати інформативні фізико-біологічні фактори, що впливають на результати предикативного контролю режимів зрошення ґрунту, а отже, може бути реалізований на підставі наступного ланцюга функціональної трансформації:

$$\begin{aligned} Data_{agr_k} \rightarrow f_3(Data_{agr_k}, Type_{soil}, Type_{crop}, N_{veg}) \rightarrow \\ \rightarrow f_4(Data_{agr_k}, Type_{soil}, Type_{crop}, N_{veg}) \rightarrow Information_{SCC_k}, \end{aligned} \quad (2.8)$$

де $Data_{agr_k}$ – агрегований пакет вимірювальних даних; f_3 – функція завантаження даних щодо інформативних факторів, які мають бути враховані, під час трансформації даних комп'ютерних вимірювань; $Type_{soil}$ – тип ґрунту; $Type_{crop}$ – тип вирощуваних с/г культур; N_{veg} – фаза вегетації вирощуваних с/г культур; f_4 – функція інтелектуальної обробки вимірювальних даних та інформативних факторів на предмет оцінки інтегрального стану ґрунтокліматичних умов вирощування с/г культур; $Information_{SCC_k}$ – вимірювальна інформація щодо інтегрального стану ґрунтокліматичних умов вирощування с/г культур.

Етап 6: предикативна обробка вимірювальної інформації та генерування сигналів керування виконавчими механізмами систем зрошення агроугідь, що реалізується на підставі результатів попередніх етапів (2.4) – (2.8) на основі залежності (2.2) з урахуванням обмежень (2.3):

$$f_5(Information_{SCC_k}, X_{W_{min}}, X_{W_{max}}, Q_{S_{min}}, Q_{S_{max}}) \rightarrow Q_{S_k} \rightarrow f_6(X_{W_k}, Q_{S_k}) \rightarrow X_{W_{k+1}}, \quad (2.9)$$

де f_5 – функція агрегування комплексної вимірювальної інформації та даних щодо

обмежень, які накладаються на об'єкт комп'ютерного контролю; $Information_{SCC_k}$ – вимірювальна інформація щодо інтегрального стану ґрунтокліматичних умов вирощування с/г культур; $X_{W_{min}}$ та $X_{W_{max}}$ – обмеження, що накладаються на допустиме значення вологості ґрунту; $Q_{S_{min}}$ та $Q_{S_{max}}$ – обмеження, що накладаються на граничні значення впливів керування системою зволоження; f_6 – функція предикативного комп'ютерного контролю; Q_S – дискретизовані значення впливів на об'єкт контролю; X_W – дискретні значення стану поточної вологості ґрунту; k – дискретні часові відліки.

Етап 7: абстракція, локальне і віддалене збереження вимірювальної інформації, а також глибинний інтелектуальний аналіз і графічна інтерпретація результатів комп'ютерного контролю. Цей етап може бути реалізований на підставі наступного ланцюга функціональних перетворень:

$$\begin{aligned}
 &Information_{SCC_k} \rightarrow f_7(Information_{SCC_k}) \rightarrow \\
 &\rightarrow Info_{Abstr} \rightarrow \begin{cases} f_8(Info_{Abstr}) \rightarrow \\ f_9(Info_{Abstr}, V_{info}, B_{RS}) \rightarrow \\ f_{10}(Info_{Abstr}) \rightarrow ADS \end{cases}, \quad (2.10)
 \end{aligned}$$

де $Information_{SCC_k}$ – вимірювальна інформація щодо інтегрального стану ґрунтокліматичних умов вирощування с/г культур; f_7 – функція абстракції вимірювальної інформації (див. табл. 2.1); $Info_{Abstr}$ – абстрагована вимірювальна інформація; f_8 – функція локального збереження вимірювальної інформації щодо предикативного контролю; f_9 – функція передачі даних на IoT-сервер; V_{info} – обсяг вимірювальної інформації, що передається на хмарний сервер; B_{RS} – пропускна здатність відповідного мережевого каналу зв'язку з IoT-сервером; f_{10} – функція глибинного інтелектуального аналізу часових рядів результатів предикативного контролю режимів зволоження зернових культур; ADS – функція автоматичної підтримки прийняття рішень щодо оптимізації агротехнічних процедур протягом

повного етапу вирощування.

В якості узагальненої характеристики запропонованої інформаційної моделі комп'ютерної технології предикативного контролю режимів зволоження зернових культур можна зазначити наступне:

– етапи 1–3, що описуються ланцюгами функціональних перетворень (2.4) – (2.6), реалізуються в паралельному режимі на основі польових сенсорів інформативних і дестабілізуючих ґрунтокліматичних параметрів с/г об'єктів вирощування зернових культур та сенсорів техніко-функціональних параметрів систем поливу, які, в свою чергу, спряжені з бюджетними мікропроцесорними платформами (Arduino) з вбудованим програмним забезпеченням попередньої цифрової обробки вимірювальних даних та оснащені бездротовими мережевими модулями LoRa;

– етап 4, що описується ланцюгом функціональних перетворень (2.7), реалізується з використанням дротових і бездротових інтерфейсів та характеризується необхідністю часової синхронізації мережових пристроїв під час передачі даних від них до локального мікрокомп'ютерного пристрою;

– етап 5, що описується ланцюгом функціональних перетворень (2.8), реалізується мікрокомп'ютерним пристроєм типу Raspberry Pi з вбудованим програмним забезпеченням і ґрунтується на алгоритмах обробки результатів мережевого комп'ютерного моніторингу з урахуванням інформативних фізико-біологічні факторів (тип ґрунту, тип і стадія вегетації вирощуваних зернових культур);

– етап 6, що описується ланцюгом функціональних перетворень (2.9), реалізується мікрокомп'ютерним пристроєм типу Raspberry Pi та дозволяє відпрацювати алгоритми предикативного контролю режимів зволоження ґрунту під час повного циклу вирощування зернових культур з обліком комплексної інформації щодо характеристик об'єкту комп'ютерного контролю;

– етап 7, що описується ланцюгом функціональних перетворень (2.10), реалізується на підставі мережевої взаємодії локальних пристроїв і IoT-серверу на основі клієнт-серверної архітектури та націлений на резервоване (локальне та

віддалене) збереження вимірювальної інформації, надання до неї доступу, в тому числі в віддаленому режимі, а також глибинного інтелектуального аналізу вимірювальної інформації з автоматичною підтримкою прийняття рішень щодо оптимізації агротехнічних процедур протягом повного етапу вирощування зернових культур у мінливих агрокліматичних умовах.

Отже, запропонована інформаційна модель досліджуваної комп'ютерної технології, яка представлена у вигляді ланцюгів поетапних функціональних перетворень розподілених у просторі й часі вимірювальних даних (2.1) – (2.10) враховує регламентовані функціональні вимоги до комплексного збору, передачі та інтелектуальної обробки [46, 47]. Таким чином, ця інформаційна модель може бути використана в якості базової в процесі подальших дисертаційних досліджень із розробки і тестування програмно-апаратних компонент комп'ютерної технології предикативного контролю режимів зволоження зернових культур, які зростають у польових умовах.

2.4 Математична модель процесу комп'ютерного контролю динаміки ґрунтової вологи

Розробка комп'ютерної технології предикативного контролю режимів зволоження зернових культур потребує обґрунтування та дослідження математичної моделі, що описує динаміку ґрунтової вологи для формулювання адекватного програмно-алгоритмічного забезпечення такої технології. Фізичною основою такої математичної моделі є формалізований опис процесу гідрологічного балансу, що встановлює закономірності зміни вмісту вологи в шарах ґрунту протягом певного проміжку часу за рахунок фізичних процесів надходження (опаді, капілярний підйом ґрунтових вод, примусовий полив та інше) та відтоку (інфільтраційні процеси, поверхневий стік, випаровування та інше) вологи [100, 101], а також біологічних процесів споживання вологи вирощуваними с/г культурами, як у вигляді графічної інтерпретації моделі гідрологічного балансу ґрунтової вологи показано на рисунку 2.6 [102].

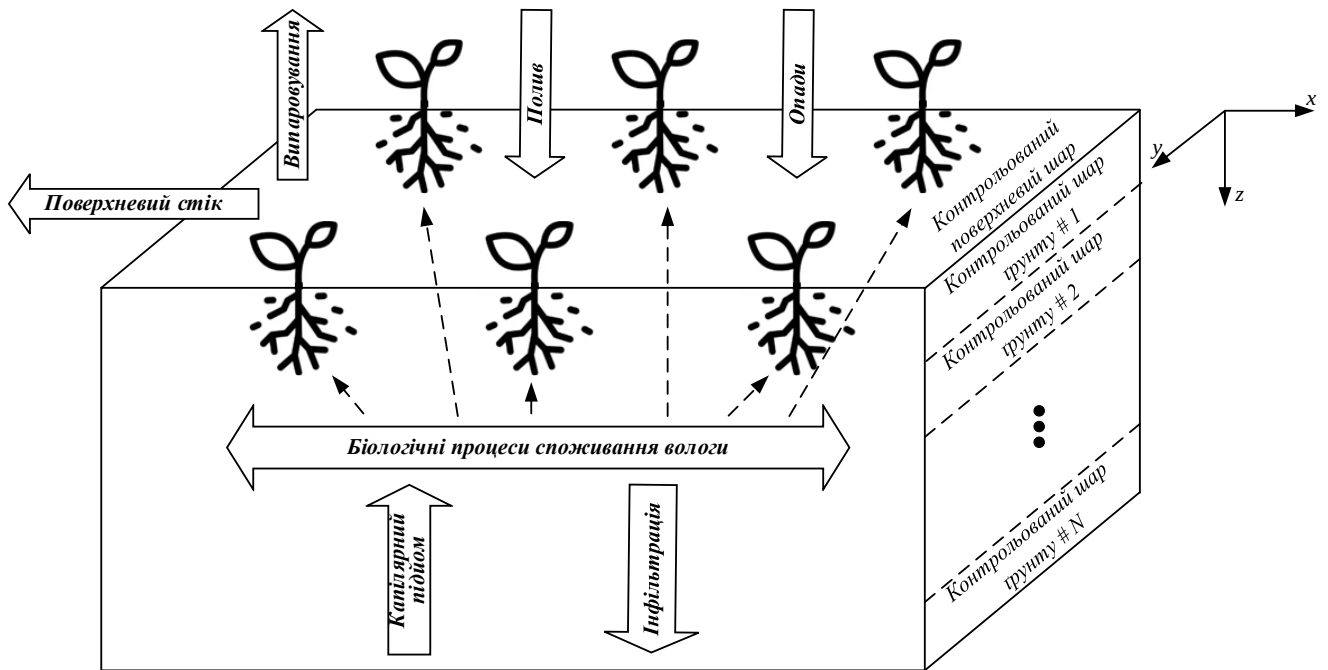


Рисунок 2.6 – Графічна інтерпретація моделі гідрологічного балансу ґрунтової ВОЛОГИ

Таким чином, узагальнена форма рівняння водного балансу ґрунтової вологи з урахуванням фізичних і біологічних процесів, які представлено на рисунку 2.6, за період спостережень має вигляд [100, 101]:

$$W_{start} + W_{pr} + W_{gw} + W_{irr} = W_{end} + W_{inf} + W_{ev} + W_{crop} + W_{dr}, \quad (2.11)$$

де W_{start} – запас ґрунтової вологи в аналізованому шарі ґрунту на початку спостережень; W_{pr} – волога, що надходить за рахунок опадів; W_{gw} – волога, що надходить за рахунок капілярного підйому ґрунтових вод; W_{irr} – поверхневий притік вологи за рахунок поливу; W_{end} – запас ґрунтової вологи в аналізованому шарі ґрунту в кінці спостережень; W_{inf} – кількість вологи, що втрачається за рахунок інфільтраційних властивостей ґрунту; W_{ev} – кількість вологи, що випаровується; W_{crop} – кількість вологи, що споживається за рахунок біологічних процесів живлення рослин; W_{dr} – кількість вологи, що втрачається за рахунок поверхневого стоку.

У свою чергу, основою математичного опису розповсюдження вологи в

ґрунті є одновимірне (за координатою глибини) рівняння Річардса, що описує процес перенесення вологи в зоні аерації ґрунту з урахуванням джерел надходження та стоку [103–105]:

$$\frac{\partial W_{soil}}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial z} \left(K(W_{soil}) \frac{\partial \psi(W_{soil})}{\partial z} \right) + S_{in}(z, t) - S_{out}(z, t), \quad (2.12)$$

де W_{soil} – об’ємна вологість ґрунту як функція глибини та часу; t – час; z – координата глибини; $K(W_{soil})$ – гідравлічна провідність ґрунту як функція вологості; $\psi(W_{soil})$ – потенціал ґрунтової води як функція вологості; S_{in} – функція надходження вологи; S_{out} – функція стоку (випаровування, споживання) вологи.

Своєю чергою, гідравлічна провідність ґрунту з урахуванням розширеної області використання від максимальної гігроскопічності до повного насичення ґрунту вологою може бути обчислена за формулою [105]:

$$K(W_{soil}) = K_f \left(\frac{W_{soil} - W_{max}}{m - W_{max}} \right)^5, \quad (2.13)$$

де $K(W_{soil})$ – гідравлічна провідність ґрунту; K_f – коефіцієнт фільтрації ґрунту; W_{soil} – вологість ґрунту, відн. од.; W_{max} – максимальна гігроскопічність, відн. од.; m – показник пористості ґрунту.

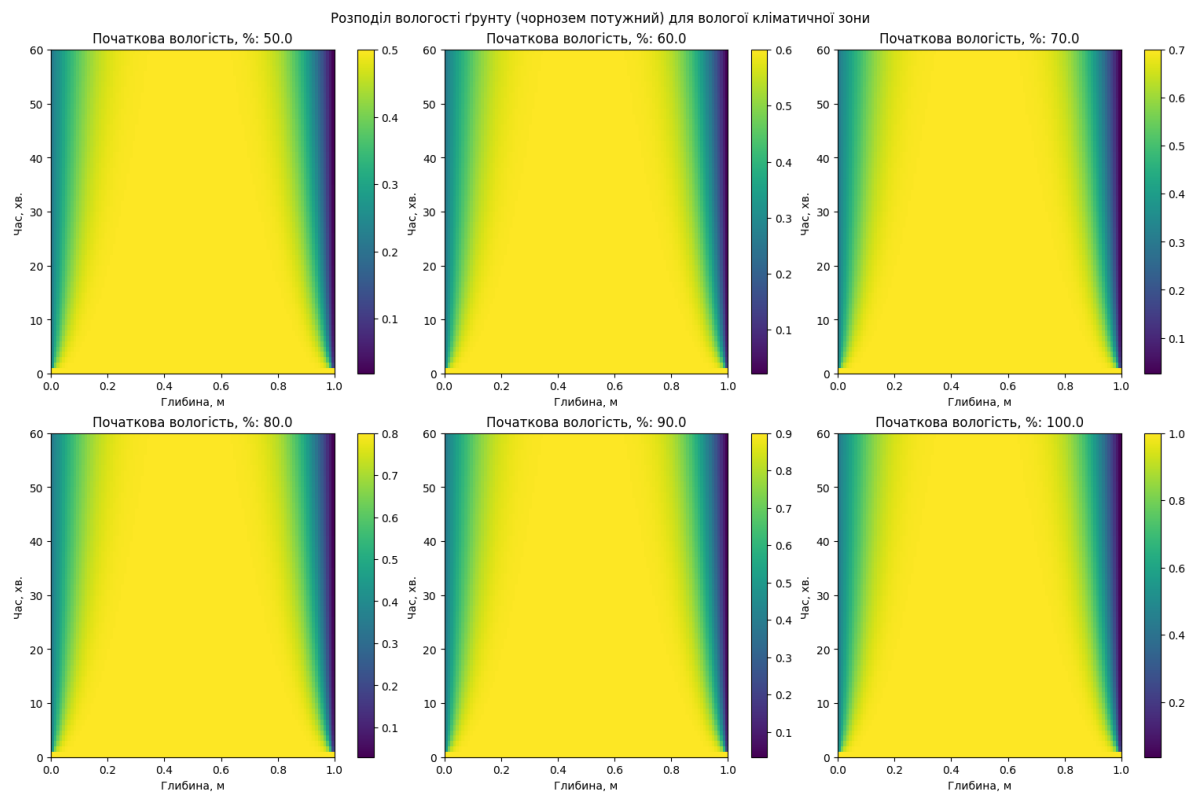
Потенціал ґрунтової вологи $\psi(W_{soil})$ може варіюватись у широкому динамічному діапазоні в залежності від поточної вологості та типу аналізованого ґрунту: від сильно негативного (-1500 кПа – для сухих умов) до позитивного потенціалу (+10 кПа – для умов перенасичення ґрунту вологою) [106, 107].

Розв’язання диференційного рівняння (2.12) виконано чисельним методом інтегрування на основі розробленої комп’ютерної програми мовою Python у середовищі Jupyter Notebook (див. додаток В, В.1). У процесі розв’язання враховано умови, параметри та обмеження як зазначено в таблиці 2.2.

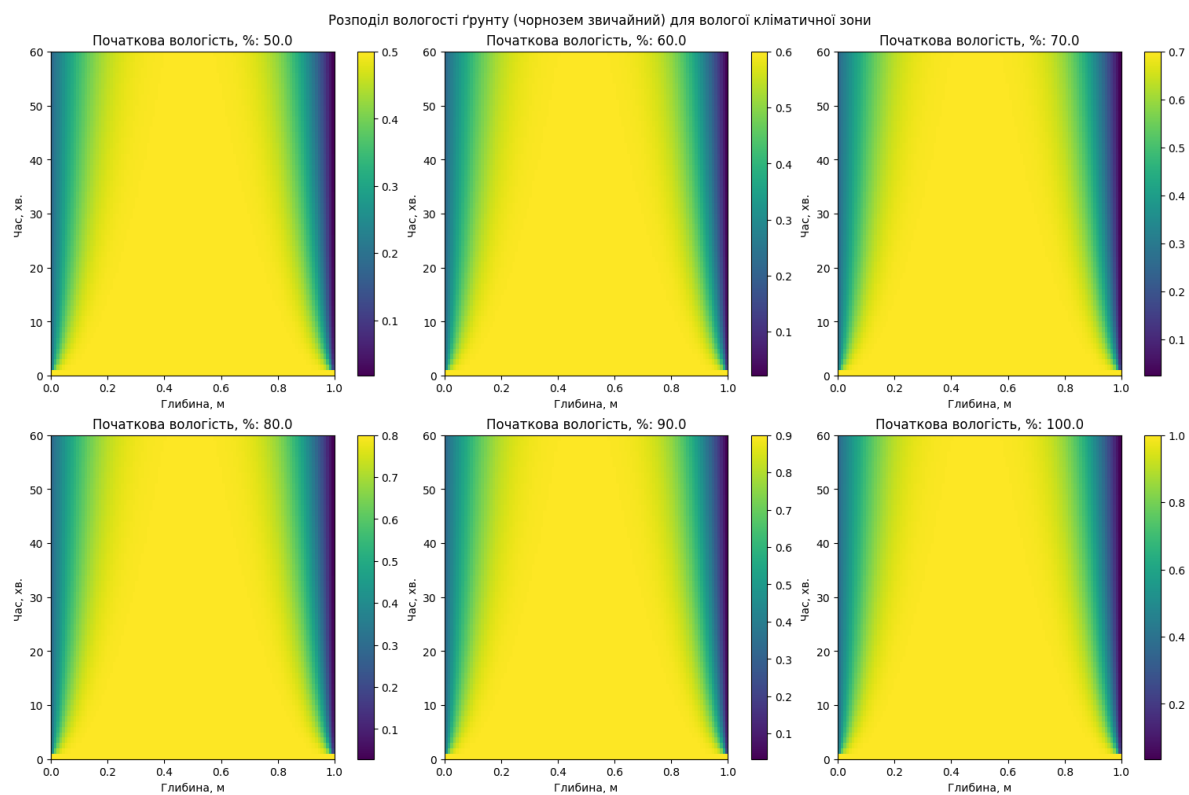
Таблиця 2.2 – Прийняті умови, параметри та обмеження в процесі моделювання динаміки ґрунтової вологи

Враховані процеси, умови та обмеження	Прийняті значення
Аналізований діапазон глибин ґрунту	Параметр z змінюється в діапазоні від 0 м до 1 м з кроком 1 см.
Аналізований часовий діапазон	Параметр t змінюється в діапазоні від 0 хв до 60 хв з кроком 1 хв.
Початкові умови	Дискретний набір значень вологості $W_{soil}(z,0)$ від 50 % до 100 % з кроком 10 %.
Граничні умови	На верхній границі (поверхня ґрунту $z_{min}=0$ м): встановлено бажане значення вологості W_0 (дискретний набір даних від 50 % до 100 %) та вимкнено полив і спостерігається постійне випаровування $W_{soil}(z_{min},t)=W_0-S_{out}(0,t)$; на нижній границі ($z_{max}=1$ м): вологість дорівнює 0 % $W_{soil}(z_{max},t)=0$.
Джерела надходження вологи	Опади й полив: враховано чисельними значеннями початкових і граничних умов через встановлення необхідної вологості на поверхні ґрунту, капілярний підйом відсутній: враховано значенням на нижній межі ґрунту.
Джерела втрат вологи	Чисельно враховано значенням коефіцієнта випаровування в умовах вологої, напівпосушливої та посушливої агрокліматичних зон, відповідно: 0,08 мм/год; 0,16 мм/год; 0,32 мм/год [108].
Гідравлічна провідність ґрунту	Обчислюється за формулою (2.13) з урахуванням коефіцієнта фільтрації для різних типів ґрунту $K_f=8,1$ мм/год (чорнозем потужний), $K_f=10,8$ мм/год (чорнозем звичайний) і $K_f=12,6$ мм/год (чорнозем південний) [109] та середнім показником пористості аерації для моделей рихлої і щільної кладки ґрунтових зерен 0,3 [110].
Потенціал ґрунтової вологи	від 0 до -100 кПа (відповідає оптимальному діапазону вологості ґрунту під час вирощування більшості польових культур).

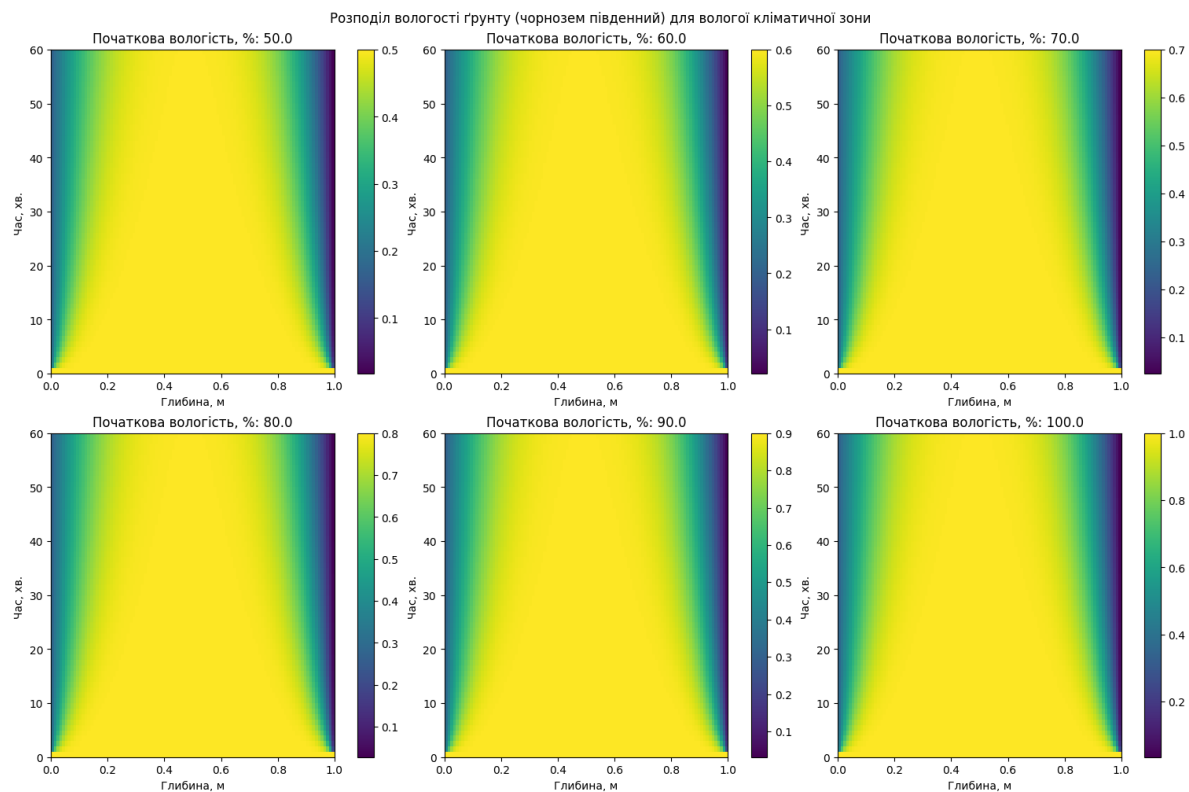
Отримані результати розв'язання диференційного рівняння (2.12) щодо годинної динаміки ґрунтової вологи з урахування прийнятих умов і обмежень (див. табл. 2.2) для різних агрокліматичних умов і типів ґрунту наведено на рисунках 2.7–2.9 [102].



а) чорнозем потужний

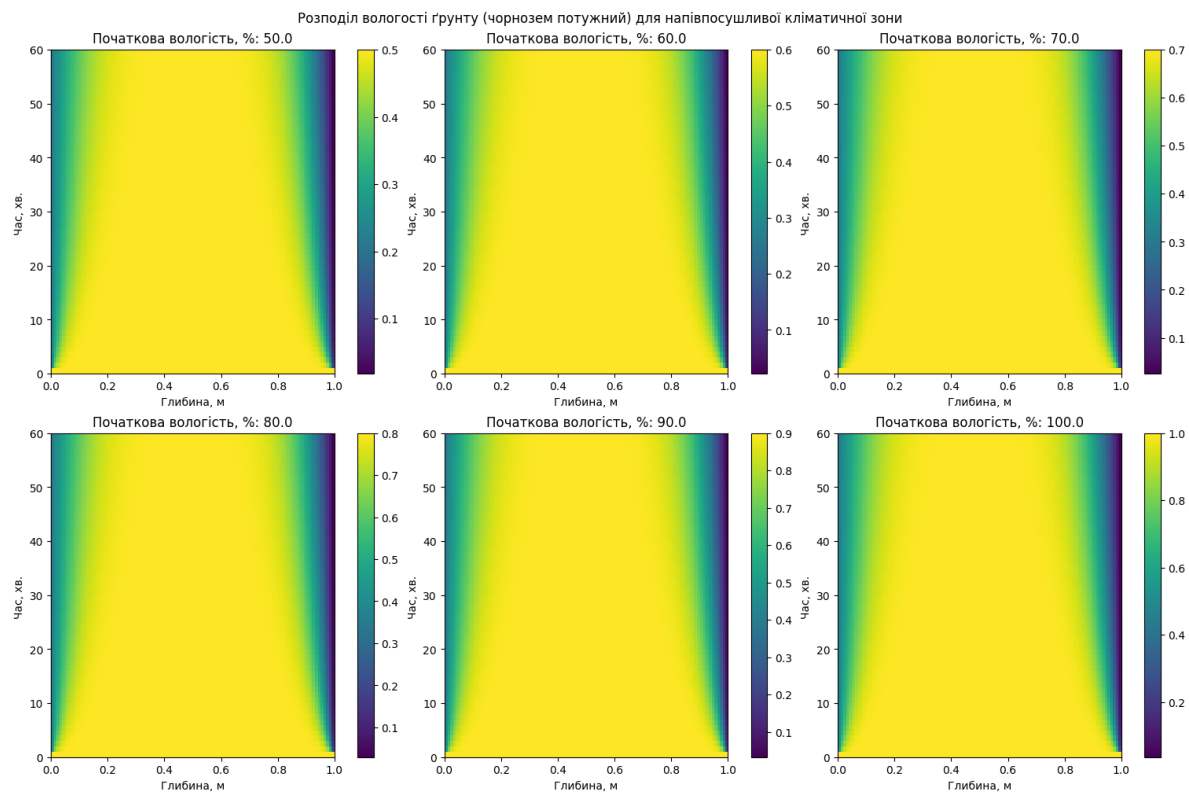


б) чорнозем звичайний

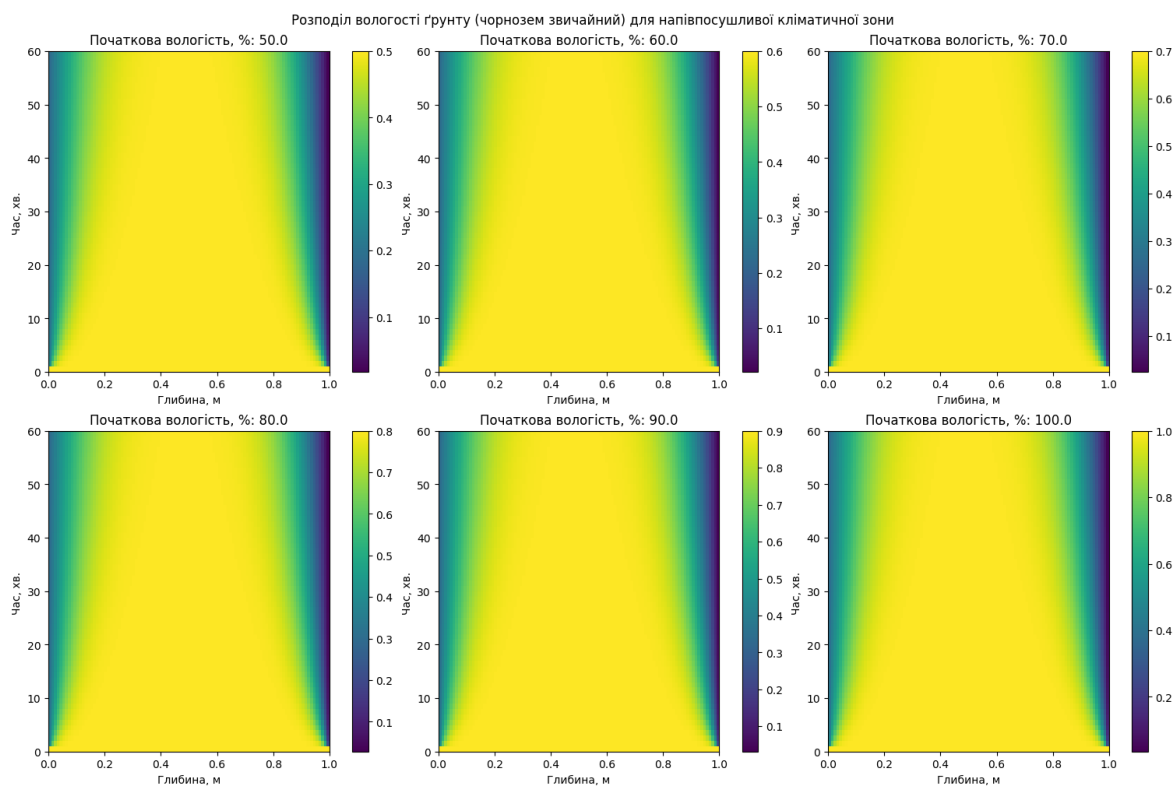


в) чорнозем південний

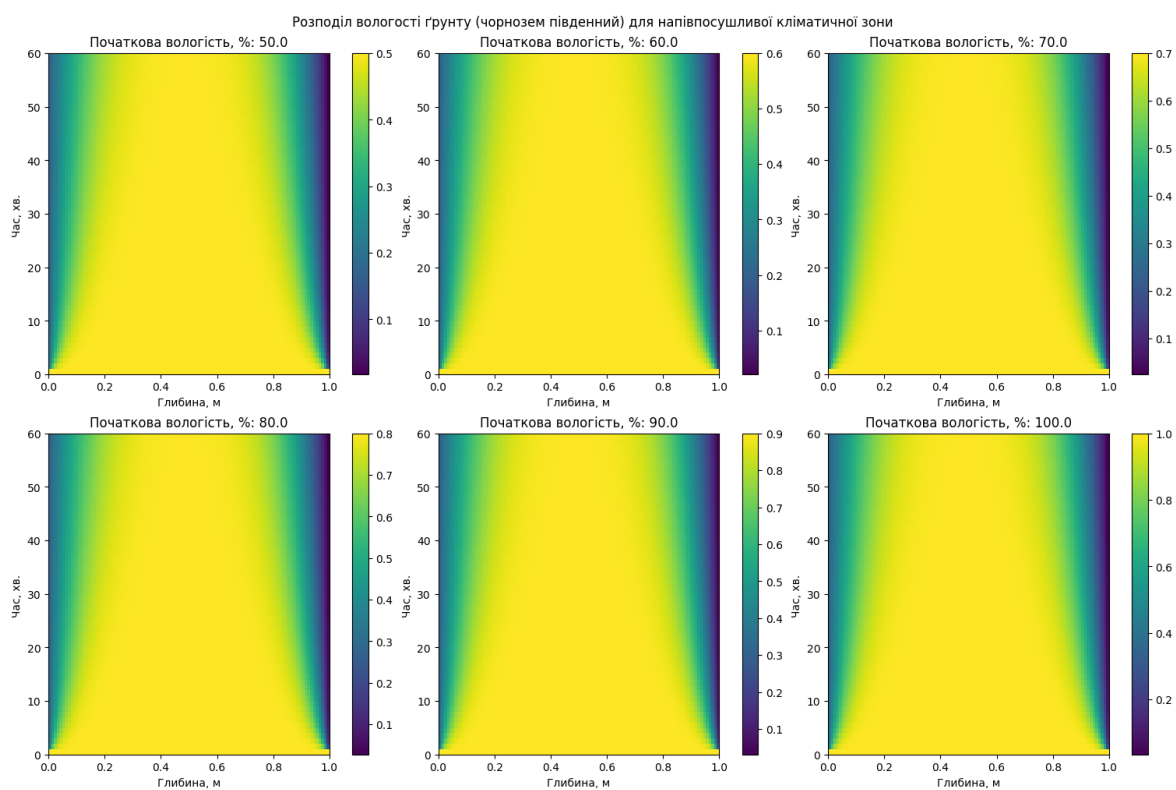
Рисунок 2.7 – Графічна інтерпретація динаміки ґрунтової вологи для умов вологої кліматичної зони



а) чорнозем потужний

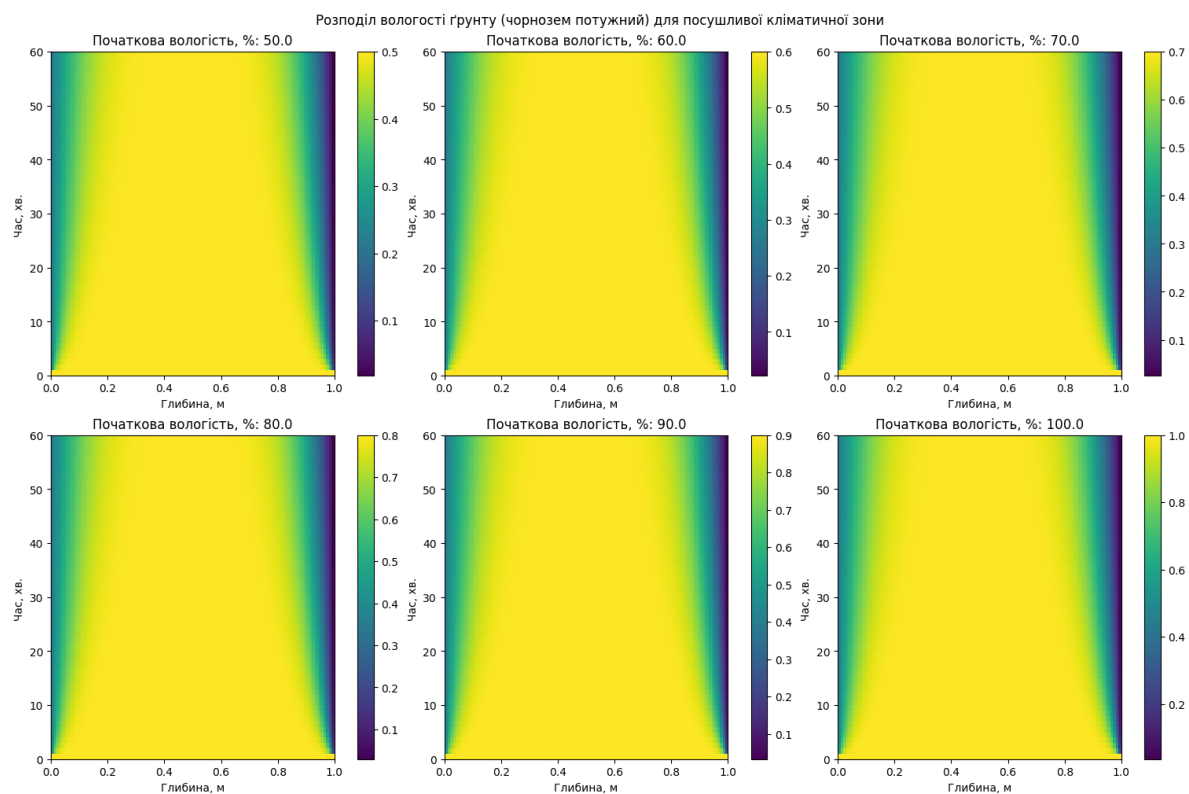


б) чорнозем звичайний

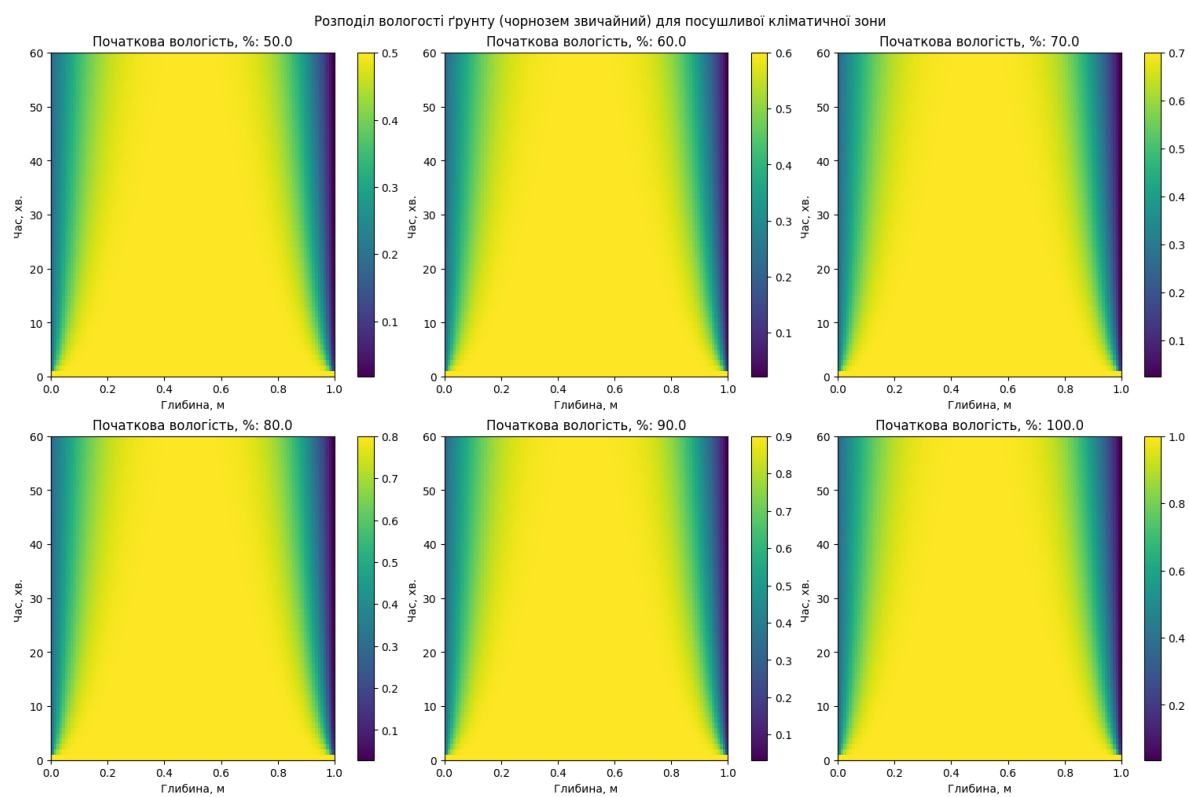


в) чорнозем південний

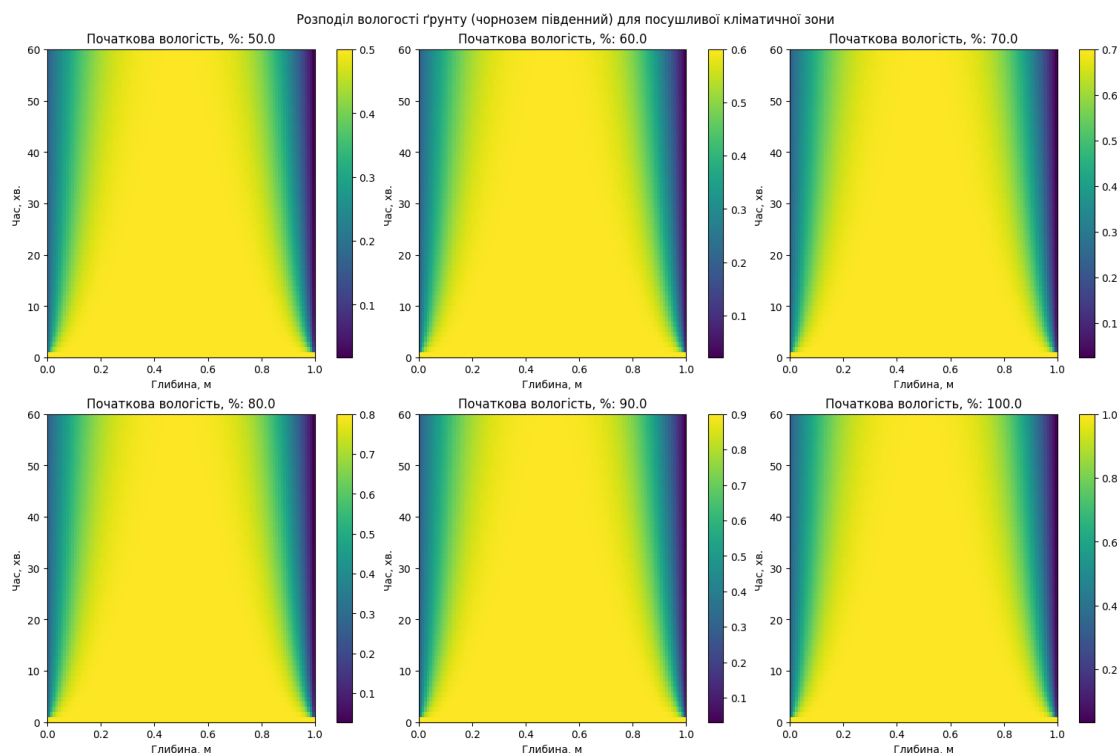
Рисунок 2.8 – Графічна інтерпретація динаміки ґрунтової вологості для умов напівпосушливої кліматичної зони



а) чорнозем потужний



б) чорнозем звичайний



в) чорнозем південний

Рисунок 2.9 – Графічна інтерпретація динаміки ґрунтової вологи для умов посушливої кліматичної зони

Проведені дослідження (див. рис. 2.7–2.9) дозволили оцінити розподіл вологи в залежності від глибини на короткотривалому проміжку часу:

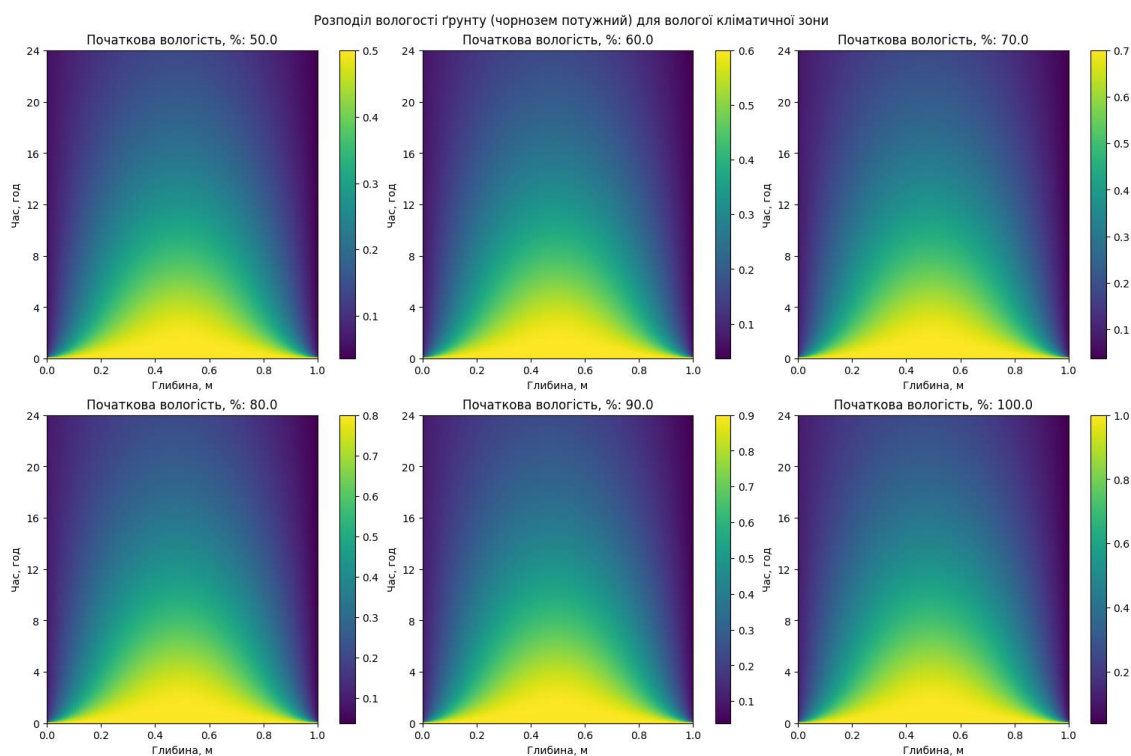
- для чорнозему потужного початкове значення вологості, що було встановлено на поверхневому шарі ґрунту, через годину спостерігається на глибині від 0,17 м до 0,83 м для всіх аналізованих кліматичних зон;

- для чорнозему звичайного початкове значення вологості, що було встановлено на поверхневому шарі ґрунту, через годину спостерігається на глибині від 0,22 м до 0,78 м для всіх аналізованих кліматичних зон;

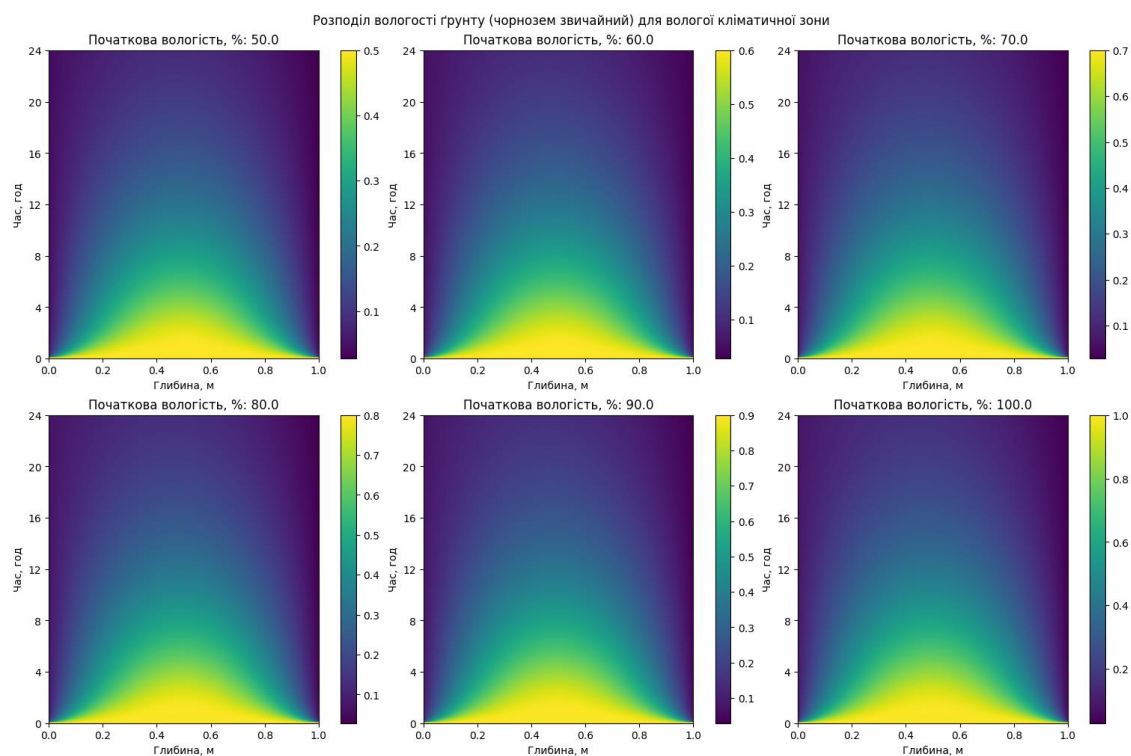
- для чорнозему південного початкове значення вологості, що було встановлено на поверхневому шарі ґрунту, через годину спостерігається на глибині від 0,26 м до 0,74 м для всіх аналізованих кліматичних зон.

Проте проведені дослідження не дозволили оцінити вплив ефектів дифузії та випаровування ґрунтової вологи через недостатній період часу аналізу. Отже, було прийнято рішення провести аналогічні дослідження для періоду часу, що

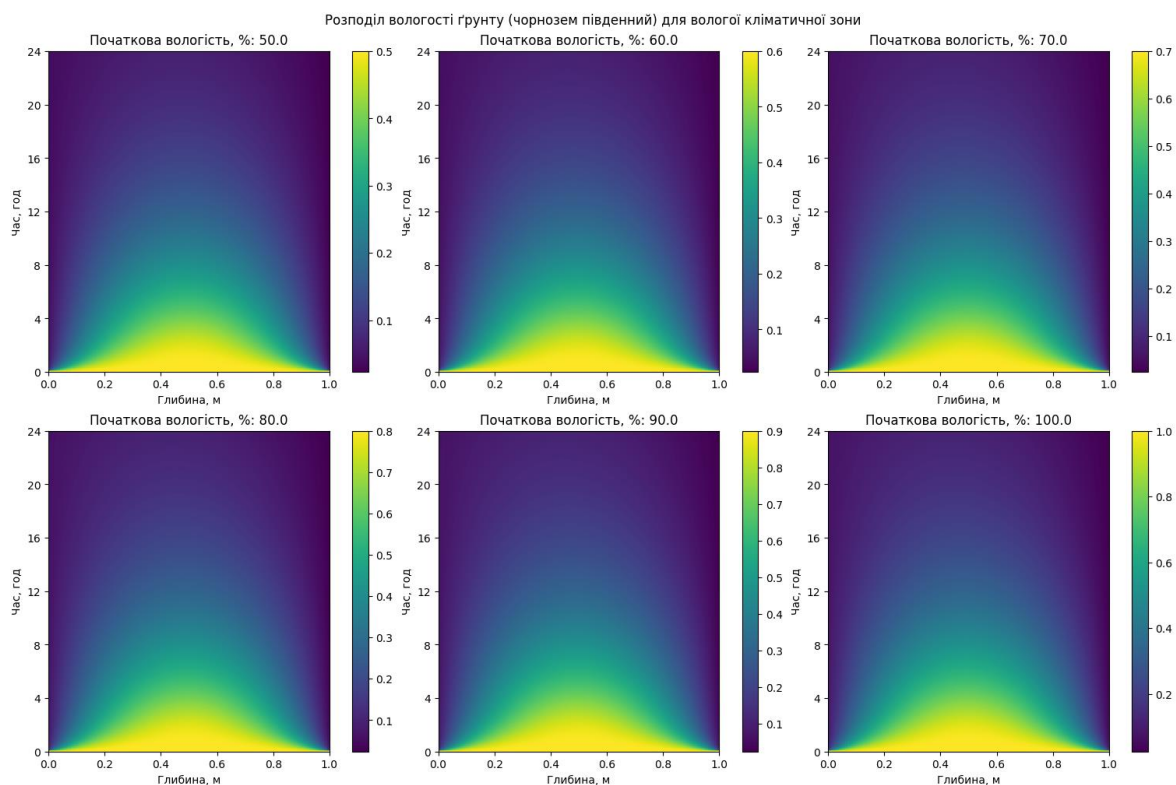
дорівнює одній добі (див. додаток В, В.2) [102]. Відповідні графічні результати наведено на рисунках 2.10–2.11 для різних агрокліматичних зон і типів ґрунту.



а) чорнозем потужний

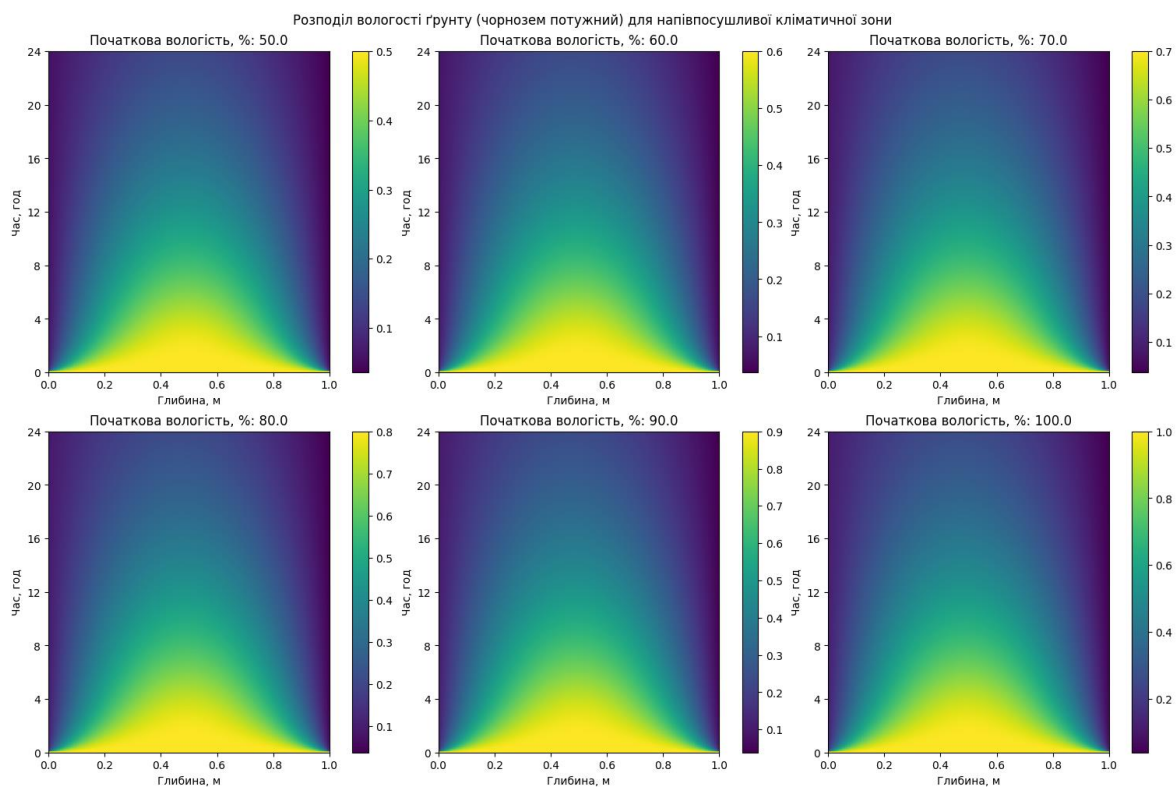


б) чорнозем звичайний

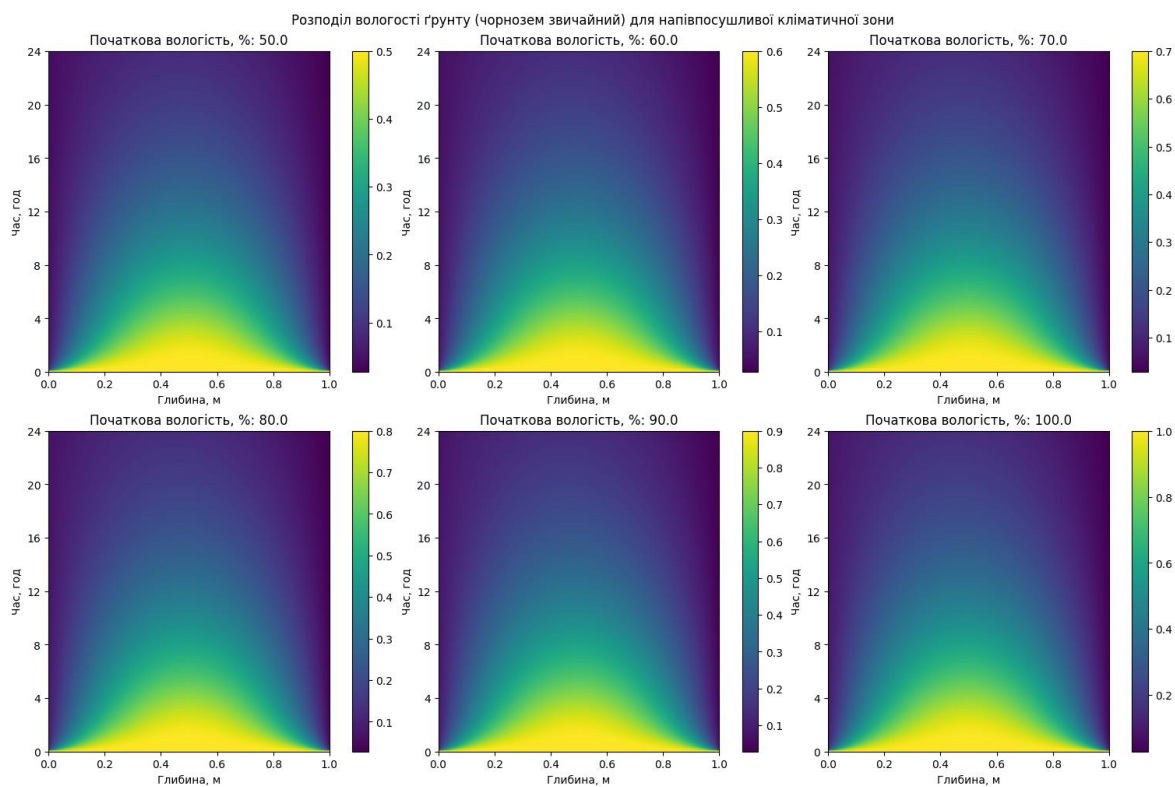


в) чорнозем південний

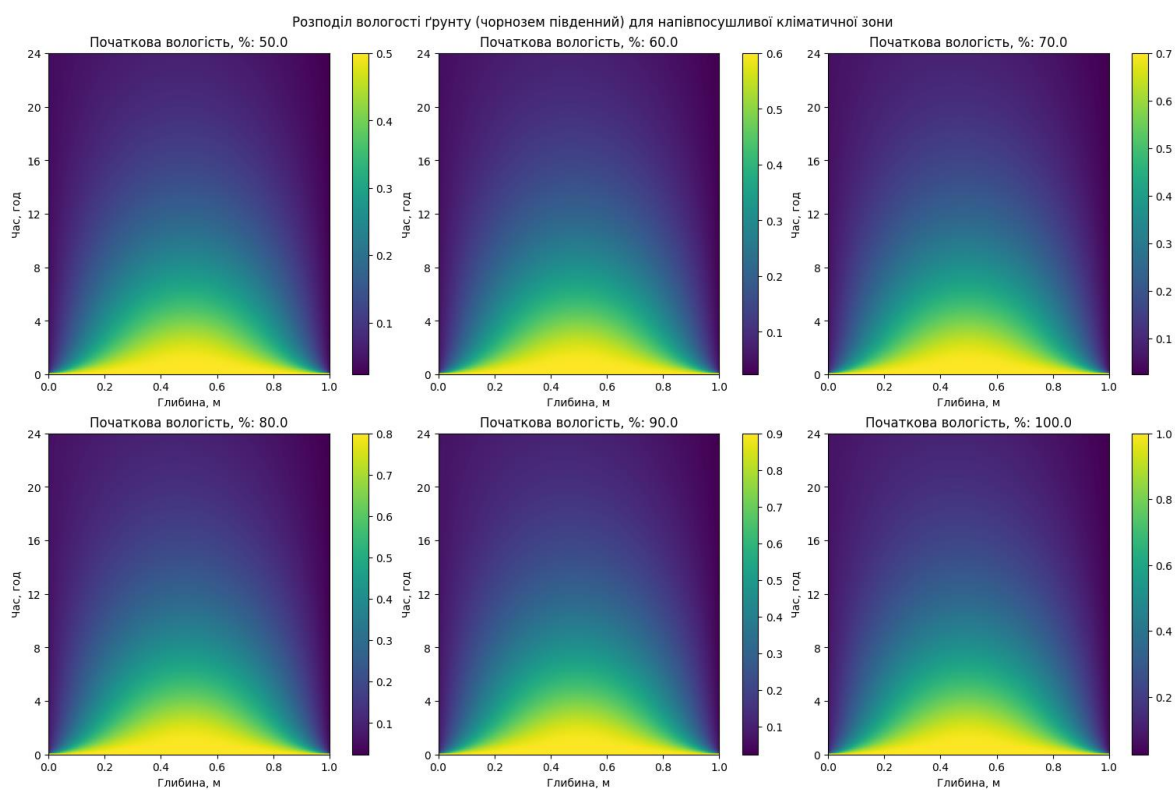
Рисунок 2.10 – Графічна інтерпретація добової динаміки ґрунтової вологи для умов вологої кліматичної зони



а) чорнозем потужний

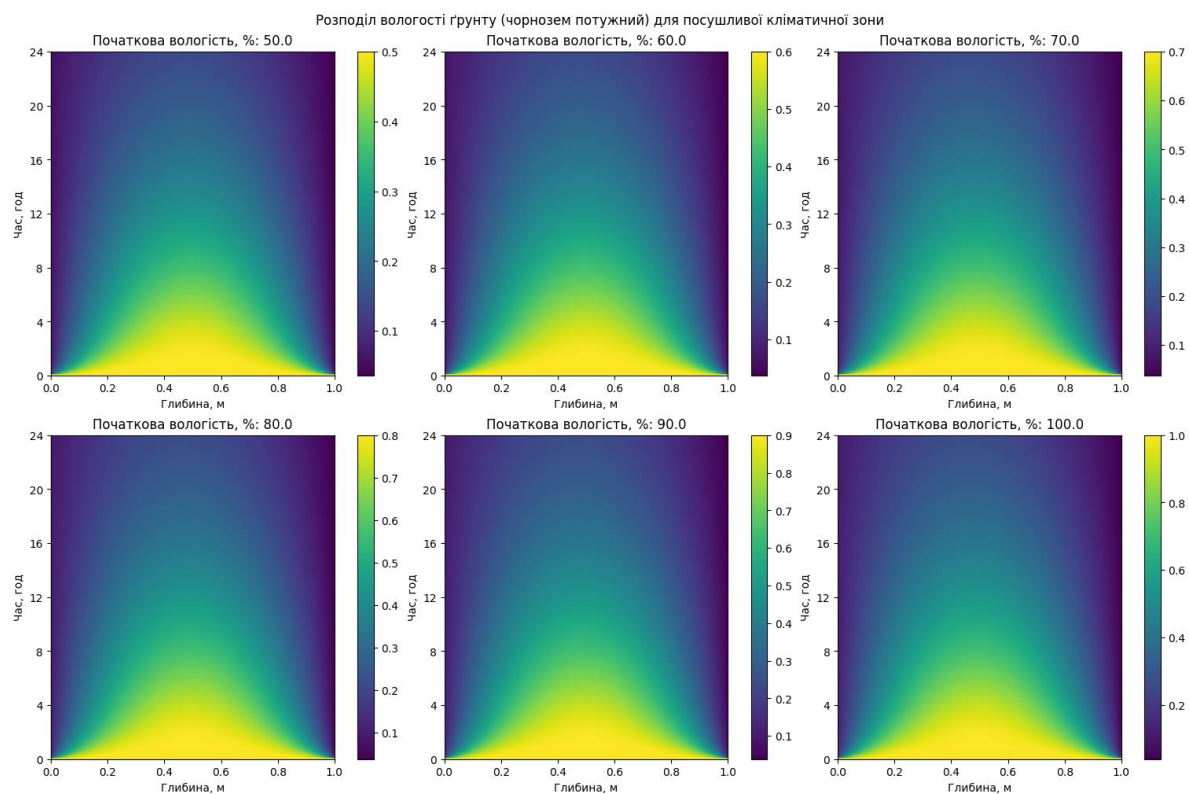


б) чорнозем звичайний

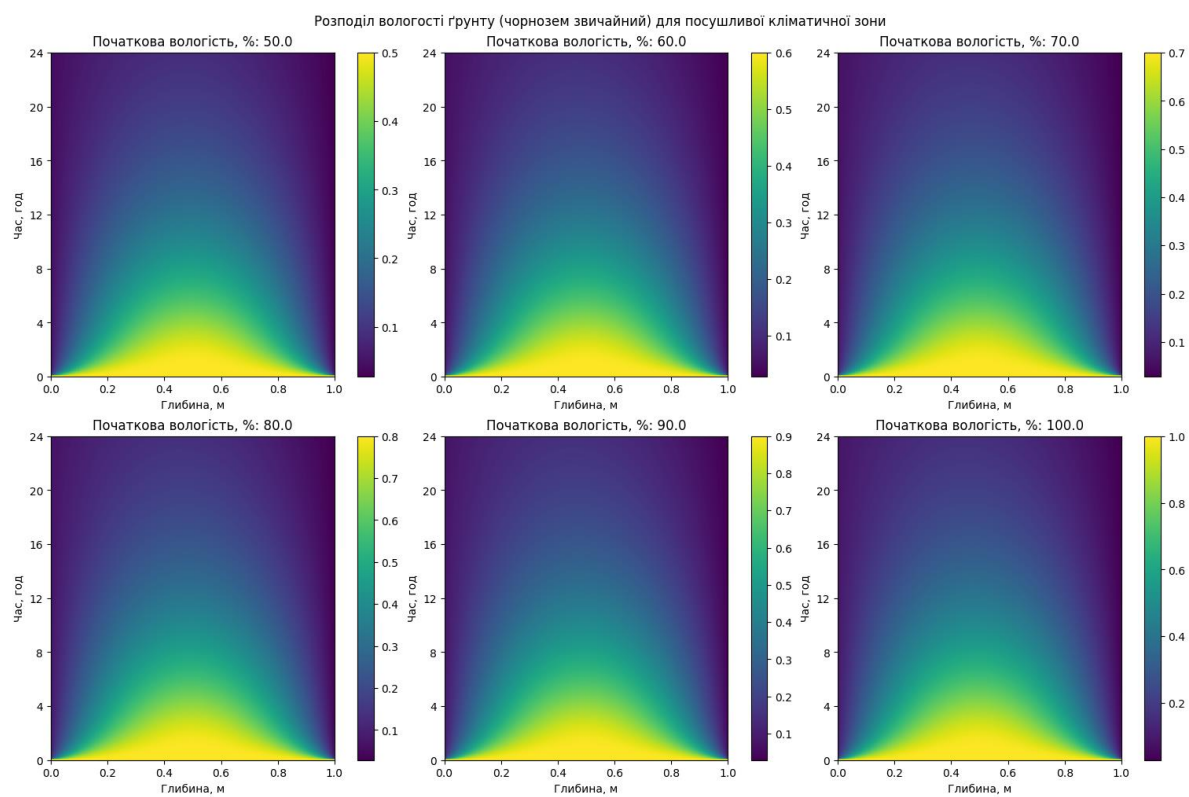


в) чорнозем південний

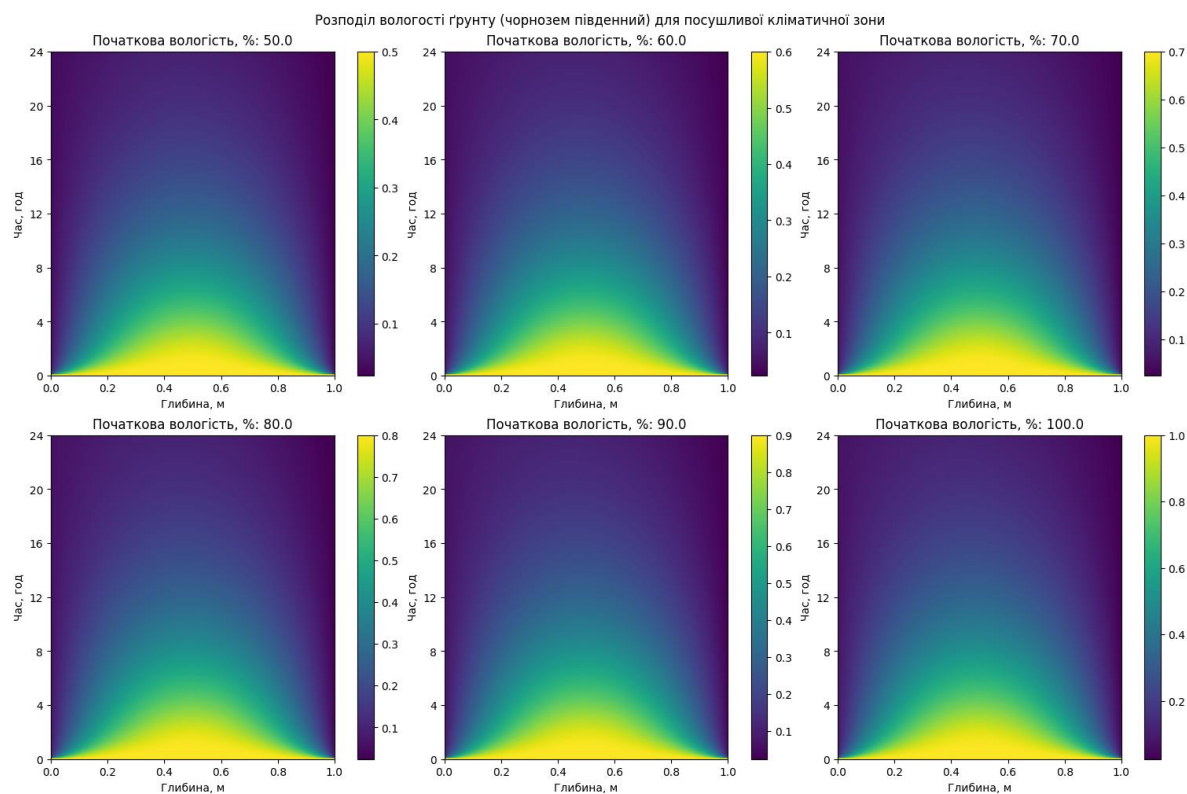
Рисунок 2.11 – Графічна інтерпретація добової динаміки ґрунтової вологи для умов напівпосушливої кліматичної зони



а) чорнозем потужний



б) чорнозем звичайний



в) чорнозем південний

Рисунок 2.12 – Графічна інтерпретація добової динаміки ґрунтової вологи для умов посушливої кліматичної зони

Отримані результати моделювання добової динаміки ґрунтової вологи (див. рис. 2.10–2.12) дозволяють стверджувати про вплив факторів типу ґрунту та кліматичної зони на вологісний режим вирощування зернових культур, адже:

– максимальне значення вологості для чорнозему потужного в залежності від початкової вологості поверхневого шару ґрунту (від 50 % до 100 %) спостерігається на середній глибині детектованого діапазону – 0,5 м через 3,5–4 год після початку аналізу для умов вологої кліматичної зони та через 2,5–3 год для умов напівпосушливої та посушливої кліматичних зон;

– максимальне значення вологості для чорнозему звичайного в залежності від початкової вологості поверхневого шару ґрунту (від 50 % до 100 %) спостерігається на середній глибині детектованого діапазону – 0,5 м через 2–2,5 год після початку аналізу для умов вологої, напівпосушливої та посушливої кліматичних зон;

– максимальне значення вологості для чорнозему південного в залежності від початкової вологості поверхневого шару ґрунту (від 50 % до 100 %) спостерігається на середній глибині детектованого діапазону – 0,5 м через 2 год після початку аналізу для умов вологої та через 1,5–2 год для умов напівпосушливої та посушливої кліматичних зон.

Таким чином, кількісні та якісні характеристики, одержані в результаті моделювання процесу комп'ютерного контролю динаміки ґрунтової вологи у різних форматах періоду, що становить одну годину (див. рис. 2.7–2.9) та одну добу (див. рис. 2.10–2.12), можуть бути використані в якості інформаційної основи під час подальших досліджень із розробки програмно-апаратного забезпечення комп'ютерної технології предикативного контролю режимів зволоження зернових культур із урахуванням факторів типу ґрунту та агрокліматичних умов вирощування.

2.5 Висновки за другим розділом

У результаті досліджень цього розділу вирішено основні задачі дисертаційної роботи, які полягали в розробці структурно-компонентного й алгоритмічної забезпечення та інформаційної й математичної моделей досліджуваної комп'ютерної технології прогнозного контролю режимів зволоження зернових культур, що дозволило обґрунтувати техніко-функціональні вимоги до її апаратно-програмної будови. Основні кількісні та якісні результати цього розділу полягають у наступному:

1. Розроблено структурне та компонентне забезпечення досліджуваної комп'ютерної технології, яке реалізує комплексний зональний збір вимірювальних даних щодо агрокліматичних умов вирощування зернових культур на основі технології бездротових мереж польових сенсорів із подальшим їх агрегуванням і обробкою на локальному мікрокомп'ютерному пристрої та наступною ретрансляцією на IoT-сервер. Запропонована структурна організація та компонента ієрархічна будова враховують актуальні світові тенденції розвитку

комп'ютерних і інформаційних технологій аграрного призначення та вимоги до розроблюваної комп'ютерної технології, що свідчить про можливість їх використання під час подальших досліджень зі створення та тестування комп'ютерної технології предикативного контролю режимів зволоження зернових культур у польових умовах.

2. Синтезовано алгоритмічне забезпечення досліджуваної комп'ютерної технології з урахуванням вимоги комплексності етапів збору, мережевого обміну та інтелектуальної обробки (розподіленої – периферійної та централізованої – серверної) просторово-часових вимірювальних даних. Доведено, що запропоноване алгоритмічне забезпечення може бути використане як базове під час розробки і тестування програмно-апаратних компонент комп'ютерної технології предикативного контролю режимів зволоження зернових культур.

3. Розроблено інформаційну модель досліджуваної комп'ютерної технології, яка реалізує ланцюг поетапних функціональних перетворень розподілених у просторі й часі даних і дестабілізуючих факторів, що обумовлюють режими зволоження зернових культур, а саме: багатозональний (за глибиною та локаціями поля) збір вимірювальних даних щодо параметрів ґрунту, збір вимірювальних даних щодо параметрів клімату, збір вимірювальних даних щодо техніко-функціональних характеристик поливної системи, бездротова передача даних від мережі польових мікропроцесорних пристроїв моніторингу агрокліматичних параметрів та мікропроцесорного пристрою моніторингу техніко-функціональних параметрів поливної системи до локального мікрокомп'ютерного пристрою інтелектуальної обробки даних, локальний інтелектуальний програмний аналіз отриманих даних, предикативна обробка вимірювальної інформації та генерування сигналів керування виконавчими механізмами систем зрошення агроугідь, агрегування, абстракція, локальне і віддалене збереження вимірювальної інформації та глибинний інтелектуальний аналіз і графічна інтерпретація результатів комп'ютерного контролю.

4. Розроблено та досліджено математичну модель процесу комп'ютерного контролю динаміки ґрунтової вологи на основі формалізованого опису процесу

гідрологічного балансу з урахуванням специфічних агрокліматичних умов планованого використання розроблюваної комп'ютерної технології. Проведені дослідження дозволили оцінити динамічні властивості розподілу вологи в залежності від глибини на короткотривалому (одна година) проміжку часу: для чорнозему потужного початкове значення вологості поверхневого шару через годину спостерігається на глибині від 0,17 м до 0,83 м для всіх аналізованих кліматичних зон; для чорнозему звичайного – на глибині від 0,22 м до 0,78 м для всіх аналізованих кліматичних зон; для чорнозему південного – на глибині від 0,26 м до 0,74 м для всіх аналізованих кліматичних зон.

5. Отримані результати моделювання добової динаміки ґрунтової вологи дозволили встановити необхідність врахування факторів типу ґрунту та кліматичної зони вирощування зернових культур під час розробки комп'ютерної технології предикативного контролю режимів зволоження зернових культур, адже: максимальне значення вологості для чорнозему потужного в залежності від початкової вологості поверхневого шару ґрунту (від 50 % до 100 %) спостерігається на середній глибині 0,5 м через 3,5–4 год після початку аналізу для умов вологої кліматичної зони та через 2,5–3 год для умов напівпосушливої та посушливої кліматичних зон; максимальне значення вологості для чорнозему звичайного – на середній глибині 0,5 м через 2–2,5 год після початку аналізу для умов вологої, напівпосушливої та посушливої кліматичних зон; максимальне значення вологості для чорнозему південного – на середній глибині 0,5 м через 2 год після початку аналізу для умов вологої та через 1,5–2 год для умов напівпосушливої та посушливої кліматичних зон.

6. Доведено, що одержані результати щодо формалізованого опису комп'ютерної технології предикативного контролю режимів зволоження зернових культур можуть слугувати структурно-функціональною та інформаційно-аналітичною основою під час подальших досліджень із розробки та валідації програмно-апаратного забезпечення досліджуваної комп'ютерної технології агротехнічного призначення.

РОЗДІЛ 3

КОМП'ЮТЕРНО-ОРІЄНТОВАНИЙ МЕТОД ПРЕДИКАТИВНОГО КОНТРОЛЮ РЕЖИМІВ ЗВОЛОЖЕННЯ ЗЕРНОВИХ КУЛЬТУР

3.1 Підходи до розробки досліджуваного комп'ютерно-орієнтованого методу

У загальному формулюванні досліджуваний метод комп'ютерного предикативного контролю режимів зволоження зернових культур розглядається як оптимізаційна задача для ефективного використання водних ресурсів та раціонального вологозабезпечення рослин. Задача полягає у визначенні оптимальної стратегії подачі води (інтенсивність поливу $S(t)$, л/год на 1 м^2), щоб підтримувати вологість ґрунту на заданому рівні на певній глибині (аналізований шар ґрунту, на якому знаходиться коренева система рослин у залежності від періоду вегетації), забезпечуючи ефективне використання поливної води. В такому випадку індекс ефективності (цільовий функціонал) виражає відхилення вологості ґрунту від бажаного рівня [111]:

$$J = \int_{t_0}^{t_f} \left(W_{\text{soil}}(t) - W_{\text{soil,ref}}(t) \right)^2 dt, \quad (3.1)$$

де $W_{\text{soil}}(t)$ – рівень вологості шару ґрунту на заданій глибині в момент часу t ;
 $W_{\text{soil,ref}}(t)$ – бажаний рівень вологості шару ґрунту на заданій глибині в момент часу t ; t_0 – початковий момент часового інтервалу, що розглядається; t_f – кінцевий момент часового інтервалу, що розглядається.

Оптимізація здійснюється з урахуванням динаміки поширення вологи, що описується чисельним розв'язком диференційного рівняння Річардса (2.12), яке є нелінійним диференційним рівнянням в частинних похідних. Крім того, враховується допустимий стан зволоженості ґрунту та граничні значення

інтенсивності поливу з використанням системи обмежень (2.3).

Через нелінійний характер цільового функціоналу (3.1), рівняння динаміки (2.12), що описує стан аналізованої фізико-біологічної системи, а також обмежень (2.3), розв'язання оптимізаційної задачі виконується на основі методу послідовного програмування [112] для знаходження мінімуму обмеженої нелінійної багатовимірної функції. Загальне формулювання такої оптимізаційної задачі наведено нижче [113]:

$$\arg \min_x f(x) \left\{ \begin{array}{l} c(x) \leq 0 \\ c_{eq} = 0 \\ A \times x \leq b \\ A_{eq} \times x = b_{eq} \\ l_b \leq x \leq u_b \end{array} \right. , \quad (3.2)$$

де $f(x)$ – цільовий функціонал, що повертає скаляр та потребує мінімізації;
 $c(x)$ – масив змінних стану та контролю; $c_{eq}(x)$ – початкова точка, задана як вектор дійсних чисел або масив дійсних чисел; A – лінійні нерівності, задані у вигляді матриці дійсних чисел, A – матриця розміром m на n , де m – кількість нерівностей, а n – кількість змінних (кількість елементів у c_{eq}); A_{eq} – лінійні обмеження, задані у вигляді матриці дійсних чисел, A_{eq} – матриця m_e на n , де m_e – кількість рівностей, а n – кількість змінних (кількість елементів у c_{eq}); l_b – нижня межа, задана як вектор або масив дійсних чисел; u_b – верхня межа, задана як вектор або масив дійсних чисел; b – лінійні нерівності, задані у вигляді вектора дійсних чисел, $b \in m$ -елементним вектором, що пов'язаний з матрицею A ; та b_{eq} – лінійні нерівності, задані у вигляді вектора дійсних чисел, $b_{eq} \in m_e$ -елементним вектором, що пов'язаний з матрицею A_{eq} .

Реалізація динамічної оптимізації траєкторії інтенсивності поливу вимагає врахування динаміки стану системи у вигляді обмежень разом із граничними

умовами. Під час реалізації задачі використовується оптимізаційний підхід на основі функції мінімізації з обмеженнями `fmincon` із MATLAB Optimization Toolbox [113] (під час досліджень використано студентську навчальну версію програмного забезпечення Matlab & Simulink).

Для розв'язання задачі в неперервному часі, задане рівняння динаміки (2.12), дискретизується за часом T_s і $t = kT_s$. Після дискретизації відповідного функціоналу (3.1) отримано наступне рівняння:

$$J_d = \sum_{k=1}^N \left(W_{soil}(k) - W_{soil,ref}(k) \right)^2. \quad (3.3)$$

Вбудований розв'язувач функції `fmincon` побудовано таким чином, що він намагається знайти таку матрицю станів S , за якої значення цільового функціоналу J_d мінімізується при заданих обмеженнях і початковому припущенні s_0 . Отже, виклик цієї функції має наступний вигляд [113]:

$$S = \text{fmincon}(J_d, s_0, A, b, A_{eq}, b_{eq}, l_b, u_b, c_{eq}, options). \quad (3.4)$$

де *options* – параметри оптимізації, що задаються у формі

```
>> options = optimoptions('fmincon', 'Display', 'Iter', 'Algorithm', 'sqp', 'OptimalityTol', 1e-4, 'TolFun', 1e-6, 'MaxFunEvals', Inf, 'PlotFcns', {@optimplotx, @optimplotfval, @optimplotfirstorderopt}, 'MaxIter', 700, 'StepTol', 1e-4);
```

'Display','Iter' – відображення вихідних даних на кожній ітерації та повідомлення про завершення роботи за замовчуванням; 'Algorithm','sqp' – вибір послідовного квадратичного програмування як алгоритму оптимізації; 'OptimalityTol',1e-4 – встановлення допуску на закінчення для оптимальності першого порядку на рівні 10^{-4} ; 'TolFun', 1e-6 – встановлення допуску на закінчення для оптимальності першого порядку для набору параметрів `optimset` на рівні 10^{-6} ; 'MaxFunEvals', Inf – встановлення максимальної кількості дозволених обчислень функції, допуск на закінчення для

оптимальності першого порядку на рівні нескінченості; 'PlotFcn',{@optimplotx,@optimplotfval,@optimplotfirstorderopt} – функціонал відображення поточних точок $s(x)$, значення розв'язання функції та міри оптимальності першого порядку; 'MaxIter',700 – встановлення максимальної кількості дозволених ітерацій на рівні 700; 'StepTol', 1e-4 – встановлення точності пошукового алгоритму на рівні 10^{-4} . Розроблений скрипт розв'язання оптимізаційної задачі в середовищі Matlab & Simulink наведено в додатку В, В.3.

Таким чином, на підставі запропонованого вище математичного опису, основні етапи методу предикативного комп'ютерного контролю можна графічно інтерпретувати як показано на рисунку 3.1.

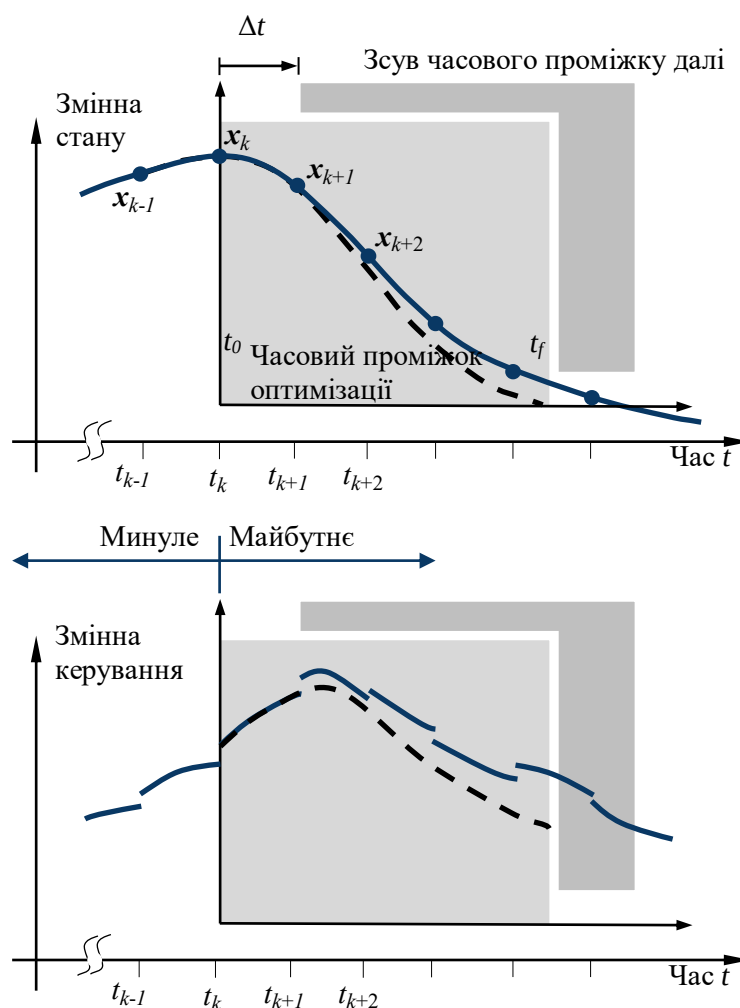


Рисунок 3.1 – Графічна інтерпретація методу предикативного контролю режимів зволоження зернових культур із рухомим часовим проміжком оптимізації

Виходячи з аналізу графічної інтерпретації досліджуваного методу предикативного контролю, яку наведено на рисунку 3.1, до його основних етапів відносяться:

1. Ініціалізація: визначення початкових умов вологості $W_{soil}(z,0)$.
2. Розв'язання рівняння вологості методом чисельної апроксимації.
3. Оптимізація подачі поливної води за допомогою функції `fmincon` на заданому часовому проміжку. Під час цього етапу здійснюється уточнення траєкторій вектору керуючих змінних – інтенсивність поливу $S(t)$ на часовому інтервалі від t_k до $t_k+(t_f-t_0)$. Обмеження на змінні керування та стану також враховуються на цьому кроці.
4. Після досягнення встановленої точності або ліміту ітерацій, перше значення вектору отриманої траєкторії S^* використовується в якості керуючого сигналу. Алгоритм повторюється на наступному кроці t_{k+1} , забезпечуючи послідовну оптимізацію.

Отже, запропонований підхід до розробки комп'ютерно-орієнтованого методу предикативного контролю режимів зволоження зернових культур дозволяє реалізувати та протестувати відповідну імітаційну модель із оптимізації поливу засобами комп'ютерного експерименту в середовищі Matlab & Simulink.

3.2 Алгоритмічне та програмне забезпечення досліджуваного комп'ютерно-орієнтованого методу

У цьому підрозділі дисертації основну увагу приділено створенню інтуїтивно зрозумілої комп'ютерної моделі, що реалізує етапи введення, розрахунку та візуалізації даних під час розробки та валідації методу предикативного контролю режимів зволоження зернових культур. У такому випадку до основних функціональних вимог зазначеної комп'ютерної моделі, що реалізує досліджуваний метод, відносяться:

1. Користувач повинен мати можливість вводити дані: фізико-хімічні параметри ґрунту, агробіологічні процеси динаміки вологи (випаровування,

споживання), обмеження та початкові умови процесу.

2. Користувач повинен мати можливість графічно відображати результати розрахунків щодо оптимізації режиму поливу.

3. Користувач повинен мати можливість зберігати результати обчислень.

Отже, на першому етапі з обліком обґрунтованих вище вимог, запропоновано Use-case діаграму [114, 115] для користувача, як показано на рисунку 3.2.

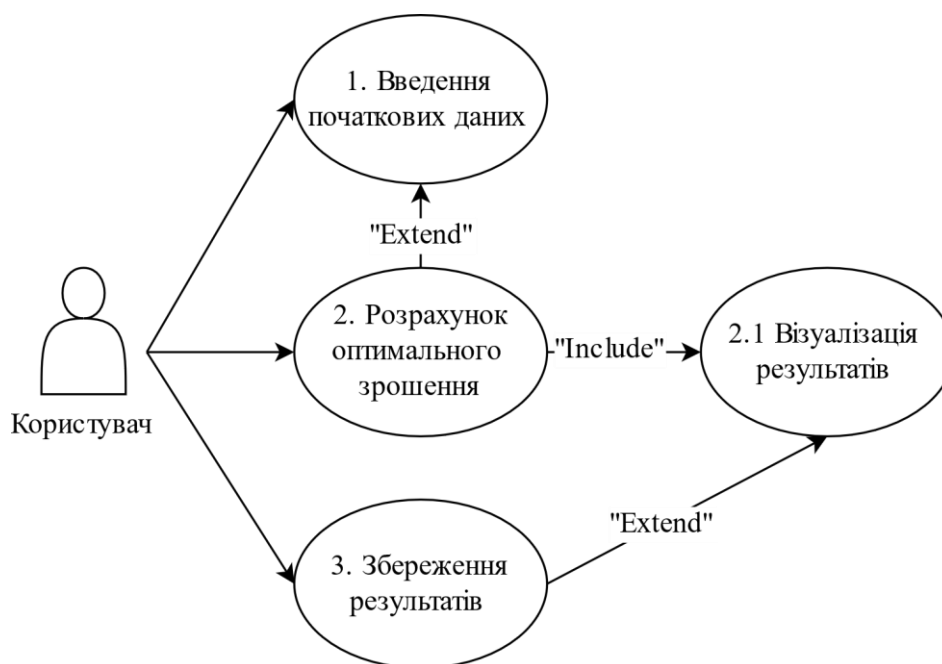


Рисунок 3.2 – Use-case діаграма для користувача комп’ютерної моделі, що програмно реалізує метод предикативного контролю режимів зволоження

На цій діаграмі (див. рис. 3.2) позначено:

1. Use case «1. Введення початкових даних»: актори: користувач; передумови: користувач відкрив програмний застосунок; основний сценарій: користувач вводить числові дані у відповідні поля; пост-умови: кнопка «Розрахувати» стає активною, якщо до всіх полів занесено числові значення; альтернативні потоки: некоректний формат даних або не введено дані до полів – користувач має перевірити введену інформацію.

2. Use case «2. Розрахунок оптимального зрошення»: актори: користувач;

передумови: користувач ввів числові дані у відповідні поля; основний сценарій: користувач натискає кнопку «Розрахувати», програмний застосунок зчитує відповідні поля та викликає функцію розрахунку оптимального режиму зрошення для підтримання вологості ґрунту на заданому рівні, процес пошуку рішення відображається у режимі реального часу з візуалізацією та числовими показниками; пост-умови: будуються два 2D-графіки (рівень вологості ґрунту та оптимальна стратегія поливу); альтернативні потоки: рішення не знайдено – користувач має перевірити введену інформацію та запустити процедуру розрахунку ще раз.

3. Use case «3. Збереження результатів»: актори: користувач; передумови: рішення оптимальної задачі знайдено, графіки побудовано; основний сценарій: користувач натискає кнопку «Зберегти як» / «Копіювати як картинку» / «Копіювати як векторну графіку».

З урахуванням розробленої use-case діаграми (див. рис. 3.2), сукупності обґрунтованих функціональних вимог, а також підходів до реалізації досліджуваного методу предикативного контролю (див. п. 3.1), розроблено комп'ютерну модель у програмному середовищі Matlab & Simulink, яка реалізує графічний інтерфейс для розрахунку оптимального режиму зволоження зернових культур [115, 116]. Основним призначенням цієї комп'ютерної моделі є підтримання відносної вологості на заданій глибині в межах цільового значення. Ця комп'ютерна модель із графічним інтерфейсом (див. рис. 3.3) складається з наступних програмних модулів:

- модуль введення даних: дозволяє користувачу вручну вводити дані до відповідних полів;

- модуль розрахунків: дозволяє на основі введених даних знайти рішення задачі оптимального режиму зрошення, як у вигляді прикладу візуалізації процесу пошуку оптимального рішення наведено на рисунку 3.4;

- модуль побудови графіків: відображає результати пошуку оптимального рішення у вигляді 2D-графіків та дозволяє зберегти результати.

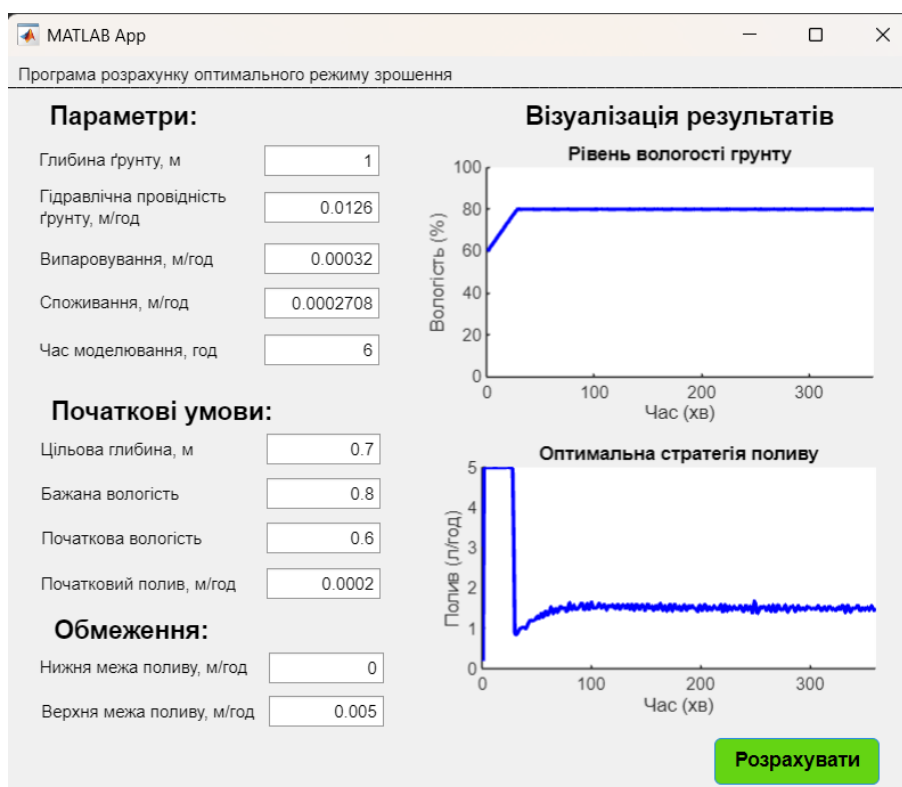


Рисунок 3.3 – Графічний інтерфейс комп'ютерної моделі предикативного контролю режимів зволоження зернових культур

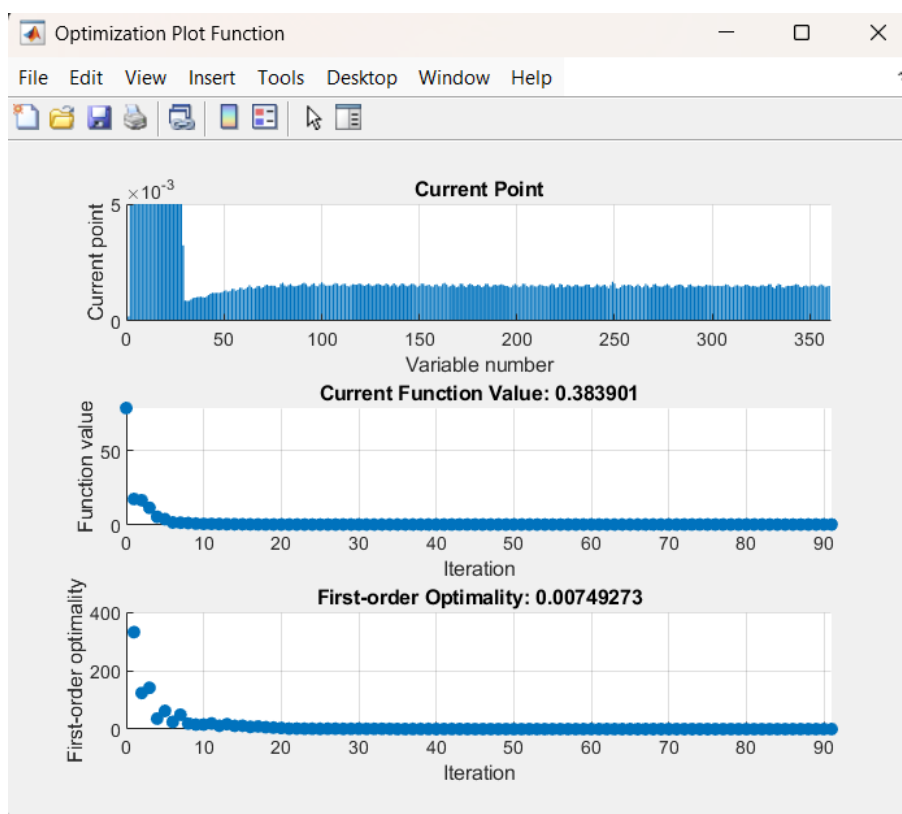


Рисунок 3.4 – Візуалізація процесу пошуку оптимального рішення

Під час синтезу алгоритмічного та програмного забезпечення досліджуваного комп'ютерно-орієнтованого методу також реалізовано відповідну UML-діаграму класів [117], що дозволяє відобразити та проаналізувати структуру розробленої комп'ютерної моделі (див. рис. 3.5) [116]. Ця UML-діаграма включає:

- клас `app1` із успадкуванням від `matlab.apps.AppBase`;
- приватні властивості UI-компонентів (`EditField`, `Label`, `UIAxes`);
- властивості для зберігання параметрів користувача;
- властивості для зберігання результатів;
- приватні та публічні методи.

Варто зазначити, що реалізована комп'ютерна модель (див. рис. 3.3) містить два набори властивостей: параметри користувача та результати розрахунку, як детально описано в таблиці 3.1.

Таблиця 3.1 – Властивості для зберігання параметрів користувача та результатів пошуку рішення задачі оптимізації режимів зрошення

Властивість	Пояснення
<i>Параметри користувача</i>	
<code>user_s_depth</code>	глибина ґрунту, м
<code>user_s_alpha</code>	гідравлічна провідність ґрунту, м/год
<code>user_s_E</code>	показник інтенсивності випаровування, м/год
<code>user_s_SS</code>	показник споживання вологи, м/год
<code>user_t_model</code>	час моделювання, год
<code>user_t_depth</code>	глибина цільового рівня вологості, м
<code>user_s_theta_des</code>	бажана вологість, %
<code>user_init_theta</code>	початковий рівень вологості, %
<code>user_s_sinit</code>	початкове значення подачі води, м/год
<code>user_ss_min</code>	мінімальна подача води, м/год
<code>user_ss_max</code>	максимальна подача води, м/год
<i>Результати розрахунків</i>	
<code>t_idx</code>	часові значення, хв
<code>s_idx</code>	оптимальна стратегія подачі води, л/год
<code>thet_idx</code>	рівень вологості, %

Основні методи користувацького інтерфейсу комп'ютерної моделі включають наступне: `createComponents()` – створення UI-компонентів; приватний

метод `ButtonPushed()` – обробник натискання кнопки «Розрахувати»; приватний метод `optimal_irrigation()` – основний метод, реалізує оптимізацію поливу, використовуючи `fmincon` для мінімізації відхилення вологості від бажаного рівня; приватний метод `solve_richards()` – розв’язання рівняння Річардса; `delete()` – деструктор застосунку. Вихідний код розробленого та протестованого Matlab-застосунку, що реалізує описану вище логіку предикативного контролю режимів зрошення зернових культур, наведено у додатку В, В.4.

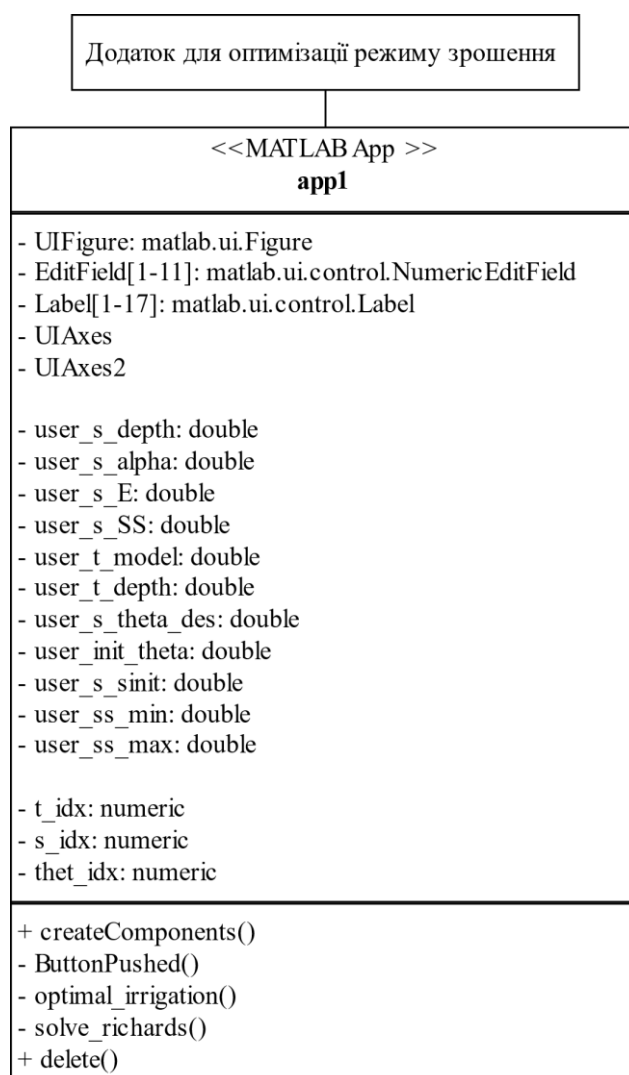


Рисунок 3.5 – UML-діаграма класів розробленого Matlab-застосунку

Отже, розроблена комп’ютерна модель у вигляді Matlab-застосунку, що реалізує метод предикативного контролю режимів зволоження зернових культур, дозволяє оцінювати та аналізувати показники ефективності поливу залежно від

параметрів ґрунту та потреб зернових культури з урахуванням їх типів і стадій розвитку, забезпечуючи програмний інструмент для цифровізованого керування агротехнічними процедурами зрошення.

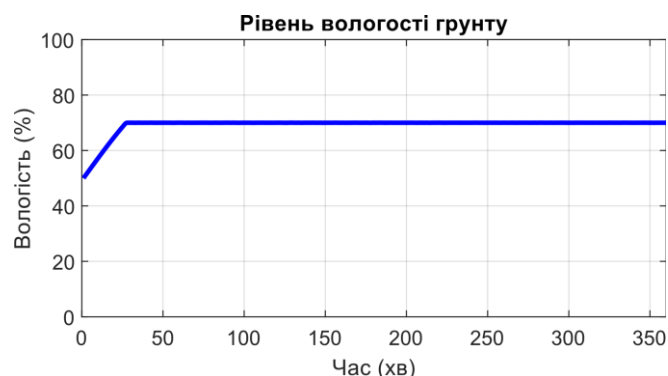
3.3 Результати тестування та валідації досліджуваного комп'ютерно-орієнтованого методу

В процесі комп'ютерного експерименту із тестування та валідації придатності до застосування запропонованого комп'ютерно-орієнтованого методу предикативного контролю режимів зволоження зернових культур враховано наступні умови, параметри і обмеження, як показано в таблиці 3.2 [115].

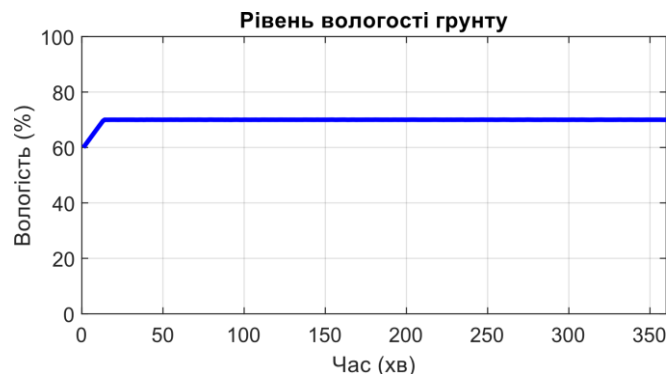
Таблиця 3.2 – Параметри, враховані в процесі предикативного контролю режимів зволоження зернових культур

Враховані процеси, умови та обмеження	Прийняті значення
Джерела втрат вологи	Випаровування в умовах вологої, напівпосушливої та посушливої агрокліматичних зон, відповідно: 0,08 мм/год; 0,16 мм/год; 0,32 мм/год [108].
Гідравлічна провідність ґрунту	Обчислюється за формулою (2.13) з урахуванням $K_f=8,1$ мм/год. (чорнозем потужний), $K_f=10,8$ мм/год. (чорнозем звичайний), $K_f=12,6$ мм/год. (чорнозем південний) [109].
Граничні умови	на верхній межі (поверхня ґрунту $z=0$ м): дискретний набір даних від 50 % до 100 %; на нижній межі ($z=1$ м): в початковий момент часу вологість дорівнює 0 %.
Зернові культури	ячмінь і пшениця
Добове споживання вологи зерновими культурами	див. рис. 1.4 [8, 10].
Аналізований діапазон глибин ґрунту	0,2 м, 0,6 м.
Фази росту культур	перехід до зернового розвитку, колосіння і цвітіння.
Інтенсивність поливу	5 л/год на 1 м ² . Початкова умова: 0,2 л/год.
Час моделювання	6 год.
Бажаний рівень вологи	70 %, 75 %.

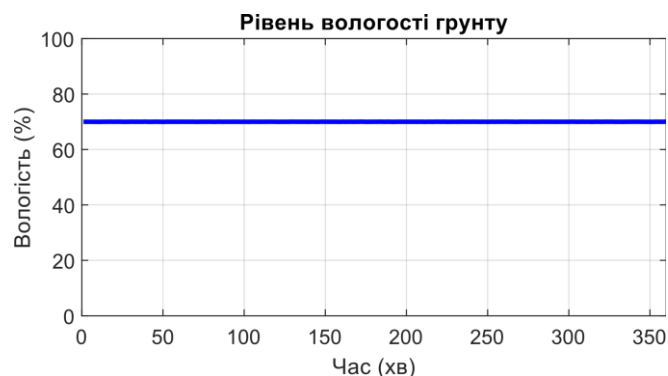
Із використанням розробленої комп'ютерної моделі (див. п. 3.2) та прийнятих умов і обмежень (див. табл. 3.2) виконано декілька серій комп'ютерного експерименту з пошуку оптимального рішення рівняння (3.2), яке описує динаміку ґрунтової вологи для різних агрокліматичних умов. Графічну інтерпретацію результатів зазначеного комп'ютерного експерименту за різних умов наведено на рисунках 3.6–3.11.



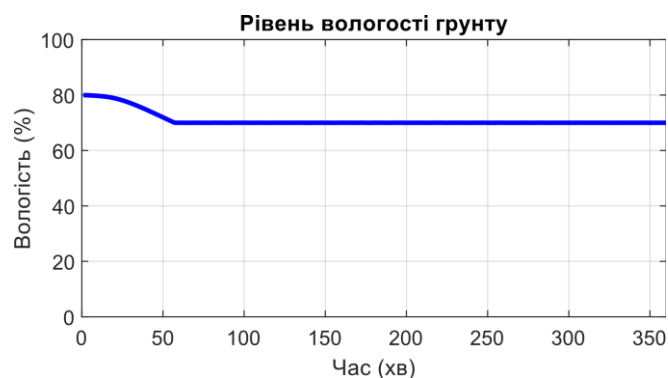
а) початкова вологість ґрунту – 50 %



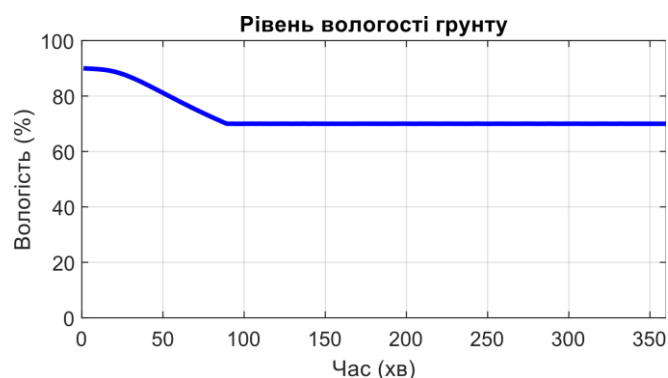
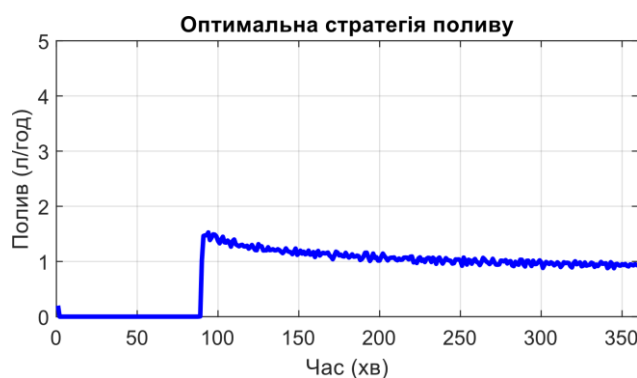
б) початкова вологість ґрунту – 60 %



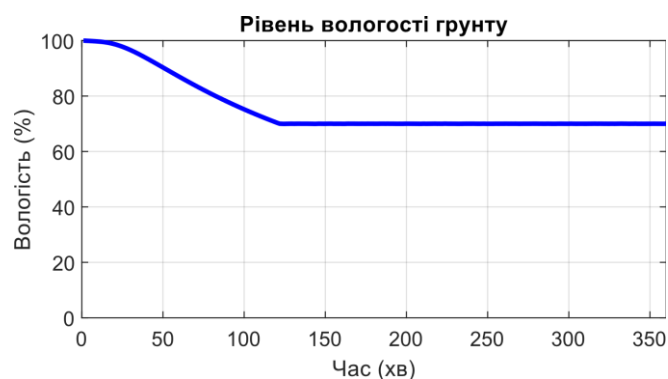
в) початкова вологість ґрунту – 70 %



г) початкова вологість ґрунту – 80 %

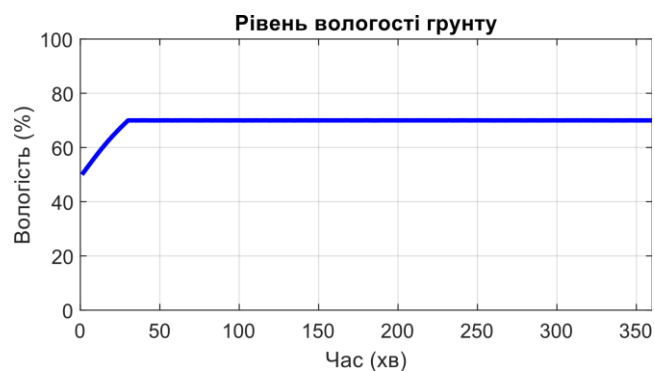
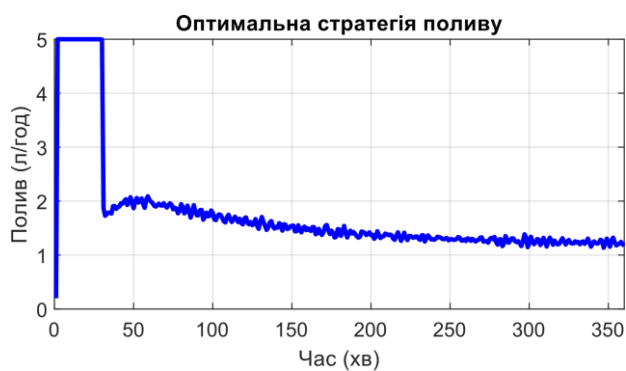


г) початкова вологість ґрунту – 90 %

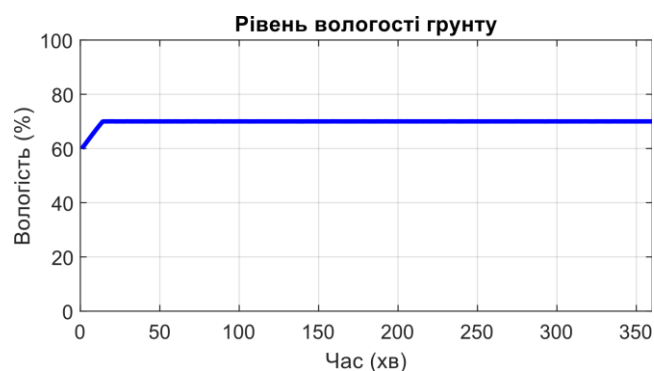
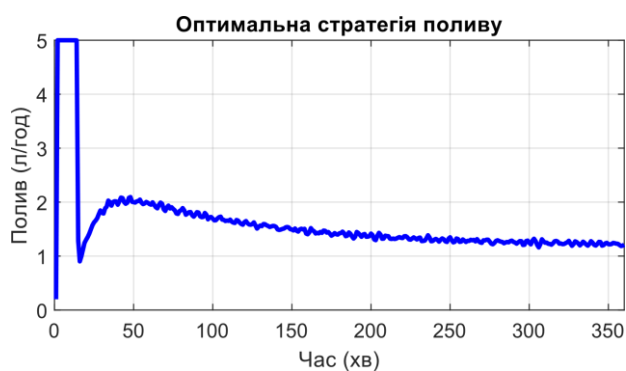


д) початкова вологість ґрунту – 100 %

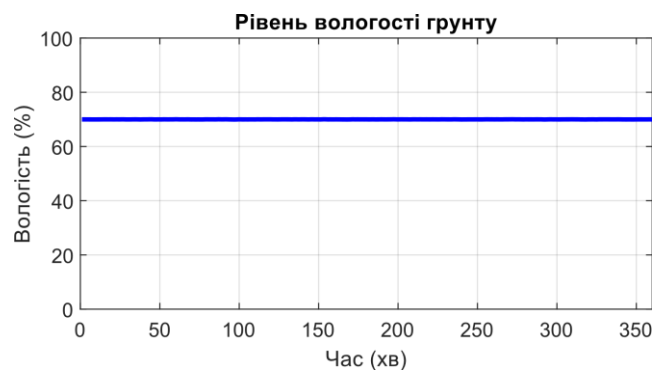
Рисунок 3.6 – Графічна інтерпретація комп'ютерного експерименту щодо аналізу динаміки відносної вологості ґрунту та показника інтенсивності поливу за умови оптимізації режимів зрошення (прийняті умови: волога кліматична зона, чорнозем потужний, перехід до зернового розвитку, аналізована глибина 0,2 м, бажана вологість 70 %)



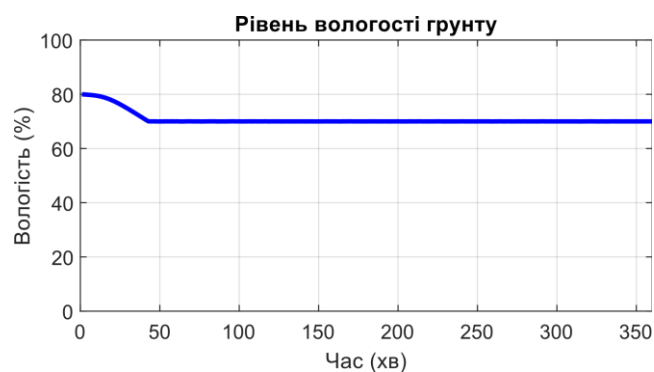
а) початкова вологість ґрунту – 50 %



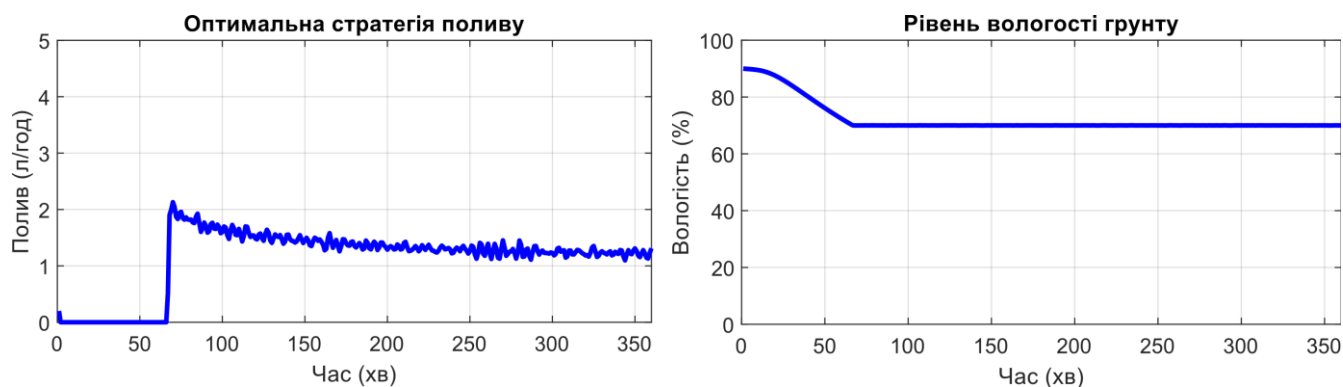
б) початкова вологість ґрунту – 60 %



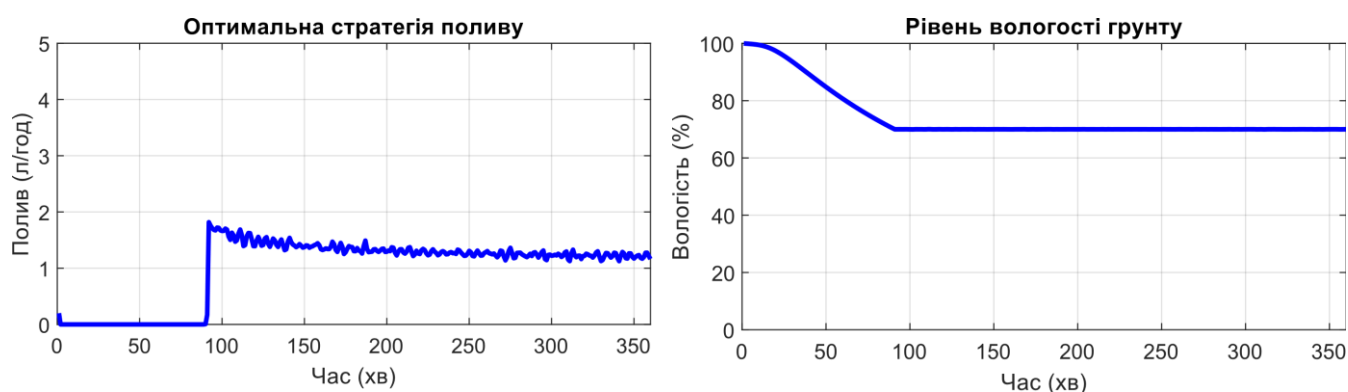
в) початкова вологість ґрунту – 70 %



г) початкова вологість ґрунту – 80 %

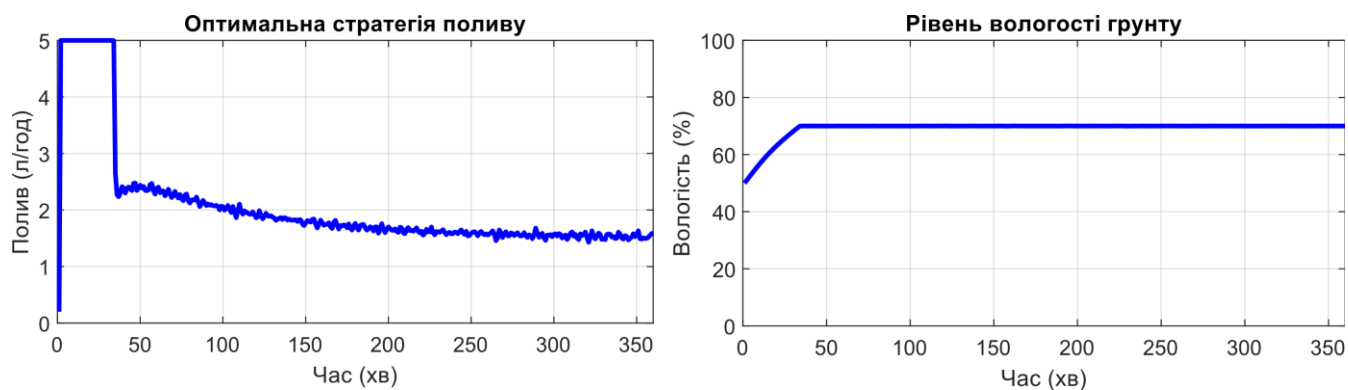


г) початкова вологість ґрунту – 90 %

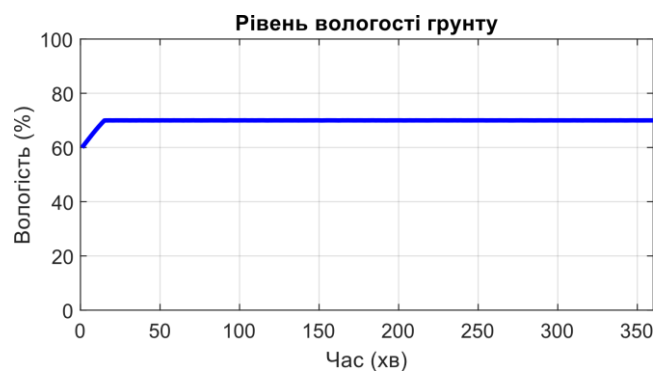
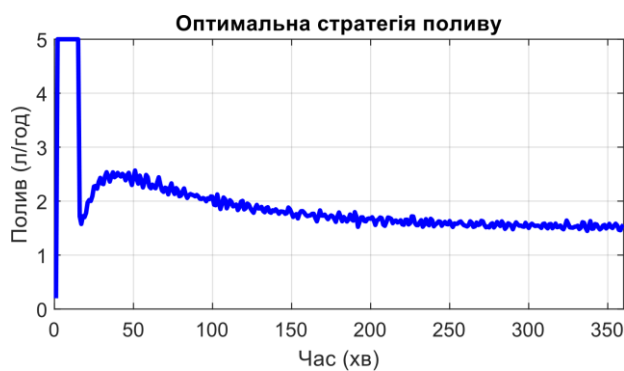


д) початкова вологість ґрунту – 100 %

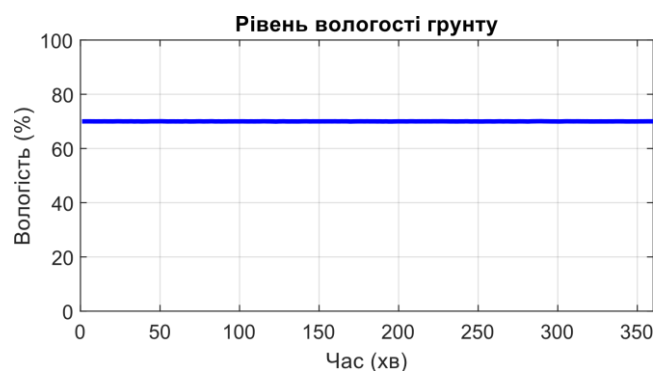
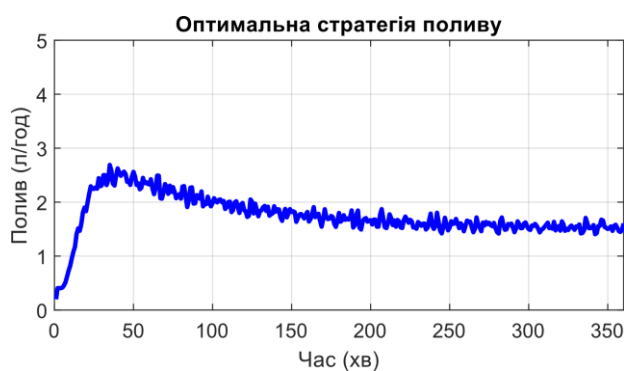
Рисунок 3.7 – Графічна інтерпретація комп'ютерного експерименту щодо аналізу динаміки відносної вологості ґрунту та показника інтенсивності поливу за умови оптимізації режимів зрошення (прийняті умови: напівпосушлива кліматична зона, чорнозем звичайний, перехід до зернового розвитку, аналізована глибина 0,2 м, бажана вологість 70 %)



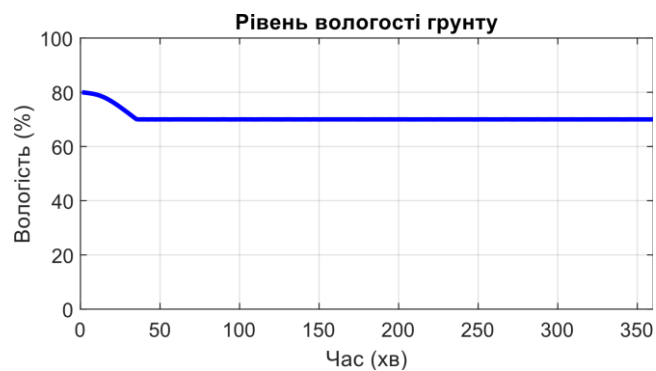
а) початкова вологість ґрунту – 50 %



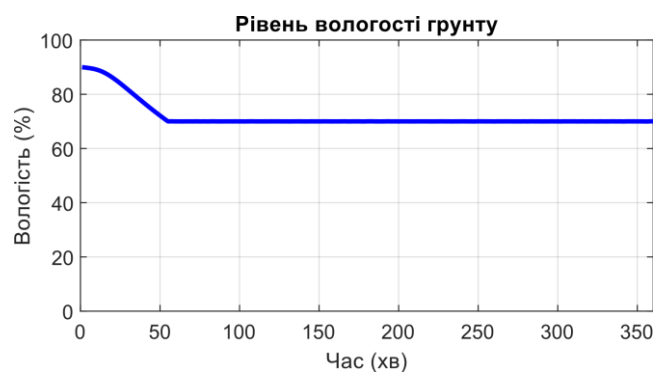
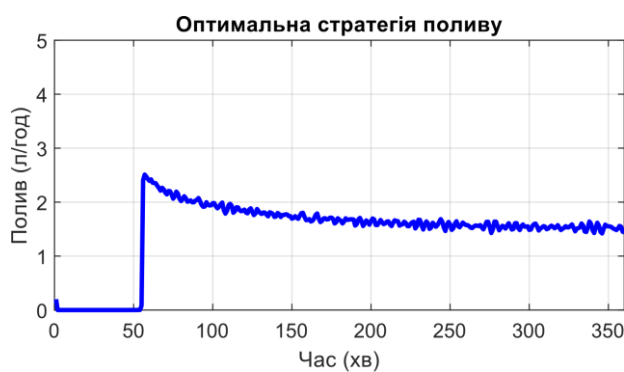
б) початкова вологість ґрунту – 60 %



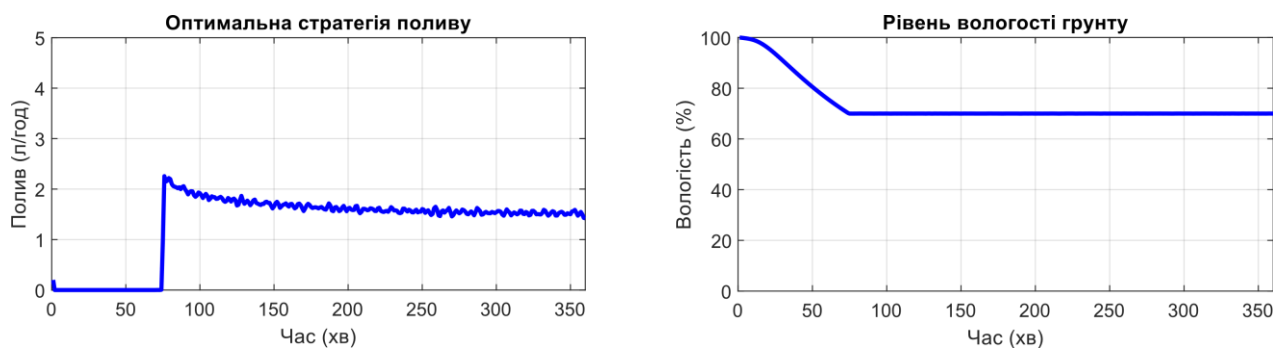
в) початкова вологість ґрунту – 70 %



г) початкова вологість ґрунту – 80 %

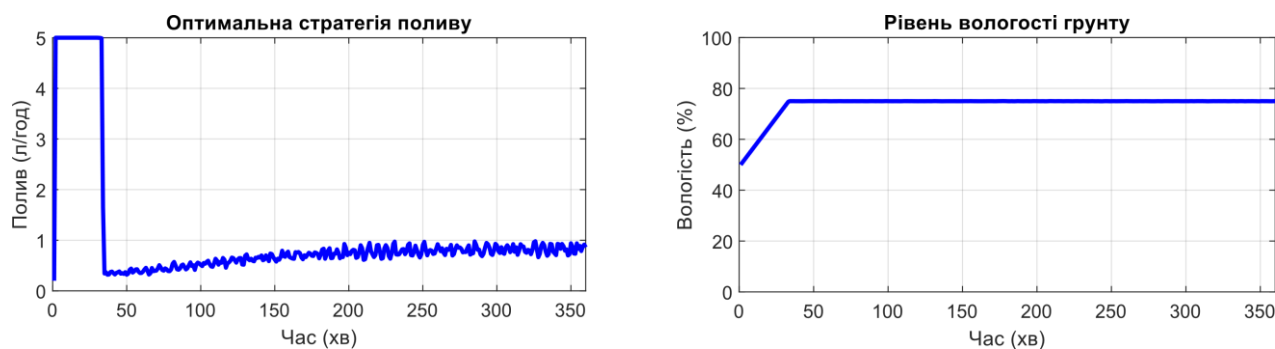


г) початкова вологість ґрунту – 90 %

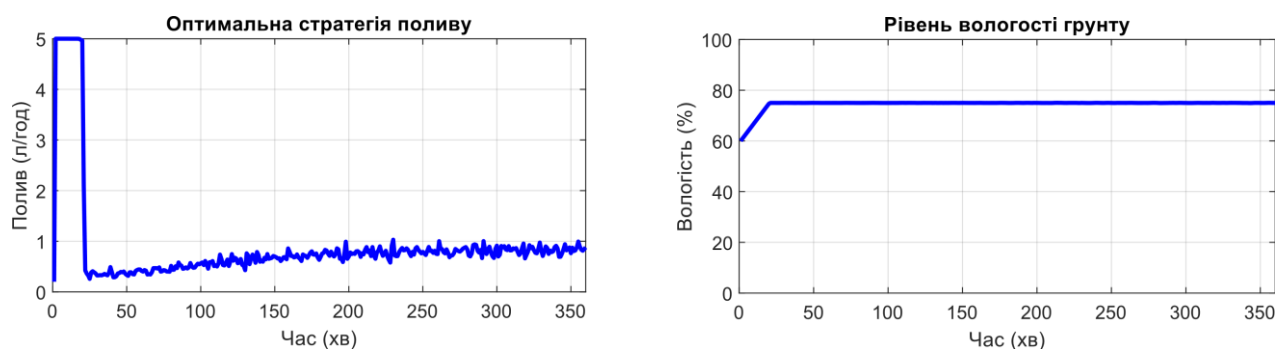


д) початкова вологість ґрунту – 100 %

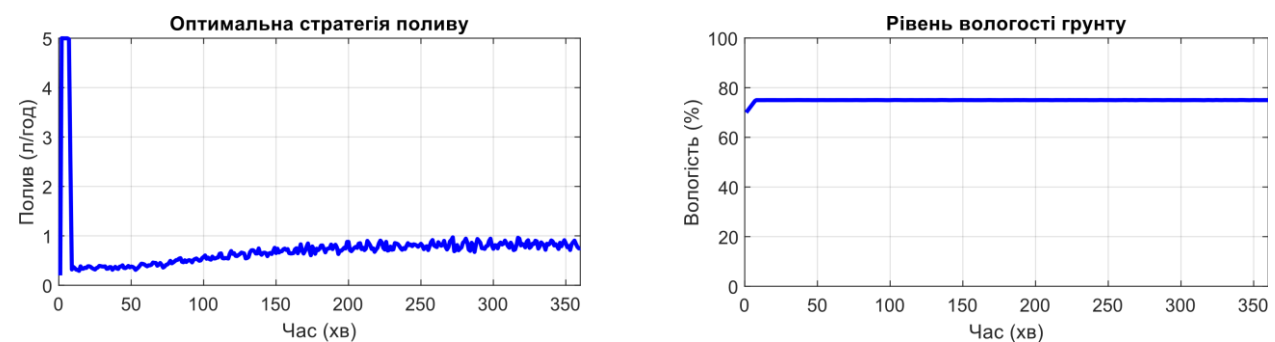
Рисунок 3.8 – Графічна інтерпретація комп'ютерного експерименту щодо аналізу динаміки відносної вологості ґрунту та показника інтенсивності поливу за умови оптимізації режимів зрошення (прийняті умови: посушлива зона, чорнозем південний, перехід до зернового розвитку, глибина 0,2 м, бажана вологість 70 %)



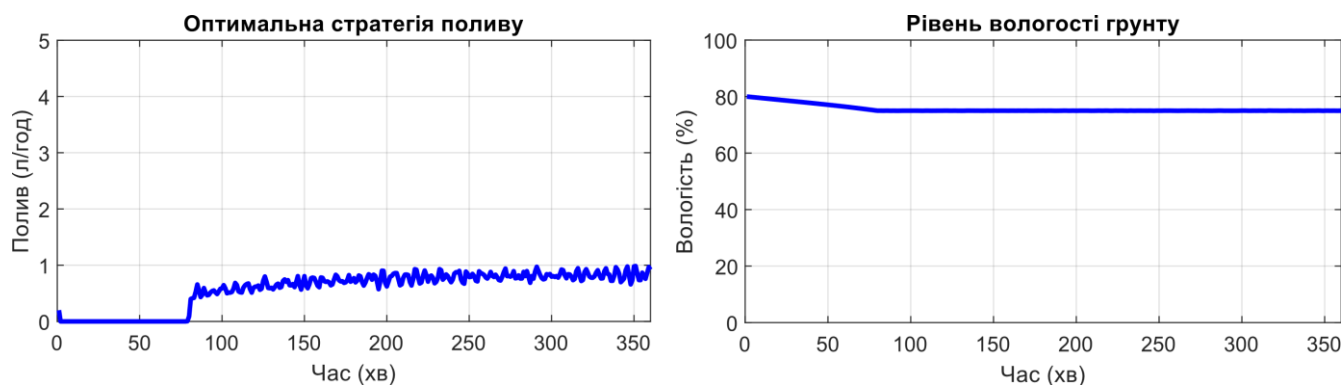
а) початкова вологість ґрунту – 50 %



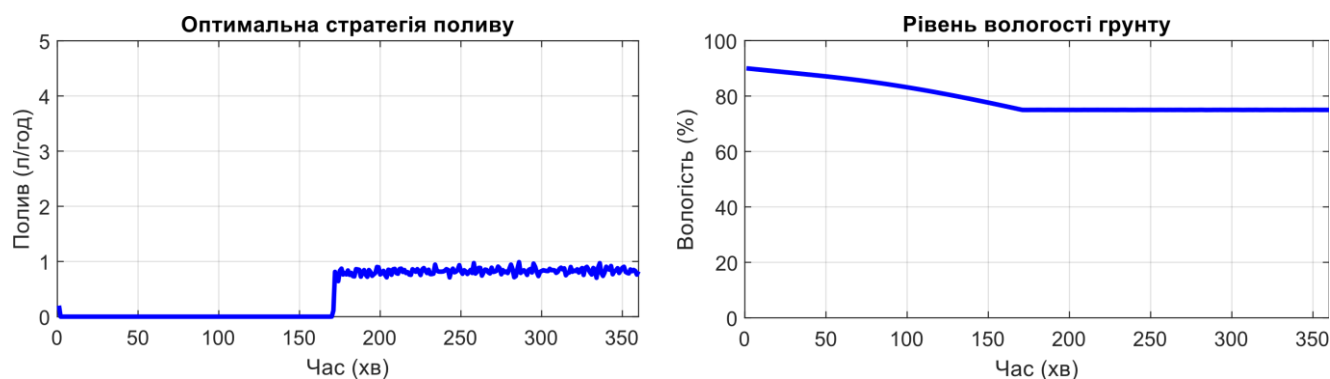
б) початкова вологість ґрунту – 60 %



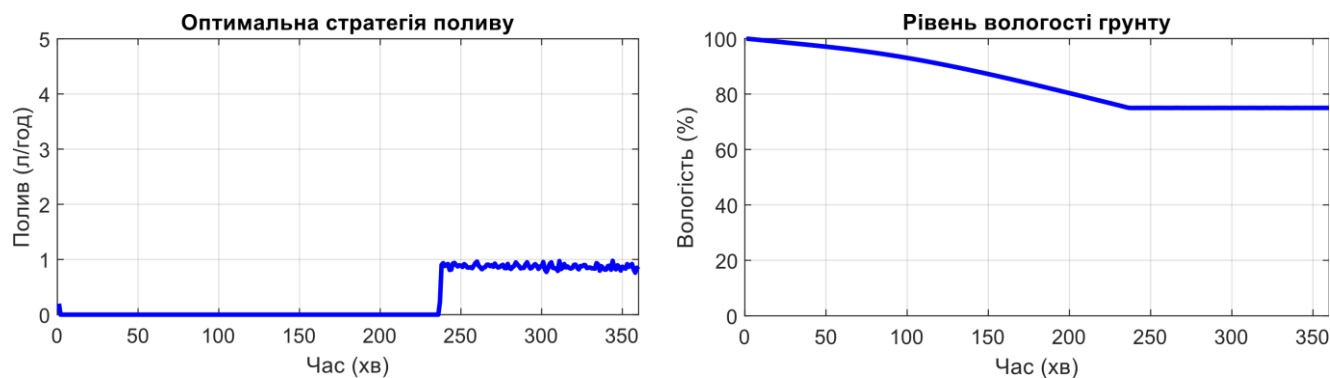
в) початкова вологість ґрунту – 70 %



г) початкова вологість ґрунту – 80 %

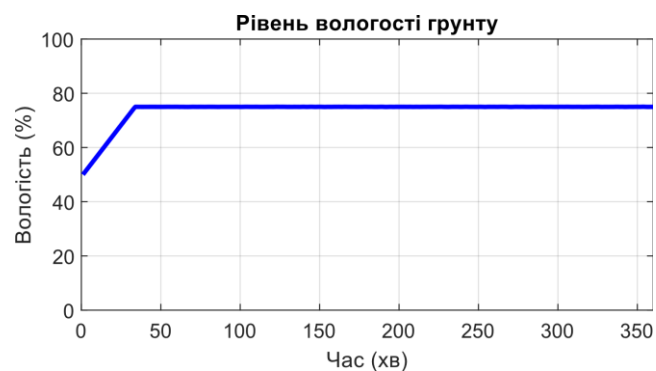


г) початкова вологість ґрунту – 90 %

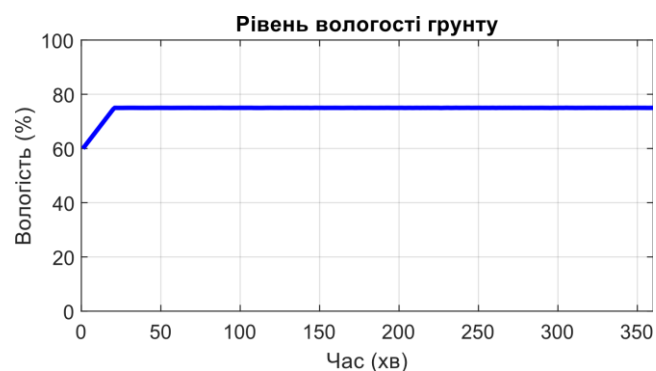


д) початкова вологість ґрунту – 100 %

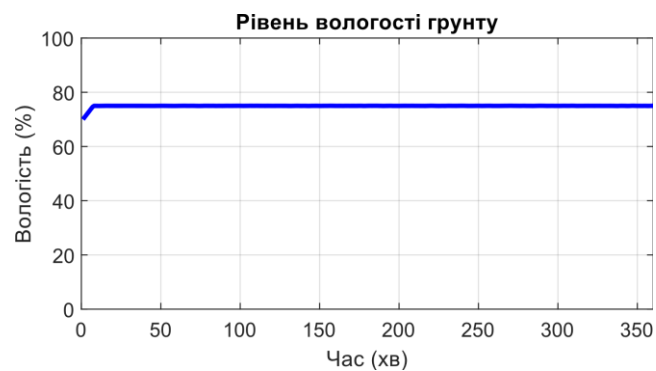
Рисунок 3.9 – Графічна інтерпретація комп'ютерного експерименту щодо аналізу динаміки відносної вологості ґрунту та показника інтенсивності поливу за умови оптимізації режимів зрошення (прийняті умови: волога кліматична зона, чорнозем потужний, фаза колосіння і цвітіння, аналізована глибина 0,6 м, бажана вологість 75 %)



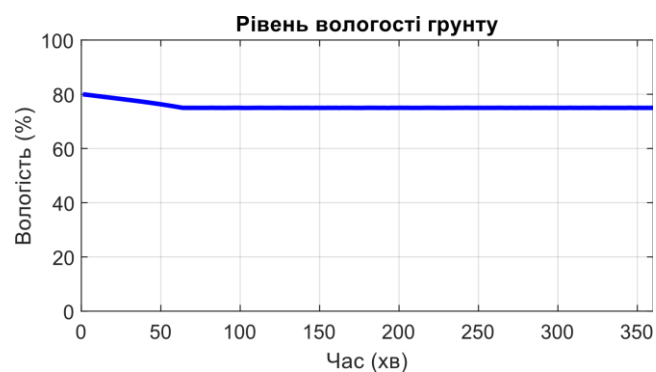
а) початкова вологість ґрунту – 50 %



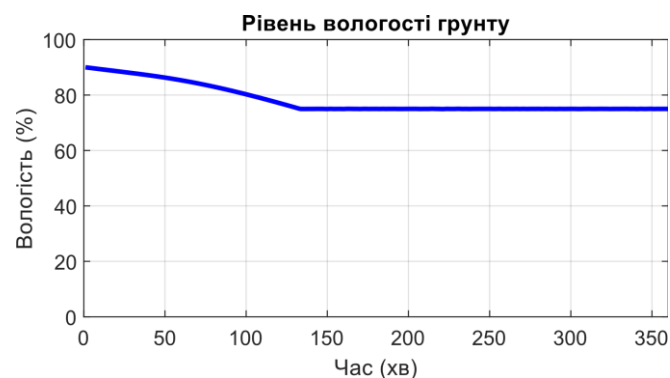
б) початкова вологість ґрунту – 60 %



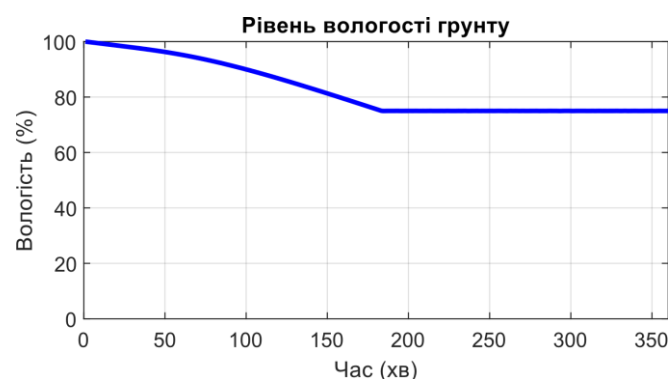
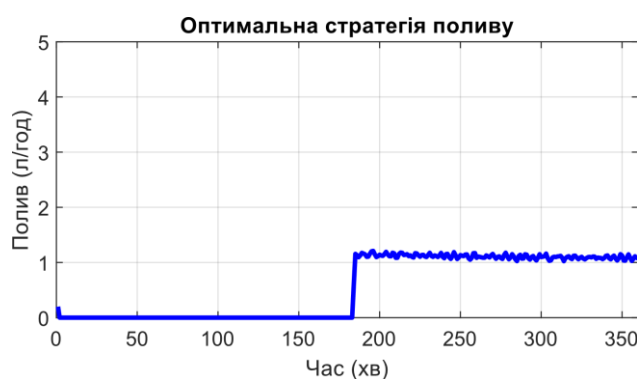
в) початкова вологість ґрунту – 70 %



г) початкова вологість ґрунту – 80 %

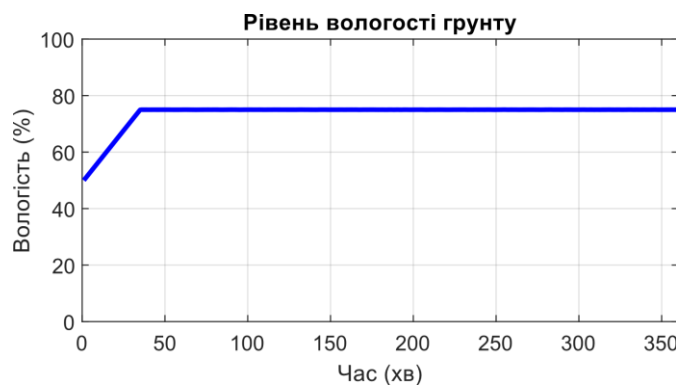


г) початкова вологість ґрунту – 90 %

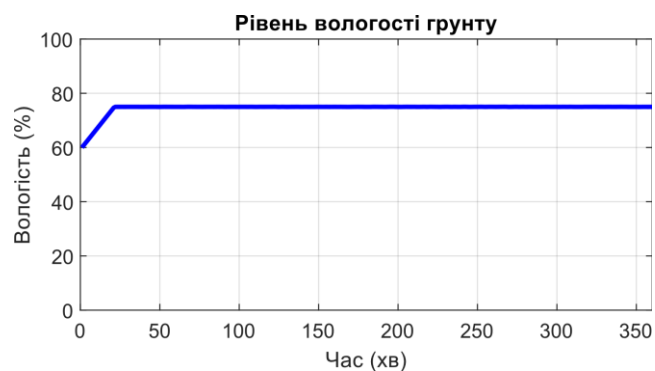


д) початкова вологість ґрунту – 100 %

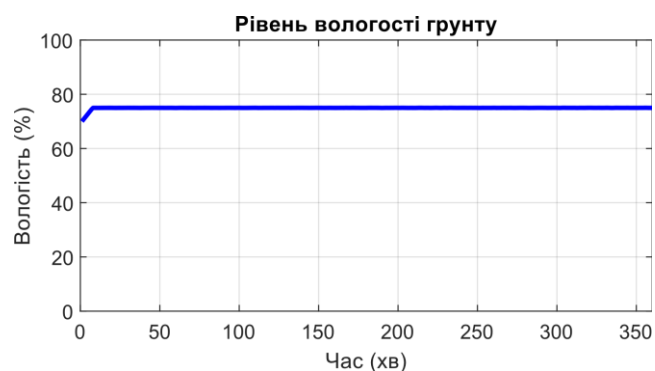
Рисунок 3.10 – Графічна інтерпретація комп'ютерного експерименту щодо аналізу динаміки відносної вологості ґрунту та показника інтенсивності поливу за умови оптимізації режимів зрошення (прийняті умови: напівпосушлива кліматична зона, чорнозем звичайний, фаза колосіння і цвітіння, аналізована глибина 0,6 м, бажана вологість 75 %)



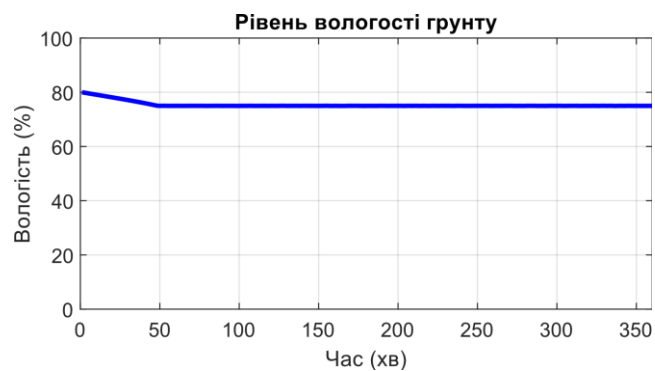
а) початкова вологість ґрунту – 50 %



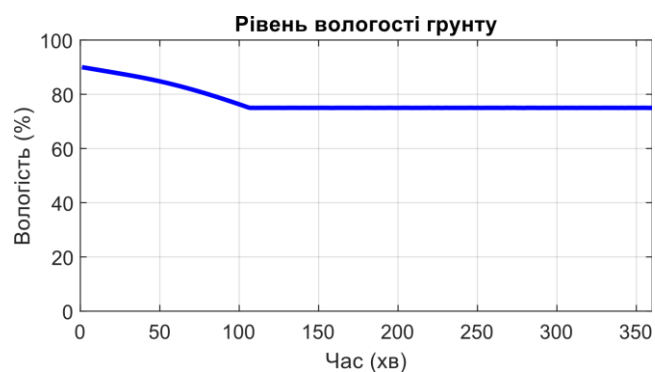
б) початкова вологість ґрунту – 60 %



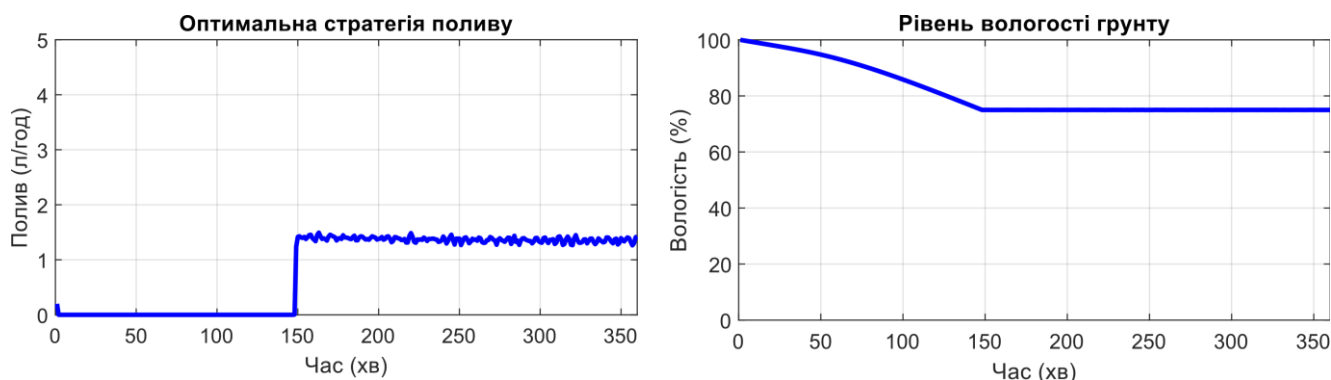
в) початкова вологість ґрунту – 70 %



г) початкова вологість ґрунту – 80 %



г) початкова вологість ґрунту – 90 %



д) початкова вологість ґрунту – 100 %

Рисунок 3.11 – Графічна інтерпретація комп’ютерного експерименту щодо аналізу динаміки відносної вологості ґрунту та показника інтенсивності поливу за умови оптимізації режимів зрошення (прийняті умови: посушлива зона, чорнозем південний, фаза колосіння і цвітіння, глибина 0,6 м, бажана вологість 75 %)

Аналізуючи графіки динаміки ґрунтової вологи за умови оптимізації стратегії поливу (див. рис. 3.6–3.11), можна стверджувати, що запропонований метод предикативного контролю режимів зволоження зернових культур здатен прецизійно забезпечувати та підтримувати необхідний рівень відносної вологості на заданих глибинах (0,2 м і 0,6 м, що характеризують різні вегетаційні періоди) відповідно до встановлених значень 70 % та 75 %. Оптимізація подачі води дозволяє мінімізувати відхилення вологості ґрунту від цільового рівня.

Результати комп’ютерного експерименту в графічному вигляді доводять, що відносна вологість ґрунту стабілізується на заданих рівнях протягом перших кількох годин поливу. Також встановлено, що вплив випаровування є найбільш вагомим у верхніх шарах ґрунту, що підтверджує необхідність адаптивного контролю режимів подачі поливної води. Оптимізація подачі поливної води дозволяє використовувати мінімально необхідний об’єм води, забезпечуючи ефективне керування споживаними ресурсами. Розрахунки показують, що витрати води залишаються в межах допустимих обмежень (не перевищують значення 5 л/год на 1 м²).

Аналізуючи дані інтенсивності поливу для підтримки на глибині 0,2 м бажаної вологості 70 % встановлено наступне:

– в умовах вологої агрокліматичної зони із типом ґрунту – чорнозем потужний споживання поливної води в усталеному режимі складає 1,0 л/год;

– в умовах напівпосушливої агрокліматичної зони із типом ґрунту – чорнозем звичайний споживання поливної води в усталеному режимі складає 1,2 л/год;

– в умовах посушливої агрокліматичної зони із типом ґрунту – чорнозем південний споживання поливної води в усталеному режимі складає 1,5 л/год.

У той самий час для аналізованої глибини 0,6 м і бажаної відносної вологості 75 % результати комп'ютерного експерименту доводять наступне:

– для вологої агрокліматичної зони із типом ґрунту – чорнозем потужний споживання поливної води в усталеному режимі складає 0,8 л/год;

– для напівпосушливої агрокліматичної зони із типом ґрунту – чорнозем звичайний споживання води в усталеному режимі складає 1,0 л/год;

– для посушливої агрокліматичної зони із типом ґрунту – чорнозем південний споживання поливної води в усталеному режимі складає 1,3 л/год.

Таким чином, встановлено, що за однакових ґрунтокліматичних умов споживання поливної води для досягнення відповідних рівнів бажаної відносної вологості в шарі ґрунту на глибині 0,6 м є орієнтовно на 17 % меншим порівняно з шаром ґрунту на глибині 0,2 м. Це підтверджує факт того, що із шарів ґрунту, які розташовані ближче до поверхні, волога випаровується швидше, а отже, потрібно більше води для компенсації втрат через випаровування, що своєю чергою обумовлює необхідність практичної реалізації адаптивних до періодів вегетації зернових культур методів і засобів зрошення.

Отже, на підставі аналізу якісних і кількісних результатів комп'ютерного експерименту з тестування та валідації запропонованого комп'ютерно-орієнтованого методу предикативного контролю режимів зволоження зернових культур встановлено, що він забезпечує стабільне досягнення та утримання вологості ґрунту на заданому рівні з оптимізованими витратами води. В свою чергу, запропонований метод та відповідна його комп'ютерна реалізація у вигляді програмного застосунку являють собою функціональну основу під час

запровадження стратегії адаптивного поливу з підтриманням оптимальної вологості на різних глибинах ґрунту з урахуванням характеристик агрокліматичних зон, типів ґрунту та видів і фаз росту сільськогосподарських культур, що є ефективним підходом до оптимізації використання водних ресурсів під час повного періоду вирощування зернових культур.

3.4 Висновки за третім розділом

У результаті досліджень цього розділу розв'язано одну з основних задач дисертаційного дослідження, що полягала в розробці та валідації комп'ютерно-орієнтованого методу предикативного контролю режимів зволоження зернових культур із обліком інформативних і дестабілізуючих параметрів. Основні кількісні та якісні результати розробок і досліджень цього розділу є такими:

1. Запропоновано підхід до формалізації й реалізації комп'ютерно-орієнтованого методу предикативного контролю режимів зволоження зернових культур як задачі нелінійної оптимізації. В основу формалізованого опису покладено диференційне рівняння Річардса в частинних похідних для аналізу показників динаміки вологи в шарах ґрунту та цільовий функціонал задля мінімізації відхилення фактичної вологості від бажаного рівня. В якості функціональної основи під час реалізації досліджуваного комп'ютерно-орієнтованого методу використано вбудовану до Matlab Optimization Toolbox функцію мінімізації з обмеженнями `fmincon`, яка дозволяє одночасно враховувати як граничні й початкові умови процесу, так і фізико-біологічних обмеження агробіологічних екосистем вирощування зернових культур. Обґрунтована на підставі запропонованого формалізованого опису ітераційна обчислювальна процедура дозволила сформувати оптимізовану траєкторію поливу з обліком прогнозованого стану вологості ґрунту.

2. Розроблене алгоритмічне та програмне забезпечення досліджуваного комп'ютерно-орієнтованого методу у вигляді Use-case і UML діаграм та користуцького Matlab-застосунку дозволило провести дослідження з оптимізації

подачі поливної води на основі формалізованого опису динаміки вологи в шарах ґрунту з урахуванням типів ґрунту, характеристик агрокліматичних зон вирощування, техніко-технологічних параметрів засобів поливу, а також типів і періодів зростання зернових культур. Застосування підходу на основі принципу послідовного квадратичного програмування з використанням Matlab Optimization Toolbox дозволило забезпечити ефективне розв'язання задачі оптимізації режимів поливу зернових культур із урахуванням нелінійності процесу та обмежень на змінні стану й керування засобами автоматизованого зрошення.

3. Розроблена комп'ютерна модель із графічним інтерфейсом користувача, що реалізує досліджуваний метод предикативного контролю режимів зволоження зернових культур, дозволила провести серію імітаційних експериментів у середовищі Matlab & Simulink щодо аналізу впливу ряду інформативних і дестабілізуючих параметрів на характеристики процесу контролю вологості ґрунту. В результаті цього встановлено, що запропонований метод здатен прецизійно забезпечувати та підтримувати необхідний рівень відносної вологості на глибинах 0,2 м і 0,6 м, що характеризують різні вегетаційні періоди зернових культур, відповідно до встановлених значень 70 % та 75 %. Розрахунки показують, що витрати води не перевищують значення 5 л/год на 1 м² агроугідь. Шляхом порівняльного аналізу чисельних характеристик оптимізованої стратегії поливу для різних ґрунтокліматичних умов доведено необхідність адаптації режимів зрошення до періодів вегетації зернових культур.

4. Результати серії комп'ютерних експериментів підтверджують доцільність практичного застосування запропонованого комп'ютерно-орієнтованого методу предикативного контролю режимів зволоження зернових культур. Це встановлено на підставі аналізу графіків динаміки ґрунтової вологи, які доводять здатність програмної реалізації запропонованого методу підтримувати необхідний рівень вологості на заданих глибинах для різних агрокліматичних умов, типів ґрунту та фаз росту агрокультур. Оптимізація стратегії подачі води на основі розробленого методу дозволяє мінімізувати відхилення вологості від цільового рівня та ефективно використовувати водні ресурси.

РОЗДІЛ 4

РЕЗУЛЬТАТИ РОЗРОБКИ ПРОГРАМНО-ТЕХНІЧНОГО РІШЕННЯ КОМП'ЮТЕРНОЇ ТЕХНОЛОГІЇ ПРЕДИКАТИВНОГО КОНТРОЛЮ РЕЖИМІВ ЗВОЛОЖЕННЯ ЗЕРНОВИХ КУЛЬТУР

4.1 Імітаційна модель підсистеми збору та мережевого обміну даними

В основу розроблюваної імітаційної моделі підсистеми збору та мережевого обміну даними предикативного комп'ютерного контролю режимів зволоження зернових культур покладено мережеву організацію бездротових сенсорів (Wireless Sensor Network, WSN) [118] за топологією зірка [119], що спряжена із вебтехнологіями агрегування та візуалізації результатів моніторингу [120], як показано на рисунку 4.1.

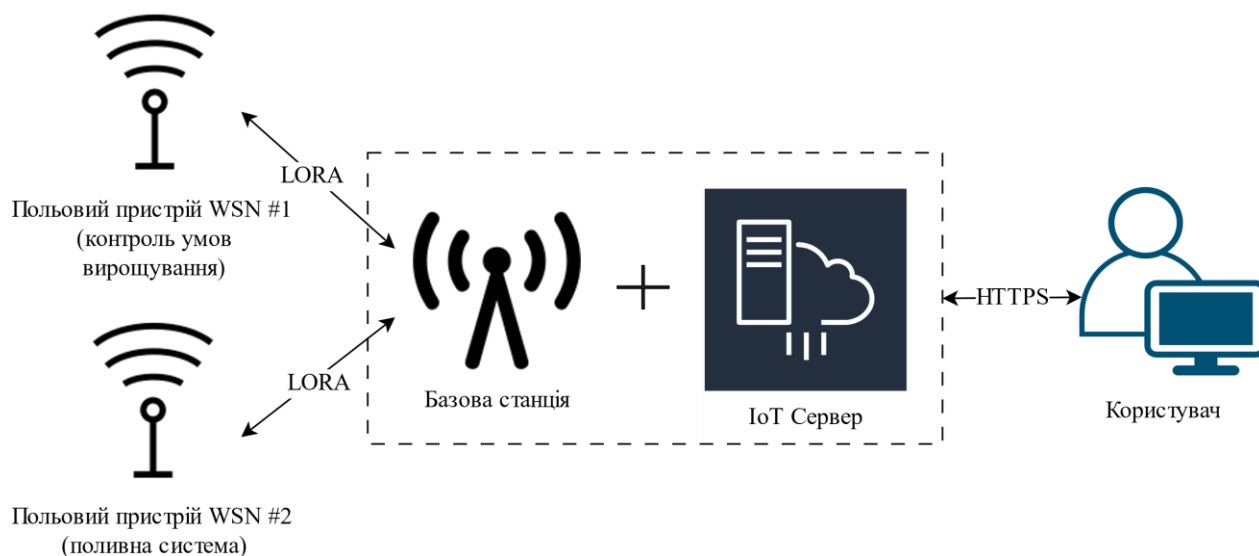


Рисунок 4.1 – Узагальнена архітектура системного рішення засобів збору та мережевого обміну даними предикативного комп'ютерного контролю режимів зволоження зернових культур

У наведеній архітектурі функціональний блок «Польовий пристрій WSN #1» («Arduino Mini #1», див. рис. 4.2) агрегує вимірювальні дані з датчиків щодо динаміки ґрунтокліматичних показників (кількість опадів, температура та

вологість ґрунту, температура та вологість повітря) у реальному часі. Аналогічно, функціональний блок «Польовий пристрій WSN #2» («Arduino Mini #2», див. рис. 4.2) агрегує вимірювальні дані з давачів щодо техніко-функціональних параметрів поливної системи (тиск на виході насоса та витрата поливної води) у реальному часі. Функціональний блок «Базова станція» («Arduino MEGA», див. рис. 4.2) агрегує дані з кінцевих вузлів «Польовий пристрій WSN #1» та «Польовий пристрій WSN #2» за допомогою бездротової технології LoRa [121]. Після цього, агреговані дані від зазначених мережевих вузлів проходять процедуру попереднього статистичного аналізу та перетворення типів даних для подальшої передачі до IoT-сервера, який реалізовано на базі мікрокомп'ютерної платформи Raspberry PI [122, 123].

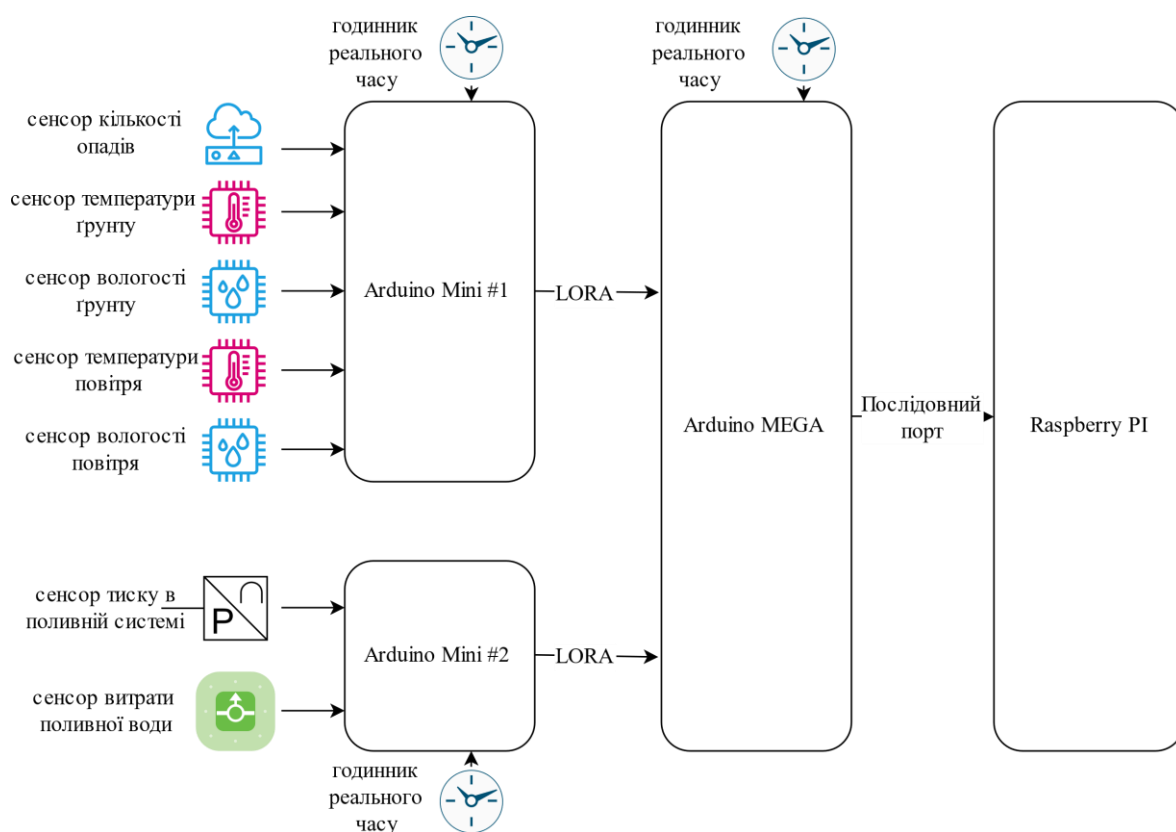


Рисунок 4.2 – Деталізована структурно-функціональна організація системного рішення засобів збору та мережевого обміну даними предикативного комп'ютерного контролю режимів зволоження зернових культур

Функціями Raspberry PI (див. рис. 4.2) є наступні: реалізація

інтелектуального алгоритму обчислень щодо предикативного контролю режимів зволоження зернових культур; формування локальної бази даних результатів вимірювальних спостережень та результатів обчислень; надання доступу до графічної інтерпретації результатів у віддаленому та локальному режимі у відповідності до прав користувачів.

Польовий рівень підсистеми збору вимірювальних даних (функціональні блоки на рисунку 4.2 без урахування Raspberry PI) у досліджуваній моделі реалізовано на базі стандартних апаратно-програмних компонент середовища Proteus (навчальна версія) [124], що забезпечує моделювання вбудованих систем у режимі реального часу. В якості обчислювальних вузлів застосовано мікроконтролерні плати Arduino Mini та Arduino Mega 2560, які забезпечують збір, попередню обробку та передачу даних. Деталізований опис застосованого апаратного забезпечення під час реалізації імітаційної моделі підсистеми збору та локального мережевого обміну даними наведено в таблиці 4.1.

Таблиця 4.1 – Компонентне забезпечення імітаційної моделі підсистеми збору та локального мережевого обміну даними

Компоненти IoT системи	Тип вузлу	Еквівалент в бібліотеці Proteus
Сенсор температури ґрунту	WSN #1	DTH22, Ground, DC generator
Сенсор вологості ґрунту		
Сенсор температури повітря		DHT22, Ground, DC generator
Сенсор вологості повітря		
Сенсор кількості опадів		POT-HG, Ground, Power
Сенсор тиску в поливній системі	WSN #2	MPX4115, Ground, Power
Сенсор витрати води поливної системи		Pulse Generator
Годинник реального часу	WSN #1, WSN #2, базова станція	DS1307 RTC Module (від www.TheEngineeringProjects.com)

Продовження табл. 4.1

LoRa модуль	WSN #1, WSN #2, базова станція	MODULO RX (modulo rf library), MODULO TX (modulo rf library) [125], Ground, Power
Arduino Mini	WSN #1, WSN #2	Arduino Mini, Ground, Power
Arduino Mega 2560 Rev3	базова станція	Arduino Mega 2560

Для реалізації бездротового зв'язку між вузлами використовувались модулі MODULO TX для вузлів WSN #1 та WSN #2 , а для вузлу базової станції – MODULO RX, бібліотеки Modulo RF (на базі послідовного інтерфейсу UART) для симуляції RF-з'єднань. Візуалізацію даних на етапі моделювання забезпечував віртуальний термінал Virtual Terminal, інтегрований у середовище Proteus.

Відповідно до запропонованої деталізованої структурно-функціональної організації системного рішення засобів збору та мережевого обміну даними предикативного комп'ютерного контролю режимів зволоження зернових культур (див. рис. 4.2 без Raspberry PI) із урахуванням принципу декомпозиції дослідницького завдання, у середовищі Proteus була реалізована імітаційна комп'ютерна модель [123]. Метою її створення було тестування обміну вимірювальними даними між сенсорами та мікропроцесорними модулями, а також мережевої взаємодії між різними протоколами передачі даних на різних архітектурних рівнях досліджуваної комп'ютерної технології предикативного контролю режимів зволоження зернових культур. Алгоритм реалізації та тестування запропонованої комп'ютерної моделі є таким:

1. Розробка імітаційної моделі мережевого вузла «Польовий пристрій WSN #1» («Arduino Mini #1», див. рис. 4.2) на базі Arduino Mini у середовищі Proteus (див. рис. 4.3). До моделі також інтегровано програмне забезпечення, створене в середовищі Open-source software Arduino IDE [126], яке реалізує функціонал зчитування даних із сенсорів контролю ґрунтокліматичних умов та передачу інформації до вузла «Базова станція» («Arduino MEGA», див. рис. 4.2) за технологією LoRa. Відповідний код програми наведено в додатку В, В.5.

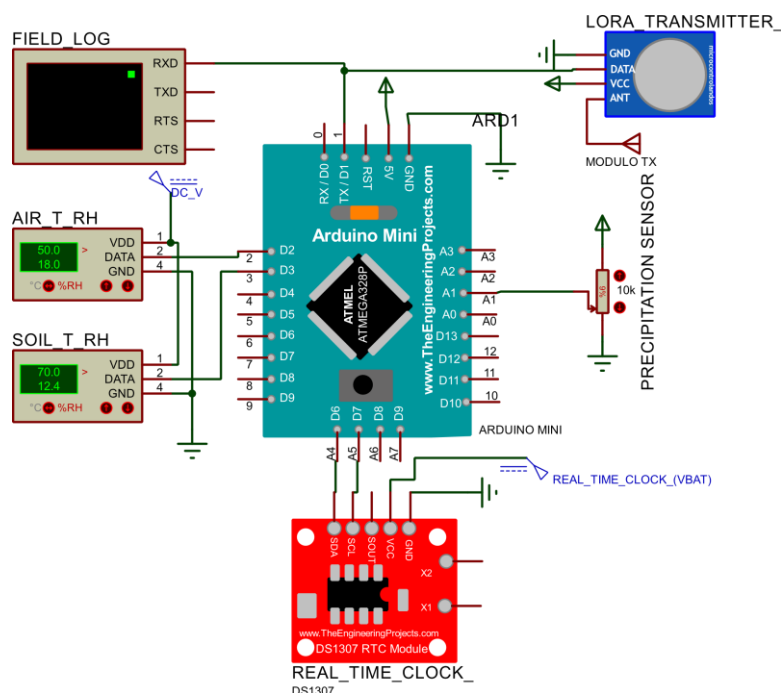


Рисунок 4.3 – Імітаційна модель мережевого вузла «Польовий пристрій WSN #1» у середовищі Proteus

2. Розробка імітаційної моделі мережевого вузла «Польовий пристрій WSN #2» («Arduino Mini #2», див. рис. 4.2) на базі Arduino Mini у середовищі Proteus (див. рис. 4.4). До моделі також інтегровано програмне забезпечення, створене в середовищі Open-source software Arduino IDE, яке реалізує функціонал зчитування даних із сенсорів контролю техніко-функціональних параметрів поливної системи та передачу інформації до вузла «Базова станція» («Arduino MEGA», див. рис. 4.2) за технологією LoRa. Відповідний код програми наведено в додатку В, В.6.

3. Розробка імітаційної моделі базової станції на базі мікроконтролерної платформи Arduino Mega 2560 (див. рис. 4.5). Цей вузол здійснює збір і статистичну обробку даних від вузлів «Польовий пристрій WSN #1» (див. рис. 4.3) та «Польовий пристрій WSN #2» (див. рис. 4.4), зчитування даних від модуля годинника реального часу, а також перетворення даних у формат `uint8_t` та їх передавання за допомогою послідовного порту (технологія UART) до мікрокомп'ютерного модуля Raspberry PI (в імітаційній моделі Raspberry PI не показано, дані які надходять на цей модуль візуалізовано за допомогою блока Virtual Terminal). Відповідний код програми наведено в додатку В, В.7.

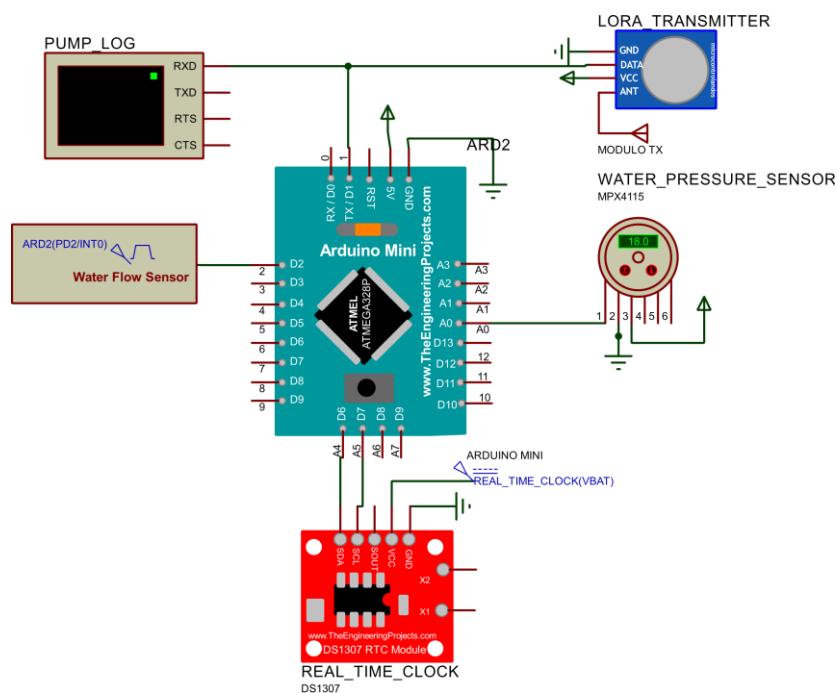


Рисунок 4.4 – Імітаційна модель мережевого вузла «Польовий пристрій WSN #2» у середовищі Proteus

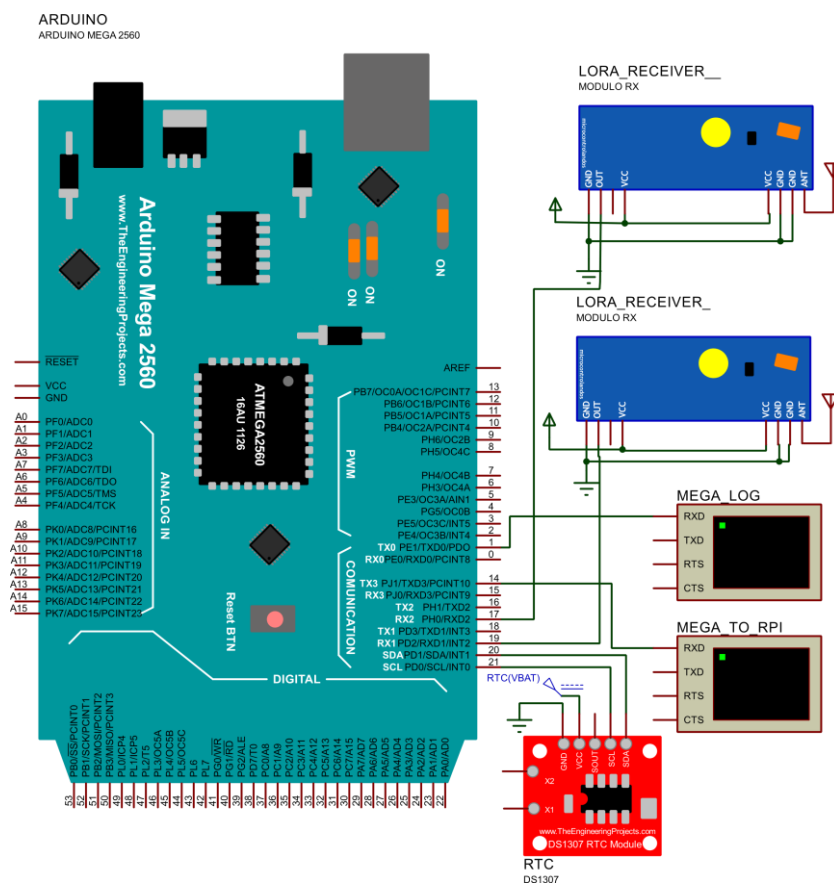


Рисунок 4.5 – Імітаційна модель мережевого вузла «Базова станція» у середовищі Proteus

4. Тестування функціонування моделі проводилося шляхом аналізу мережевої взаємодії на різних рівнях запропонованої архітектури досліджуваної підсистеми із використанням засобу візуалізації Virtual Terminal, що дозволило здійснити валідацію та оцінити робастність розробленого рішення.

Розроблені імітаційні моделі (див. рис. 4.3–4.5) слугують експериментальною основою для подальшого дослідження ефективності та функціональних властивостей розроблюваної комп'ютерної технології предикативного контролю режимів зволоження зернових культур з використанням методів комп'ютерного моделювання та симуляційного експерименту. Загальний вигляд моделі наведено на рисунку 4.6 [123].

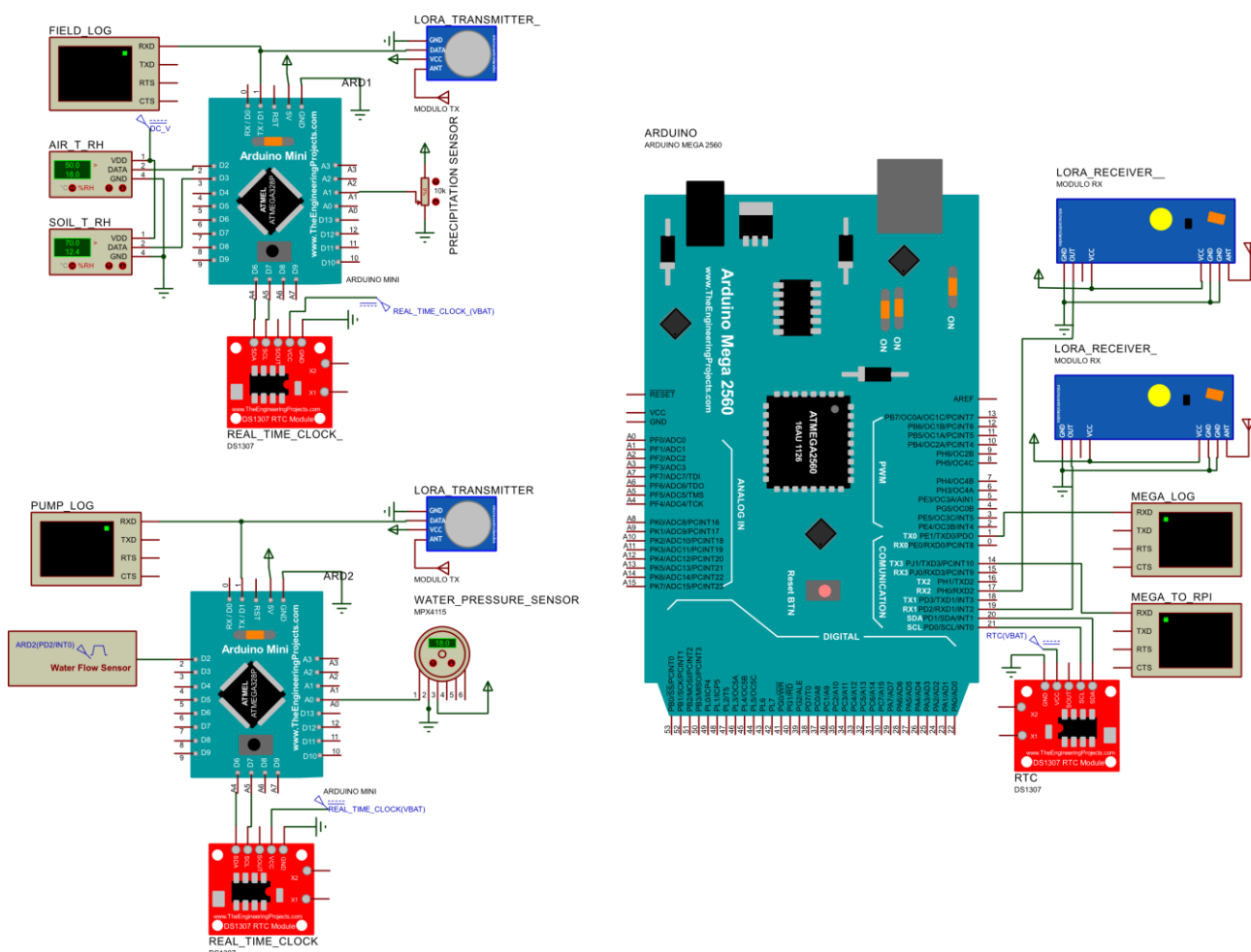
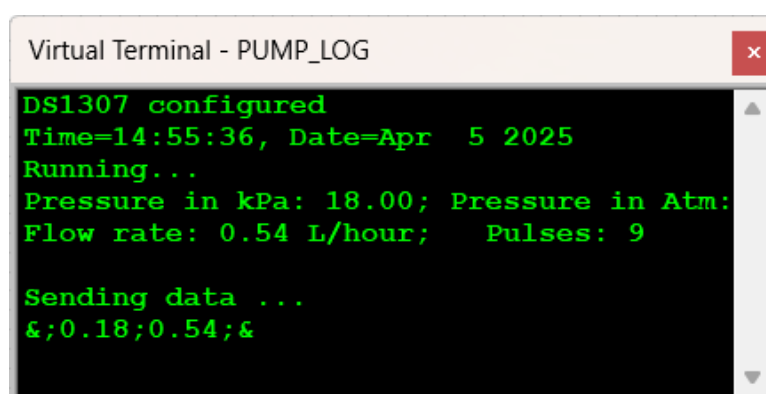


Рисунок 4.6 – Імітаційна модель польового рівня підсистеми збору та мережевого обміну даними предикативного комп'ютерного контролю режимів зволоження зернових культур у середовищі Proteus

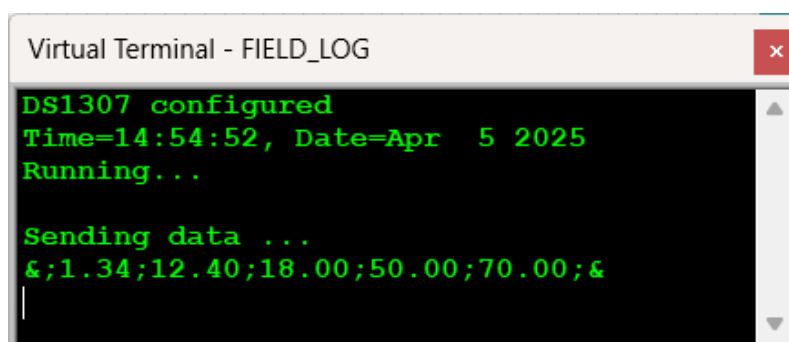
Таким чином, структура імітаційної моделі (див. рис. 4.6) відповідає логіці побудови підсистеми, яку наведено на рисунку 4.2. На основі окреслених вище етапів побудови комп'ютерної моделі підсистеми збору та мережевого обміну даними предикативного комп'ютерного контролю режимів зволоження зернових культур у середовищі Proteus, проведено серію комп'ютерних експериментів, спрямованих на верифікацію функціональності запропонованої архітектури. Валідацію мережевої взаємодії між протоколами, що функціонують на різних архітектурних рівнях комп'ютерної технології, проведено шляхом аналізу виводів Virtual Terminal в середовищі Proteus (див. рис. 4.7–4.9). Метою експерименту була перевірка ефективності обміну даними між мережевими вузлами та коректність формування даних для подальшої передачі через послідовний порт на мікрокомп'ютерний пристрій Raspberry PI.



```
Virtual Terminal - PUMP_LOG
DS1307 configured
Time=14:55:36, Date=Apr 5 2025
Running...
Pressure in kPa: 18.00; Pressure in Atm:
Flow rate: 0.54 L/hour; Pulses: 9

Sending data ...
&0.18;0.54;&
```

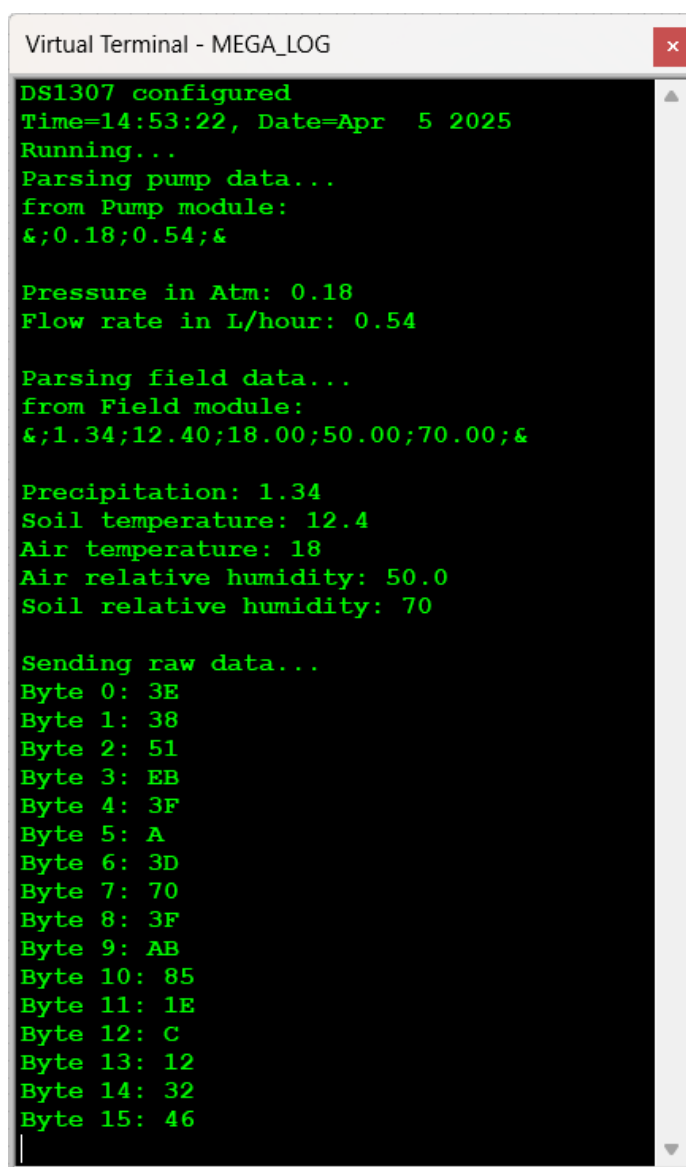
Рисунок 4.7 – Результат відображення процесу вимірювання та передачі даних мережевого вузла «Польовий пристрій WSN #1» за допомогою Virtual Terminal



```
Virtual Terminal - FIELD_LOG
DS1307 configured
Time=14:54:52, Date=Apr 5 2025
Running...

Sending data ...
&1.34;12.40;18.00;50.00;70.00;&
```

Рисунок 4.8 – Результат відображення процесу вимірювання та передачі даних мережевого вузла «Польовий пристрій WSN #2» за допомогою Virtual Terminal



```

Virtual Terminal - MEGA_LOG
DS1307 configured
Time=14:53:22, Date=Apr  5 2025
Running...
Parsing pump data...
from Pump module:
&0.18;0.54;&

Pressure in Atm: 0.18
Flow rate in L/hour: 0.54

Parsing field data...
from Field module:
&1.34;12.40;18.00;50.00;70.00;&

Precipitation: 1.34
Soil temperature: 12.4
Air temperature: 18
Air relative humidity: 50.0
Soil relative humidity: 70

Sending raw data...
Byte 0: 3E
Byte 1: 38
Byte 2: 51
Byte 3: EB
Byte 4: 3F
Byte 5: A
Byte 6: 3D
Byte 7: 70
Byte 8: 3F
Byte 9: AB
Byte 10: 85
Byte 11: 1E
Byte 12: C
Byte 13: 12
Byte 14: 32
Byte 15: 46

```

Рисунок 4.9 – Результат відображення процесу отримання та передачі даних мережевого вузла «Базова станція» за допомогою Virtual Terminal

Результати проведеного комп’ютерного експерименту (див. рис. 4.7–4.9) засвідчили коректність роботи запропонованої імітаційної моделі. Поведінка віртуальних вузлів та реалізованих протоколів комунікації точно імітувала реальні сценарії, забезпечуючи достовірну інформацію про функціонування підсистеми. Надійна передача даних через модулі LoRa та послідовний порт підтвердила працездатність мережевої взаємодії компонент комп’ютерної технології [123].

Таким чином, результати комп’ютерного моделювання підтвердили

ефективність запропонованого підходу до реалізації програмно-апаратних засобів побудови підсистеми збору та мережевого обміну даними предикативного комп'ютерного контролю режимів зволоження зернових культур під час агрегації вимірювальних даних, локального мережевого обміну даними, їх трансформації в формат `uint8_t` та передачі через послідовний порт на Raspberry PI.

4.2 Імітаційна модель підсистеми інтелектуальної предикативної обробки даних

Для реалізації підсистеми інтелектуальних алгоритмів обчислень щодо предикативного контролю режимів зволоження зернових культур на периферійному (польовому) рівні, відповідно до методу, що описаний у третьому розділі цієї дисертації, було реалізовано функціонально завершену модель (див. рис. 4.10) із використанням середовища Matlab & Simulink [127], інструментарію Simulink Support Package for Raspberry Pi Hardware [128] та Code Generation [129].

Розроблена комп'ютерна модель, яку наведено на рисунку 4.10, реалізує наступний функціонал [123]:

1. Зчитування даних у форматі `uint8` із послідовного порту `‘/dev/serial0’`, які надходять від вузла «Базова станція» (див. рис. 4.5) за допомогою блоку `‘Serial Read’` [130]. Налаштування `‘Serial Read’` наведено на рисунку 4.11.

2. Конкатенація відповідних байтів інформації за допомогою блоків `‘Bit Concat’` [131], `‘Float Typecast’` [132] та `‘Data Type Conversion’` [133] для отримання оригінальних даних.

3. Розрахунок оптимального режиму поливу на основі запропонованого методу, який детально викладено в третьому розділі дисертації (у моделі блок `‘optimal_irrigation_sfunc’`, код наведено у додатку В, В.8–В.10).

4. Формування нового рядка типу `string` на базі даних, що надійшли до послідовного порту та результатів розрахунку предикативного алгоритму з подальшою відправкою до IoT-серверу через протокол MQTT [134] за допомогою блоку `‘MQTT Publish’` [135] з пакету Simulink Support Package for Raspberry Pi до

вказаної теми брокера MQTT.

Варто зазначити, що запропонована модель передбачає можливість роботи як із реальними даними що надходять через послідовний порт від мережевого вузла «Базова станція» (див. рис. 4.5), так і в тестовому режимі з симуляційними даними. Для цього додано перемикач ‘Manual switch’ [136], за допомогою якого є можливість перемкнутись на тестові дані, що внесено до Simulink моделі, при цьому блоки ‘Serial Read’ та ‘MQTT Publish’ мають бути закоментовані. Рядок ASCII з даними для відправки, у такому випадку, може бути вручну збережений до workspace matlab та відправлений за допомогою функції myMQTT.write().

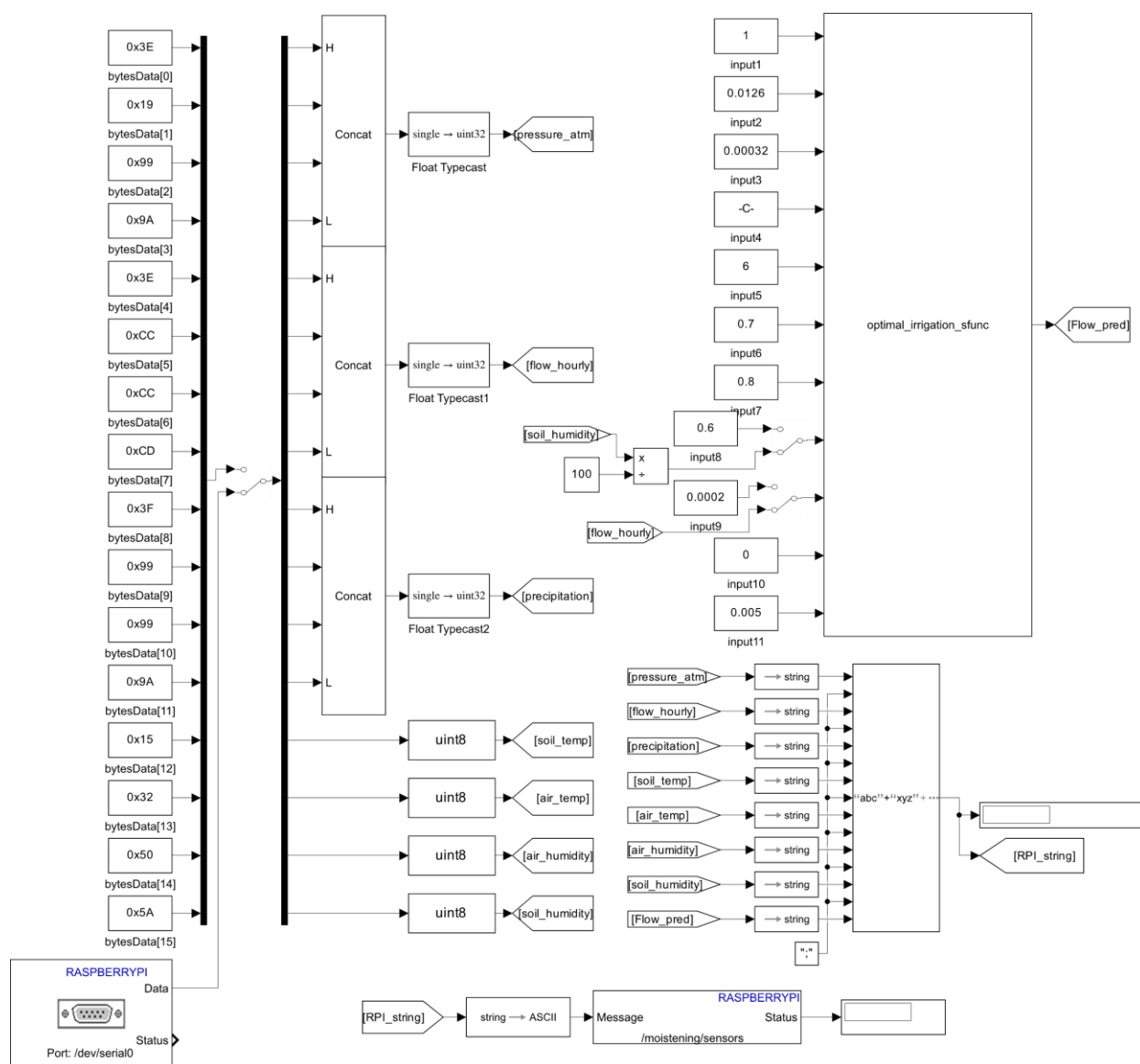


Рисунок 4.10 – Імітаційна модель підсистеми предикативного контролю режимів зволоження, реалізована в середовищі Matlab & Simulink

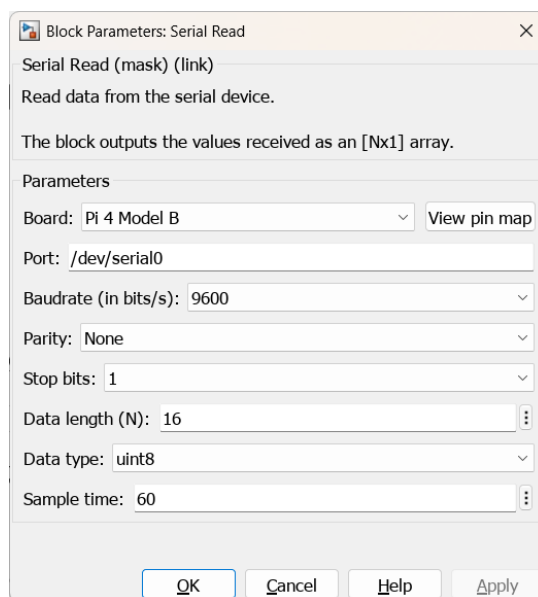


Рисунок 4.11 – Візуалізація процесу налаштування блоку ‘Serial read’ із пакету Simulink Support Package for Raspberry Pi Hardware

На відміну від реалізації комп’ютерного застосунку для розрахунку режимів зволоження (див. п. 3.2), модель передбачає введення зворотних зв’язків до блоку ‘optimal_irrigation_sfunc’ для врахування актуальної швидкості витрат води та рівня вологості шару ґрунту на аналізованій глибині. За допомогою перемикача ‘Manual switch’ аналогічно можна перемкнутись на тестові дані.

Розроблена модель орієнтована на платформу Raspberry Pi та реалізує замкнутий цикл прийняття рішень щодо оптимізації зрошення на основі даних сенсорного моніторингу. Архітектура моделі побудована відповідно до концептуальних принципів IoT із використанням серійного інтерфейсу, методів обробки вхідних сигналів та публікації результатів у хмарну інфраструктуру. Це забезпечує інтеграцію системи у реальні IoT-сервіси для подальшого аналізу, візуалізації та зберігання даних.

Для розгортання розробленої інтелектуальної моделі на апаратній платформі Raspberry Pi здійснюється автоматизована генерація виконуваного коду з середовища Matlab & Simulink. З цією метою було виконано низку послідовних кроків, що охоплюють налаштування середовища, адаптацію алгоритмів до вимог embedded-системи, а також перевірку сумісності з вимогами

кодогенерації.

Першочергово здійснено встановлення підтримки апаратної платформи Raspberry Pi за допомогою Simulink Support Package for Raspberry Pi Hardware [128], а також інструментів генерації коду — Embedded Coder [137] та Simulink Coder [138]. Вказані пакети забезпечують компіляцію моделі у програмний код мовою C із подальшим його завантаженням на цільову платформу через SSH-з'єднання.

У налаштуваннях моделі (Model Settings) обрано апаратну платформу Raspberry Pi як Target Hardware. У відповідному підменю було вказано: System target file: ert.tlc — для забезпечення сумісності з Embedded Coder; тип моделювання: Fixed-step, оскільки система має дискретний характер; Solver: FixedStepDiscrete, що відповідає логіці циклічного зчитування даних; комунікаційний порт: /dev/serial0, з відповідною швидкістю обміну, згідно параметрів вузла «Базова станція».

Для можливості використання в Matlab & Simulink раніше розробленого алгоритму предикативного контролю на базі fmincon (див. додаток В, В.3) з можливістю генерації коду для Raspberry PI [129], спершу його було перероблено у функцію (див. додаток В, В.8) аналогічно як у додатку В, В.4 під час реалізації комп'ютерного застосунку для розрахунку режимів зволоження (див. п. 3.2). Так як використання стандартного блоку 'Matlab function' [139] не є можливим з урахуванням особливостей embedded-системи та підтримки апаратної платформи, натомість створено Level-2 MATLAB S-Function [140] (див. додаток В, В.9) з відповідним tlc-файлом [141] (див. додаток В, В.10). Блоки 'Display' при генерації коду попередньо видаляються з моделі.

Перед генерацією коду здійснено перевірку моделі на сумісність із генерацією коду за допомогою інструменту Model Advisor. Було успішно пройдено валідацію на відповідність вимогам Embedded Coder, зокрема щодо типів даних, розмірів масивів, використаних мовних конструкцій та сумісності з S-функціями.

Для ініціації процесу використано функціонал Build, Deploy & Start, в

результаті чого система автоматично виконала такі дії: згенерувала С-код із моделі; скомпілювала його з використанням компілятора `arm-linux-gnueabi-hf-gcc`; завантажила виконуваний файл на Raspberry Pi; запустила модель у реальному часі (надалі реалізовано як `stand-alone app` без необхідності бути підключеним до плати Raspberry Pi).

У процесі роботи, модель зчитує послідовні пакети даних через послідовний порт UART, виконує обробку вбудованим інтелектуальним алгоритмом, формує MQTT-повідомлення та передає результати обробки на IoT-сервер. Після розгортання моделі було проведено серію її тестувань. Отримані результати підтвердили коректність її функціонування.

Отже, розроблена імітаційна модель підсистеми інтелектуальної предикативної обробки даних демонструє ефективну реалізацію концепції `edge computing` [142, 143] у задачах агротехнічного моніторингу, зокрема контролю водних ресурсів. Її структурна модульність та застосування стандартів передачі даних у поєднанні з аналітичним блоком прогнозування забезпечують масштабованість та можливість подальшої адаптації під час вирощування різних сільськогосподарських культур у мінливих агрокліматичних умовах.

4.3 Результати розробки серверної частини комп'ютерної технології предикативного контролю режимів зволоження зернових культур

Для реалізації серверної частини комп'ютерної технології предикативного контролю режимів зволоження зернових культур із урахуванням можливості формування локальної бази даних результатів вимірювальних спостережень та результатів обчислень разом із наданням доступу до графічної інтерпретації результатів у віддаленому режимі у відповідності до прав користувачів, використано стек технологій IoT Stack [144], заснований на доступних контейнеризованих рішеннях, що забезпечують гнучку обробку, зберігання та візуалізацію даних. У межах цієї архітектури розгорнуто наступні основні компоненти: Portainer [145], Mosquitto [146], Node-RED [147], InfluxDB [148] та

Grafana [149]. Усі сервіси функціонують на одному пристрої – Raspberry Pi 4 (Model B), який одночасно виконує роль як кінцевого вузла обробки даних (див. п. 4.2), так і сервера [123].

Після інсталяції операційної системи Raspberry Pi OS Lite виконано стандартні налаштування: оновлення системи, зміна пароля користувача, активація SSH для віддаленого доступу. Наступним кроком було встановлення IoTStack [144], як показано нижче:

```
curl -fsSL https://raw.githubusercontent.com/SensorsIot/IOTstack/master/install.sh | bash
```

разом з Docker та Docker Compose, що є обов'язковими для розгортання контейнеризованих сервісів IoT Stack. Після цього в інтерактивному режимі:

```
cd IOTstack/  
./menu.sh
```

створюється docker-compose.yml. У результаті отримано стек, який розгорнуто на localhost Raspberry Pi з зазначеними вище компонентами (див. рис. 4.12).

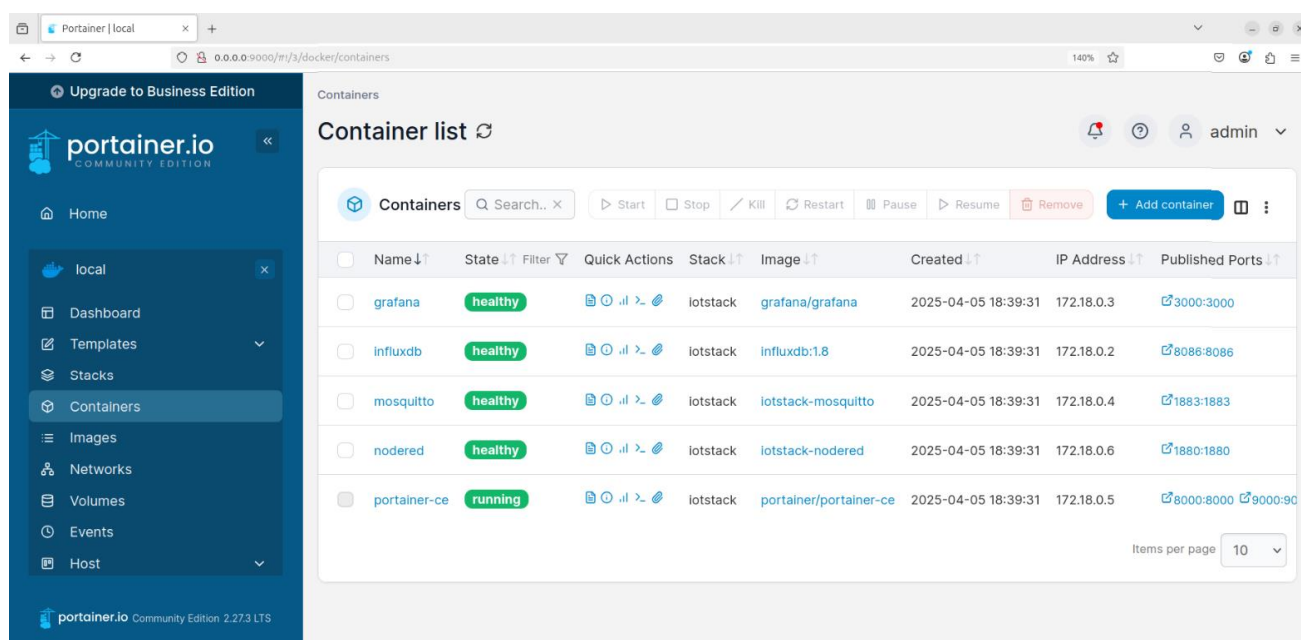


Рисунок 4.12 – Візуалізація вікна розгорнутого IoT-стека на мікрокомп'ютерному пристрої Raspberry Pi

У цьому випадку MQTT-протокол обрано як основний засіб обміну даними між Simulink-моделлю на Raspberry Pi та серверною частиною розроблюваної комп'ютерної технології агротехнічного призначення. MQTT-брокер Mosquitto [146] конфігурується для прослуховування порту 1883 без автентифікації для спрощення внутрішньої комунікації. MQTT-брокер приймає дані від блоку 'MQTT Publish' у Simulink, які надходять у форматі uint8 ASCII з темою '/moistening/sensors'.

Середовище Node-RED [147] використовується як інструмент для обробки, перетворення та маршрутизації даних між сервісами (див. рис. 4.13).

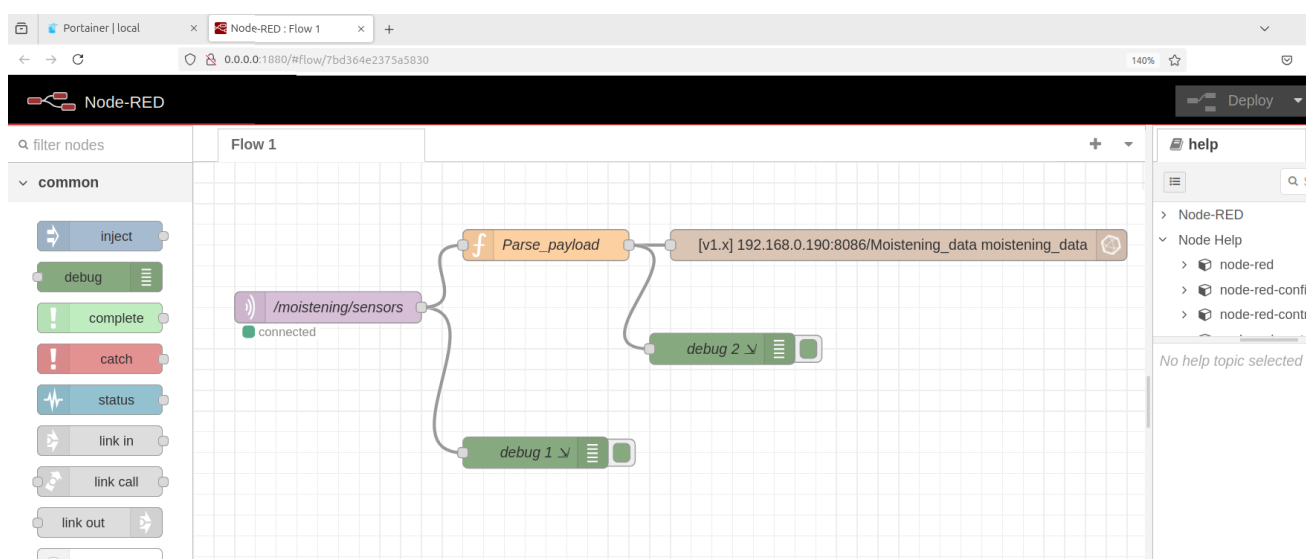


Рисунок 4.13 – Структура інформаційного потоку в Node-RED

Реалізований інформаційний потік у середовищі Node-RED має наступну структуру:

- вузол «Mqtt in» отримує повідомлення з теми '/moistening/sensors' (див. рис. 4.14);
- вузол «Function» декодує дані у форматі uint8 ASCII string та створює структуру формату JSON на JavaScript для збереження в блоці InfluxDB (див. рис. 4.15);
- вузол «Influxdb out» надсилає результати обробки для зберігання в базі даних (див. рис. 4.16).

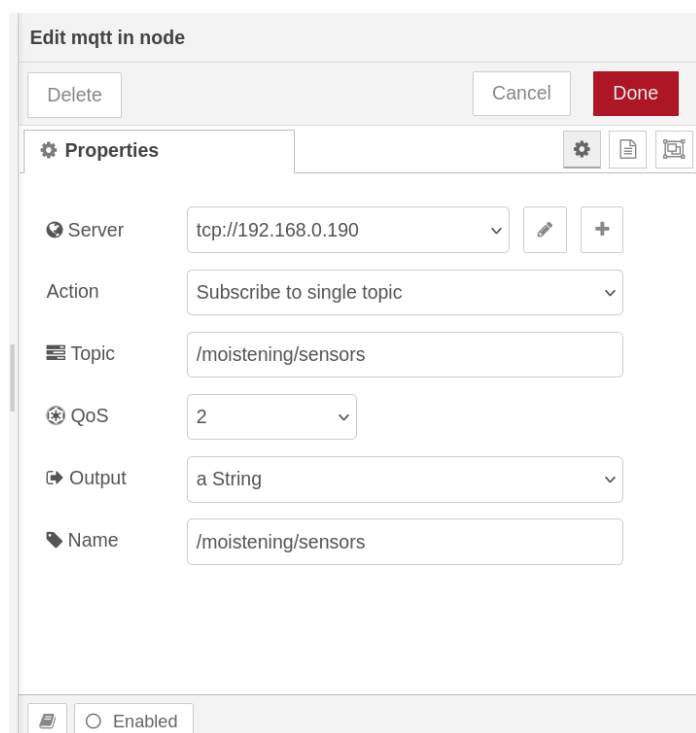


Рисунок 4.14 – Візуалізація процесу налаштування блоку ‘mqtt in’ у потоці Node-RED

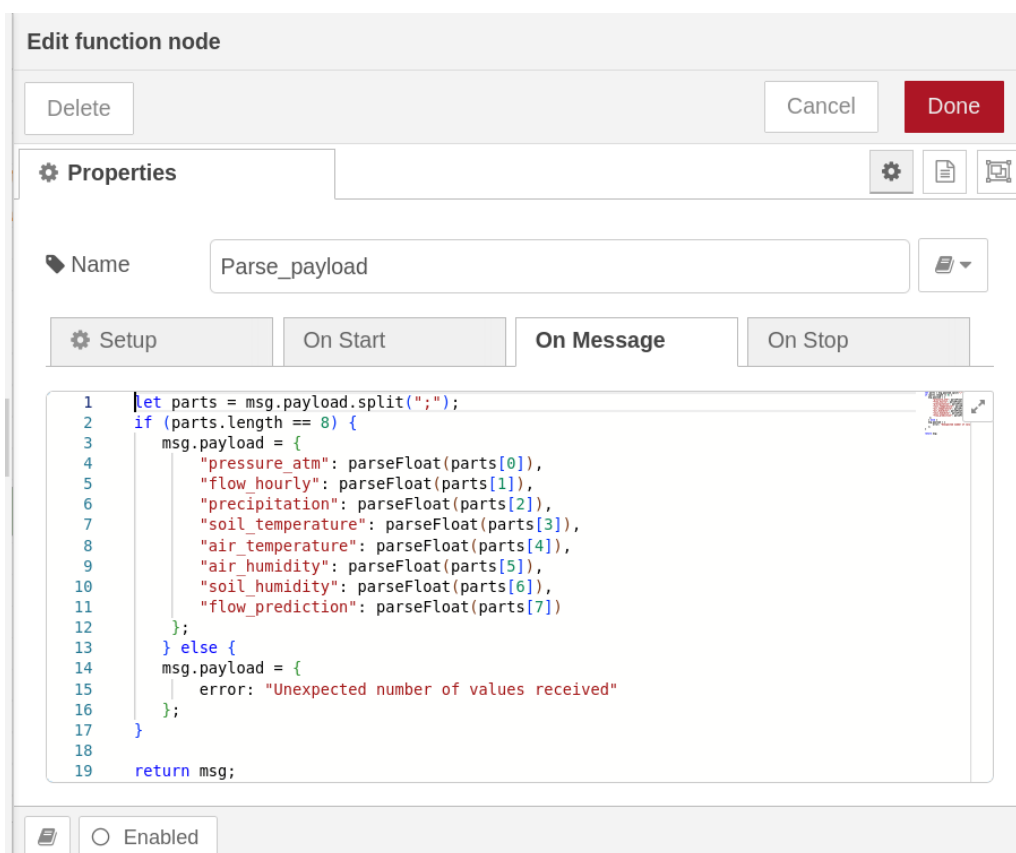


Рисунок 4.15 – Візуалізація процесу налаштування блоку ‘function’ у потоці Node-RED

Edit influxdb out node > Edit influxdb node

Delete Cancel Update

⚙ Properties

🔑 Name

🔗 Version

🌐 Host Port

🗄 Database

Рисунок 4.16 – Візуалізація процесу налаштування блоку ‘influxdb out’ у потоці Node-RED

InfluxDB [148] обрано через її високу ефективність під час зберігання та обробки часових рядів. У цьому випадку створено базу даних із назвою ‘Moistening_data’, як зазначено нижче:

```
docker exec -it influxdb influx
CREATE DATABASE Moistening_data
```

Node-RED надсилає дані у вигляді результатів вимірювань, кожне з яких містить значення, позначене міткою часу (Unix time in nanoseconds since January 1, 1970 UTC), автоматично доданою InfluxDB. Щоб перевірити, що дані записуються до бази даних, можна використати наступну послідовність команд:

```
docker exec -it influxdb influx
USE Moistening_data
show measurements
select * from moistening_data
```

Відповідний результат тестування послідовності дій, яку описано вище, наведено на рисунку 4.17.

```

admin@Ubuntu-24:~/Desktop$ docker exec -it influxdb influx
Connected to http://localhost:8086 version 1.8.10
InfluxDB shell version: 1.8.10
> USE Moistening_data
Using database Moistening_data
> show measurements
name: measurements
name
----
moistening_data
> select * from moistening_data
name: moistening_data
time                air_humidity air_temperature flow_hourly flow_prediction precipitation pressure_atm soil_humidity soil_temperature
-----
1743931436673759000 82          11.4           0.2          0.2          0          0.0002      50          12.6
1743931496673759000 81.9304     11.4056        5            5            0          0.0975      50.7349     12.6139
1743931556673759000 81.8607     11.4111        5            5            0          0.0975      51.4697     12.6279
1743931616673759000 81.7911     11.4167        5            5            0          0.0975      52.2046     12.6418
1743931676673759000 81.7214     11.4223        5            5            0          0.0975      52.9394     12.6557
1743931736673759000 81.6518     11.4279        5            5            0          0.0975      53.6743     12.6696
1743931796673759000 81.5822     11.4334        5            5            0          0.0975      54.4092     12.6836
1743931856673759000 81.5125     11.439         5            5            0          0.0975      55.144      12.6975
1743931916673759000 81.4429     11.4446        5            5            0          0.0975      55.8789     12.7114
1743931976673759000 81.3733     11.4501        5            5            0          0.0975      56.6137     12.7253

```

Рисунок 4.17 – Результат візуалізації вимірювальних даних, що записані до InfluxDB

Для графічної візуалізації техніко-функціональних параметрів поливної системи та показників ґрунтокліматичних умов вирощування, а також можливості віддаленого доступу користувачів розгорнуто програмну систему Grafana, яка підключається до бази ‘Moistening_data’ за допомогою InfluxQL [150]. Під час досліджень у Grafana створено Dashboard із наступними панелями, як показано на рисунку 4.18: графік динаміки кількості опадів (Precipitation, mm); графік динаміки температури ґрунту (Soil temperature); графік динаміки вологості ґрунту (Soil humidity, %); графік динаміки температури повітря (Air temperature); графік динаміки вологості повітря (Air humidity, %); графік динаміки фактичної витрати води (Flow, L/hour); панель із прогнозованою витратою води (Flow prediction, L/hour); панель із тиском в поливній системі (Pressure, Atm).

Під час реалізації засобів графічної інтерпретації результатів контролю показників агротехнічного процесу зволоження зернових культур передбачено, що кожна панель із графіками формує запити типу:

```
SELECT mean("value") FROM "soil_humidity" WHERE $timeFilter GROUP BY time($__interval) fill(null)
```

Portainer [145] забезпечує простий інтерфейс для керування контейнерами

Docker. Через веб-інтерфейс Portainer доступні такі можливості як: перезапуск та оновлення контейнерів; перегляд логів MQTT, Node-RED, InfluxDB; контроль ресурсів Raspberry Pi.

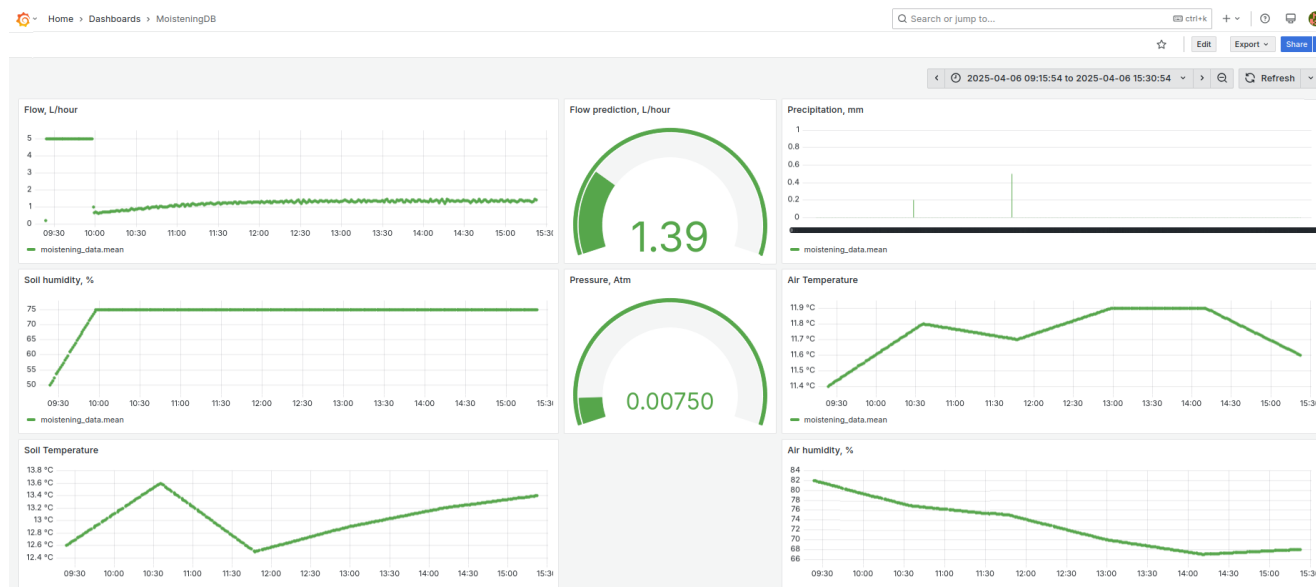


Рисунок 4.18 – Графічний інтерфейс реалізований за допомогою Grafana

Simulink-модель (див. рис. 4.10), яка працює безпосередньо на Raspberry Pi, через блок ‘MQTT Publish’ передає дані в реальному часі до брокера Mosquitto. Це забезпечує безпосередню взаємодію між програмно-обчислювальною (алгоритм предикативного контролю режимів зрошення на базі `fmincon`) та серверною частинами (збір, обробка, візуалізація, віддалений доступ користувачів) розробленої комп’ютерної технології.

На підставі досліджень зі синтезу системної організації програмно-апаратних засобів було запропоновано деталізовану структурно-функціональну організацію розробленої та досліджуваної комп’ютерної технології предикативного контролю режимів зрошення зернових культур, яка складається з інтегрованих компонентів, що спільно працюють для забезпечення ефективної прогностичної аналітики даних щодо агротехнічних процесів використання водних ресурсів під час повного циклу вирощування сільськогосподарських культур у польових умовах, як показано на рисунку 4.19 [123, 151].

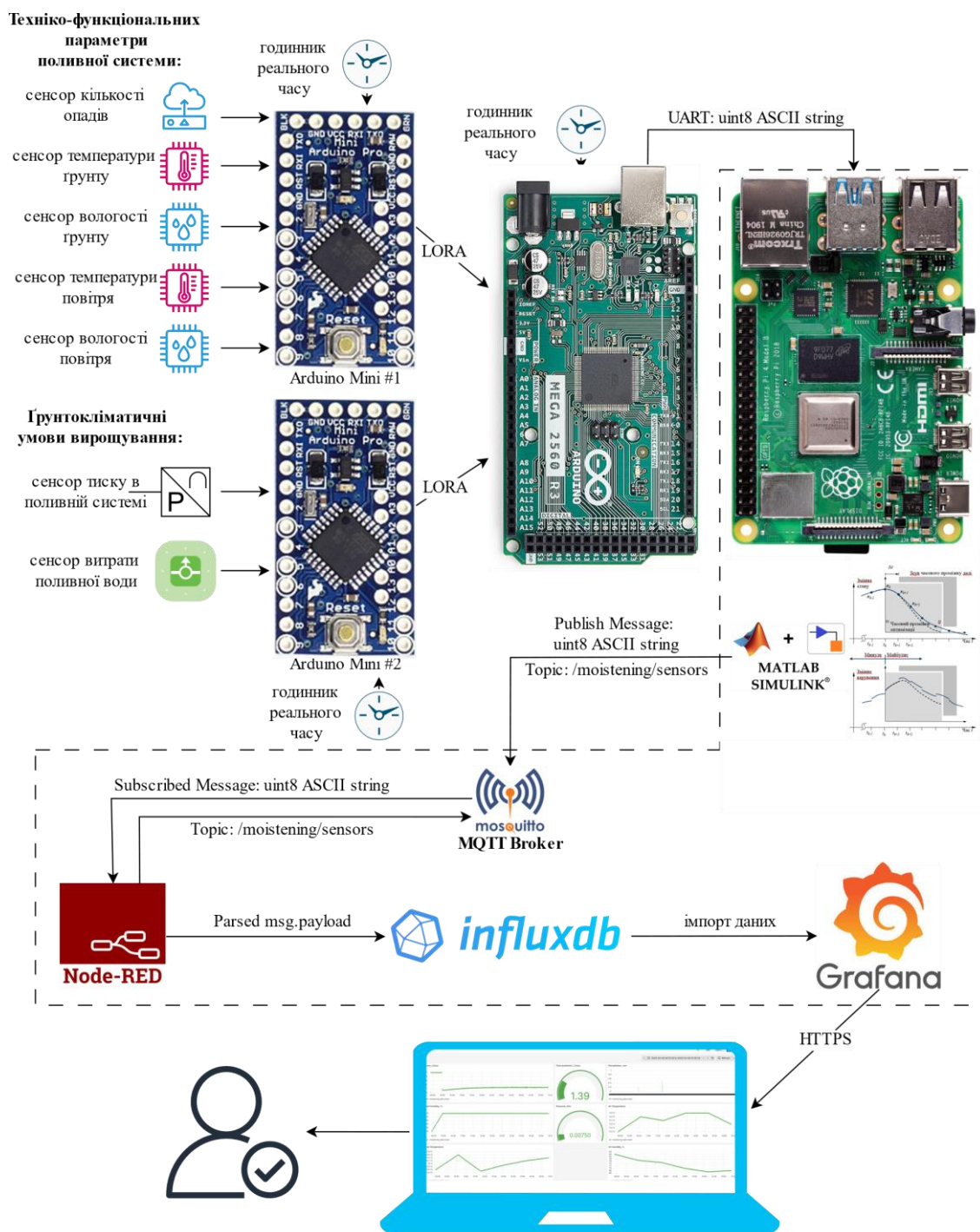


Рисунок 4.19 – Деталізована структурно-функціональна організація комп'ютерної технології предикативного контролю режимів зволоження зернових культур

Таким чином, у результаті проведених досліджень створено повноцінний серверний комплекс для автономного функціонування комп'ютерної технології предикативного контролю режимів зволоження зернових культур, що забезпечує як обробку, так і зберігання та представлення результатів у зручному форматі для кінцевого користувача. Здійснена розробка та моделювання ієрархічної

інформаційно-комунікаційної інфраструктури для агротехнічного контролю дозволили не лише апробувати ефективність інтеграції сенсорних вузлів, мікроконтролерів та засобів бездротової передачі даних у єдину комп'ютерну технологію, але й продемонстрували практичну реалізованість вбудованого інтелектуального алгоритму на основі `fmincon`. Отримані результати підтверджують доцільність застосування модульного підходу до побудови комп'ютерної технології предикативного контролю режимів зволоження зернових культур з урахуванням декомпозиції функціональних завдань за рівнями, що забезпечує її масштабованість, адаптивність та інформаційну цілісність. Проведене тестування підтвердило робастність та функціональну узгодженість між окремими компонентами, що свідчить про високий потенціал запропонованого програмно-технічного рішення для подальшого практичного впровадження в умовах аграрних підприємств із вирощування зернових культур.

4.4 Практична цінність одержаних результатів та перспективні напрямки подальших досліджень

У цій дисертаційній роботі запропоновано та реалізовано програмно-технічні рішення, комп'ютерні моделі та алгоритми побудови й функціонування комп'ютерної технології предикативного контролю режимів зволоження зернових культур, які інтегрально забезпечують наступні положення практичного ефекту:

- алгоритмічне та структурно-компонентне забезпечення досліджуваної комп'ютерної технології агротехнічного призначення;
- програмні компоненти інтегральної вбудованої мікропроцесорної статистичної обробки результатів детектування ґрунтокліматичних параметрів та техніко-функціональних характеристик поливної системи;
- програмне забезпечення мікрокомп'ютерної інтелектуальної прогнозної аналітики стану зволоження ґрунту на різних глибинах;
- Matlab-застосунок із користувацьким інтерактивним інтерфейсом задля предикативного аналізу режимів зволоження зернових культур;

– графічний інтерфейс із можливістю віддаленого доступу до результатів детектування динаміки інформативних показників стану зволоження зернових культур під час повного циклу їх вирощування;

– децентралізована архітектура програмно-технічної організації досліджуваної комп'ютерної технології агротехнічного призначення.

Одержані результати науково-прикладних досліджень цієї дисертації використано: у виробничій діяльності ДДСДС НААН України під час модернізації та оптимізації агротехнічних процесів вирощування зернових культур у агрокліматичних умовах північного степу України; у технологічних умовах ТОВ «БВС+» для оперативного планування та виконання агротехнічних процедур зрошення ґрунту під час повного циклу вирощування зернових культур; у навчальному процесі Національного технічного університету «Дніпровська політехніка» під час підготовки здобувачів вищої освіти за освітньо-науковим рівнем «Доктор філософії» за спеціальністю 122 Комп'ютерні науки; у науково-інноваційній діяльності НТУ «Дніпровська політехніка» під час виконання досліджень у рамках наукових тем: «Розвиток програмно-апаратного забезпечення інтелектуальних технологій для сталого вирощування сільськогосподарських культур у воєнний та повоєнний час (0124U000289)» та «Методи, моделі та технології обробки і аналізу даних в комп'ютеризованих системах (0124U004583)».

Результати проведеного дослідження, зокрема побудова імітаційної моделі комп'ютерної технології предикативного контролю режимів зволоження зернових культур, розробка та верифікація інтелектуального модуля на основі fmincon, а також реалізація предикативного контролю зволоження ґрунту, створюють ефективну програмно-технічну основу для подальшого розвитку цієї комп'ютерної технології в напрямі підвищення точності, надійності та ефективності децентралізованого управління агротехнологічними процесами. Враховуючи отримані результати, визначено кілька ключових напрямків подальших науково-прикладних досліджень.

Перш за все, перспективним є вдосконалення методів інтелектуального аналізу даних шляхом інтеграції архітектур штучних нейронних мереж, зокрема глибинного навчання, графових нейронних мереж та трансформерних моделей. Це дозволить покращити якість прогнозування розповсюдження вологи в різних шарах ґрунту, з урахуванням неоднорідностей різного типу, а також оптимізувати підходи до прийняття рішень в умовах високої невизначеності й складних міжпараметричних залежностей. Важливим напрямом є також врахування багатовимірної сезонності, часових затримок і впливу довготривалих кліматичних змін, що потребує розширення вхідного простору моделей за рахунок використання зовнішніх метеорологічних сервісів, супутникових даних та історичних спостережень.

Другим пріоритетним напрямком є апаратна мініатюризація та перехід від комп'ютерних моделей до прототипових макетів та створення реальних зразків вбудованих IoT-пристроїв, які адаптовано для роботи в агресивному середовищі сільськогосподарських угідь. Доцільним є також впровадження автономних засобів живлення за рахунок використання сонячних панелей, суперконденсаторів та механізмів енергозбору із навколишнього середовища.

Третім перспективним напрямом є розробка цифрових двійників агротехнічних об'єктів, що дозволить здійснювати симуляцію, оптимізацію та контроль у реальному часі з урахуванням фізичних, біологічних та економічних моделей. У цьому контексті також може бути реалізована концепція предикативного цифрового управління з використанням Model Predictive Control (MPC), де поточні дані з сенсорів будуть слугувати вхідними сигналами до прогнозної моделі, а результатом стане автоматизована рекомендація щодо режимів зрошення, внесення добрив або обробки культур.

Крім того, перспективним є напрям інтеграції розробленої технології з геоінформаційними системами (GIS) для створення просторово обґрунтованих рекомендацій щодо управління режимами зволоження. Таке поєднання дозволить сформувати карти ризику дефіциту вологи та оптимальні траєкторії дій для агрономів або автономних агротехнічних роботів.

Окремим вектором розвитку є створення програмного забезпечення користувацького рівня, зокрема мобільних застосунків, які забезпечуватимуть доступ до візуалізованих даних із полів, прогнозів, рекомендацій та аналітики. Інтеграція з хмарними сервісами дозволить реалізувати адаптовані хмарно-орієнтовані рішення для фермерських господарств різного масштабу та форм власності.

Таким чином, подальші дослідження доцільно зосередити на вдосконаленні математичних моделей поширення вологи в ґрунті, прогнозуванні, підвищенні енергоефективності апаратних рішень, створенні адаптивних систем керування з використанням предикативного аналізу, а також на забезпеченні інтеграції запропонованої технології з цифровими інструментами підтримки агрономічних рішень. Усі ці напрямки формують сервісну основу трансформації агропромислового виробництва у напрямку сталого, точного, цифрового та інтелектуального землеробства.

4.5 Висновки за четвертим розділом

У результаті досліджень цього розділу було розв'язано декілька основних завдань дисертаційного дослідження, які полягали у створенні та тестуванні імітаційних моделей побудови апаратно-програмного забезпечення досліджуваної комп'ютерної технології для оцінки її основних характеристик і параметрів, створенні та валідації комп'ютерної технології прогнозного контролю режимів зволоження зернових культур для формулювання рекомендацій з її подальшого прикладного використання і впровадження, а також аналізі отриманих результатів досліджень і обґрунтуванні перспективних напрямків розвитку створеної комп'ютерної технології. До основних науково-прикладних результатів цього розділу відносяться:

1. Реалізовано імітаційну модель підсистеми збору та мережевого обміну даними комп'ютерного контролю у середовищі Proteus, що дозволило провести тестування та валідацію мережевої взаємодії протоколів, що функціонують на

різних архітектурних рівнях досліджуваної комп'ютерної технології предикативного контролю режимів зволоження зернових культур. Верифікацію здійснено за критерієм коректного виконання алгоритмів багаторівневої агрегації, обробки та передачі даних, що дозволило об'єктивно оцінити працездатність запропонованої структурно-функціональної організації зазначеної підсистеми досліджуваної комп'ютерної технології.

2. Розроблено програмне забезпечення та імітаційну модель досліджуваної комп'ютерної технології, що реалізує децентралізовану структурно-функціональну організацію поетапних перетворень розподілених у просторі й часі даних, що характеризують режими зволоження зернових культур, а саме: збір даних щодо ґрунтокліматичних умов вирощування, збір вимірювальних даних щодо техніко-функціональних характеристик поливної системи, бездротова передача даних від мережі польових мікропроцесорних пристроїв агромоніторингу до локального мікропроцесорного пристрою з подальшою передачею даних на мікрокомп'ютерний пристрій Raspberry Pi для інтелектуальної предикативної обробки вимірювальної інформації та генерування сигналів керування виконавчими механізмами автоматизованих засобів зрошення зернових культур, збереження вимірювальної інформації до бази даних та графічна інтерпретація результатів комп'ютерного контролю з можливістю віддаленого доступу користувачів.

3. Деталізовано положення практичного ефекту від проведених досліджень із розробки комп'ютерної технології предикативного контролю режимів зволоження зернових культур, а також обґрунтовано подальші напрямки науково-прикладних досліджень із удосконалення та розвитку розробленої комп'ютерної технології, які дозволять підвищити ефективність і продуктивність агротехнічних процесів вирощування зернових культур в умовах мінливості агрокліматичних параметрів і обмеженості ресурсів за рахунок цифровізації й інтелектуалізації технологічних і виробничих процесів сільськогосподарських підприємств рослинництва відкритого ґрунту.

ВИСНОВКИ

У цій дисертаційній роботі на основі одержаних теоретичних і експериментальних результатів розв'язано актуальну науково-прикладну задачу дослідницького характеру щодо розвитку теоретичних положень і практичних напрацювань зі створення, вдосконалення та використання комп'ютерних технологій прогнозного контролю режимів зволоження зернових культур з урахуванням специфічних агрокліматичних умов, фізико-хімічних властивостей ґрунту, типів і фаз зростання вирощуваних зернових культур, а також техніко-технологічної бази провадження сільськогосподарської діяльності рослинництва на відкритому ґрунті, що дозволило сформулювати науково обґрунтовані положення з оптимізації використання водних ресурсів та підвищення ефективності агротехнологічних процесів виробництва зернової продукції. Основні науково-практичні результати дисертаційної роботи полягають у такому:

1. У результаті проведеного аналізу та логічного узагальнення сучасного стану розробок і досліджень у галузі комп'ютерного контролю режимів зволоження сільськогосподарських культур обґрунтовано перспективність і необхідність розробки та впровадження сучасних комп'ютерних технологій предикативної аналітики даних щодо режимів зволоження під час вирощування зернових культур в умовах відкритого ґрунту. Проведено ґрунтовний аналіз агрокліматичних і техніко-технологічних аспектів, що впливають на продуктивність агровиробництв із вирощування зернових культур, визначено основні фактори водоспоживання та типи культур, які зокрема релевантні для умов агровиробництв в Україні. Ці результати стали інформаційним підґрунтям для формування основної мети, дослідницьких завдань і узагальненої методології досліджень зі створення та валідації комп'ютерної технології предикативного контролю режимів зволоження зернових культур, яка спрямована на модернізацію вітчизняних підприємств агросектору.

2. Обґрунтовано структурно-алгоритмічну будову комп'ютерної технології предикативного контролю режимів зволоження зернових культур із урахуванням

вимог зонального збору, периферійної обробки та мережевої взаємодії її функціональних компонент. Запропоновано структуру, програмні й апаратні компоненти та алгоритмічне забезпечення комп'ютерної технології, яка реалізує багатозональний збір, бездротовий мережевий обмін та інтелектуальну обробку агрокліматичних і технологічних даних, що узгоджується з актуальними світовими трендами та досягненнями в галузі інтелектуальних засобів цифровізації агровиробництва у контексті системного відпрацювання етапів агрегування, трансформації, інформаційної комунікації та децентралізованої інтелектуальної обробки розподілених в просторі й часі вимірювальних даних.

3. Розроблено інформаційну та математичну моделі досліджуваної комп'ютерної технології, що реалізують повний ланцюг поетапних функціональних перетворень розподілених у просторі й часі даних і факторів, що характеризують режими зволоження зернових культур. Моделювання динаміки ґрунтової вологи під час варіювання типів ґрунту та характеристик агрокліматичних зон дозволило встановити закономірності розподілу вологи в аналізованих шарах ґрунту за різних умов: за одну годину найбільш широкий діапазон переміщення вологи в ґрунті спостерігається для чорнозему потужного від 0,17 м до 0,83 м, а найбільш вузький – для чорнозему південного від 0,26 м до 0,74 м. На підставі цього сформульовано вимоги до прецизійності, дискретності та адаптивності програмно-апаратної реалізації комп'ютерної технології. Отримані результати формалізованого опису структурно-алгоритмічної організації досліджуваної комп'ютерної технології забезпечили теоретико-прикладний базис для її подальшої розробки, тестування й валідації.

4. У результаті досліджень розроблено та доведено ефективність комп'ютерно-орієнтованого методу предикативного контролю режимів зволоження зернових культур, який ґрунтується на формалізованому описі динаміки вологи в шарах ґрунту з використанням рівняння Річардса та принципів нелінійної оптимізації. Обґрунтовано та програмно реалізовано комп'ютерну модель у середовищі Matlab & Simulink, яка відпрацьовує алгоритмічні засади запропонованого комп'ютерно-орієнтованого методу з обліком інформативних і

дестабілізуючих параметрів. Це дозволило оцінити показники ефективності стратегії автоматизованого поливу залежно від агрокліматичних умов, типу ґрунту та видів і фаз розвитку зернових культур. У результаті тестування досліджуваного методу встановлено, що він здатен прецизійно забезпечувати та підтримувати необхідний рівень відносної вологості на глибинах 0,2 м і 0,6 м, що характеризують різні вегетаційні періоди зернових культур, відповідно до встановлених значень 70 % та 75 %. Розрахунки показують, що витрати поливної води не перевищують значення 5 л/год на 1 м² площі сільськогосподарських угідь. Проведені комп'ютерні експерименти довели здатність запропонованого методу підтримувати цільові параметри вологості на аналізованих глибинах, забезпечуючи при цьому оптимізоване використання поливної води та адаптивність до мінливих умов вирощування, що свідчить про доцільність апаратно-програмної реалізації засобів предикативного контролю режимів зволоження зернових культур на основі розробленого методу.

5. Створено, протестовано та валідовано імітаційні моделі функціональних підсистем та синтезовану на їх основі деталізовану архітектуру комп'ютерної технології предикативного контролю режимів зволоження зернових культур, що дало змогу оцінити її працездатність, зокрема встановлено, що запропонована децентралізована архітектура забезпечує повний цикл функціональних перетворень: від польового збору даних до їх інтелектуального аналізу, формування оптимізованої стратегії поливу (споживання поливної води в усталеному режимі в залежності від типу ґрунту, фази вегетації зернових культур та агрокліматичного районування становить від 0,8 л/год до 1,5 л/год) та віддаленого візуального представлення результатів, що підтверджує її прикладну ефективність під час використання в умовах агровиробництва.

6. Деталізовано прикладний ефект від розробки й використання запропонованої комп'ютерної технології предикативного контролю режимів зволоження зернових культур, а також обґрунтовано доцільність подальших її досліджень, що сприятимуть підвищенню ефективності агротехнічних процесів у сфері рослинництва відкритого ґрунту.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Shaxson F., Barber R. Optimizing Soil Moisture for Plant Production. The significance of soil porosity. Rome, 2003. 107 p.
2. FAOSTAT: Food and agriculture organization of the united nations. URL: <https://www.fao.org/faostat/en/#data/QCL> (дата звернення 05.06.2024).
3. АГРОСЕПМАШ: Зернові культури – основні види, популярні сорти та умови вирощування. URL: <https://agrosepmash.ua/uk/zernovi-kulturi-osnovni-vidi-populyarni-sorti-ta-umovi-viroshhuvannya/> (дата звернення 05.06.2024).
4. Bassine F.Z., Epule T.E., Kechchour A., Chehbouni A. Recent applications of machine learning, remote sensing, and IoT approaches in yield prediction: a critical review. *Arxiv Cornell University*. 2023. Preprint. P. 1–35.
5. Boretti A., Rosa L. Reassessing the projections of the World Water Development Report. *npj Clean Water*. 2019. Vol. 2 (15). P. 1–6.
6. АГРОБІЗНЕС: Система повного забезпечення посівів вологою за умов зрошення. URL: <https://agro-business.com.ua/agro/ahronomiia-sohodni/item/16506-systema-povnoho-zabezpechennia-posiviv-volohoiu-za-umov-zroshennia.html> (дата звернення 07.06.2024).
7. KURKUL: Продуктивна волога в ґрунті: визначення запасів і поради щодо збереження. URL: <https://kurkul.com/spetsproekty/807-produktivna-vologa-v-grunti-viznachennya-zapasiv-i-poradi-schodo-zberejennya> (дата звернення 07.06.2024).
8. MANITOBA CROP ALLIANCE: Wheat And Barley Crop Water Use. URL: <https://mbcropalliance.ca/directory/production-resources/wheat-and-barley-crop-water-use/> (дата звернення 10.06.2024).
9. Incrocci L., Thompson R.B., Fernandez-Fernandez M.D., De Pascale S., Pardossi A., Stanghellini C., Roupheal Y., Gallardo M. Irrigation management of European greenhouse vegetable crops. *Agricultural Water Management*. 2020. Vol. 242. P. 1–15.
10. AGRI-FACTS: Crop Water Use and Requirements. URL:

<https://open.alberta.ca/dataset/5485851#summary> (дата звернення 15.06.2024).

11. Адаменко Т.І. Агрокліматичне зонування території України з врахуванням зміни клімату. Київ, 2014. 16 с.

12. Велика Українська Енциклопедія: Агрокліматичне районування. URL: <http://surl.li/ugazc> (дата звернення 21.06.2024).

13. АГРОНОМ Журнал: Сучасні системи зрошування. URL: <https://www.agronom.com.ua/suchasni-systemy-zroshuvannya/> (дата звернення 22.06.2024).

14. Gamal Y., Soltan A., Said L.A., Madian A.H., Radwan A.G. Smart Irrigation Systems: Overview. *IEEE Access*. 2016. Vol. 4. P. 1–13.

15. FAO: The practice of irrigation. URL: <https://www.fao.org/4/t0231e/t0231e03.htm> (дата звернення 23.06.2024).

16. Walker W.R., Skogerboe G.V. Surface Irrigation. Theory and Practice. New Jersey, 1987. 386 p.

17. Abioye E.A., Abidin M.S.Z., Mahmud M.S.A., Buyamin S., Ishak M.H.I., Abd Rahman M.K.I., Otuoze A.O., Onotu P., Ramli M.S.A. A review on monitoring and advanced control strategies for precision irrigation. *Computers and Electronics in Agriculture*. 2020. Vol. 173. P. 1–22.

18. Дяченко Г.Г., Алексєєв М.О., Кремньов В.В., Євстрат'єв М.А. Обґрунтування методів і засобів побудови інформаційних технологій комп'ютерного предикативного контролю режимів зволоження зернових культур // VI Міжнародна науково-практична інтернет-конференція «Integration of Education, Science and Business in Modern Environment: Summer Debates», 01–02 August 2024: Dnipro, 2024. С. 125–127.

19. Diachenko G., Kremnov V., Koval V., Yevstratiev M. Information analysis and systematisation of the state of the art in research and development of technologies for computer control of grain crops moistening modes. *Herald of Khmelnytskyi Nat. University. Technical Sciences*. 2024. V. 339 (4). P. 458–469.

20. Sharma P.K., Kumar D., Srivastava H.S., Patel P. Assessment of different methods for soil moisture estimation: a review. *Journal of Remote Sensing & GIS*.

2018. Vol. 9 (1). P. 57–73.

21. Li W., O’Kelly B.C., Fang K., Yang M. Briefing: Water content determinations of peaty soils using the oven-drying method. *Environmental Geotechnics*. 2019. Vol. 9 (1). P. 3–11.

22. Wang L., Qu J.J. Satellite remote sensing applications for surface soil moisture monitoring: A review. *Frontiers of Earth Science in China*. 2009. Vol. 3. P. 237–247.

23. Білінський Й.Й., Скалецька М.О. Аналіз методів та засобів вимірювання вологості сипких продуктів. *Вісник ВПІ*. 2023. Вип. 2. С. 125–134.

24. Ahmad A., Zhang Y., Nichols S. Review and evaluation of remote sensing methods for soil moisture estimation. *SPIE Reviews*. 2011. Vol. 2. P. 1–17.

25. Sudarmaji A., Gunawan B., Nugraha F., Arini N., Mulyani S. Smart Soil Moisture Control Based on IoT ESP-32 for Horticulture Cultivation in Coastal Area // The 2nd Unhas International Conference on Agricultural Technology (UICAT 2023), 25–26 Oct. 2023: Virtual Conference, 2023. P. 1–8.

26. Matula S., Batkova K., Legese W.L. Laboratory Performance of Five Selected Soil Moisture Sensors Applying Factory and Own Calibration Equations for Two Soil Media of Different Bulk Density and Salinity Levels. *Sensors*. 2016. Vol. 16 (11). P. 1–22.

27. Louki I.I., Al-Omran A.M. Calibration of Soil Moisture Sensors (ECH2O-5TE) in Hot and Saline Soils with New Empirical Equation. *Agronomy*. 2023. Vol. 13 (1). P. 1–18.

28. Kozhushko O.D., Boiko M.V., Kovbasa M.Yu., Martyniuk P.M., Stepanchenko O.M., Uvarov N.V. Field scale computer modeling of soil moisture with dynamic nudging assimilation algorithm. *MATHEMATICAL MODELING AND COMPUTING*. 2022. Vol. 9 (2). P. 203–216.

29. Vishwakarma D.K., Kumar R., Abed S.A., Al-Ansari N., Kumar A., Kushwaha N.L., Yadav D., Kumawat A., Kuriqi A., Alataway A., Dewidar A.Z., Mattar M.A. Modeling of soil moisture movement and wetting behavior under point-source trickle irrigation. *Scientific Reports*. 2023. Vol. 13 (14981). P. 1–23.

30. Lozoya C., Mendoza C., Mejia L., Quintana J., Mendoza G., Bustillos M., Arras O., Solis L. Model Predictive Control for Closed-Loop Irrigation. *IFAC Proceedings Volumes*. 2014. Vol. 47 (3). P. 4429–4434.

31. Caceres G., Millan P., Pereira M., Lozano D. Smart Farm Irrigation: Model Predictive Control for Economic Optimal Irrigation in Agriculture. *Agronomy*. 2021. Vol. 11 (9). P. 1–18.

32. Abioye A.E., Abidin M.S.Z., Mahmud M.S.A., Buyamin S., Mohammed O.O., Otuoze A.O., Oleolo I.O., Mayowa A. Model based predictive control strategy for water saving drip irrigation. *Smart Agricultural Technology*. 2023. Vol. 4. P. 1–15.

33. Nadhori I.U., Al Rasyid M.U.H., Ahsan A.S., Mauludi B.R. Internet of Things Based Intelligent Water Management System for Plants // Proceedings of the 2nd International Conference on Smart and Innovative Agriculture (ICoSIA 2021), 03–04 Nov. 2021: Yogyakarta, 2021. P. 331–336.

34. Ghazouani M., Azzouazi M., Lamhour M.A. A drip irrigation prediction system in a greenhouse based on long short-term memory and connected objects. *MATHEMATICAL MODELING AND COMPUTING*. 2023. Vol. 10 (2). P. 524–533.

35. Tace Y., Elfilali S., Tabaa M., Leghris C. Implementation of smart irrigation using IoT and Artificial Intelligence. *MATHEMATICAL MODELING AND COMPUTING*. 2023. Vol. 10 (2). P. 575–582.

36. Лактіонов І.С., Вовна О.В., Бережний М.О. Програмно-апаратне забезпечення комп'ютерно-інтегрованої системи контролю і керування вологістю тепличного ґрунту на базі нечіткої логіки. *Науково-виробничий журнал «Електромеханічні і енергозберігаючі системи»*. 2021. № 4 (56). С. 68 – 79.

37. Бережний М.О., Лактіонов І.С., Лебедев В.А. Інформаційно-вимірювальна система моніторингу й керування автоматичним поливом рослин у теплицях на базі нечіткої логіки. *Перспективні технології та прилади*. 2020. № 16. С. 6–13.

38. Лактіонов І.С., Лебедев В.А., Лактіонова Г.А., Бережний М.О. Обґрунтування плану експериментальних досліджень комп'ютеризованої системи

моніторингу та керування зволоженням тепличних культур. *Наукові праці Донецького національного технічного університету. Серія: Обчислювальна техніка та автоматизація*. 2019. № 1 (32). С. 103–113.

39. Ng I.C.L., Wakenshaw S.Y.L. The Internet-of-Things: Review and research directions. *International Journal of Research in Marketing*. 2017. Vol. 34 (1). P. 3–21.

40. He Y., He J., Wen H. The challenges of IoT-based applications in high-risk environments, health and safety industries in the Industry 4.0 era using decision-making approach. *Journal of Innovation & Knowledge*. 2023. Vol. 8 (2). P. 1–12.

41. Liu Y., Ma X., Shu L., Hancke G.P., Abu-Mahfouz A.M. From Industry 4.0 to Agriculture 4.0: Current Status, Enabling Technologies, and Research Challenges. *IEEE Transactions on Industrial Informatics*. 2021. Vol. 17 (6). P. 4322–4334.

42. Niedbala G., Piekutowska M., Hara P. New Trends and Challenges in Precision and Digital Agriculture. *Agronomy*. 2023. Vol. 13 (8). P. 1–7.

43. Національна економічна стратегія 2030. URL: <https://nes2030.org.ua/> (дата звернення 07.07.2024).

44. Ndjuluwa L.N.P., Adebisi J.A., Dayoub M. Internet of Things for Crop Farming: A Review of Technologies and Applications. *Commodities*. 2023. Vol. 2 (4). P. 367–381.

45. Xu J., Gu B., Tian G. Review of agricultural IoT technology. *Artificial Intelligence in Agriculture*. 2022. Vol. 6. P. 10–22.

46. Recommendation ITU-T Y.2060. URL: https://www.itu.int/rec/dologin_pub.asp?lang=s&id=T-REC-Y.2060-201206-I!!PDF-E&type=items (дата звернення 12.07.2024).

47. El Hakim A. Internet of Things (IoT) System Architecture and Technologies. *White Paper*. 2018. P. 1–5.

48. Жураковський Б.Ю., Зенів І.О. Технології інтернету речей. Навчальний посібник [Електронний ресурс]: навчальний посібник для студентів спеціальності 126 Інформаційні системи та технології, спеціалізації «Інформаційне забезпечення робототехнічних систем». Київ, 2021. 271 с.

49. Гіоргізова-Гай В.ІІІ., Шеренковський А.О. Шлюз у системі інтернету

речей. *Вчені записки ТНУ імені В.І. Вернадського. Серія: технічні науки*. 2019. Том 30 (69) Ч. 1 № 1. С. 31–37.

50. Web Thing Model: Standards and Specifications. URL: <https://webofthings.org/standards/> (дата звернення 26.07.2024).

51. W3: Web of Thing Model. URL: <https://www.w3.org/Submission/2015/SUBM-wot-model-20150824/> (дата звернення 29.07.2024).

52. Ojha T., Misra S., Raghuwanshi N.S. Internet of Things for Agricultural Applications: The State of the Art. *IEEE Internet of Things Journal*. 2021. Vol. 8 (14). P. 10973–10997.

53. Pullo S., Pareschi R., Piantadosi V., Salzano F., Carlini R. Integrating IOTA's Tangle with the Internet of Things for Sustainable Agriculture: A Proof-of-Concept Study on Rice Cultivation. *Informatics*. 2024. Vol. 11 (1). P. 1–20.

54. Mao Y., Liu S., Nahar J., Liu J., Ding F. Regulation of soil moisture using zone model predictive control. *IFAC-PapersOnLine*. 2018. Vol. 51 (18). P. 762–767.

55. Caceres G.B., Millan P., Pereira M., Lozano D. Economic Model Predictive Control for Smart and Sustainable Farm Irrigation // 2021 European Control Conference (ECC), 29 Jun. – 02 Jul. 2021: Delft, 2021. P. 1255–1260.

56. Huang Z., Liu J., Huang B. Model predictive control of agro-hydrological systems based on a two-layer neural network modeling framework. *International Journal of Adaptive Control and Signal Processing*. 2023. Vol. 37 (6). P. 1536–1558.

57. Стеценко А.І. Автоматизоване керування вологозабезпеченістю сільськогосподарських культур при підґрунтового зволоженні з врахуванням збурень: дис. ...канд. техн. наук: 05.13.07. Рівне, 2017. 323 с.

58. Лактіонов І.С. Комп'ютеризована інформаційно-вимірювальна система фізичних параметрів ґрунтів промислових теплиць з компенсацією дестабілізуючих впливів: дис. ... канд. техн. наук: 05.13.05. Красноармійськ, 2015. 226 с.

59. Грицик А.Я., Клушин Ю.С. Кіберфізична система автономного поливу з дистанційним управлінням. *COMPUTER SYSTEMS AND NETWORKS*. 2021. Вип. 3 (1). С. 38–46.

60. Литвин Ю.О., Строкань О.В. Система поливу ґрунту на платформі мікроконтролера Arduino. *Системи обробки інформації*. 2019. Вип. 2 (157). С. 90–95.
61. Xin L., Guang L., Ming Y. Design on the Precise Regulating Control System for Moisture and Nutrient of Plants Based on PLC. *Physics Procedia*. 2012. Vol. 33. P. 429–436.
62. Luo L., Li Y., Guo F., Huang Z., Wang S., Zhang Q., Zhang Z., Yao Y. Research on robust inversion model of soil moisture content based on GF-1 satellite remote sensing. *Computers and Electronics in Agriculture*. 2023. Vol. 213. P. 1–17.
63. Anello M., Bittelli M., Bordon M., Laurini F., Meisina C., Riani M., Valentino R. Robust Statistical Processing of Long-Time Data Series to Estimate Soil Water Content. *Mathematical Geosciences*. 2024. Vol. 56. P. 3–26.
64. Ahmed Z., Gui D., Murtaza G., Yunfei L., Ali S. An Overview of Smart Irrigation Management for Improving Water Productivity under Climate Change in Drylands. *Agronomy*. 2023. Vol. 13 (8). P. 1–25.
65. Моделювання та оптимізація систем: підручник / Дубовой В.М., Квєтний Р.Н., Михальов О.І., Усов А.В. Вінниця: ПП «ТД«Еднльвейс», 2017. 804 с.
66. Elnemr M. Evaluation of an automatic control system with drip irrigation system showing poor hydraulic performance. *INMATEH Agricultural Engineering*. 2020. Vol. 60 (1). P. 155–162.
67. Kalandarov P., Kutlimurotov Zh., Eshchanova G., Mustafakulov A. Automated control system of drip irrigation and mathematical modeling. *IOP Conf. Ser.: Earth Environ. Sci.* 2023. Vol. 1142. P. 1–11.
68. Кремньов В.В., Коваль В.С., Євстратьєв М.А. Компонентно-структурне забезпечення комп'ютерної технології предикативного контролю агротехнічних процесів вирощування зернових культур // Міжнародна науково-практична конференція «Теоретико-практичні аспекти розвитку науки, освіти, технологій і суспільства», 10 серпня 2024: Кременчук, 2024. С. 45–47.
69. Musa P., Sugeru H., Wibowo E.P. Wireless Sensor Networks for Precision

Agriculture: A Review of NPK Sensor Implementations. *Sensors*. 2024. Vol. 24 (1):51. P. 1–14.

70. Aqeel-ur-Rehman, Abu Zafar Abbasi, Noman Islam, Zubair Ahmed Shaikh. A review of wireless sensors and networks' applications in agriculture. *Computer Standards & Interfaces*. 2014. Vol. 36 (2). P. 263–270.

71. Et-taibi B., Riduan Abid M., Boufounas El-M., Morchid A., Bourhnane S., Abu Hamed T., Benhaddou D. Enhancing water management in smart agriculture: A cloud and IoT-Based smart irrigation system. *Results in Engineering*. 2024. Vol. 22. P. 1–15.

72. Шаматрін А.М., Кремньов В.В. Розробка архітектури комп'ютерної системи адаптивного контролю зрошення ґрунту // XII Міжнародна науково-технічна конференція студентів, аспірантів та молодих вчених «Молодь: наука та інновації», 13–15 листопада 2024: Дніпро, 2024. С. 146–147.

73. Sabu D., Alagumariappan P., Sankaran V., Pittu P.S.K.R. Design and Development of Internet of Things-Based Smart Sensors for Monitoring Agricultural Lands. *Engineering Proceedings*. 2023. Vol. 58 (1):13. P. 1–6.

74. Vilas Bhau G., Gautamkumar Deshmukh R., Rajasanthosh Kumar T., Chowdhury S., Sesharao Y., Abilmazhinov Y. IoT based solar energy monitoring system. *Materials Today: Proceedings*. 2023. Vol. 80 (3). P. 3697–3701.

75. Kour K., Gupta D., Gupta K., Anand D., Elkamchouchi D.H., Pérez-Oleaga C.M., Ibrahim M., Goyal N. Monitoring Ambient Parameters in the IoT Precision Agriculture Scenario: An Approach to Sensor Selection and Hydroponic Saffron Cultivation. *Sensors*. 2022. Vol. 22 (22). P. 1–25.

76. Сьомкіна Т.В., Згурська О.М. Роль інформаційного забезпечення у диверсифікаційній діяльності підприємств АПК. *АГРОСВІТ*. 2019. № 21. С. 8–14.

77. Comegna A., Hassan S.B.M., Coppola A. Development and Application of an IoT-Based System for Soil Water Status Monitoring in a Soil Profile. *Sensors*. 2024. Vol. 24. P. 1–19.

78. Mohankumar A., Gowtham R. Revolutionizing Automated Agriculture: A Brief Overview of an Advanced Smart Agriculture System Using Arduino UNO. *Irish*

Interdisciplinary Journal of Science & Research. 2024. Vol. 8 (1). P. 13–23.

79. Soussi A., Zero E., Sacile R., Trincherio D., Fossa M. Smart Sensors and Smart Data for Precision Agriculture: A Review. *Sensors*. 2024. Vol. 24. P. 1–32.

80. Triantafyllou A., Sarigiannidis P., Bibi S. Precision Agriculture: A Remote Sensing Monitoring System Architecture. *Information*. 2019. Vol. 10 (11). P. 1–25.

81. Terence S., Immaculate J., Raj A., Nadarajan J. Systematic Review on Internet of Things in Smart Livestock Management Systems. *Sustainability*. 2024. Vol. 16 (10). P. 1–37.

82. Oudah M., Al-Naji A., AL-Janabi T.Y., Namaa D.S., Chahl J. Automatic Irrigation System Based on Computer Vision and an Artificial Intelligence Technique Using Raspberry Pi. *Automation*. 2024. Vol. 5 (2). P. 90–105.

83. Dai Q., Chen Z., Wu G., Li Z., Lv S., Huang W. LoRa Communication Quality Optimization on Agriculture Based on the PHY Anti-Frame Loss Mechanism. *Agriculture*. 2024. Vol. 14 (3). P. 1–19.

84. Kuo Y.-W., Wen W.-L., Hu X.-F., Shen Y.-T., Miao S.-Y. A LoRa-Based Multisensor IoT Platform for Agriculture Monitoring and Submersible Pump Control in a Water Bamboo Field. *Processes*. 2021. Vol. 9 (5). P. 1–17.

85. Rivera Guzmán E.F., Mañay Chochos E.D., Chiliquinga Malliquinga M.D., Baldeón Egas P.F., Toasa Guachi R.M. LoRa Network-Based System for Monitoring the Agricultural Sector in Andean Areas: Case Study Ecuador. *Sensors*. 2022. Vol. 22 (18). P. 1–24.

86. Panchalaiah N., Nelson Emmanuel J., Suraj Kamal S., Lakshmi Narayana C.V. IoT Based Smart Farming Using Thingspeak and MATLAB. *Lecture Notes in Electrical Engineering*. 2021. Vol. 698. P. 1273–1295.

87. Mansour M., Gamal A., Ahmed A.I., Said L.A., Elbaz A., Herencsar N., Soltan A. Internet of Things: A Comprehensive Overview on Protocols, Architectures, Technologies, Simulation Tools, and Future Directions. *Energies*. 2023. Vol. 16 (8). P. 1–39.

88. Deniziak S., Płaza M., Arcab Ł. Approach for Designing Real-Time IoT Systems. *Electronics*. 2022. Vol. 11 (24). P. 1–21.

89. Яремко С., Кузьміна О. Напрямки розвитку Інтернету речей в системах управління складними пристроями. *Вісник Хмельницького національного університету. Економічні науки*. 2023. №1 (314). С. 149–153.

90. Bangui H., Rakrak S., Raghay S., Buhnova B. Moving to the Edge-Cloud-of-Things: Recent Advances and Future Research Directions. *Electronics*. 2018. Vol. 7 (11). P. 1–31.

91. Pozzebon A. Edge and Fog Computing for the Internet of Things. *Future Internet*. 2024. Vol. 16 (3). P. 1–2.

92. Томашевський В.М. Моделювання систем. Київ: Видавнича група BHV, 2005. 352 с.

93. Яровенко А. Інформаційна модель об'єкту дослідження в навчально-тренувальних задачах. *Наукові записки. Серія: Проблеми методики фізико-математичної і технологічної освіти*. 2015. Т. 3, № 8. С. 198–202.

94. Rawlings J.B., Mayne D.Q., Diehl M.M. Model Predictive Control: Theory, Computation, and Design 2nd Edition. Madison: Nob Hill Publishing, 2017. 770 p.

95. PESSL INSTRUMENTS: METOS. URL: <https://metos.global/ua/> (дата звернення 01.08.2024).

96. Laktionov I., Diachenko G., Koval V., Yevstratiev M. Computer-Oriented Model for Network Aggregation of Measurement Data in IoT Monitoring of Soil and Climatic Parameters of Agricultural Crop Production Enterprises. *Baltic Journal of Modern Computing*. 2023, Vol. 11 (3). P. 500–522.

97. Kaiwartya O., Abdullah A.H., Cao Y., Raw R.S., Kumar S., Lobiyal D.K., Isnin I.F., Liu X., Shah R.R. T-MQM: Testbed-Based Multi-Metric Quality Measurement of Sensor Deployment for Precision Agriculture – A Case Study. *IEEE Sensors Journal*. 2016. Vol. 16 (23). P. 8649–8664.

98. Amiri A. Optimal bandwidth allocation with bandwidth reservation and adaptation in wireless communication networks. *International Journal of Computer Networks & Communications*. 2016. Vol. 8 (1). P. 21–33.

99. Левкін А.В., Белов В.С. Оцінка пропускної здатності бездротового каналу стандартів IEEE802.11 за використання протоколів IPV4 та IPV6. *Вісник*

Вінницького політехнічного інституту. 2019. № 1. С. 92–100.

100. Лозовіцький П.С. Водні та хімічні меліорації ґрунтів. Навчальний посібник. Київ: Видавничо-поліграфічний центр “Київський університет”, 2010. 276 с.

101. Таврійський державний агротехнологічний університет імені Дмитра Моторного: Лекція. Водні властивості та водний режим ґрунту. URL: <http://www.tsatu.edu.ua/ros1/wp-content/uploads/sites/20/lekcija-9.vodni-vlastyvosti-ta-vodnyj-rezhym-hruntu.pdf> (дата звернення 25.07.2024).

102. Дяченко Г., Кремньов В. Математичне та комп’ютерне моделювання процесу комп’ютеризованого предикативного контролю режимів зрошення ґрунту під час вирощування зернових культур. *Вимірювальна та обчислювальна техніка в технологічних процесах*. 2024. № 3. С. 136–141.

103. Tracy F.T. Analytical and Numerical Solutions of Richards’ Equation with Discussions on Relative Hydraulic Conductivity. *Hydraulic Conductivity – Issues, Determination and Applications*. InTech, 2011. P. 203–222.

104. Колесников В.А., Ляшко С.І. Стійкість розв’язків рівняння Річардса–Клюта. *Доповіді Національної академії наук України*. 2023. № 6. С. 12–18.

105. Солоня О.В., Ковбаса В.П. Обґрунтування параметрів робочих органів для укладання внутрішньогрунтових зрошувачів: монографія. Вінниця, 2020. 155 с.

106. Brady N.C., Weil R.R. The Nature and Properties of Soils: 14th edition. Columbus: Pearson Education, 2008. 965 p.

107. Allen R.G., Pereira L.S., Raes D., Smith M. Crop Evapotranspiration – Guidelines for Computing Crop Water Requirements. Rome: FAO, 1998. 300 p.

108. EOS DATA ANALYTICS: Евапотранспірація як процес та методи її вимірювання. URL: <https://eos.com/uk/blog/evapotranspiratsiia/> (дата звернення 31.07.2024).

109. Карти України: Фільтрація ґрунтів. URL: <https://geomap.land.kiev.ua/soil-6.html> (дата звернення 31.07.2024).

110. Велика Українська Енциклопедія: Аерація ґрунту. URL:

https://vue.gov.ua/Аерація_грунту (дата звернення 31.07.2024).

111. Data Science Africa: Tonyloi I. Understanding Cost Functions and Their Role in Measuring the Accuracy of Machine Learning Models. URL: <https://datascienceafrica.medium.com/understanding-cost-functions-and-their-role-in-measuring-the-accuracy-of-machine-learning-models-63ae4f7d03c5> (дата звернення: 18.03.2025).

112. Boggs P.T., Tolle J.W. Sequential Quadratic Programming. *Acta Numerica*. 1995. Vol. 4. P. 1–51.

113. MathWorks – Maker of MATLAB and Simulink: Linear Inequality Constraint. URL: <https://www.mathworks.com/help/optim/ug/fmincon.html> (дата звернення: 19.03.2025).

114. IBM – United States: Rational Software Architect. URL: <https://www.ibm.com/docs/en/rational-soft-arch/9.7.0?topic=diagrams-use-case> (дата звернення: 20.03.2025).

115. Кремньов В., Дяченко Г. Комп'ютеризований метод оптимізації зрошення сільськогосподарських культур на основі предикативного контролю вологості ґрунту. *Вимірювальна та обчислювальна техніка в технологічних процесах*. 2025. № 1. С. 310–315.

116. Алексєєв М.О., Кремньов В.В. Алгоритмічне забезпечення комп'ютеризованого методу предикативного контролю вологості ґрунту // XV Міжнародна науково-технічна конференція аспірантів та молодих вчених «Наукова весна», 26–28 березня 2025: Дніпро, 2025. С. 194 – 195.

117. IBM Developer: The UML 2 class diagram. URL: <https://developer.ibm.com/articles/the-class-diagram/> (дата звернення: 21.03.2025).

118. Nourildean S.W., Hassib M.D., Mohammed Y.A. Internet of things based wireless sensor network: a review. *Indonesian Journal of Electrical Engineering and Computer Science*. 2022. Vol. 27 (1). P. 246–261.

119. Soparia J., Bhatt N. A Survey on Comparative Study of Wireless Sensor Network Topologies. *International Journal of Computer Applications*. 2014. Vol. 87 (1). P. 40–43.

120. Aleksieiev M., Kremnov V. Results of synthesis of a simulation-based computer technology for predictive control of grain crop moisture modes // XX Міжнародна конференція з проблем використання інформаційних технологій в освіті, науці та промисловості № 10 (ч. 2), 05 грудня 2025: Дніпро, 2025. С. 4–7.

121. The Things Network: What are LoRa and LoRaWAN. URL: <https://www.thethingsnetwork.org/docs/lorawan/what-is-lorawan/> (дата звернення: 02.04.2025).

122. Кремньов В., Шаматрін А. Імітаційна модель системи комп'ютерного контролю технологічних процесів аграрних виробництв. *Information Technology: Computer Science, Software Engineering and Cyber Security*. 2024. Вип. 2. С. 68–78.

123. Кремньов В.В. Результати комп'ютерного експерименту з архітектурної інтеграції апаратно-програмних компонент багаторівневої трансформації вимірюваних даних предикативного контролю вологості ґрунту. *Наукові праці ДонНТУ. Серія: «Інформатика, кібернетика та обчислювальна техніка»*. 2025. № 1 (40). С. 89–96.

124. PCB Design and Circuit Simulator Software – Proteus: EDA for Education - Learn how Proteus is used to teach Electronics. URL: <https://www.labcenter.com/education/> (дата звернення: 04.04.2025).

125. The Electronics: Singh S. Arduino Rf module simulation in proteus. URL: <https://www.theelectronics.co.in/2020/11/arduino-rf-module-simulation-proteus.html> (дата звернення: 04.04.2025).

126. Arduino – Home: Software. URL: <https://www.arduino.cc/en/software> (дата звернення: 04.04.2025). – Назва з екрана.

127. MathWorks – Maker of MATLAB and Simulink: MATLAB Online Versions. URL: <https://www.mathworks.com/products/matlab-online/matlab-online-versions.html> (дата звернення: 05.04.2025).

128. Matlab Help Center: Simulink Support Package for Raspberry Pi Hardware. URL: <https://www.mathworks.com/matlabcentral/fileexchange/40313-simulink-support-package-for-raspberry-pi-hardware> (дата звернення: 05.04.2025).

129. Matlab Help Center: Code Generation for Optimization Basics. URL:

<https://www.mathworks.com/help/optim/ug/code-generation-for-optimization.html>
(дата звернення: 05.04.2025).

130. Matlab Help Center: Serial Read. URL:
https://www.mathworks.com/help/simulink/supportpkg/raspberrypi_ref/serialread.html
(дата звернення: 07.04.2025).

131. Matlab Help Center: Bit Concat. URL:
<https://www.mathworks.com/help/hdlcoder/ref/bitconcat.html> (дата звернення:
07.04.2025).

132. Matlab Help Center: Float Typecast. URL:
<https://www.mathworks.com/help/hdlcoder/ref/floattypecast.html> (дата звернення:
07.04.2025).

133. Matlab Help Center: Data Type Conversion. URL:
<https://www.mathworks.com/help/simulink/slref/datatypeconversion.html> (дата
звернення: 07.04.2025).

134. MQTT.org: MQTT – The Standard for IoT Messaging. URL:
<https://mqtt.org/> (дата звернення: 07.04.2025).

135. Matlab Help Center: MQTT Publish. URL:
[https://www.mathworks.com/help/simulink/supportpkg/raspberrypi_ref/mqttpublish.ht](https://www.mathworks.com/help/simulink/supportpkg/raspberrypi_ref/mqttpublish.html)
[ml](https://www.mathworks.com/help/simulink/supportpkg/raspberrypi_ref/mqttpublish.html) (дата звернення: 07.04.2025).

136. Matlab Help Center: Manual Switch. URL:
<https://www.mathworks.com/help/simulink/slref/manualswitch.html> (дата звернення:
07.04.2025).

137. MathWorks – MATLAB & Simulink: Embedded Coder. URL:
<https://www.mathworks.com/products/embedded-coder.html> (дата звернення:
07.04.2025).

138. MathWorks – MATLAB & Simulink: Simulink Coder. URL:
<https://www.mathworks.com/products/simulink-coder.html> (дата звернення:
07.04.2025).

139. Matlab Help Center: MATLAB Function. URL:
<https://www.mathworks.com/help/simulink/slref/matlabfunction.html> (дата звернення:

07.04.2025).

140. Matlab Help Center: Level-2 MATLAB S-Function. URL: <https://www.mathworks.com/help/simulink/slref/level2matlabsfunction.html> (дата звернення: 07.04.2025).

141. Matlab Help Center: TLC Files. URL: <https://www.mathworks.com/help/rtw/tlc/tlc-files.html> (дата звернення: 07.04.2025).

142. IBM – United States: IBM. What Is Edge Computing. URL: <https://www.ibm.com/think/topics/edge-computing> (дата звернення: 08.04.2025).

143. Akhtar M.N., Shaikh A.J., Khan A., Awais H., Bakar E.A., Othman A.R. Smart Sensing with Edge Computing in Precision Agriculture for Soil Assessment and Heavy Metal Monitoring: A Review. *Agriculture*. 2021. Vol. 11 (6). P. 1–31.

144. GitHub Pages: Getting Started – IOTstack. URL: https://sensorsiot.github.io/IOTstack/Basic_setup/ (дата звернення: 08.04.2025).

145. GitHub Pages: Portainer CE. URL: <https://sensorsiot.github.io/IOTstack/Containers/Portainer-ce/> (дата звернення: 08.04.2025).

146. GitHub Pages: Mosquitto. URL: <https://sensorsiot.github.io/IOTstack/Containers/Mosquitto/> (дата звернення: 08.04.2025).

147. GitHub Pages: Node-RED. URL: <https://sensorsiot.github.io/IOTstack/Containers/Node-RED/> (дата звернення: 08.04.2025).

148. GitHub Pages: InfluxDB. URL: <https://sensorsiot.github.io/IOTstack/Containers/InfluxDB/> (дата звернення: 08.04.2025).

149. GitHub Pages: Grafana. URL: <https://sensorsiot.github.io/IOTstack/Containers/Grafana/> (дата звернення: 08.04.2025).

150. InfluxData Documentation: Influx Query Language (InfluxQL). URL: https://docs.influxdata.com/influxdb/v1/query_language/ (дата звернення: 08.04.2025).

151. Алексєєв М.О., Дяченко Г.Г., Кремньов В.В. Результати розробки серверного інфокомунікаційного забезпечення комп'ютерної технології прогнозного агроконтролю // XV Міжнародна науково-практична конференція «Комплексне забезпечення якості технологічних процесів та систем», 22–23 травня 2025: Чернігів, 2025. С. 290 – 292.

ДОДАТОК А

Список публікацій здобувача за темою дисертації

Наукові праці, в яких опубліковано основні наукові результати:

1. Кремньов В.В. Результати комп'ютерного експерименту з архітектурної інтеграції апаратно-програмних компонент багаторівневої трансформації вимірюваних даних предикативного контролю вологості ґрунту. *Наукові праці Донецького національного технічного університету. Серія: «Інформатика, кібернетика та обчислювальна техніка»*. 2025. № 1 (40). С. 89–96. doi.org/10.31474/1996-1588-2025-1-40-89-96. (Стаття в науковому фаховому періодичному виданні України).

2. Кремньов В., Дяченко Г. Комп'ютеризований метод оптимізації зрошення сільськогосподарських культур на основі предикативного контролю вологості ґрунту. *Вимірювальна та обчислювальна техніка в технологічних процесах*. 2025. № 1. С. 310–315. doi.org/10.31891/2219-9365-2025-81-38. (Стаття в науковому фаховому періодичному виданні України. Особистий внесок здобувача: локалізація задач дослідження, розробка та тестування користувацького інтерфейсу щодо реалізації досліджуваного методу оптимізації зрошення, розробка Use-case та UML діаграм, обґрунтування висновків. Внесок Дяченка Г.: формулювання підходів і обґрунтування методики досліджень, уточнення термінології в тексті статті).

3. Кремньов В., Шаматрін А. Імітаційна модель системи комп'ютерного контролю технологічних процесів аграрних виробництв. *Information Technology: Computer Science, Software Engineering and Cyber Security*. 2024. Вип. 2. С. 68–78. doi.org/10.32782/IT/2024-2-9. (Стаття в науковому фаховому періодичному виданні України. Особистий внесок здобувача: обґрунтування мети і формулювання задач досліджень, синтез структури досліджуваної системи, створення та тестування комп'ютерної моделі системи, аналіз отриманих результатів і обґрунтування висновків. Внесок Шаматріна А.: оптимізація програмного коду, створення графічного матеріалу).

4. Дяченко Г., Кремньов В. Математичне та комп'ютерне моделювання процесу комп'ютеризованого предикативного контролю режимів зрошення ґрунту під час вирощування зернових культур. *Вимірювальна та обчислювальна техніка в технологічних процесах*. 2024. № 3. С. 136–141. doi.org/10.31891/2219-9365-2024-79-18. (Стаття в науковому фаховому періодичному виданні України. Особистий внесок здобувача: локалізація задач дослідження, розробка та тестування програмного забезпечення мовою Python щодо дослідження динамічних процесів розповсюдження вологи в ґрунті, аналіз отриманих результатів і обґрунтування висновків. Внесок Дяченка Г.: уточнення проблеми дослідження, обґрунтування підходів досліджень, редагування термінології в тексті статті).

5. Diachenko G., Kremnov V., Koval V., Yevstratiev M. Information analysis

and systematisation of the state of the art in research and development of technologies for computer control of grain crops moistening modes. *Herald of Khmelnytskyi Nat. University. Technical Sciences*. 2024. V. 339 (4). P. 458–469. doi.org/10.31891/2307-5732-2024-339-4-68. (Стаття в науковому фаховому періодичному виданні України. Особистий внесок здобувача: проведення бібліографічного пошуку, аналіз і систематизація результатів бібліографічних досліджень зі створення комп'ютерних технологій та інтелектуальних алгоритмів контролю вологості ґрунту, графічне оформлення, формулювання висновків. Внесок Дяченка Г.: уточнення проблеми дослідження, аналіз одержаних результатів і обґрунтування перспектив подальших досліджень. Внесок Ковалю В.: критеріальний відбір інформаційних джерел та їх апіорний аналіз. Внесок Євстрат'єва М.: редагування та структуризація тексту статті).

Опубліковані праці апробаційного характеру:

6. Aleksieiev M., Kremnov V. Results of synthesis of a simulation-based computer technology for predictive control of grain crop moisture modes // XX Міжнародна конференція з проблем використання інформаційних технологій в освіті, науці та промисловості № 10 (частина 2), 05 грудня 2025: Дніпро, 2025. С. 4–7. URL: https://pzks.nmu.org.ua/ua/science/conf2025_2.pdf (Тези доповіді. Особистий внесок здобувача: розробка комп'ютерної технології та підходів до її тестування, аналіз отриманих результатів і формулювання висновків. Внесок Алексєєва М.: постановка проблеми досліджень).

7. Алексєєв М.О., Дяченко Г.Г., Кремньов В.В. Результати розробки серверного інфокомунікаційного забезпечення комп'ютерної технології прогнозного агроконтролю // XV Міжнародна науково-практична конференція «Комплексне забезпечення якості технологічних процесів та систем»: Том 2, 22–23 травня 2025: Чернівці, 2025. С. 290 – 292. URL: https://drive.google.com/file/d/1LZk8Efz_0OsYSOPtmLeR8y3PuVnIJeys/view (Тези доповіді. Особистий внесок здобувача: обґрунтування стеку використовуваних інформаційних технологій, розробка структурно-функціональної моделі. Внесок Алексєєва М.О.: постановка проблеми досліджень. Внесок Дяченка Г.Г.: локалізація та формулювання задач дослідження, аналіз результатів).

8. Алексєєв М.О., Кремньов В.В. Алгоритмічне забезпечення комп'ютеризованого методу предикативного контролю вологості ґрунту // XV Міжнародна науково-технічна конференція аспірантів та молодих вчених «Наукова весна», 26–28 березня 2025: Дніпро, 2025. С. 194 – 195. URL: https://rmv.nmu.org.ua/ua/arkhiv-zbirok-konferentsiy/naukova-vesna-2025/Scientific_Spring_2025.pdf (Тези доповіді. Особистий внесок здобувача: обґрунтування математичного забезпечення методу предикативного контролю вологості

грунту, реалізація засобів графічної інтерпретації результатів комп'ютерного тестування розробленого методу. Внесок Алексєєва М.О.: постановка проблеми досліджень, уточнення одержаних результатів).

9. Дяченко Г.Г., Алексєєв М.О., Кремньов В.В., Євстратьєв М.А. Обґрунтування методів і засобів побудови інформаційних технологій комп'ютерного предикативного контролю режимів зволоження зернових культур // VI Міжнародна науково-практична інтернет-конференція «Integration of Education, Science and Business in Modern Environment: Summer Debates», 01–02 August 2024: Dnipro, 2024. С. 125–127. URL: <http://www.wayscience.com/wp-content/uploads/2024/08/Conference-Proceedings-August-1-2-2024.pdf>. (Тези доповіді. Особистий внесок здобувача: аналіз і узагальнення техніко-функціональних складових процесу адаптивного комп'ютерного контролю характеристик об'єктів рослинництва під час оптимізації режимів зрошення ґрунту, формулювання висновків. Внесок Дяченка Г.Г.: апріорний аналіз і систематизація літературних джерел. Внесок Алексєєва М.О.: постановка проблеми досліджень. Внесок Євстратьєва М.А.: опис актуальності досліджень).

10. Кремньов В.В., Коваль В.С., Євстратьєв М.А. Компонентно-структурне забезпечення комп'ютерної технології предикативного контролю агротехнічних процесів вирощування зернових культур // Міжнародна науково-практична конференція «Теоретико-практичні аспекти розвитку науки, освіти, технологій і суспільства», 10 серпня 2024: Кременчук, 2024. С. 45–47. URL: <https://www.economics.in.ua/2024/08/10.html>. (Тези доповіді. Особистий внесок здобувача: розробка та опис принципу дії схеми компонентно-структурного забезпечення комп'ютерної технології предикативного контролю режимів зволоження ґрунту. Внесок Ковалю В.С.: підбір літературних джерел і їх апріорний аналіз. Внесок Євстратьєва М.А.: обґрунтування підходів до дослідження, редагування тексту).

11. Шаматрін А.М., Кремньов В.В. Розробка архітектури комп'ютерної системи адаптивного контролю зрошення ґрунту // XII Міжнародна науково-технічна конференція студентів, аспірантів та молодих вчених «Молодь: наука та інновації», 13–15 листопада 2024: Дніпро, 2024. С. 146–147. URL: <https://rmv.nmu.org.ua/ua/arkhiv-zbirok-konferentsiy/molod-nauka-ta-innovatsii-2024/molod-2024-vol2.pdf>. (Тези доповіді. Особистий внесок здобувача: синтез архітектури системи моніторингу вологості ґрунту, формулювання висновків. Внесок Шаматріна А.М.: підбір літературних джерел, оформлення графічного матеріалу).

ДОДАТОК Б

Акти впровадження та використання результатів дисертаційного дослідження

НАЦІОНАЛЬНА АКАДЕМІЯ
АГРАРНИХ НАУК УКРАЇНИ

ДОНЕЦЬКА ДЕРЖАВНА
СІЛЬСЬКОГОСПОДАРСЬКА
ДОСЛІДНА СТАНЦІЯ



NATIONAL ACADEMY
OF AGRARIAN SCIENCES OF UKRAINE

DONETSK STATE AGRICULTURAL
SCIENCE STATION

85307, Донецька обл., м. Покровськ,
вул. Захисників України, 1

Тел.: (050) - 965-91-39

85307, Donetsk region., Pokrovsk,
St. Zakhisnykiv Ukrainy, 1

Phone.: (050) - 965-91-39

E-mail: cnzdiapw@ukr.net

№ _____ від 16.09.2025

АКТ

*використання науково-практичних результатів, які одержано **Кремньовим Володимиром Володимировичем** в результаті дисертаційного дослідження на здобуття наукового ступеня доктора філософії зі спеціальності 122 Комп'ютерні науки*

Цей акт складено на підставі використання науково-практичних результатів, які отримано аспірантом Кремньовим Володимиром Володимировичем під час виконання його дисертаційного дослідження на здобуття наукового ступеня доктора філософії за спеціальністю 122 Комп'ютерні науки. Цим актом засвідчую, що результати його розробок і досліджень апробовано та застосовано у виробничих умовах Донецької державної сільськогосподарської дослідної станції Національної академії аграрних наук (ДДСДС НААН) України під час планування, реалізації та оптимізації агротехнічних процедур із вирощування зернових культур у польових умовах, а саме:

– математичні моделі розподілу вологи на різних глибинах ґрунту під час планування графіку поливу зернових культур;

– макетний зразок комп'ютерної технології предикативного контролю режимів зволоження зернових культур під час планування заходів із модернізації виробничих процесів вирощування пшениці;

– програмне забезпечення графічної візуалізації результатів моніторингу ґрунтокліматичних параметрів під час комп'ютерного контролю режимів зволоження пшениці.

Отримані Кремньовим В.В. результати науково-прикладних досліджень, що зазначені вище, використано у виробничій діяльності ДДСДС НААН України під час модернізації та оптимізації агротехнічних процесів вирощування зернових культур у агрокліматичних умовах північного степу України.

В.о. директора ДДСДС НААН України,
д.с-г.н., проф.



Олександр ВІНЮКОВ

БВС +
Товариство з обмеженою відповідальністю

85330, с. Гришине, вул. Олеся Гончара, 14. Тел. (050)-448-53-80,
e-mail: LLC_BVS@ukr.net

08/09/2025р. № _____
На № _____ від _____

АКТ

використання науково-практичних результатів дисертаційного дослідження
Кремньова Володимира Володимировича на здобуття наукового ступеня доктора
філософії зі спеціальності 122 Комп'ютерні науки

Цей акт складено на підставі апробації й використання результатів науково-практичних досліджень і розробок, які отримано аспірантом Кремньовим Володимиром Володимировичем під час виконання його дисертаційного дослідження на здобуття наукового ступеня доктора філософії за спеціальністю 122 Комп'ютерні науки, щодо створення апаратно-програмного забезпечення комп'ютерної технології контролю режимів зволоження ґрунту під час вирощування зернових культур у виробничих умовах ТОВ «БВС+». Науково-практичні розробки, які було протестовано, апробовано та використано, є наступними:

1. Тестовий зразок апаратно-програмного рішення комп'ютерної технології прогностичного контролю режимів зволоження зернових культур, який виконує функції збору, мережевого обміну та автоматичної обробки фізико-хімічних параметрів, що є інформативними та впливають на планування агротехнічних процедур зрошення.

2. Комп'ютерні моделі для аналізу часового розподілу ґрунтової вологості на різних глибинах.

Вищенаведені наукові та практичні результати досліджень, які одержано Кремньовим В.В., були застосовані для оперативного планування та виконання агротехнічних процедур зрошення ґрунту під час повного циклу вирощування зернових культур в умовах ТОВ «БВС+».

Директор



Олександр БУТЕНКО

ЗАТВЕРДЖУЮ

Перший проректор

НТУ «Дніпровська політехніка»

Артем ПАВЛИЧЕНКО

«20» травня 2025 р.



АКТ

упровадження результатів дисертаційної роботи **КРЕМНЬОВА Володимира Володимировича** на тему: **«Комп'ютерна технологія предикативного контролю режимів зволоження зернових культур»**

Цим актом засвідчується факт того, що науково-прикладні результати досліджень дисертаційної роботи здобувача Кремньова В.В. на тему «Комп'ютерна технологія предикативного контролю режимів зволоження зернових культур» упроваджено до навчального процесу Національного технічного університету «Дніпровська політехніка» в межах підготовки здобувачів вищої освіти за освітньо-науковим рівнем «Доктор філософії» за спеціальністю 122 Комп'ютерні науки, а саме під час викладання фахових академічних дисциплін: «Сучасні методи і системи підтримки прийняття рішень» та «Хмарні системи та технології високої готовності». У цьому контексті використано наступні теоретичні й практичні здобутки дисертаційної роботи: результати синтезу децентралізованої архітектури досліджуваної комп'ютерної технології, підходи та результати створення комп'ютерно-орієнтованого методу предикативного контролю режимів зволоження зернових культур, методи та засоби побудови серверної частини розробленої комп'ютерної технології.

Декан ФІТ

 Ірина УДОВИК

Зав. каф. ПЗКС

 Михайло АЛЕКСЄЄВ

Гарант ОНП «Комп'ютерні науки»

 Борис МОРОЗ

ДОДАТОК В

Програмне забезпечення розробленої та дослідженої комп'ютерної технології
предикативного контролю режимів зволоження зернових культур

В.1. Комп'ютерна програма мовою Python для моделювання процесу розповсюдження ґрунтової вологи за період одна година

```
import numpy as np
import matplotlib.pyplot as plt
from scipy.sparse import diags
from scipy.sparse.linalg import spsolve

# Параметри
L = 1.0 # Глибина ґрунту, м
T = 1.0 # Час, год (1 година)
Nx = 100 # Кількість просторових точок
Nt = 60 # Кількість часових точок (60 хвилин)
alpha = 0.0081 # коефіцієнт гідравлічної провідності (перераховане значення коефіцієнту
фільтрації для різних типів ґрунтів: для чорнозем потужний - 0.0081, для чорнозем
звичайний - 0.0108, для чорнозем південний - 0.0126)
E = 0.00008 # Швидкість випаровування (для вологої зони - 0.00008, для напівпосушливої -
0.00016, для посушливої - 0.00032)

# Просторовий та часовий кроки
dx = L / Nx
dt = T / Nt

# Початкові значення вологості
initial_moisture_values = np.arange(0.5, 1.1, 0.1)

# Матриця апроксимованих коефіцієнтів для функцій гідравлічної провідності та потенціалу
ґрунтової вологи
main_diag = (1 + 2 * alpha * dt / dx**2) * np.ones(Nx+1)
off_diag = (-alpha * dt / dx**2) * np.ones(Nx)
A = diags([main_diag, off_diag, off_diag], [0, -1, 1]).tocsc()

# Збереження даних для теплових карт
heatmap_data = []

# Розв'язання рівняння динаміки вологи в ґрунті
for initial_moisture in initial_moisture_values:
    theta = np.zeros((Nt, Nx+1))
    theta[0, :] = initial_moisture
    theta_left = initial_moisture
    theta_right = 0.0
    for n in range(1, Nt):
        b = theta[n-1].copy()
        b[1:Nx] += E * dt # Урахування випаровування
        b[0] = theta_left
        b[-1] = theta_right
        theta[n] = spsolve(A, b)

    # Збереження кінцевих даних для кожного початкового значення вологості
    heatmap_data.append(theta)

# Побудова теплових карт
fig, axes = plt.subplots(2, 3, figsize=(15, 10), constrained_layout=True)

for i, ax in enumerate(axes.flat):
    if i < len(initial_moisture_values):
        im = ax.imshow(heatmap_data[i], aspect='auto', cmap='viridis', origin='lower',
extent=[0, Nx*dx, 0, Nt*dt*60])
        ax.set_title(f'Початкова вологість, %: {initial_moisture_values[i]*100:.1f}')
        ax.set_xlabel('Глибина, м')
        ax.set_ylabel('Час, хв.')
```

```
fig.colorbar(im, ax=ax)

plt.suptitle('Розподіл вологості ґрунту ...')
plt.show()
```

В.2. Комп'ютерна програма мовою Python для моделювання процесу розповсюдження ґрунтової вологи за період одна доба

```
import numpy as np
import matplotlib.pyplot as plt
from scipy.sparse import diags
from scipy.sparse.linalg import spsolve

# Параметри
L = 1.0 # Глибина ґрунту, м
T = 24.0 # Час, год (24 години)
Nx = 100 # Кількість просторових точок
Nt = 240 # Кількість часових точок (24 год * 10 точок/год)
alpha = 0.0081 # коефіцієнт гідравлічної провідності (перераховане значення коефіцієнту
фільтрації для різних типів ґрунтів: для чорнозем потужний – 0.0081, для чорнозем
звичайний – 0.0108, для чорнозем південний – 0.0126)
E = 0.00008 # Швидкість випаровування (для вологої зони – 0.00008, для напівпосушливої –
0.00016, для посушливої – 0.00032)

# Просторовий та часовий кроки
dx = L / Nx
dt = T / Nt

# Початковий розподіл вологи
initial_moisture_values = np.arange(0.5, 1.1, 0.1)

# Матриця апроксимованих коефіцієнтів для функцій гідравлічної провідності та потенціалу
ґрунтової вологи
main_diag = (1 + 2 * alpha * dt / dx**2) * np.ones(Nx+1)
off_diag = (-alpha * dt / dx**2) * np.ones(Nx)
A = diags([main_diag, off_diag, off_diag], [0, -1, 1]).tocsc()

# Збереження даних для побудови графічних залежностей у вигляді теплових карт
heatmap_data = []

# Розв'язання рівняння динаміки вологи в ґрунті
for initial_moisture in initial_moisture_values:
    theta = np.zeros((Nt, Nx+1))
    theta[0, :] = initial_moisture # Початкова вологість по всій довжині
    theta_left = initial_moisture
    theta_right = 0.3
    for n in range(1, Nt):
        b = theta[n-1].copy()
        b[1:Nx] += E * dt # Урахування випаровування
        b[0] = theta_left
        b[-1] = theta_right
        theta[n] = spsolve(A, b)

    # Збереження кінцевих даних для кожного початкового значення вологості
    heatmap_data.append(theta)

# Побудова графічних залежностей у вигляді теплових карт
fig, axes = plt.subplots(2, 3, figsize=(15, 10), constrained_layout=True)

for i, ax in enumerate(axes.flat):
```

```

    if i < len(initial_moisture_values):
        im = ax.imshow(heatmap_data[i], aspect='auto', cmap='viridis', origin='lower',
            extent=[0, Nx*dx, 0, T])
        ax.set_title(f'Початкова вологість, %: {initial_moisture_values[i]*100:.1f}')
        ax.set_xlabel('Глибина, м')
        ax.set_ylabel('Час, год')
        ax.set_yticks(np.arange(0, T+1, 4)) # Adjusting y-ticks to show time in hourly
increments
        fig.colorbar(im, ax=ax)

plt.suptitle('Розподіл вологості ґрунту ...')
plt.show()

```

В.3. Скрипти в середовищі Matlab & Simulink (використано студентську навчальну версію програмного забезпечення Matlab & Simulink), що реалізують предикативний контроль вологості за допомогою fmincon

```

% основний скрипт optimal_irrigation.m
function S_opt = optimal_irrigation()
% Параметри
    L = 1.0;          % Глибина ґрунту (м)
    T = 6.0;          % Час моделювання, год
    Nx = 100;         % Просторовий розподіл
    Nt = 60 * T;       % Часові кроки (60 кроків на 1 год)
    alpha = 0.0126;    % Провідність (м/год)      0.0081, 0.0108, 0.0126
    E = 0.00032 + 6.5/24/1000; % Випаровування (м/год) + споживання 0.00008, 0.00016,
0.00032

    % Просторовий та часовий кроки
    dx = L / Nx;
    dt = T / Nt;

    % Ціль
    target_depth = 0.7;
    idx_depth = round(target_depth / dx);
    theta_des = 0.7;

    % Початкова вологість (верхній шар ґрунту)
    h0 = 0.4; % initial_moisture_values = 0.5:0.1:1.0;
    %h0 = 0;
    theta_fin = 0;
    % Функція втрати: мінімізуємо відхилення вологості на 0.8 м від 85%
    function J = cost_function(S)
        h = solve_richards(h0, S, alpha, E, Nx, Nt, dx, dt);
        theta = h(:, idx_depth);
        theta_fin = theta;
        %theta = van_genuchten(h(:, idx_depth));
        J = sum((theta - theta_des).^2);
    end

    % Обмеження на S(t)
    S_min = 0; S_max = 0.005; % Межі подачі води
    S0 = 0.0002 * ones(Nt, 1); % Початкове припущення
    lb = S_min * ones(Nt, 1);
    ub = S_max * ones(Nt, 1);

    % Налаштування оптимізатора
    options = optimoptions('fmincon', 'Display', 'Iter', 'Algorithm', 'sqp', 'OptimalityTol',
1e-4, 'TolFun', 1e-6, ...

```



```

'MaxFunEvals', Inf, 'PlotFcn', {@optimplotx, @optimplotfval, @optimplotfirstorderopt}, 'MaxIter'
, 700, 'StepTol', 1e-4);
%optimoptions('fmincon', 'Algorithm', 'sqp', 'Display', 'iter');
S_opt = fmincon(@cost_function, S0, [], [], [], [], lb, ub, [], options);

% Візуалізація оптимального поливу
figure;
plot(1:Nt, S_opt*1e3, 'b-', 'LineWidth', 2);
xlabel('Час (хв)');
ylabel('Полив (л/год)');
title('Оптимальна стратегія поливу');
ylim([0 5])

% Візуалізація оптимального поливу
figure;
plot(1:Nt, theta_fin*100, 'b-', 'LineWidth', 2);
xlabel('Час (хв)');
ylabel('Вологість (%)');
title('Рівень вологості ґрунту');
ylim([0 100])
end

% скрипт solve_richards.m
function theta = solve_richards(h0, S, alpha, E, Nx, Nt, dx, dt)

    main_diag = (1 + 2 * alpha * dt / dx^2) * ones(Nx+1, 1); % (Nx+1) elements
    off_diag = (-alpha * dt / dx^2) * ones(Nx, 1); % (Nx) elements

    A = spdiags([ off_diag; 0], main_diag, [0; off_diag] ], [-1, 0, 1], Nx+1, Nx+1);

    initial_moisture = h0;

    theta = zeros(Nt, Nx+1);
    theta(1, :) = initial_moisture; % Початкова вологість по всій довжині

    theta_left = initial_moisture; % Вологість на лівому кінці
    theta_right = 0.0; % -100; % 0.0; % Вологість на правому кінці

    for n = 2:Nt
        b = theta(n-1, :);
        %b(2:Nx) = b(2:Nx) + dt * (-E); %b(2:Nx) + dt * (S(n) / dx - E);
        b(2:Nx) = b(2:Nx) + dt * (S(n) / dx - E / dx);
        %b(1) = b(1) + dt * (S(n) / dx); %theta_left;
        b(1) = b(1) + dt * (S(n) / dx); %theta_left;
        b(end) = theta_right;

        theta(n, :) = A \ b';
    end
end

```

В.4. Програмне забезпечення Matlab-застосунку (використано студентську навчальну версію програмного забезпечення Matlab & Simulink) для розрахунку оптимального режиму зрошення

```

classdef app1 < matlab.apps.AppBase

    properties (Access = public)
        UIFigure      matlab.ui.Figure
        EditField_11   matlab.ui.control.NumericEditField
    end

```

```

Label_15      matlab.ui.control.Label
EditField_10  matlab.ui.control.NumericEditField
Label_17      matlab.ui.control.Label
EditField_9   matlab.ui.control.NumericEditField
Label_16      matlab.ui.control.Label
EditField_8   matlab.ui.control.NumericEditField
Label_14      matlab.ui.control.Label
EditField_7   matlab.ui.control.NumericEditField
Label_13      matlab.ui.control.Label
EditField_6   matlab.ui.control.NumericEditField
Label_12      matlab.ui.control.Label
EditField_5   matlab.ui.control.NumericEditField
Label_11      matlab.ui.control.Label
EditField_4   matlab.ui.control.NumericEditField
Label_10      matlab.ui.control.Label
EditField_3   matlab.ui.control.NumericEditField
Label_9       matlab.ui.control.Label
EditField_2   matlab.ui.control.NumericEditField
Label_8       matlab.ui.control.Label
Button        matlab.ui.control.Button
Label_6       matlab.ui.control.Label
Label_5       matlab.ui.control.Label
Label_4       matlab.ui.control.Label
EditField     matlab.ui.control.NumericEditField
Label_7       matlab.ui.control.Label
Label_3       matlab.ui.control.Label
Label_2       matlab.ui.control.Label
Label         matlab.ui.control.Label
UIAxes2       matlab.ui.control.UIAxes
UIAxes        matlab.ui.control.UIAxes
end

```

```

properties (Access = private)

```

```

    user_s_depth
    user_s_alpha
    user_s_E
    user_s_SS
    user_t_model
    user_t_depth
    user_s_theta_des
    user_init_theta
    user_s_sinit
    user_ss_min
    user_ss_max

```

```

    t_idx
    s_idx
    thet_idx

```

```

end

```

```

methods (Access = private)

```

```

    function [times, ss_optim, st_theta] = optimal_irrigation(app, s_depth, s_alpha,
s_E, s_SS, t_model, t_depth, s_theta_des, init_theta, s_sinit, ss_min, ss_max)

```

```

        % Параметри
        L = s_depth;      % Глибина ґрунту (м)
        T = t_model;      % Час моделювання, год
        Nx = 100;         % Просторовий розподіл
        Nt = 60 * T;       % Часові кроки (60 кроків на 1 год)
        alpha = s_alpha;   % Провідність (м/год)      0.0081, 0.0108, 0.0126

```

```

0.00032      E = s_E + s_SS;      % Випаровування (м/год) + споживання      0.00008, 0.00016,

% Просторовий та часовий кроки
dx = L / Nx;
dt = T / Nt;

% Ціль
target_depth = t_depth;
idx_depth = round(target_depth / dx);
theta_des = s_theta_des;

% Початкова вологість (верхній шар ґрунту)
h0 = init_theta;
%h0 = 0;
theta_fin = 0;
% Функція втрати: мінімізуємо відхилення вологості на 0.8 м від 85%
function J = cost_function(S)
    h = solve_richards(app, h0, S, alpha, E, Nx, Nt, dx, dt);
    theta = h(:, idx_depth);
    theta_fin = theta;
    %theta = van_genuchten(h(:, idx_depth));
    J = sum((theta - theta_des).^2);
end

% Обмеження на S(t)
S_min = ss_min; S_max = ss_max; % Межі подачі води
S0 = s_sinit * ones(Nt, 1); % Початкове припущення
lb = S_min * ones(Nt, 1);
ub = S_max * ones(Nt, 1);

% Налаштування оптимізатора
options
optimoptions('fmincon','Display','Iter','Algorithm','sqp','OptimalityTol',      =
4,'TolFun',1e-6,..., 1e-

'MaxFunEvals',Inf,'PlotFcn',{@optimplotx,@optimplotfval,@optimplotfirstorderopt},'MaxIter'
,700,'StepTol', 1e-4);
%optimoptions('fmincon', 'Algorithm', 'sqp', 'Display', 'iter');
S_opt = fmincon(@cost_function, S0, [], [], [], [], lb, ub, [], options);

times = 1:Nt;
ss_optim = S_opt*1e3;
st_theta = theta_fin*100;
end

function theta = solve_richards(app, h0, S, alpha, E, Nx, Nt, dx, dt)
% Corrected sizes of diagonal elements
main_diag = (1 + 2 * alpha * dt / dx^2) * ones(Nx+1, 1);
off_diag = (-alpha * dt / dx^2) * ones(Nx, 1);

A = spdiags([ off_diag; 0], main_diag, [0; off_diag] ), [-1, 0, 1], Nx+1,
Nx+1);

initial_moisture = h0;

theta = zeros(Nt, Nx+1);
theta(1, :) = initial_moisture; % Початкова вологість по всій довжині

% Граничні умови
theta_left = initial_moisture; % Вологість на лівому кінці

```

```

theta_right = 0.0; %-100; % 0.0; % Вологість на правому кінці

for n = 2:Nt
    b = theta(n-1, :);
    %b(2:Nx) = b(2:Nx) + dt * (-E); %b(2:Nx) + dt * (S(n) / dx - E);
    b(2:Nx) = b(2:Nx) + dt * (S(n) / dx - E / dx);
    %b(1) = b(1) + dt * (S(n) / dx); %theta_left;
    b(1) = b(1) + dt * (S(n) / dx); %theta_left;
    b(end) = theta_right;

    theta(n, :) = A \ b';
end
end
end

methods (Access = private)

function ButtonPushed(app, event)
    app.user_s_depth = app.EditField.Value;
    app.user_s_alpha = app.EditField_5.Value;
    app.user_s_E = app.EditField_2.Value;
    app.user_s_SS = app.EditField_3.Value;
    app.user_t_model = app.EditField_4.Value;
    app.user_t_depth = app.EditField_6.Value;
    app.user_s_theta_des = app.EditField_7.Value;
    app.user_init_theta = app.EditField_8.Value;
    app.user_s_sinit = app.EditField_11.Value;
    app.user_ss_min = app.EditField_9.Value;
    app.user_ss_max = app.EditField_10.Value;

    [app.t_idx, app.s_idx, app.thet_idx] = optimal_irrigation(app, app.user_s_depth,
    app.user_s_alpha, app.user_s_E, app.user_s_SS, app.user_t_model, app.user_t_depth,
    app.user_s_theta_des, app.user_init_theta, app.user_s_sinit, app.user_ss_min,
    app.user_ss_max);
    %assignin('base', 'time', app.t_idx)
    %assignin('base', 'sopt', app.s_idx)
    %assignin('base', 'theta', app.thet_idx)
    plot(app.UIAxes, app.thet_idx, 'b-', 'LineWidth', 2)
    plot(app.UIAxes2, app.s_idx, 'b-', 'LineWidth', 2)

end
end

methods (Access = private)

function createComponents(app)

    app.UIFigure = uifigure('Visible', 'off');
    app.UIFigure.Position = [100 100 639 518];
    app.UIFigure.Name = 'MATLAB App';

    app.UIAxes = uiaxes(app.UIFigure);
    title(app.UIAxes, 'Рівень вологості ґрунту')
    xlabel(app.UIAxes, 'Час (хв)')
    ylabel(app.UIAxes, 'Вологість (%)')
    zlabel(app.UIAxes, 'Z')
    app.UIAxes.XLim = [0 360];
    app.UIAxes.YLim = [0 100];
    app.UIAxes.Position = [295 261 318 198];

```

```

app.UIAxes2 = uiaxes(app.UIFigure);
title(app.UIAxes2, 'Оптимальна стратегія поливу')
xlabel(app.UIAxes2, 'Час (хв)')
ylabel(app.UIAxes2, 'Полив (л/год)')
zlabel(app.UIAxes2, 'Z')
app.UIAxes2.XLim = [0 360];
app.UIAxes2.YLim = [0 5];
app.UIAxes2.Position = [305 57 310 193];

app.Label = uilabel(app.UIFigure);
app.Label.FontSize = 18;
app.Label.FontWeight = 'bold';
app.Label.Position = [365 468 224 23];
app.Label.Text = 'Візуалізація результатів';

app.Label_2 = uilabel(app.UIFigure);
app.Label_2.Position = [9 497 348 22];
app.Label_2.Text = 'Програма розрахунку оптимального режиму зрошення';

app.Label_3 = uilabel(app.UIFigure);
app.Label_3.Position = [1 494 660 22];
app.Label_3.Text

```

```

_____';

```

```

app.Label_7 = uilabel(app.UIFigure);
app.Label_7.HorizontalAlignment = 'right';
app.Label_7.Position = [19 437 104 22];
app.Label_7.Text = 'Глибина ґрунту, м';

app.EditField = uieditfield(app.UIFigure, 'numeric');
app.EditField.Position = [182 437 81 22];
app.EditField.Value = 1;

app.Label_4 = uilabel(app.UIFigure);
app.Label_4.FontSize = 18;
app.Label_4.FontWeight = 'bold';
app.Label_4.Position = [31 468 159 23];
app.Label_4.Text = 'Параметри:';

app.Label_5 = uilabel(app.UIFigure);
app.Label_5.FontSize = 18;
app.Label_5.FontWeight = 'bold';
app.Label_5.Position = [32 261 161 23];
app.Label_5.Text = 'Початкові умови:';

app.Label_6 = uilabel(app.UIFigure);
app.Label_6.FontSize = 18;
app.Label_6.FontWeight = 'bold';
app.Label_6.Position = [34 107 159 23];
app.Label_6.Text = 'Обмеження:';

app.Button = uibutton(app.UIFigure, 'push');
app.Button.ButtonPushedFcn = createCallbackFcn(app, @ButtonPushed, true);
app.Button.BackgroundColor = [0.3922 0.8314 0.0745];
app.Button.FontSize = 14;
app.Button.FontWeight = 'bold';
app.Button.Position = [498 10 116 33];
app.Button.Text = 'Розрахувати';

app.Label_8 = uilabel(app.UIFigure);

```

```

app.Label_8.HorizontalAlignment = 'right';
app.Label_8.Position = [19 368 127 22];
app.Label_8.Text = 'Випаровування, м/год';

app.EditField_2 = uieditfield(app.UIFigure, 'numeric');
app.EditField_2.Position = [182 368 81 22];
app.EditField_2.Value = 0.00032;

app.Label_9 = uilabel(app.UIFigure);
app.Label_9.Position = [24 338 124 21];
app.Label_9.Text = 'Споживання, м/год';

app.EditField_3 = uieditfield(app.UIFigure, 'numeric');
app.EditField_3.Position = [182 337 81 22];
app.EditField_3.Value = 0.00027083;

app.Label_10 = uilabel(app.UIFigure);
app.Label_10.Position = [24 304 130 22];
app.Label_10.Text = 'Час моделювання, год';

app.EditField_4 = uieditfield(app.UIFigure, 'numeric');
app.EditField_4.Position = [182 304 81 22];
app.EditField_4.Value = 6;

app.Label_11 = uilabel(app.UIFigure);
app.Label_11.WordWrap = 'on';
app.Label_11.Position = [24 398 139 34];
app.Label_11.Text = 'Гідравлічна провідність ґрунту, м/год';

app.EditField_5 = uieditfield(app.UIFigure, 'numeric');
app.EditField_5.Position = [182 404 81 22];
app.EditField_5.Value = 0.0126;

app.Label_12 = uilabel(app.UIFigure);
app.Label_12.HorizontalAlignment = 'right';
app.Label_12.Position = [20 234 112 22];
app.Label_12.Text = 'Цільова глибина, м';

app.EditField_6 = uieditfield(app.UIFigure, 'numeric');
app.EditField_6.Position = [183 234 81 22];
app.EditField_6.Value = 0.7;

app.Label_13 = uilabel(app.UIFigure);
app.Label_13.HorizontalAlignment = 'right';
app.Label_13.Position = [20 203 102 22];
app.Label_13.Text = 'Бажана вологість';

app.EditField_7 = uieditfield(app.UIFigure, 'numeric');
app.EditField_7.Position = [183 203 81 22];
app.EditField_7.Value = 0.8;

app.Label_14 = uilabel(app.UIFigure);
app.Label_14.HorizontalAlignment = 'right';
app.Label_14.Position = [20 172 118 22];
app.Label_14.Text = 'Початкова вологість';

app.EditField_8 = uieditfield(app.UIFigure, 'numeric');
app.EditField_8.Position = [183 172 81 22];
app.EditField_8.Value = 0.6;

app.Label_16 = uilabel(app.UIFigure);

```

```

app.Label_16.HorizontalAlignment = 'right';
app.Label_16.Position = [19 81 151 22];
app.Label_16.Text = 'Нижня межа поливу, м/год';

app.EditField_9 = uieditfield(app.UIFigure, 'numeric');
app.EditField_9.Position = [185 81 81 22];

app.Label_17 = uilabel(app.UIFigure);
app.Label_17.HorizontalAlignment = 'right';
app.Label_17.Position = [20 50 155 22];
app.Label_17.Text = 'Верхня межа поливу, м/год';

app.EditField_10 = uieditfield(app.UIFigure, 'numeric');
app.EditField_10.Position = [185 50 81 22];
app.EditField_10.Value = 0.005;

app.Label_15 = uilabel(app.UIFigure);
app.Label_15.HorizontalAlignment = 'right';
app.Label_15.Position = [20 140 142 22];
app.Label_15.Text = 'Початковий полив, м/год';

app.EditField_11 = uieditfield(app.UIFigure, 'numeric');
app.EditField_11.Position = [183 140 81 22];
app.EditField_11.Value = 0.0002;

app.UIFigure.Visible = 'on';
end
end

methods (Access = public)

function app = app1

    createComponents(app)

    registerApp(app, app.UIFigure)

    if nargin == 0
        clear app
    end
end

function delete(app)

    delete(app.UIFigure)
end
end
end

```

В.5. Комп'ютерна програма в Arduino IDE для моделювання модуля «Польовий пристрій WSN #1» («Arduino Mini #1»)

```

#include <TimeLib.h>
#include "DS1307RTC.h"
#include "DHT.h"

// призначення пінів
#define AIR_DHTPIN 2
#define SOIL_DHTPIN 3
#define DHTTYPE DHT22

```

```

#define IDENTIFIER "NODE_FIELD_1"
const int precipitation_pin = A1;

DHT air_dht(AIR_DHTPIN,DHTTYPE);
DHT soil_dht(SOIL_DHTPIN,DHTTYPE);

float precipitation;
float air_temperature;
float air_relative_humidity;
float soil_temperature;
float soil_relative_humidity;

// оголошення змінних rtc та in
const char startMarker = '&';
const char endMarker = '&';
const char delimiter = ';';
const char *monthName[12] = {
    "Jan", "Feb", "Mar", "Apr", "May", "Jun",
    "Jul", "Aug", "Sep", "Oct", "Nov", "Dec"
};
tmElements_t tm;
int lastSeconds = 0;

void setup() {
    pinMode(precipitation_pin, INPUT);
    Serial.begin(9600);
    while (!Serial);
    delay(200);
    bool parse=false;
    bool config=false;

    if (getDate(__DATE__) && getTime(__TIME__)) {
        parse = true;

        tm.Day = 30;
        tm.Month = 3;
        tm.Year = 2006;

        tm.Hour = 10;
        tm.Minute = 59;
        tm.Second = 55;

        if (RTC.write(tm)) {
            config = true;
        }
    }

    if (parse && config) {
        Serial.println("DS1307 configured ");
        Serial.print("Time=");
        Serial.print(__TIME__);
        Serial.print(", Date=");
        Serial.println(__DATE__);
    } else if (parse) {
        Serial.println("DS1307 Communication Error :-{");
        Serial.println("Please check your circuitry");
    } else {
        Serial.print("Could not parse info from the compiler, Time=\"");
        Serial.print(__TIME__);
        Serial.print("\", Date=\"");
        Serial.print(__DATE__);
    }
}

```



```

    Serial.println("\n");
}

Serial.println("Running...");
}

void loop() {
    if (RTC.read(tm)) {
        if(lastSeconds != tm.Second){
            lastSeconds = tm.Second;
            if(tm.Second==0) {
                int PrecipVal = analogRead(precipitation_pin);
                precipitation = map(PrecipVal,0,1023,0,1500) / 100.0;
                air_temperature = air_dht.readTemperature();
                air_relative_humidity = air_dht.readHumidity();
                soil_temperature = soil_dht.readTemperature();
                soil_relative_humidity = soil_dht.readHumidity();
                sendFormattedData();
            }
        }

    } else {
        if (RTC.chipPresent()) {
            Serial.println("The DS1307 is stopped. Please run the SetTime");
            Serial.println("example to initialize the time and begin running.");
            Serial.println();
        } else {
            Serial.println("DS1307 read error! Please check the circuitry.");
            Serial.println();
        }
    }
}

void sendFormattedData() {
    Serial.println();
    Serial.println("Sending data ...");
    Serial.print(startMarker);
    Serial.print(delimiter);
    Serial.print(precipitation);
    Serial.print(delimiter);
    Serial.print(soil_temperature);
    Serial.print(delimiter);
    Serial.print(air_temperature);
    Serial.print(delimiter);
    Serial.print(air_relative_humidity);
    Serial.print(delimiter);
    Serial.print(soil_relative_humidity);
    Serial.print(delimiter);
    Serial.print(endMarker);
    Serial.println();
}

bool getTime(const char *str)
{
    int Hour, Min, Sec;

    if (sscanf(str, "%d:%d:%d", &Hour, &Min, &Sec) != 3) return false;
    tm.Hour = Hour;
    tm.Minute = Min;
    tm.Second = Sec;
}

```

```

    return true;
}

bool getDate(const char *str)
{
    char Month[12];
    int Day, Year;
    uint8_t monthIndex;

    if (sscanf(str, "%s %d %d", Month, &Day, &Year) != 3) return false;
    for (monthIndex = 0; monthIndex < 12; monthIndex++) {
        if (strcmp(Month, monthName[monthIndex]) == 0) break;
    }
    if (monthIndex >= 12) return false;
    tm.Day = Day;
    tm.Month = monthIndex + 1;
    tm.Year = CalendarYrToTm(Year);
    return true;
}

```

B.6. Комп'ютерна програма в Arduino IDE для моделювання «Польовий пристрій WSN #2» («Arduino Mini #2»)

```

#include <TimeLib.h>
#include "DS1307RTC.h"

#define KPA2ATM 0.00986923267

// призначення пінів
int pressure_pin = 0;

// оголошення змінних давача тиску
int pressure_analog_val;
float pressure_kpa; // тиск в кПа
float pressure_atm; // тиск в атм

// оголошення змінних давача потоку води
byte sensorInterrupt = 0; // 0 = digital pin 2
byte sensorPin       = 2;

int calibrationFactor = 1100;

int pulseCount;

float flowRate;
float flowHour;

unsigned long oldTime;

// оголошення змінних rtc та in
const char startMarker = '&';
const char endMarker = '&';
const char delimiter = ';';

const char *monthName[12] = {
    "Jan", "Feb", "Mar", "Apr", "May", "Jun",
    "Jul", "Aug", "Sep", "Oct", "Nov", "Dec"
};

tmElements_t tm;

```

```

int lastSeconds = 0;

void setup() {

  Serial.begin(9600);
  while (!Serial) ;
  delay(200);

  pinMode(sensorPin, INPUT);
  digitalWrite(sensorPin, HIGH);

  pulseCount      = 0;
  flowRate        = 0.0;
  flowHour        = 0.0;
  oldTime         = 0;

  attachInterrupt(sensorInterrupt, pulseCounter, FALLING);

  bool parse=false;
  bool config=false;

  if (getDate(__DATE__) && getTime(__TIME__)) {
    parse = true;

    tm.Day = 30;
    tm.Month = 3;
    tm.Year = 2006;

    tm.Hour = 10;
    tm.Minute = 59;
    tm.Second = 55;

    if (RTC.write(tm)) {
      config = true;
    }
  }

  if (parse && config) {
    Serial.println("DS1307 configured ");
    Serial.print("Time=");
    Serial.print(__TIME__);
    Serial.print(", Date=");
    Serial.println(__DATE__);
  } else if (parse) {
    Serial.println("DS1307 Communication Error :-{");
    Serial.println("Please check your circuitry");
  } else {
    Serial.print("Could not parse info from the compiler, Time=\"");
    Serial.print(__TIME__);
    Serial.print("\", Date=\"");
    Serial.print(__DATE__);
    Serial.println("\");");
  }

  Serial.println("Running...");
}

void loop() {
  if((millis() - oldTime) > 1000) {
    detachInterrupt(sensorInterrupt);
  }
}

```

```

    flowRate = ((1000.0 / (millis() - oldTime)) * pulseCount) / calibrationFactor;
    oldTime = millis();
    flowHour = flowRate * 60;
    pulseCount = 0;
    attachInterrupt(sensorInterrupt, pulseCounter, FALLING);
}

if (RTC.read(tm)) {
    if(lastSeconds != tm.Second){
        lastSeconds = tm.Second;
        if(tm.Second==0) {
            pressure_analog_val = analogRead(pressure_pin);
            Data sheet:
             $V_{out} = V_S \times (0.009 \times P - 0.095) \pm (\text{Pressure Error} \times \text{Temp. Factor} \times 0.009 \times V_S)$ 
             $V_S = 5.1 \pm 0.25 \text{ Vdc}$ 
            pressure_kpa = ((float)pressure_analog_val/1024.0+0.095)/0.009 - 1.45;
            pressure_atm = KPA2ATM*pressure_kpa;

            /* відправка даних в serialport для відображення на virtual terminal */
            Serial.print("Pressure in kPa: ");
            Serial.print(pressure_kpa);

            Serial.print("; Pressure in Atm: ");
            Serial.print(pressure_atm);

            Serial.println();

            Serial.print("Flow rate: ");
            Serial.print(flowHour);
            Serial.print(" L/hour; ");
            Serial.print("\t");
            Serial.print(" Pulses: ");
            Serial.print(pulseCount);
            Serial.println();

            sendFormattedData();
        }
    }
} else {
    if (RTC.chipPresent()) {
        Serial.println("The DS1307 is stopped. Please run the SetTime");
        Serial.println("example to initialize the time and begin running.");
        Serial.println();
    } else {
        Serial.println("DS1307 read error! Please check the circuitry.");
        Serial.println();
    }
}

}

void pulseCounter()
{
    pulseCount++;
}

void sendFormattedData() {
    Serial.println();
    Serial.println("Sending data ...");
    Serial.print(startMarker);
    Serial.print(delimiter);
}

```

```

    Serial.print(pressure_atm);
    Serial.print(delimiter);
    Serial.print(flowHour);
    Serial.print(delimiter);
    Serial.print(endMarker);
    Serial.println();
}

bool getTime(const char *str)
{
    int Hour, Min, Sec;

    if (sscanf(str, "%d:%d:%d", &Hour, &Min, &Sec) != 3) return false;
    tm.Hour = Hour;
    tm.Minute = Min;
    tm.Second = Sec;
    return true;
}

bool getDate(const char *str)
{
    char Month[12];
    int Day, Year;
    uint8_t monthIndex;

    if (sscanf(str, "%s %d %d", Month, &Day, &Year) != 3) return false;
    for (monthIndex = 0; monthIndex < 12; monthIndex++) {
        if (strcmp(Month, monthName[monthIndex]) == 0) break;
    }
    if (monthIndex >= 12) return false;
    tm.Day = Day;
    tm.Month = monthIndex + 1;
    tm.Year = CalendarYrToTm(Year);
    return true;
}

```

B.7. Комп'ютерна програма в Arduino IDE для моделювання «Базова станція» («Arduino MEGA»)

```

#include <TimeLib.h>
#include "DS1307RTC.h"

struct pump_node
{
    float pressure_atm;
    float flow_hourly;
};

struct field_node
{
    float precipitation;
    float soil_temperature;
    float air_temperature;
    float air_relative_humidity;
    float soil_relative_humidity;
};

pump_node pump_data;
field_node field_data;

```

```

const char startMarker = '&';
const char endMarker = '&';
const char delimiter = ';';

const char *monthName[12] = {
    "Jan", "Feb", "Mar", "Apr", "May", "Jun",
    "Jul", "Aug", "Sep", "Oct", "Nov", "Dec"
};

tmElements_t tm;

int lastSeconds = 0;
int lastMinutes = 0;

byte parsed_pump = 0;
byte parsed_field = 0;

void setup() {
    Serial.begin(9600);
    while (!Serial) ;

    Serial1.begin(9600);
    while (!Serial1) ;

    Serial2.begin(9600);
    while (!Serial2) ;

    Serial3.begin(9600);
    while (!Serial3) ;

    bool parse=false;
    bool config=false;

    if (getDate(__DATE__) && getTime(__TIME__)) {
        parse = true;

        tm.Day = 30;
        tm.Month = 3;
        tm.Year = 2006;

        tm.Hour = 10;
        tm.Minute = 59;
        tm.Second = 55;

        if (RTC.write(tm)) {
            config = true;
        }
    }

    if (parse && config) {
        Serial.println("DS1307 configured ");
        Serial.print("Time=");
        Serial.print(__TIME__);
        Serial.print(", Date=");
        Serial.println(__DATE__);
    } else if (parse) {
        Serial.println("DS1307 Communication Error :-{");
        Serial.println("Please check your circuitry");
    } else {
        Serial.print("Could not parse info from the compiler, Time=\"");
        Serial.print(__TIME__);
    }
}

```

```

    Serial.print("\", Date=\");
    Serial.print(__DATE__);
    Serial.println("\");
}

Serial.println("Running...");
}

void loop() {
    if (Serial1.available() > 0) {
        parsed_pump = 0;
        String receivedData = Serial1.readStringUntil('\n');
        parseSerialData_pump(receivedData, pump_data);
        if(parsed_pump==1) {
            Serial.println("from Pump module: ");
            Serial.println(receivedData);
            Serial.print("Pressure in Atm: ");
            Serial.println(pump_data.pressure_atm,2);
            Serial.print("Flow rate in L/hour: ");
            Serial.println(pump_data.flow_hourly,2);
            Serial.println();
        }
    }

    if (Serial2.available() > 0) {
        parsed_field = 0;
        String receivedData = Serial2.readStringUntil('\n');
        parseSerialData_field(receivedData, field_data);
        if(parsed_field==1){
            Serial.println("from Field module: ");
            Serial.println(receivedData);
            Serial.print("Precipitation: ");
            Serial.println(field_data.precipitation);
            Serial.print("Soil temperature: ");
            Serial.println(field_data.soil_temperature,1);
            Serial.print("Air temperature: ");
            Serial.println(field_data.air_temperature,0);
            Serial.print("Air relative humidity: ");
            Serial.println(field_data.air_relative_humidity,1);
            Serial.print("Soil relative humidity: ");
            Serial.println(field_data.soil_relative_humidity,0);
            Serial.println();
        }
    }

    if (RTC.read(tm)) {
        //if(lastMinutes != tm.Minute){
        //    lastMinutes = tm.Minute;
        if(lastSeconds != tm.Second){
            lastSeconds = tm.Second;
            if(tm.Second==2 && parsed_field==1 && parsed_pump==1) {
                sendFormattedData2();
                //sendFormattedData();
            }
        }
    } else {
        if (RTC.chipPresent()) {
            Serial.println("The DS1307 is stopped. Please run the SetTime");
            Serial.println("example to initialize the time and begin running.");
            Serial.println();
        } else {

```

```

        Serial.println("DS1307 read error! Please check the circuitry.");
        Serial.println();
    }
}

bool getTime(const char *str)
{
    int Hour, Min, Sec;

    if (sscanf(str, "%d:%d:%d", &Hour, &Min, &Sec) != 3) return false;
    tm.Hour = Hour;
    tm.Minute = Min;
    tm.Second = Sec;
    return true;
}

bool getDate(const char *str)
{
    char Month[12];
    int Day, Year;
    uint8_t monthIndex;

    if (sscanf(str, "%s %d %d", Month, &Day, &Year) != 3) return false;
    for (monthIndex = 0; monthIndex < 12; monthIndex++) {
        if (strcmp(Month, monthName[monthIndex]) == 0) break;
    }
    if (monthIndex >= 12) return false;
    tm.Day = Day;
    tm.Month = monthIndex + 1;
    tm.Year = CalendarYrToTm(Year);
    return true;
}

void parseSerialData_pump(String data, pump_node& dataContainer) {
    if (data.startsWith("&") && data.endsWith("&\r")){
        Serial.println("Parsing pump data...");
        data = data.substring(1, data.length() - 1);
        int semicolonIndex = -1;
        for (int i = 0; i < 3; ++i) {
            int nextSemicolonIndex = data.indexOf(';', semicolonIndex + 1);
            if (nextSemicolonIndex != -1) {
                String substring = data.substring(semicolonIndex + 1, nextSemicolonIndex);
                switch (i) {
                    case 1:
                        dataContainer.pressure_atm = substring.toFloat();
                        break;
                    case 2:
                        dataContainer.flow_hourly = substring.toFloat();
                        break;
                }
                semicolonIndex = nextSemicolonIndex;
            }
        }
        parsed_pump = 1;
    }
}

void parseSerialData_field(String data, field_node& dataContainer) {
    if (data.startsWith("&") && data.endsWith("&\r")){
        Serial.println("Parsing field data...");
        data = data.substring(1, data.length() - 1);
    }
}

```



```

int semicolonIndex = -1;
for (int i = 0; i < 6; ++i) {
    int nextSemicolonIndex = data.indexOf(';', semicolonIndex + 1);
    if (nextSemicolonIndex != -1) {
        String substring = data.substring(semicolonIndex + 1, nextSemicolonIndex);
        switch (i) {
            case 1:
                dataContainer.precipitation = substring.toFloat();
                break;
            case 2:
                dataContainer.soil_temperature = substring.toFloat();
                break;
            case 3:
                dataContainer.air_temperature = substring.toFloat();
                break;
            case 4:
                dataContainer.air_relative_humidity = substring.toFloat();
                break;
            case 5:
                dataContainer.soil_relative_humidity = substring.toFloat();
                break;
        }
        semicolonIndex = nextSemicolonIndex;
    }
}
parsed_field = 1;
}
}

void sendFormattedData() {
    Serial.println();
    Serial.println("Sending data ...");
    Serial3.print(startMarker);
    Serial3.print(delimiter);
    Serial3.print(pump_data.pressure_atm);
    Serial3.print(delimiter);
    Serial3.print(pump_data.flow_hourly);
    Serial3.print(delimiter);
    Serial3.print(field_data.precipitation);
    Serial3.print(delimiter);
    Serial3.print(field_data.soil_temperature);
    Serial3.print(delimiter);
    Serial3.print(field_data.air_temperature);
    Serial3.print(delimiter);
    Serial3.print(field_data.air_relative_humidity);
    Serial3.print(delimiter);
    Serial3.print(field_data.soil_relative_humidity);
    Serial3.print(delimiter);
    Serial3.print(endMarker);
    Serial3.println();
}

void sendFormattedData2() {
    float dataToSend[] = {
        pump_data.pressure_atm,
        pump_data.flow_hourly,
        field_data.precipitation,
        field_data.soil_temperature,
        field_data.air_temperature,
        field_data.air_relative_humidity,
        field_data.soil_relative_humidity
    }
}

```

```

};

uint8_t byteData[16];

int byteIndex = 0;

for (int i = 0; i < 3; i++) { // 3 floats: 0.15, 0.30, 14.1
    float f = dataToSend[i];
    uint8_t* bytePtr = (uint8_t*)&f;
    for (int j = sizeof(float) - 1; j > -1; j--) { // big-indiat to low_indian
        byteData[byteIndex++] = bytePtr[j];
    }
}

for (int i = 3; i < 7; i++) { // 4 integers: 21, 23, 67, 88
    byteData[byteIndex++] = (uint8_t)dataToSend[i];
}

Serial.println("Sending raw data...");
for (int i = 0; i < 16; i++) {
    Serial.print("Byte ");
    Serial.print(i);
    Serial.print(": ");
    Serial.println(byteData[i], HEX); // Display each byte as hex
}

// Send the raw byte array via Serial3
//Serial.println("Sending binary data...");
//Serial.write(byteData, sizeof(byteData));
}

```

B.8. Комп'ютерна програма в Matlab & Simulink для реалізації предикативного контролю на базі fmincon (використано студентську навчальну версію програмного забезпечення Matlab & Simulink)

```

function ss_optim = optimal_irrigation(s_depth, s_alpha, s_E, s_SS, t_model, t_depth,
s_theta_des, init_theta, s_sinit, ss_min, ss_max)
% Параметри
L = s_depth;           % Глибина ґрунту (м)
T = t_model;           % Час моделювання, год
Nx = 100;              % Просторовий розподіл
Nt = 60 * T;           % Часові кроки (60 кроків на 1 год)
alpha = s_alpha;       % Провідність (м/год)      0.0081, 0.0108, 0.0126
E = s_E + s_SS;        % Випаровування (м/год) + споживання 0.00008, 0.00016, 0.00032

% Просторовий та часовий кроки
dx = L / Nx;
dt = T / Nt;

% Ціль
target_depth = t_depth;
idx_depth = round(target_depth / dx);
theta_des = s_theta_des;

% Початкова вологість (верхній шар ґрунту)
h0 = init_theta; % initial_moisture_values = 0.5:0.1:1.0;
%h0 = 0;
theta_fin = 0;
% Функція втрати: мінімізуємо відхилення вологості на 0.8 м від 85%

```

```

function J = cost_function(S)
    h = solve_richards(h0, S, alpha, E, Nx, Nt, dx, dt);
    theta = h(:, idx_depth);
    theta_fin = theta;
    %theta = van_genuchten(h(:, idx_depth));
    J = sum((theta - theta_des).^2);
end

% Обмеження на S(t)
S_min = ss_min; S_max = ss_max; % Межі подачі води
S0 = s_sinit * ones(Nt, 1); % Початкове припущення
lb = S_min * ones(Nt, 1);
ub = S_max * ones(Nt, 1);

% Налаштування оптимізатора
options = optimoptions('fmincon','Display','Iter','Algorithm','sqp','OptimalityTol',
1e-4,...

'PlotFcn',{@optimplotx,@optimplotfval,@optimplotfirstorderopt},'MaxIter',700,'StepTol',
1e-4);
%optimoptions('fmincon','Algorithm','sqp','Display','iter');
S_opt = fmincon(@cost_function, S0, [], [], [], [], lb, ub, [], options);

%times = 1:Nt;
ss_optim = S_opt(1)*1e3;
%st_theta = theta_fin*100;
% codegen -config:mex optimal_irrigation -args {0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0}
End

```

B.9. Level-2 MATLAB S-Function для optimal_irrigation

```

function optimal_irrigation_sfunc(block)
    setup(block);
end

function setup(block)
    block.NumInputPorts = 11;
    block.NumOutputPorts = 1;

    for i = 1:11
        block.SetPreCompInpPortInfoToDynamic;
        block.InputPort(i).Dimensions = 1;
        block.InputPort(i).DatatypeID = 0; % double
        block.InputPort(i).Complexity = 'Real';
        block.InputPort(i).DirectFeedthrough = true;
    end

    block.OutputPort(1).Dimensions = 1;
    block.OutputPort(1).DatatypeID = 0; % double
    block.OutputPort(1).Complexity = 'Real';

    block.SampleTimes = [60 0]; % 0.1s sample time, second value for offset (0 means no
offset)

    block.SetAccelRunOnTLC(true);

    block.SimStateCompliance = 'DefaultSimState';

    block.RegBlockMethod('Outputs', @Outputs);

```

```

end

function Outputs(block)
    block.OutputPort(1).Data = optimal_irrigation_mex( ...
        block.InputPort(1).Data, ...
        block.InputPort(2).Data, ...
        block.InputPort(3).Data, ...
        block.InputPort(4).Data, ...
        block.InputPort(5).Data, ...
        block.InputPort(6).Data, ...
        block.InputPort(7).Data, ...
        block.InputPort(8).Data, ...
        block.InputPort(9).Data, ...
        block.InputPort(10).Data, ...
        block.InputPort(11).Data ...
    );
End

```

B.10. Тлс файл для генерації коду Level-2 MATLAB S-Function optimal_irrigation_sfunc

```

%% File: optimal_irrigation_sfunc.tlc

%% Required setup
%% This file supports code generation from the Level-2 MATLAB S-function

%% Register the TLC version
implements "optimal_irrigation_sfunc" "C"

%function Outputs(block, system) Output
%assign u = LibBlockInputSignal(0, "", "", 0)
%assign u1 = LibBlockInputSignal(1, "", "", 0)
%assign u2 = LibBlockInputSignal(2, "", "", 0)
%assign u3 = LibBlockInputSignal(3, "", "", 0)
%assign u4 = LibBlockInputSignal(4, "", "", 0)
%assign u5 = LibBlockInputSignal(5, "", "", 0)
%assign u6 = LibBlockInputSignal(6, "", "", 0)
%assign u7 = LibBlockInputSignal(7, "", "", 0)
%assign u8 = LibBlockInputSignal(8, "", "", 0)
%assign u9 = LibBlockInputSignal(9, "", "", 0)
%assign u10 = LibBlockInputSignal(10, "", "", 0)

%assign y = LibBlockOutputSignal(0, "", "", 0)

%% Call the external C function generated from MATLAB Coder
%<y> = optimal_irrigation(&emlrtContextGlobal, %<u>, %<u1>, %<u2>, %<u3>, %<u4>, %<u5>,
%<u6>, %<u7>, %<u8>, %<u9>, %<u10>);
%endfunction

```