

Міністерство освіти і науки України
Тернопільський національний технічний університет імені Івана Пулюя

Факультет прикладних інформаційних технологій та електроінженерії
(повна назва факультету)

Кафедра комп'ютерно-інтегрованих технологій
(повна назва кафедри)

КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА

на здобуття освітнього ступеня

бакалавр

(назва освітнього ступеня)

на тему: Проєктування інтелектуальної системи моніторингу та оптимізації витрат води в середовищі тепличного комплексу

Виконав: студент IV курсу, групи КТс-41

174 Автоматизація,
комп'ютерно-інтегровані
технології та робототехніка
(шифр і назва спеціальності)

Поселюжний Ю.П.
(підпис) (прізвище та ініціали)

Вінніцький О.І.
(підпис) (прізвище та ініціали)

Керівник
(підпис) Стухляк П.Д.
(прізвище та ініціали)

Нормоконтроль
(підпис) Чихіра І.В.
(прізвище та ініціали)

Завідувач кафедри
(підпис) Голотенко О.С.
(прізвище та ініціали)

Рецензент
(підпис) Медвідь В.Р.
(прізвище та ініціали)

Тернопіль
2026

Міністерство освіти і науки України
Тернопільський національний технічний університет імені Івана Пулюя

Факультет прикладних інформаційних технологій та електроінженерії
(повна назва факультету)

Кафедра комп'ютерно-інтегрованих технологій
(повна назва кафедри)

ЗАТВЕРДЖУЮ

Завідувач кафедри

(підпис) Голотенко О.С.
(прізвище та ініціали)

«_14_» _ квітня 2026 р.____

**ЗАВДАННЯ
НА КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ**

на здобуття освітнього ступеня Бакалавр
(назва освітнього ступеня)

за спеціальністю 174 Автоматизація, комп'ютерно інтегровані технології та робототехніка
(шифр і назва спеціальності)

Студенту Поселюжному Юрію Петровичу
(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема роботи Проектування інтелектуальної системи моніторингу та оптимізації витрат води в середовищі тепличного комплексу

Керівник роботи Стухляк Петро Данилович, д.т.н., професор кафедри КТ
(прізвище, ім'я, по батькові, науковий ступінь, вчене звання)

Затверджені наказом ректора від «_14_» квітня 2026 року № 4/9-185

2. Термін подання студентом завершеної роботи 25 червня 2025р.

3. Вихідні дані до роботи Наукові публікації про інтелектуальні системи моніторингу

4. Зміст роботи

Вступ. 1 Аналітична частина. 1.1 Аналіз технологічного процесу водозабезпечення тепличного комплексу. 1.2 Огляд сучасних систем моніторингу та автоматизованого поливу. 1.3 Аналіз параметрів моніторингу. 1.4 Визначення вимог до системи. 1.5 Постановка задачі проектування 1.6 Висновок до першого розділу 2 Проектна частина. 2.1 Розроблення структурної схеми інтелектуальної системи. 2.2 Вибір технічних засобів автоматизації. 2.3 Розроблення функціональної схеми та алгоритму роботи системи. 2.4 Проектування інформаційної моделі та бази даних системи. 2.5 Розроблення ПЗ та інтерфейсу користувача 2.6 Висновок до другого розділу 3 Спеціальна частина. 3.1 Математична модель водоспоживання тепличної зони. 3.2 Розроблення алгоритму інтелектуальної оптимізації витрат води. 3.3 Моделювання роботи системи та сценарії функціонування. 3.4 Оцінювання ефективності запропонованого рішення. 3.5 Надійність, безпека та перспективи розвитку системи 3.6 Висновок до третього розділу. 4 Охорона праці та безпека в надзвичайних ситуаціях. Висновки, Перелік джерел, Додатки

5. Перелік графічного матеріалу

1 Титульна сторінка. 2 Тема, Мета, Об'єкт, Предмет дослідження. 3 Завдання дослідження 4 Актуальність дослідження. 5 Структурна схема системи. 6 Функціональна схема системи. 7 Схема електрична принципова. 8 Алгоритм керування поливом. 9 Схема взаємодії програмних модулів. 10 Макет головного екрану користувача. 11 Приклад зміни вологості. 12 Візуалізація системи. 13 Висновки. 14 Завершальний.

6. Консультанти розділів роботи

Розділ	Прізвище, ініціали та посада консультанта	Підпис, дата	
		завдання видав	завдання прийняв
Безпека в надзвичайних ситуаціях	к.т.н., доц. Сенчишин В.С.		

7. Дата видачі завдання 14 квітня 2026 р.

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№ з/п	Назва етапів роботи	Термін виконання етапів роботи	Примітка
1.	Ознайомлення з завданням до кваліфікаційної роботи	14.04.2026	Виконано
2.	Підбір джерел про інтелектуальні системи керування	02.06.2026	Виконано
3.	Вибір компонентної бази	04.06.2026	Виконано
4.	Розроблення інтелектуальної системи моніторингу та оптимізації витрат води	05.06.2026	Виконано
5.	Переклад та опрацювання джерел	06.06.2026	Виконано
6.	Розроблення прототипу системи керування	07.06.2026	Виконано
7.	Оформлення розділу «Аналітична частина»	10.06.2026	Виконано
8.	Оформлення розділу «Проектна частина»	13.06.2026	Виконано
9.	Оформлення розділу «Спеціальна частина»	15.06.2026	Виконано
10.	Виконання розділу «Охорона праці та безпека в НС»	16.06.2026	Виконано
11.	Підготовка графічного матеріалу	17.06.2026	Виконано
12.	Оформлення кваліфікаційної роботи	18.06.2026	Виконано
13.	Нормоконтроль	19.06.2026	Виконано
14.	Перевірка на плагіат	20.06.2026	Виконано
15.	Попередній захист кваліфікаційної роботи	23.06.2026	Виконано
16.	Захист кваліфікаційної роботи	25.06.2026	

Студент

(підпис)

Поселюжний Ю.П.

(прізвище та ініціали)

Керівник роботи

(підпис)

Стухляк П.Д.

(прізвище та ініціали)

Міністерство освіти і науки України
Тернопільський національний технічний університет імені Івана Пулюя

Факультет прикладних інформаційних технологій та електроінженерії
(повна назва факультету)

Кафедра комп'ютерно-інтегрованих технологій
(повна назва кафедри)

ЗАТВЕРДЖУЮ

Завідувач кафедри

(підпис) Голотенко О.С.
(прізвище та ініціали)

«14» квітня 2026 р.____

**ЗАВДАННЯ
НА КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ**

на здобуття освітнього ступеня Бакалавр
(назва освітнього ступеня)

за спеціальністю 174 Автоматизація, комп'ютерно інтегровані технології та робототехніка
(шифр і назва спеціальності)

Студенту Віннічкому Олександрові Ігоровичу
(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема роботи Проектування інтелектуальної системи моніторингу та оптимізації витрат води в середовищі тепличного комплексу

Керівник роботи Стухляк Петро Данилович, д.т.н., професор кафедри КТ
(прізвище, ім'я, по батькові, науковий ступінь, вчене звання)

Затверджені наказом ректора від «14» квітня 2026 року № 4/9-185

2. Термін подання студентом завершеної роботи 25 червня 2025р.

3. Вихідні дані до роботи Наукові публікації про інтелектуальні системи моніторингу

4. Зміст роботи

Вступ. 1 Аналітична частина. 1.1 Аналіз технологічного процесу водозабезпечення тепличного комплексу. 1.2 Огляд сучасних систем моніторингу та автоматизованого поливу. 1.3 Аналіз параметрів моніторингу. 1.4 Визначення вимог до системи. 1.5 Постановка задачі проектування 1.6 Висновок до першого розділу 2 Проектна частина. 2.1 Розроблення структурної схеми інтелектуальної системи. 2.2 Вибір технічних засобів автоматизації. 2.3 Розроблення функціональної схеми та алгоритму роботи системи. 2.4 Проектування інформаційної моделі та бази даних системи. 2.5 Розроблення ПЗ та інтерфейсу користувача 2.6 Висновок до другого розділу 3 Спеціальна частина. 3.1 Математична модель водоспоживання тепличної зони. 3.2 Розроблення алгоритму інтелектуальної оптимізації витрат води. 3.3 Моделювання роботи системи та сценарії функціонування. 3.4 Оцінювання ефективності запропонованого рішення. 3.5 Надійність, безпека та перспективи розвитку системи 3.6 Висновок до третього розділу. 4 Охорона праці та безпека в надзвичайних ситуаціях. Висновки, Перелік джерел, Додатки

5. Перелік графічного матеріалу

1 Титульна сторінка. 2 Тема, Мета, Об'єкт, Предмет дослідження. 3 Завдання дослідження 4 Актуальність дослідження. 5 Структурна схема системи. 6 Функціональна схема системи. 7 Схема електрична принципова. 8 Алгоритм керування поливом. 9 Схема взаємодії програмних модулів. 10 Макет головного екрану користувача. 11 Приклад зміни вологості. 12 Візуалізація системи. 13 Висновки. 14 Завершальний.

6. Консультанти розділів роботи

Розділ	Прізвище, ініціали та посада консультанта	Підпис, дата	
		завдання видав	завдання прийняв
Безпека в надзвичайних ситуаціях	к.т.н., доц. Сенчишин В.С.		

7. Дата видачі завдання 14 квітня 2026 р.

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№ з/п	Назва етапів роботи	Термін виконання етапів роботи	Примітка
1.	Ознайомлення з завданням до кваліфікаційної роботи	14.04.2026	Виконано
2.	Підбір джерел про інтелектуальні системи керування	02.06.2026	Виконано
3.	Вибір компонентної бази	04.06.2026	Виконано
4.	Розроблення інтелектуальної системи моніторингу та оптимізації витрат води	05.06.2026	Виконано
5.	Переклад та опрацювання джерел	06.06.2026	Виконано
6.	Розроблення прототипу системи керування	07.06.2026	Виконано
7.	Оформлення розділу «Аналітична частина»	10.06.2026	Виконано
8.	Оформлення розділу «Проектна частина»	13.06.2026	Виконано
9.	Оформлення розділу «Спеціальна частина»	15.06.2026	Виконано
10.	Виконання розділу «Охорона праці та безпека в НС»	16.06.2026	Виконано
11.	Підготовка графічного матеріалу	17.06.2026	Виконано
12.	Оформлення кваліфікаційної роботи	18.06.2026	Виконано
13.	Нормоконтроль	19.06.2026	Виконано
14.	Перевірка на плагіат	20.06.2026	Виконано
15.	Попередній захист кваліфікаційної роботи	23.06.2026	Виконано
16.	Захист кваліфікаційної роботи	25.06.2026	

Студент

(підпис)

Вінницький О.І.

(прізвище та ініціали)

Керівник роботи

(підпис)

Стухляк П.Д.

(прізвище та ініціали)

АНОТАЦІЯ

Проектування інтелектуальної системи моніторингу та оптимізації витрат води в середовищі тепличного комплексу (комплексна тема) // Кваліфікаційна робота освітнього рівня «Бакалавр» // Поселюжний Юрій Петрович, Вінницький Олександр Ігорович // Тернопільський національний технічний університет імені Івана Пулюя, факультет прикладних інформаційних технологій та електроінженерії, кафедра комп'ютерно-інтегрованих технологій, група КТс-41 // Тернопіль, 2026 // С. 57, рис. – 7, табл. – 14, кресл. – 14, додат. – 18, бібліогр. – 31.

Ключові слова: інтелектуальна система, тепличний комплекс, АСУ, моніторинг, оптимізація, система поливу, насос, ПЛК, алгоритм.

Кваліфікаційна робота присвячена проектуванню інтелектуальної системи моніторингу та оптимізації витрат води в тепличному комплексі.

У першому розділі проаналізовано технологічний процес водозабезпечення теплиці, сучасні підходи до автоматизованого поливу, контрольовані параметри та вимоги до майбутньої системи;

У другому розділі розроблено структурну й функціональну схеми системи, обґрунтовано вибір технічних засобів автоматизації, інформаційну модель, програмні модулі та інтерфейс користувача;

У третьому розділі запропоновано математичну модель водоспоживання, алгоритм інтелектуальної оптимізації поливу, виконано імітаційне моделювання та оцінено ефективність і надійність розробленого рішення;

В четвертому розділі кваліфікаційної роботи: висвітлено питання з Безпеки життєдіяльності та Основ охорони праці.

Об'єктом дослідження є процеси водоспоживання та мікрокліматичного регулювання в середовищі тепличного комплексу.

Предметом дослідження є методи, технічні засоби, інформаційні моделі та програмні алгоритми моніторингу, аналізу й оптимізації витрат води в автоматизованій системі керування поливом.

ANNOTATION

Design of an intelligent system for monitoring and optimizing water consumption in a greenhouse complex environment (complex topic) // The educational level "Bachelor" qualification work // Poseliuzhnyi Yuriy Petrovych, Vinnitskyi Oleksandr Ihorovych // Ternopil Ivan Pulyuy National Technical University, Faculty of Applied Information Technologies and Electrical Engineering, Department of Computer-Integrated Technologies, KT-41 group // Ternopil, 2026 // P. 58, fig. - 7, tables - 14, chair. - 14, annexes - 18, ref. - 31.

Key words: intelligent system, greenhouse complex, automated control system, monitoring, optimization, irrigation system, pump, PLC, algorithm.

This qualification work devoted to the design of an intelligent system for monitoring and optimizing water consumption in a greenhouse complex.

The first chapter analyzes the technological process of greenhouse water supply, modern approaches to automated irrigation, controlled parameters, and requirements for the future system;

The second chapter presents the system's structural and functional diagrams, justifies the selection of automation hardware, the information model, software modules, and the user interface;

The third chapter proposes a mathematical model of water consumption and an algorithm for intelligent irrigation optimization; it also performs simulation modeling and evaluates the effectiveness and reliability of the developed solution;

The fourth chapter of this thesis addresses issues related to life safety and the fundamentals of occupational safety.

The object of the study is the processes of water consumption and microclimatic regulation within a greenhouse complex.

The subject of the study is the methods, technical means, information models, and software algorithms for monitoring, analyzing, and optimizing water consumption in an automated irrigation control system.

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ, СИМВОЛІВ, ОДИНИЦЬ, СКОРОЧЕНЬ І ТЕРМІНІВ

$W(t)$ — поточна вологість ґрунту або субстрату в момент часу t , %.

$W_{\min}$ — нижня допустима межа вологості ґрунту, %.

$W_{\max}$ — верхня допустима межа вологості ґрунту, %.

W_{opt} — цільове або оптимальне значення вологості ґрунту, після досягнення якого полив може бути завершений, %.

$Q(t)$ — поточна витрата води через поливний контур у момент часу t , л/хв або м³/год.

$P(t)$ — тиск у трубопроводі в момент часу t , бар або кПа.

$L(t)$ — рівень освітленості в тепличній зоні, лк.

$E(t)$ — оціночні втрати вологи через випаровування, транспірацію та дренаж, %/год.

$U(t)$ — керуючий вплив системи, що визначає стан насоса або електромагнітного клапана.

ПЛК — програмований логічний контролер, призначений для промислового керування технологічними процесами.

HMI (англ. Human–Machine Interface) — людино-машинний інтерфейс, призначений для візуалізації параметрів системи та взаємодії оператора з обладнанням.

SCADA (англ. Supervisory Control and Data Acquisition) — система диспетчерського керування та збору даних.

IoT (англ. Internet of Things) — Інтернет речей; концепція підключення пристроїв, датчиків і виконавчих механізмів до мережі для обміну даними.

MQTT (англ. Message Queuing Telemetry Transport) — легкий протокол передавання телеметричних даних, що використовується в IoT-системах.

Modbus — промисловий протокол обміну даними між контролерами, датчиками, модулями введення-виведення та SCADA/HMI-системами.

ЗМІСТ

ВСТУП	8
1 АНАЛІТИЧНА ЧАСТИНА	11
1.1 Аналіз технологічного процесу водозабезпечення тепличного комплексу	11
1.2 Огляд сучасних систем моніторингу та автоматизованого поливу ...	13
1.3 Аналіз параметрів моніторингу	15
1.4 Визначення вимог до системи.....	17
1.5 Постановка задачі проєктування	19
1.6 Висновок до першого розділу	21
2 ПРОЕКТНА ЧАСТИНА	22
2.1 Розроблення структурної схеми інтелектуальної системи	22
2.2 Вибір технічних засобів автоматизації	24
2.3 Розроблення функціональної схеми та алгоритму роботи системи...	27
2.4 Проєктування інформаційної моделі та бази даних системи	29
2.5 Розроблення ПЗ та інтерфейсу користувача.....	32
2.6 Висновок до другого розділу	35
3 СПЕЦІАЛЬНА ЧАСТИНА.....	36
3.1 Математична модель водоспоживання тепличної зони	36
3.2 Розроблення алгоритму інтелектуальної оптимізації витрат води	38
3.3 Моделювання роботи системи та сценарії функціонування.....	41
3.4 Оцінювання ефективності запропонованого рішення.....	43
3.5 Надійність, безпека та перспективи розвитку системи	44
3.6 Висновок до третього розділу	46
4 ОХОРОНА ПРАЦІ ТА БЕЗПЕКА В НАДЗВИЧАЙНИХ СИТУАЦІЯХ	47
4.1 Питання щодо охорони праці.....	47
4.2 Питання щодо безпеки в надзвичайних ситуаціях	49
ВИСНОВКИ.....	53
ПЕРЕЛІК ДЖЕРЕЛ	55
ДОДАТКИ	

ВСТУП

Актуальність теми. Актуальність дослідження зумовлена необхідністю раціонального використання водних ресурсів у тепличному господарстві та підвищення ефективності автоматизованого керування поливом. Традиційні системи поливу часто не враховують фактичну вологість ґрунту, температуру, вологість повітря та інші параметри середовища, що призводить до перевитрат води або недостатнього зволоження рослин. Тому розроблення інтелектуальної системи моніторингу та оптимізації витрат води є важливим завданням, оскільки така система дає змогу підвищити точність керування, зменшити вплив людського фактора та забезпечити стабільні умови вирощування культур у тепличному комплексі.

Раціональне використання водних ресурсів є одним із ключових завдань сучасного тепличного господарства, у якому параметри середовища мають підтримуватися в заданих технологічних межах. Вода в тепличному комплексі є не лише ресурсом для росту рослин, а й керованим фактором, що впливає на вологість ґрунту або субстрату, інтенсивність транспірації, стабільність розвитку культур, енерговитрати та собівартість продукції. За умов підвищення вимог до ефективності агровиробництва актуальним є перехід від поливу за фіксованим графіком до систем, здатних аналізувати фактичний стан середовища й адаптувати керуючі дії до поточних умов [1], [2], [3].

Ручний і таймерний режими поливу мають обмежену точність, оскільки не враховують зміну вологості ґрунту, температури, відносної вологості повітря, освітленості, стану гідравлічної системи та фактичної витрати води. Надмірний полив спричиняє непродуктивні втрати води, погіршення повітряного режиму кореневої зони та збільшення навантаження на насосне обладнання. Недостатній полив може викликати водний стрес рослин і порушення стабільності вирощування. Тому для тепличного комплексу доцільним є застосування автоматизованої системи керування із сенсорним моніторингом, зворотним зв'язком, журналюванням подій і алгоритмом оптимізації витрат води [8], [9], [12].

Розвиток комп'ютерно-інтегрованих технологій, мікроконтролерних платформ, промислових контролерів, IoT-рішень і засобів передавання даних створює передумови для проектування інтелектуальних систем поливу. Такі системи поєднують апаратні засоби вимірювання, програмну обробку даних і автоматичне керування виконавчими механізмами, можуть працювати з кількома зонами теплиці, накопичувати історію вимірювань, виявляти аварійні ситуації та забезпечувати адаптивне дозування води [14], [15].

Мета і задачі дослідження. Є розроблення проекту інтелектуальної системи моніторингу параметрів тепличного середовища та оптимізації витрат води на основі сенсорних даних, алгоритмів аналізу й автоматизованого керування поливом.

Для досягнення поставленої мети у роботі необхідно розв'язати такі основні завдання:

- проаналізувати тепличний комплекс як об'єкт автоматизації;
- дослідити сучасні підходи до моніторингу та автоматизованого поливу;
- визначити параметри, що підлягають контролю;
- сформулювати вимоги до системи; розробити структурну та функціональну схеми;
- обґрунтувати вибір технічних засобів;
- спроектувати інформаційну модель і програмну архітектуру;
- запропонувати математичну модель водоспоживання;
- розробити алгоритм оптимізації витрат води;
- оцінити очікувану ефективність і надійність рішення.

Об'єкт дослідження: процеси водоспоживання, зволоження ґрунту або субстрату та мікрокліматичного регулювання в середовищі тепличного комплексу.

Предмет дослідження: методи, технічні засоби, інформаційні моделі та програмні алгоритми моніторингу, аналізу й оптимізації витрат води в автоматизованій системі керування поливом.

Наукова новизна одержаних результатів кваліфікаційної роботи полягає в удосконаленні підходу до керування поливом у тепличному

комплексі шляхом поєднання сенсорного моніторингу параметрів середовища з адаптивним алгоритмом оптимізації витрат води. На відміну від традиційних таймерних систем, запропоноване рішення враховує вологість ґрунту, температуру й вологість повітря, освітленість, витрату води та тиск у поливному контурі.

У роботі запропоновано інформаційну модель системи, яка поєднує дані про тепличні зони, сенсорні показники, події поливу, стан обладнання, налаштування користувача та аварійні повідомлення. Також розроблено алгоритм прийняття рішень із елементами адаптивного керування, що дозволяє запускати полив лише за фактичною потребою, блокувати його при перезволоженні та виявляти аварійні ситуації, зокрема витік, падіння тиску або відсутність витрати води при активному поливі.

Практичне значення одержаних результатів. Полягає в можливості використання запропонованої системи як основи для створення навчально-прикладного або промислового рішення автоматизованого керування поливом у тепличному комплексі. Розроблена структура системи, інформаційна модель, алгоритм керування та макети інтерфейсу можуть бути використані для побудови прототипу, що забезпечує моніторинг вологості ґрунту, температури, вологості повітря, освітленості, витрати води й тиску.

Практична цінність роботи полягає також у тому, що запропоноване рішення дає змогу зменшити непродуктивні витрати води, своєчасно виявляти аварійні ситуації, контролювати стан насоса й електромагнітних клапанів, вести журнал подій і підвищити зручність роботи оператора через вебінтерфейс або НМІ-панель. Отримані результати можуть бути застосовані під час проєктування систем автоматизованого поливу, навчальних стендів, лабораторних макетів і подальших досліджень у сфері комп'ютерно-інтегрованого керування тепличним середовищем.

1 АНАЛІТИЧНА ЧАСТИНА

Аналітична частина роботи спрямована на дослідження тепличного комплексу як об'єкта автоматизації, визначення особливостей технологічного процесу водозабезпечення та обґрунтування необхідності застосування інтелектуальної системи моніторингу. Для коректного проєктування автоматизованої системи керування поливом потрібно встановити, які параметри середовища впливають на водоспоживання, які технічні рішення вже використовуються в тепличному господарстві та які обмеження мають традиційні підходи.

У цьому розділі розглянуто технологічний процес поливу в тепличному комплексі, виконано огляд сучасних систем моніторингу й автоматизованого поливу, визначено параметри, що підлягають контролю, сформульовано вимоги до інтелектуальної системи та поставлено інженерну задачу її проєктування.

1.1 Аналіз технологічного процесу водозабезпечення тепличного комплексу

Тепличний комплекс є керованим агротехнічним середовищем, у якому створюються умови для вирощування рослин незалежно від зовнішніх кліматичних факторів. На відміну від відкритого ґрунту, теплиця має штучно організовані контури поливу, вентиляції, освітлення, обігріву, живлення рослин і контролю мікроклімату. Це дає змогу підвищувати стабільність виробництва, але одночасно ускладнює задачу керування, оскільки всі основні параметри середовища стають взаємозалежними [4], [6].

Процес водозабезпечення тепличного комплексу охоплює подачу води з резервуара або магістралі, її транспортування трубопроводами, розподіл за зонами вирощування, дозування через крапельниці або інші поливні пристрої та контроль фактичного зволоження ґрунту чи субстрату. У типовій системі використовуються насосне обладнання, фільтри, трубопроводи, електромагнітні клапани, витратоміри, датчики тиску й сенсори вологості.

Кожна зона теплиці може мати власний контур поливу, що дозволяє диференціювати подачу води залежно від культури, площі, типу субстрату та фази розвитку рослин.

Водний режим рослин визначається співвідношенням між надходженням води до кореневої зони та її втратами через транспірацію, випаровування з поверхні ґрунту або субстрату, дренаж і нерівномірність розподілу. Для оцінювання потреби рослин у воді важливими є вологість ґрунту, температура повітря, відносна вологість, освітленість, швидкість вентиляції, тип культури та агрофізичні властивості субстрату [1], [5], [7]. Якщо ці параметри не враховуються, система поливу може подавати воду за формальним графіком, який не відповідає реальному стану рослин.

Процес поливу є динамічним, оскільки потреба у воді змінюється протягом доби. За високої температури й інтенсивної освітленості зростає випаровування та транспірація, тому волога з кореневої зони витрачається швидше. За високої відносної вологості повітря або зниження температури інтенсивність втрат зменшується. Фаза росту культури також впливає на водоспоживання: молоді рослини потребують меншого обсягу води, тоді як у фазі активного росту та плодоношення потреба збільшується. Отже, фіксований режим поливу не може забезпечити оптимальне водозабезпечення в усіх умовах.

Основні фактори, що впливають на водоспоживання в тепличному комплексі, узагальнено в таблиці 1.1.

Традиційний ручний або напіваавтоматичний полив має низку недоліків. Оператор не завжди може точно оцінити фактичний стан ґрунту, особливо в багатозонній теплиці. Таймерний режим подає воду за наперед заданим графіком, але не враховує зміну мікроклімату та реальну вологість субстрату. У результаті можливі як перевитрати води, так і недостатнє зволоження. Для технологічного процесу вирощування це означає нестабільність умов, підвищене навантаження на обладнання та залежність від людського фактора.

Отже, тепличний комплекс доцільно розглядати як об'єкт автоматизованого керування із зворотним зв'язком. У такій системі рішення

про полив має прийматися не лише за часом, а на основі поточних вимірювань, оцінки тенденції зміни вологості та контролю фактичної витрати води.

Таблиця 1.1 — Фактори, що впливають на водоспоживання в тепличному комплексі

Фактор	Характер впливу на водоспоживання	Значення для автоматизації
Вологість ґрунту або субстрату	Безпосередньо визначає наявність води в кореневій зоні	Основний параметр для запуску або блокування поливу
Температура повітря	За підвищення температури зростають випаровування й транспірація	Використовується для коригування тривалості поливу
Відносна вологість повітря	Впливає на інтенсивність транспірації	Дає змогу уточнювати потребу рослин у воді
Освітленість	Визначає активність фотосинтезу та випаровування	Використовується для адаптації режиму поливу протягом доби
Фаза розвитку рослин	Змінює потребу культури у воді	Враховується під час налаштування порогів вологості
Тип ґрунту або субстрату	Визначає водоутримувальну здатність	Впливає на частоту та обсяг поливу
Стан поливного контуру	Витоки, засмічення, падіння тиску порушують подачу води	Потребує гідравлічного контролю й аварійної діагностики

1.2 Огляд сучасних систем моніторингу та автоматизованого поливу

Сучасні системи поливу відрізняються рівнем автоматизації, способом прийняття рішень, типом використовуваних датчиків і можливістю інтеграції з інформаційними системами. Найпростішим підходом є ручне керування, коли оператор самостійно визначає час і тривалість поливу. Такий підхід не потребує складного обладнання, але має низьку точність і залежить від досвіду персоналу.

Таймерні системи автоматизують запуск насоса або клапанів за заданим розкладом. Їх перевагою є простота реалізації, однак вони не реагують на зміну вологості ґрунту, температури, освітленості чи фактичної потреби рослин. У тепличних умовах це є суттєвим обмеженням, оскільки водоспоживання залежить не лише від часу доби, а й від мікроклімату та стану кореневої зони [8], [12].

Сенсорні системи поливу використовують датчики вологості ґрунту або субстрату, а також додаткові датчики температури, вологості повітря, тиску та витрати води. У таких системах полив запускається після досягнення певного порогового значення. Це підвищує точність керування порівняно з таймерним підходом, але потребує калібрування датчиків, перевірки достовірності даних і захисту від помилкових спрацювань [10], [11].

Крапельний полив є одним із найефективніших способів подачі води в тепличних комплексах, оскільки забезпечує локальне зволоження кореневої зони та зменшує втрати. Проте сама наявність крапельного поливу не гарантує оптимального водоспоживання. Без датчиків і алгоритмів керування така система може працювати в неадаптивному режимі, тобто подавати воду незалежно від фактичної вологості субстрату.

IoT-рішення для сільського господарства поєднують сенсори, контролери, мережеві протоколи, хмарні або локальні бази даних і користувацькі інтерфейси. Їх перевагою є можливість віддаленого моніторингу, накопичення історії вимірювань, побудови графіків і аналізу тенденцій [9], [14], [15]. Такі системи можуть використовувати MQTT, HTTP, Wi-Fi, Ethernet або інші канали передавання даних. Для промислових об'єктів важливими є також PLC, SCADA, Modbus RTU/TCP і стандартизовані підходи до програмування контролерів [25], [26], [27].

Крім того, IoT-підхід у точному землеробстві забезпечує перехід від ізольованого вимірювання параметрів до інтегрованого збору, передавання й аналітичної обробки даних, що є важливим для масштабування системи тепличного моніторингу [13].

Інтелектуальні системи поливу відрізняються тим, що не обмежуються простим порівнянням вологості з порогом. Вони можуть ураховувати декілька параметрів одночасно, застосовувати адаптивні правила, прогнозування, нечітку логіку або методи аналізу даних. Для бакалаврської роботи доцільним є використання комбінованого адаптивного алгоритму з елементами нечіткої логіки, оскільки він дозволяє формалізувати експертні правила без надмірного ускладнення системи [18], [19], [20].

Порівняння основних підходів до автоматизації поливу наведено в таблиці 1.2.

Таблиця 1.2 — Порівняння підходів до автоматизації поливу

Тип системи	Характеристика	Переваги	Недоліки
Ручне керування	Оператор самостійно запускає полив	Простота, мінімальна вартість	Висока похибка, залежність від персоналу
Таймерний полив	Полив виконується за фіксованим розкладом	Просте налаштування, базова автоматизація	Не враховує фактичну вологість і мікроклімат
Сенсорний полив	Рішення приймається за показниками датчиків	Зворотний зв'язок, вища точність	Потребує калібрування та контролю даних
Крапельний полив	Вода подається локально в кореневу зону	Зменшення втрат води	Без алгоритму може залишатися неадаптивним
ІоТ-система	Дані передаються до сервера або хмарної платформи	Віддалений моніторинг, історія даних	Потреба в надійному зв'язку та захисті
PLC/SCADA-система	Промисловий контроль і візуалізація	Надійність, масштабованість	Вища вартість і складність
Інтелектуальна система	Адаптивне керування за кількома параметрами	Оптимізація водоспоживання	Складніша розробка й налаштування

Аналіз показує, що найбільш перспективним для тепличного комплексу є поєднання сенсорного моніторингу, автоматизованого керування виконавчими механізмами, журналювання даних та адаптивного алгоритму. Саме такий підхід забезпечує основу для оптимізації витрат води й виявлення аварійних ситуацій.

1.3 Аналіз параметрів моніторингу

Ефективність інтелектуальної системи поливу залежить від того, які параметри вимірюються та як вони використовуються в алгоритмі керування. Для тепличного комплексу недостатньо контролювати лише час поливу або стан насоса. Необхідно отримувати інформацію про стан кореневої зони, мікроклімат, гідравлічний режим і працездатність обладнання.

Основним агротехнічним параметром є вологість ґрунту або субстрату $W(t)$. Вона визначає, чи є в кореневій зоні достатня кількість води для нормального розвитку рослин. Якщо $W(t)$ нижча за допустиму межу W_{min} , система повинна ініціювати полив. Якщо $W(t)$ перевищує верхню межу W_{max} , полив має бути заблокований, оскільки надмірне зволоження може погіршити повітряний режим кореневої зони [1], [7].

Температура повітря $T(t)$, відносна вологість $H(t)$ та освітленість $L(t)$ є мікрокліматичними параметрами, що впливають на інтенсивність випаровування й транспірації. За високої температури та високої освітленості потреба рослин у воді зростає, тоді як за нижчої температури або підвищеної вологості повітря втрати води зменшуються. Тому ці параметри доцільно використовувати не як прямі команди для поливу, а як коригувальні фактори в адаптивному алгоритмі [1], [8].

Гідравлічні параметри потрібні для контролю фактичної роботи системи. Витрата води $Q(t)$ показує, чи справді вода проходить через поливний контур після відкриття клапана. Тиск $P(t)$ дає змогу виявляти порушення гідравлічного режиму: падіння тиску, засмічення, витік або несправність насоса. Рівень води в резервуарі важливий для захисту насосного обладнання від роботи “всуху”.

Діагностичні параметри характеризують стан клапанів, насоса, датчиків і каналу зв'язку. Наприклад, якщо клапан закритий, але витратомір фіксує рух води, це може свідчити про витік або механічну несправність.

Якщо клапан відкритий, насос увімкнений, але витрата відсутня, можливими причинами є засмічення, відсутність води, падіння тиску або відмова насоса.

Групування параметрів інтелектуальної системи наведено в таблиці 1.3.

Таблиця 1.3 — Контрольовані параметри інтелектуальної системи моніторингу

Група параметрів	Параметри	Призначення в системі
Агротехнічні	Вологість ґрунту або субстрату, температура ґрунту	Визначення фактичної потреби в поливі
Мікрокліматичні	Температура повітря, відносна вологість, освітленість	Коригування рішення про тривалість і частоту поливу
Гідравлічні	Витрата води, тиск у трубопроводі, рівень води в резервуарі	Контроль подачі води та виявлення аварій
Діагностичні	Стан клапанів, насоса, датчиків, зв'язку	Оцінювання працездатності системи
Інформаційні	Час вимірювання, ідентифікатор зони, журнал подій	Архівування, аналіз і візуалізація даних

Під час вибору параметрів важливо враховувати не лише їх агротехнічне значення, а й придатність до автоматизованого вимірювання. Датчики мають забезпечувати достатню точність, стабільність показників, сумісність із контролером і стійкість до умов тепличного середовища. Для мікроконтролерної реалізації доцільними є цифрові сенсори температури, вологості та освітленості з інтерфейсом I²C, а також імпульсні або аналогові датчики для контролю витрати й тиску [21 – 24].

Отже, система моніторингу має бути багатопараметричною. Саме поєднання агротехнічних, мікрокліматичних, гідравлічних і діагностичних даних створює інформаційну основу для інтелектуального керування поливом.

1.4 Визначення вимог до системи

Вимоги до інтелектуальної системи моніторингу та оптимізації витрат води формуються з урахуванням особливостей тепличного комплексу, необхідності безперервного контролю параметрів середовища, стабільної роботи обладнання та можливості масштабування. Система має не лише вмикати або вимикати насос, а забезпечувати повний цикл автоматизованого керування: вимірювання, перевірку даних, аналіз, прийняття рішення, виконання команди, контроль результату й журналювання.

Функціональні вимоги охоплюють збір даних із датчиків, обробку показників, формування рішення про полив, керування насосом і клапанами, аварійне блокування, ручний режим, візуалізацію та збереження історії. Частота опитування датчиків має бути достатньою для відстеження зміни параметрів, але не надмірною, щоб не створювати зайве навантаження на контролер і мережу. Для більшості параметрів тепличного середовища доцільним є періодичний моніторинг з інтервалом від кількох секунд до кількох хвилин залежно від типу параметра.

Технічні вимоги визначають склад апаратних засобів. Система повинна містити контролер, сенсорні модулі, виконавчі пристрої, модулі зв'язку, джерело живлення та захисні елементи. Для навчально-прикладного варіанта доцільним є використання ESP32, оскільки він підтримує цифрові інтерфейси, має достатню кількість входів/виходів і вбудований Wi-Fi. Для промислового масштабування доцільно передбачити можливість переходу до PLC з використанням Modbus, RS-485 або Ethernet [21], [25], [26].

Програмні вимоги передбачають модульну структуру програмного забезпечення. Окремими блоками мають бути реалізовані опитування датчиків, фільтрація значень, перевірка достовірності, алгоритм прийняття рішень, керування виконавчими пристроями, архівування та інтерфейс користувача. Для передавання даних між контролером і сервером або вебінтерфейсом можуть використовуватися MQTT чи HTTP, а для промислових систем — стандартизовані протоколи обміну [27].

Інформаційні вимоги стосуються структури даних, часових міток, збереження історії вимірювань і журналу подій. Система повинна фіксувати не лише значення датчиків, а й моменти запуску та завершення поливу, обсяг поданої води, причину запуску, режим роботи та аварійні повідомлення. Це необхідно для подальшого аналізу ефективності, виявлення відхилень і коригування алгоритму.

Експлуатаційні вимоги включають надійність, простоту обслуговування, стійкість до підвищеної вологості, захист електричних з'єднань, стабільне живлення, можливість калібрування датчиків і діагностики несправностей.

Особливу увагу потрібно приділити безпечному режиму роботи: у разі некоректних даних, втрати зв'язку або аварійного стану система не повинна продовжувати полив без контролю.

Систематизацію вимог наведено в таблиці 1.4.

Таблиця 1.4 — Вимоги до інтелектуальної системи моніторингу та оптимізації витрат води.

Тип вимог	Зміст вимог
Функціональні	Збір даних, автоматичний полив, ручне керування, аварійна сигналізація, архівування
Технічні	Контролер, датчики, насос, клапани, модулі зв'язку, захист живлення
Програмні	Алгоритм керування, фільтрація даних, база даних, інтерфейс оператора
Інформаційні	Часові мітки, журнал подій, історія вимірювань, структура зон теплиці
Експлуатаційні	Надійність, простота обслуговування, калібрування, захист від вологи
Безпекові	Блокування поливу при аварії, контроль тиску, захист насоса, обмеження ручного доступу
Масштабованість	Додавання нових зон, датчиків, клапанів і контролерів
Інтелектуальні	Адаптація до мікроклімату, оптимізація витрат води, виявлення нетипових ситуацій

Інтелектуальна складова системи повинна забезпечувати не формальне виконання розкладу, а прийняття рішення на основі сукупності параметрів. Наприклад, однакове значення вологості ґрунту може вимагати різної реакції залежно від температури, освітленості та швидкості зниження вологості. Тому вимоги до системи передбачають використання адаптивного алгоритму, який коригує рішення відповідно до поточного стану середовища [8], [9], [11].

1.5 Постановка задачі проєктування

На основі аналізу технологічного процесу, сучасних систем поливу, контрольованих параметрів і вимог до майбутньої системи можна сформулювати інженерну задачу проєктування. Потрібно розробити інтелектуальну автоматизовану систему моніторингу та оптимізації витрат води для тепличного комплексу, яка забезпечує збір сенсорних даних, аналіз

стану середовища, автоматичне керування поливом і контроль аварійних ситуацій.

Межі системи охоплюють одну або кілька тепличних зон, кожна з яких має власні параметри вологості, поливний контур і виконавчі механізми. До складу системи входять датчики вологості ґрунту, температури й вологості повітря, освітленості, витрати води, тиску, контролер, насос, електромагнітні клапани, база даних і інтерфейс оператора. Зовнішніми щодо системи є агротехнічні рішення про вибір культури, загальна конструкція теплиці та джерело водопостачання.

Вхідними даними системи є значення вологості ґрунту $W(t)$, температури повітря $T(t)$, відносної вологості $H(t)$, освітленості $L(t)$, витрати води $Q(t)$, тиску $P(t)$, рівня води в резервуарі та стану обладнання. Також до вхідних даних належать налаштування користувача: допустимі межі вологості W_{min} і W_{max} , режим роботи, обмеження за тривалістю поливу та параметри окремих зон.

Вихідними даними є команди на запуск або зупинку насоса, відкриття чи закриття електромагнітних клапанів, повідомлення оператору, записи в базі даних, аварійні сигнали, графіки параметрів і рекомендації щодо режиму поливу. Керуючим впливом у системі є $U(t)$, що визначає стан виконавчих механізмів і фактичну подачу води до відповідної зони.

Основними обмеженнями задачі є необхідність підтримання вологості ґрунту в допустимому діапазоні, недопущення надмірного поливу, захист насоса від роботи без води, блокування системи при аварійних режимах, забезпечення достовірності сенсорних даних і можливість роботи в умовах підвищеної вологості. Для навчально-прикладного варіанта також важливими є помірна вартість компонентів і зрозумілість реалізації.

Критеріями ефективності системи є зменшення сумарної витрати води, підтримання $W(t)$ у межах W_{min} – W_{max} , зниження кількості непродуктивних поливів, своєчасне виявлення витоків і несправностей, стабільність роботи обладнання, інформативність моніторингу та можливість масштабування. Очікуваним результатом є проєкт системи, що поєднує сенсорний моніторинг,

алгоритмічну обробку даних, автоматичне керування поливом і елементи інтелектуальної оптимізації [8], [9], [11], [12].

Таким чином, задача проєктування полягає в створенні структурно, функціонально й інформаційно узгодженої системи, яка здатна працювати як навчально-прикладний прототип і водночас має логіку масштабування до промислового тепличного комплексу.

1.6 Висновок до першого розділу

У першому розділі проаналізовано тепличний комплекс як об'єкт автоматизації та встановлено, що процес водозабезпечення залежить від багатьох взаємопов'язаних параметрів: вологості ґрунту, температури, відносної вологості повітря, освітленості, фази розвитку рослин, типу субстрату та стану поливного контуру. Показано, що ручний і таймерний полив не забезпечують достатньої адаптивності, оскільки не враховують фактичний стан кореневої зони та мікроклімату.

На основі огляду сучасних підходів визначено доцільність розроблення інтелектуальної системи, що поєднує сенсорний моніторинг, автоматизоване керування насосом і клапанами, журналювання даних, аварійну діагностику та алгоритм оптимізації витрат води. Сформульовано вимоги до системи й поставлено інженерну задачу, яка буде деталізована в проєктній частині роботи.

2 ПРОЕКТНА ЧАСТИНА

Проектна частина роботи присвячена розробленню інтелектуальної системи моніторингу та оптимізації витрат води як програмно-апаратного комплексу, що забезпечує збір сенсорних даних, їх обробку, прийняття рішень і керування виконавчими механізмами поливу. На основі вимог, сформульованих в аналітичній частині, у цьому розділі визначено архітектуру системи, обґрунтовано вибір технічних засобів, описано функціональну логіку роботи, інформаційну модель і структуру програмного забезпечення.

Запропоноване рішення орієнтоване на навчально-прикладну реалізацію на базі мікроконтролера ESP32, але передбачає можливість масштабування до промислового рівня із застосуванням PLC, Modbus, Ethernet, SCADA або HMI-панелі. Такий підхід дає змогу поєднати доступність апаратної реалізації з принципами, характерними для сучасних комп'ютерно-інтегрованих систем автоматизації [8], [9], [14], [21], [25].

2.1 Розроблення структурної схеми інтелектуальної системи

Інтелектуальна система моніторингу та оптимізації витрат води проєктується як багаторівнева автоматизована система керування із замкненим контуром зворотного зв'язку. Основна логіка її роботи полягає в тому, що дані про стан тепличного середовища надходять від сенсорів до контролера, після чого програмний алгоритм оцінює потребу в поливі, формує керуючі сигнали для насоса й електромагнітних клапанів, контролює фактичну витрату води та зберігає результати в базі даних.

До складу системи входять такі основні рівні: сенсорний, контролерний, виконавчий, інформаційний та операторський. Сенсорний рівень забезпечує отримання первинної інформації про вологість ґрунту або субстрату, температуру й відносну вологість повітря, освітленість, витрату води та тиск у поливному контурі. Контролерний рівень виконує обробку даних, перевірку їх достовірності та запуск алгоритму прийняття рішень. Виконавчий рівень

реалізує фізичне керування насосом і клапанами. Інформаційний рівень відповідає за збереження вимірювань, журналювання подій і підготовку даних для аналізу. Операторський рівень забезпечує візуалізацію параметрів, налаштування системи й ручне втручання у разі потреби.

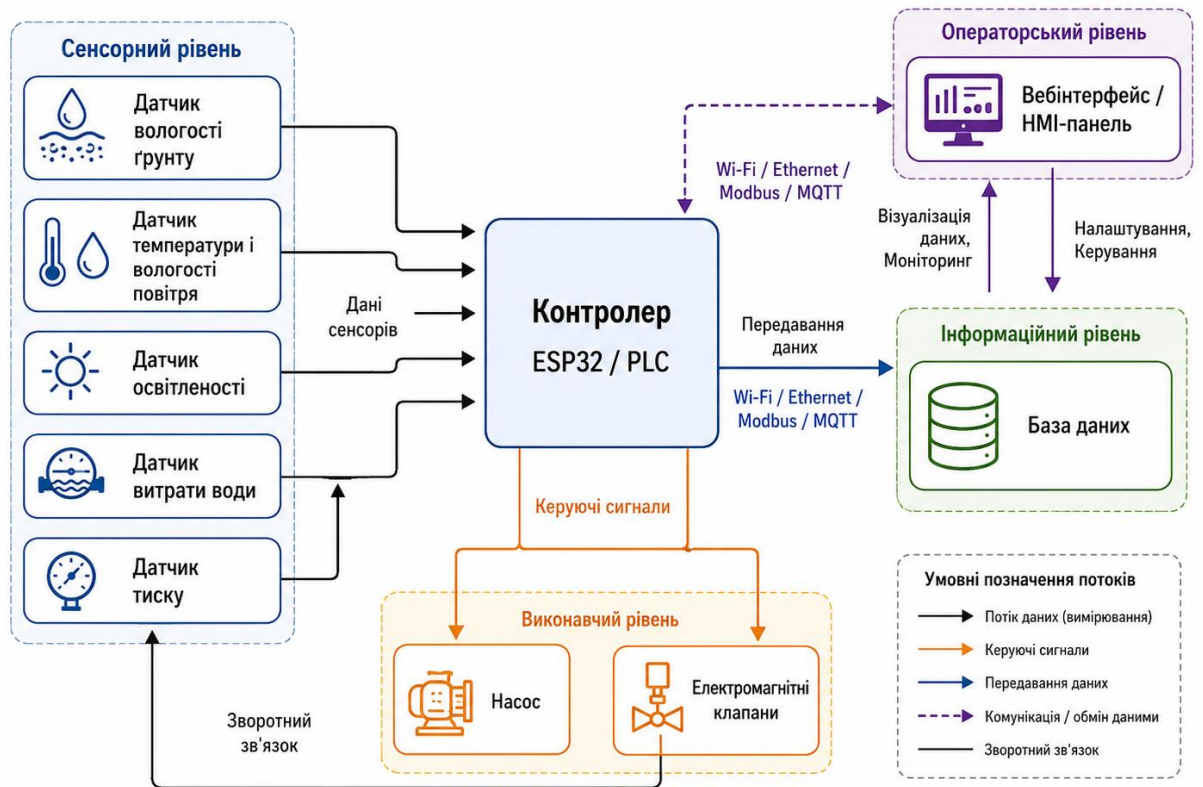


Рисунок 2.1 – Структурна схема інтелектуальної системи моніторингу та оптимізації витрат води

Структурно система може обслуговувати кілька тепличних зон. Кожна зона має власний датчик вологості ґрунту, окремий електромагнітний клапан і набір технологічних налаштувань: допустимі межі вологості W_{min} та W_{max} , тип культури, площу зони, тип субстрату й обмеження за тривалістю поливу.

Спільними для всієї теплиці можуть бути датчики температури, вологості повітря, освітленості, насос, витратомір і датчик тиску.

Таблиця 2.1 — Рівні архітектури системи та їх функціональне призначення

Рівень системи	Основні елементи	Функціональне призначення
Сенсорний рівень	Датчики вологості ґрунту, температури, вологості повітря, освітленості, витрати води, тиску	Отримання первинних даних про стан тепличного середовища та гідравлічного контуру
Контролерний рівень	ESP32 у навчальному варіанті або PLC у промисловому варіанті	Обробка сигналів, виконання алгоритму керування, формування команд
Виконавчий рівень	Насос, електромагнітні клапани, релейний або силовий модуль	Фізична реалізація поливу відповідної тепличної зони
Інформаційний рівень	База даних, журнал подій, сервер або локальне сховище	Збереження вимірювань, подій поливу, аварій і налаштувань
Операторський рівень	Вебінтерфейс, НМІ-панель або SCADA	Візуалізація параметрів, налаштування режимів, ручне керування

Архітектура системи відповідає принципам IoT-рішень у сільському господарстві, де контролер виконує роль периферійного вузла збору й первинної обробки даних, а серверна або локальна частина забезпечує збереження, аналіз і візуалізацію інформації [9], [14], [15]. Для промислової реалізації контролерний рівень може бути замінений PLC, а інформаційно-операторський рівень — SCADA-системою з підтримкою журналювання та аварійної сигналізації [25], [26].

2.2 Вибір технічних засобів автоматизації

Вибір технічних засобів автоматизації здійснюється з урахуванням умов експлуатації в тепличному середовищі, де на обладнання впливають підвищена вологість, коливання температури, можливість конденсації, електромагнітні завади від насосного обладнання та потреба в надійному керуванні виконавчими пристроями. Для бакалаврського проєкту доцільно прийняти мікроконтролерний варіант реалізації, оскільки він забезпечує достатню функціональність, доступність компонентів і можливість програмної реалізації алгоритмів моніторингу та керування.

Як центральний контролер обрано ESP32. Його перевагами є наявність вбудованого Wi-Fi, достатня кількість цифрових і аналогових входів/виходів, підтримка інтерфейсів I²C, SPI, UART, можливість роботи з MQTT або HTTP, а також достатня продуктивність для виконання алгоритмів збору даних, фільтрації та прийняття рішень [21], [27]. Для промислової експлуатації доцільно передбачити альтернативний варіант на базі PLC, який має кращу електромагнітну стійкість, промислове виконання входів/виходів, підтримку Modbus і стандартизованих мов програмування [25], [26].

Для вимірювання вологості ґрунту доцільно застосувати ємнісний датчик, оскільки він менш схильний до корозії, ніж резистивні сенсори. Його показники можуть бути подані у вигляді аналогового сигналу, який після калібрування перетворюється у відсоткове значення вологості $W(t)$. Для контролю температури та відносної вологості повітря доцільно використовувати цифрові сенсори SHT31/SHT35 або BME280. Вони мають цифровий інтерфейс I²C, що спрощує підключення до контролера та зменшує вплив аналогових завад [22], [23].

Освітленість $L(t)$ може вимірюватися датчиком BH1750, який також працює через I²C і видає результат у люксах [24]. Витрата води $Q(t)$ контролюється імпульсним турбінним витратоміром: контролер підраховує кількість імпульсів за одиницю часу й перераховує їх у л/хв або загальний об'єм води. Тиск $P(t)$ у трубопроводі доцільно вимірювати аналоговим датчиком тиску з вихідним сигналом 0–5 В або промисловим датчиком 4–20 мА через відповідний перетворювач.

У межах роботи цей мікроконтролерний варіант є доцільним, оскільки дозволяє реалізувати всі ключові функції системи: збір даних, керування клапанами, зв'язок із сервером, журналювання та аварійну діагностику. Водночас структура системи має залишатися сумісною з промисловим підходом: сенсори й виконавчі пристрої повинні бути логічно відокремлені від програмного рівня, а обмін даними варто організувати так, щоб у майбутньому ESP32 можна було замінити PLC без зміни загальної логіки системи.

Узагальнене електричне підключення контролера, датчиків, блоків живлення, насоса та електромагнітних клапанів наведено в додатку Д.

Таблиця 2.2 — Обґрунтування вибору технічних засобів автоматизації

Компонент	Обраний або рекомендований варіант	Призначення	Обґрунтування вибору
Контролер	ESP32	Збір даних, обробка, керування, передавання інформації	Має Wi-Fi, цифрові інтерфейси, достатню продуктивність і доступну вартість [21]
Датчик вологості ґрунту	Ємнісний датчик вологості	Визначення $W(t)$ у зоні коренів	Менша схильність до корозії порівняно з резистивними сенсорами
Датчик температури й вологості	SHT31/SHT35 або BME280	Вимірювання $T(t)$ і $H(t)$	Цифровий інтерфейс, достатня точність, зручність інтеграції [22], [23]
Датчик освітленості	BH1750	Вимірювання $L(t)$	Дає цифрове значення освітленості в люксах, працює через I ² C [24]
Датчик витрати води	Імпульсний турбінний витратомір	Контроль $Q(t)$ і об'єму води	Дає змогу перевіряти фактичну подачу води й виявляти аварії
Датчик тиску	Аналоговий або промисловий датчик тиску	Контроль $P(t)$ у трубопроводі	Дозволяє виявляти падіння тиску, засмічення або витік
Виконавчі пристрої	Насос, електромагнітні клапани	Реалізація поливу	Забезпечують подачу води до окремих зон
Силовий модуль	Реле, MOSFET або контактор	Комутація навантажень	Відокремлює малопотужні сигнали контролера від силового кола
Модуль зв'язку	Wi-Fi, MQTT/HTTP	Передавання даних до інтерфейсу або сервера	Дозволяє реалізувати віддалений моніторинг [27]
Промислове масштабування	PLC, Modbus RTU/TCP, Ethernet	Розширення системи	Підвищує надійність і сумісність із SCADA [25], [26]

2.3 Розроблення функціональної схеми та алгоритму роботи системи

Функціональна схема системи описує взаємозв'язок між вимірювальними, обчислювальними, керуючими та інформаційними блоками. На вхід системи надходять параметри $W(t)$, $T(t)$, $H(t)$, $L(t)$, $Q(t)$, $P(t)$, стан клапанів, насоса та каналу зв'язку. Після попередньої обробки дані передаються до модуля прийняття рішень, який порівнює поточну вологість із межами $W_{\min}$ і $W_{\max}$, враховує мікрокліматичні умови та формує керуючий вплив $U(t)$.

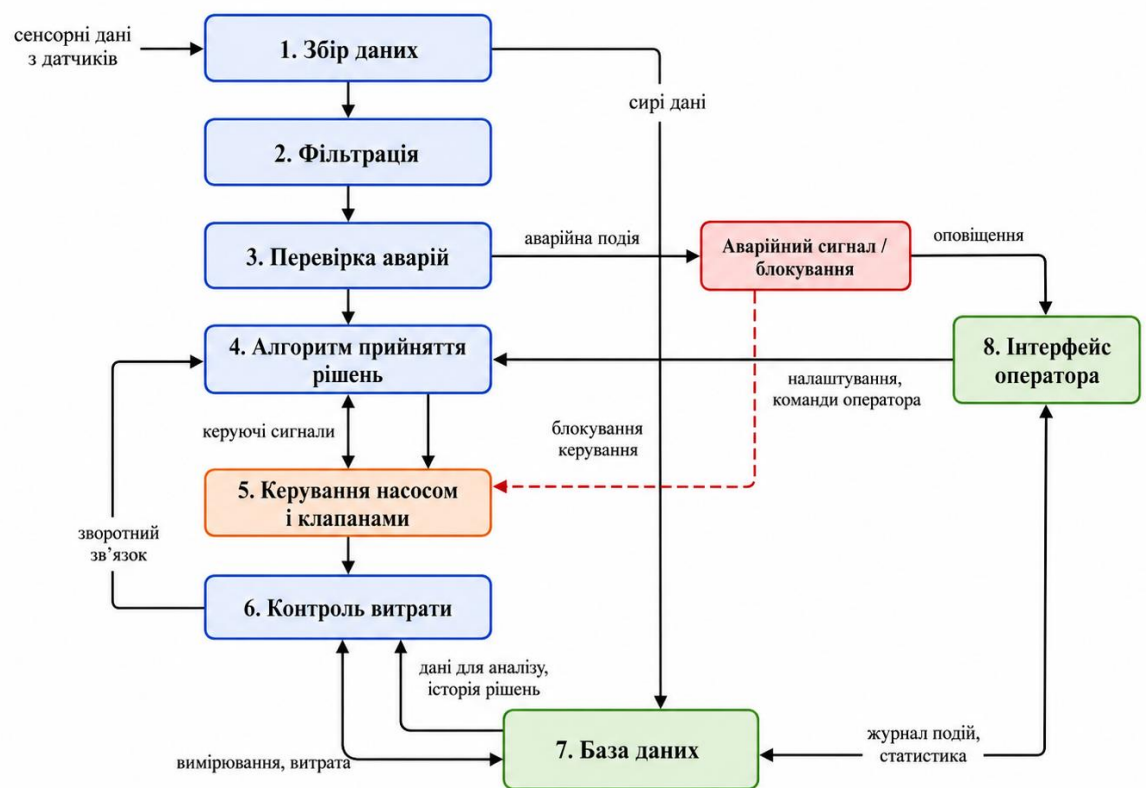


Рисунок 2.2 — Функціональна схема системи керування поливом

Алгоритм роботи системи починається з ініціалізації контролера, перевірки доступності датчиків, встановлення мережевого з'єднання та завантаження налаштувань зон. Після цього система переходить до циклічного режиму, у якому періодично зчитує показники датчиків, перевіряє їх допустимість, виконує фільтрацію або усереднення, порівнює вологість із заданими межами та визначає потребу в поливі.

Якщо $W(t)$ менша за $W_{\min}$, система формує команду на відкриття клапана відповідної зони та запуск насоса. Якщо $W(t)$ перебуває в допустимому діапазоні, полив не виконується, але система продовжує моніторинг. Якщо $W(t)$ вища за $W_{\max}$, полив блокується. Додатково враховуються $T(t)$, $H(t)$ і $L(t)$: за високої температури та значної освітленості алгоритм може збільшувати пріоритет поливу або скорочувати інтервал між перевірками, а за підвищеної вологості повітря — зменшувати потребу в додатковому зволоженні.

Під час поливу система контролює $Q(t)$ і $P(t)$. Якщо клапан відкрито й насос увімкнено, але витрата відсутня, формується аварійне повідомлення про можливе засмічення, відсутність води або несправність насоса. Якщо витрата фіксується при закритому клапані, система розглядає це як ознаку витоку. У таких ситуаціях полив блокується, відповідна подія записується в журнал, а оператор отримує повідомлення.

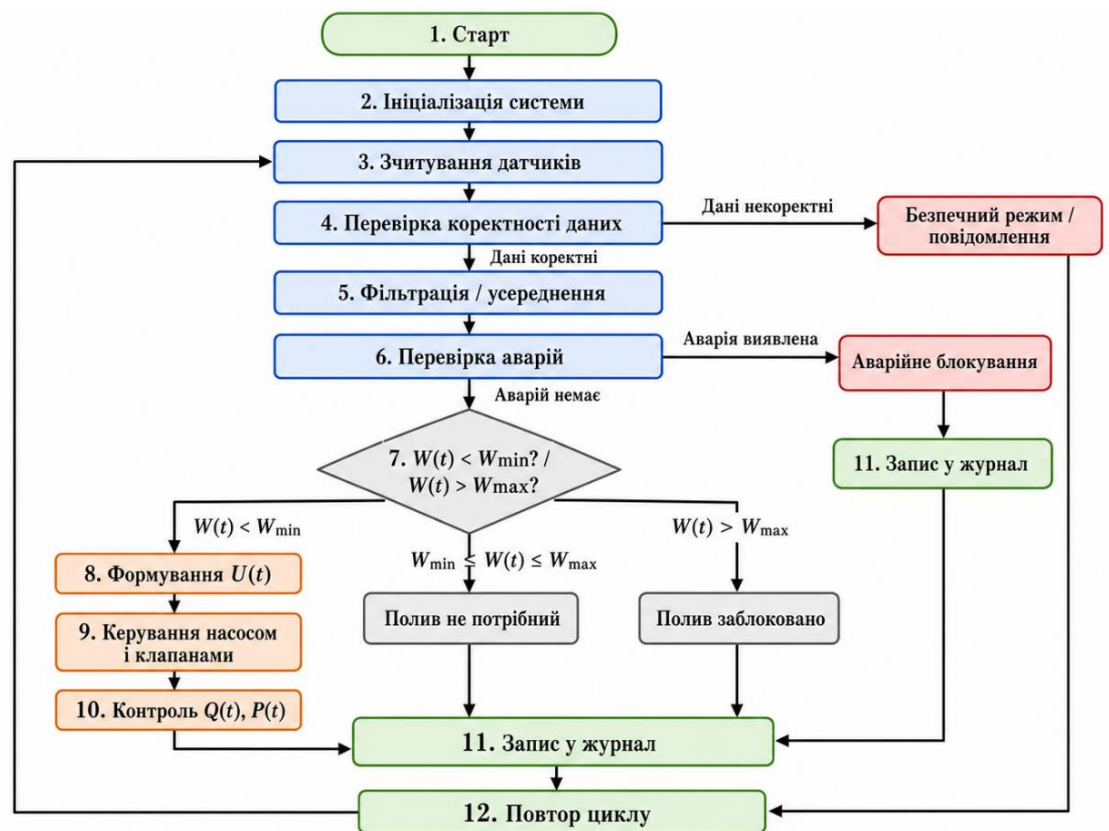


Рисунок 2.4 — Блок-схема алгоритму керування поливом

Система повинна підтримувати кілька режимів роботи. Автоматичний режим є основним і передбачає самостійне прийняття рішення про полив. Ручний режим дозволяє оператору керувати насосом і клапанами безпосередньо через інтерфейс, але із збереженням аварійних обмежень. Напівавтоматичний режим формує рекомендацію, яку оператор має підтвердити. Аварійний режим блокує полив або вимикає насос при небезпечних умовах. Сервісний режим використовується для калібрування датчиків і перевірки обладнання.

Таблиця 2.3 — Режими роботи системи

Режим	Призначення	Особливості роботи
Автоматичний	Самостійне керування поливом за алгоритмом	Система аналізує $W(t)$, $T(t)$, $H(t)$, $L(t)$, $Q(t)$, $P(t)$ і формує $U(t)$
Ручний	Безпосереднє керування оператором	Дозволяє вмикати насос і клапани, але аварійні блокування залишаються активними
Напівавтоматичний	Формування рекомендацій	Система пропонує дію, оператор підтверджує або відхиляє
Аварійний	Захист обладнання та тепличної зони	Полів блокується при витокі, відсутності тиску, несправності датчика
Сервісний	Обслуговування та перевірка	Використовується для калібрування датчиків, тестування клапанів і насоса

Застосування таких режимів забезпечує гнучкість експлуатації. Водночас автоматичний режим повинен бути пріоритетним, оскільки саме він реалізує переваги сенсорного моніторингу та адаптивного керування, характерні для сучасних smart irrigation systems [8], [9], [11].

2.4 Проектування інформаційної моделі та бази даних системи

Інформаційна модель системи визначає, які дані збираються, як вони структуруються, зберігаються та використовуються для прийняття рішень. Для інтелектуальної системи моніторингу важливо не лише отримувати поточні значення датчиків, а й накопичувати історію вимірювань. Це дає змогу

аналізувати тенденції зміни вологості, оцінювати витрати води, виявляти нетипові режими та коригувати налаштування алгоритму.

Базу даних доцільно побудувати за модульним принципом. Основними сутностями є `SensorData`, `IrrigationEvent`, `GreenhouseZone`, `DeviceStatus`, `UserSettings` та `Alerts`. Сутність `SensorData` зберігає всі вимірювання з часовими мітками. `IrrigationEvent` описує кожен цикл поливу: час початку, час завершення, зону, об'єм води та причину запуску. `GreenhouseZone` містить параметри конкретної зони теплиці, зокрема тип культури, площу, тип субстрату та межі вологості. `DeviceStatus` фіксує стан обладнання, `UserSettings` — налаштування користувача, а `Alerts` — аварійні події.

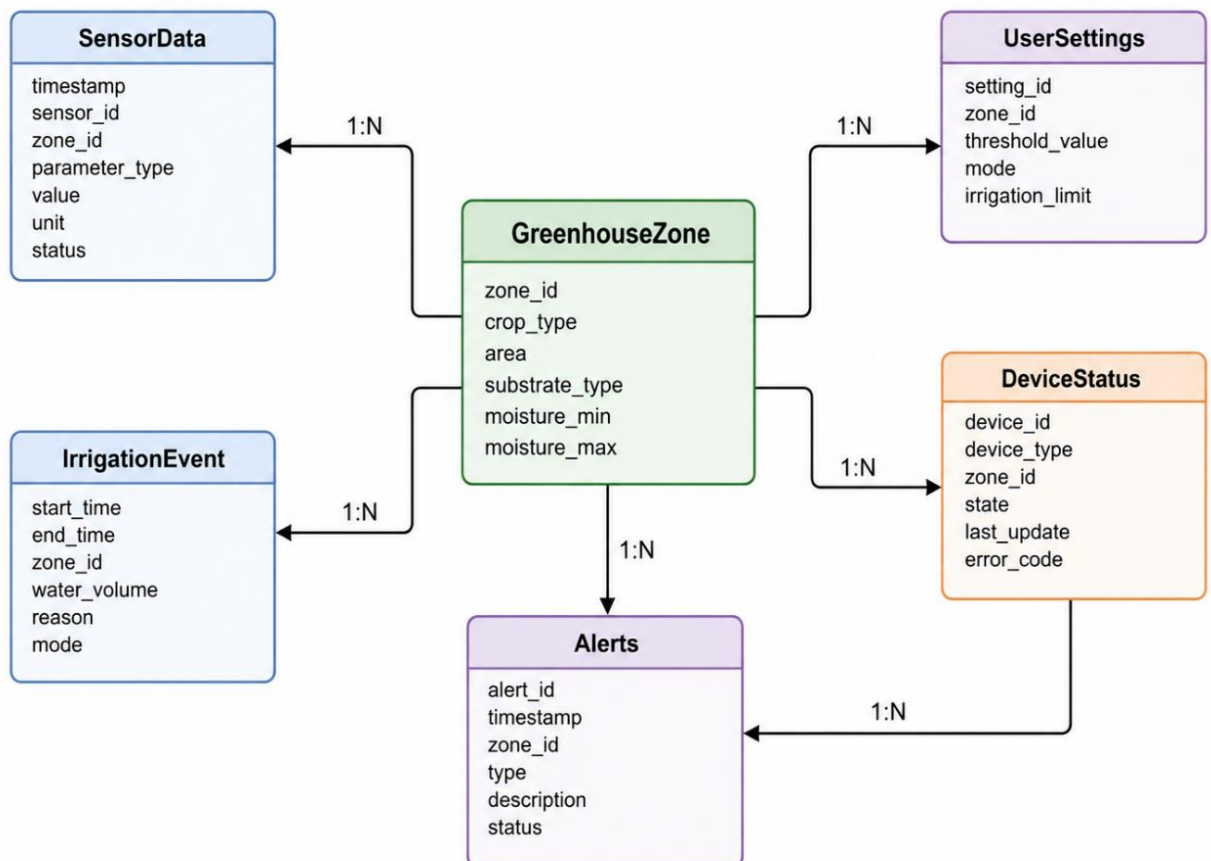


Рисунок 2.5 — ER-діаграма бази даних

Таблиця 2.4 — Основні сутності бази даних системи

Сутність	Основні поля	Призначення
SensorData	timestamp, sensor_id, zone_id, parameter_type, value, unit, status	Зберігання вимірених значень параметрів середовища
IrrigationEvent	start_time, end_time, zone_id, water_volume, reason, mode	Фіксація подій поливу та обсягу використаної води
GreenhouseZone	zone_id, crop_type, area, substrate_type, moisture_min, moisture_max	Опис тепличних зон і технологічних меж вологості
DeviceStatus	device_id, device_type, state, last_update, error_code	Контроль стану датчиків, насоса, клапанів і зв'язку
UserSettings	setting_id, zone_id, threshold_value, mode, irrigation_limit	Збереження користувацьких налаштувань системи
Alerts	alert_id, timestamp, type, description, status	Реєстрація аварійних повідомлень і стану їх обробки

Інформаційні потоки системи мають двонапрямний характер. У прямому напрямі дані надходять від сенсорів до контролера, після чого передаються до бази даних і відображаються в інтерфейсі оператора. У зворотному напрямі оператор може змінювати пороги вологості, обирати режим роботи або подавати команду ручного керування. При цьому всі дії користувача мають фіксуватися в журналі подій для забезпечення простежуваності.

Для коректної роботи системи необхідно забезпечити єдину систему часових міток. Кожен запис повинен містити час вимірювання або події, ідентифікатор зони та статус достовірності. Це особливо важливо для аналізу залежності між поливом і зміною вологості ґрунту. Наприклад, після завершення поливу значення $W(t)$ може змінюватися не миттєво, а з певною затримкою, що потрібно враховувати під час оцінювання ефективності.

Архівування даних дає змогу формувати добові, тижневі та сезонні звіти про водоспоживання. У подальшому така інформаційна база може використовуватися для вдосконалення алгоритму, побудови прогнозних моделей або інтеграції з комплексною системою керування мікрокліматом теплиці [15], [16].

2.5 Розроблення ПЗ та інтерфейсу користувача

Програмне забезпечення системи має модульну архітектуру. Такий підхід спрощує розроблення, тестування, масштабування та подальшу модернізацію. У навчально-прикладному варіанті програмна частина включає прошивку контролера ESP32, серверний або локальний модуль збереження даних, базу даних і вебінтерфейс оператора. У промисловому варіанті функції контролера можуть бути реалізовані на PLC, а візуалізація — через HMI або SCADA [25], [26].

Модуль збору даних відповідає за опитування датчиків, перетворення сигналів у фізичні величини та присвоєння часових міток. Модуль попередньої обробки перевіряє, чи належать показники допустимому діапазону, а також виявляє відсутність відповіді від датчика. Модуль фільтрації зменшує вплив шуму шляхом усереднення кількох вимірювань або застосування простого ковзного середнього.

Модуль прийняття рішень є центральним елементом програмної логіки. Він аналізує $W(t)$, $W_{\min}$, $W_{\max}$, $T(t)$, $H(t)$, $L(t)$, $Q(t)$, $P(t)$ і стан обладнання. На основі цих даних формується керуючий вплив $U(t)$. Модуль керування виконавчими пристроями перетворює це рішення на конкретні сигнали для реле, MOSFET-модуля, насоса та клапанів. Модуль аварійної діагностики контролює невідповідності між командою й фактичним станом системи.

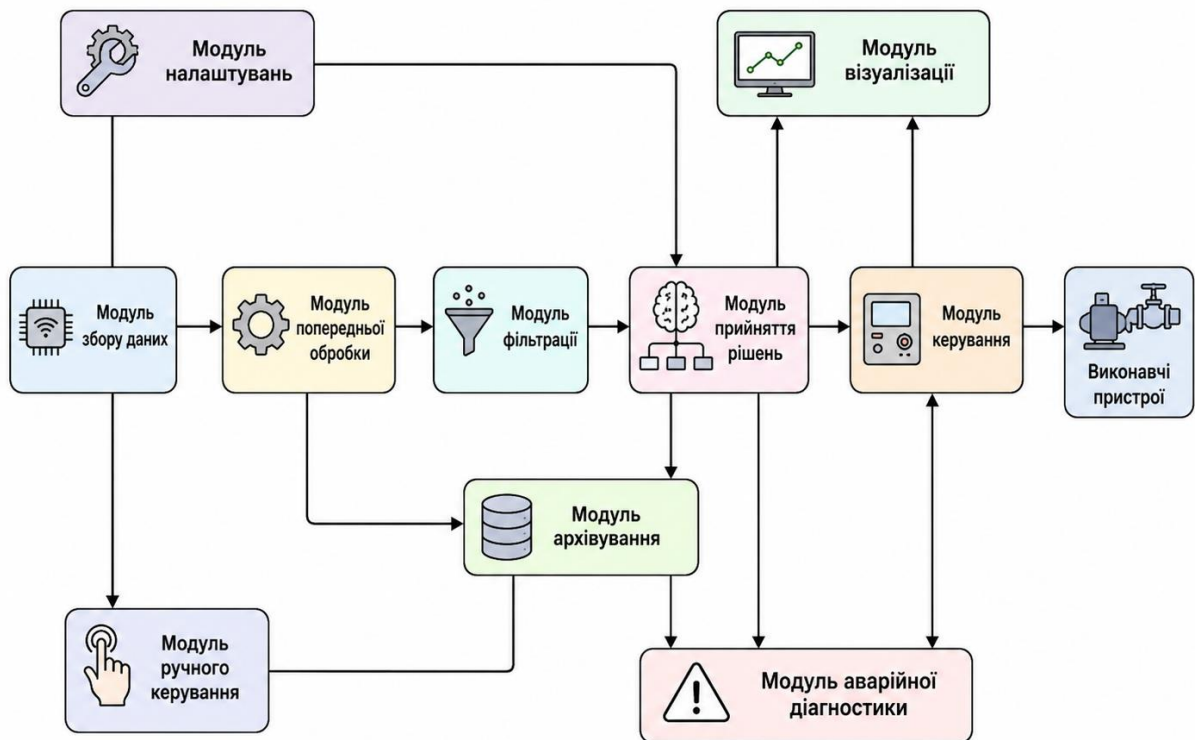


Рисунок 2.6 — Схема взаємодії програмних модулів

Інтерфейс користувача має забезпечувати оператору доступ до поточного стану тепличного комплексу. На головному екрані доцільно відобразити поточну вологість ґрунту по зонах, температуру, відносну вологість повітря, освітленість, витрату води, тиск, стан насоса, стан клапанів і режим роботи.

Окремими елементами інтерфейсу мають бути графіки зміни параметрів, історія поливів, журнал аварій, форма налаштування порогів і кнопки ручного керування.

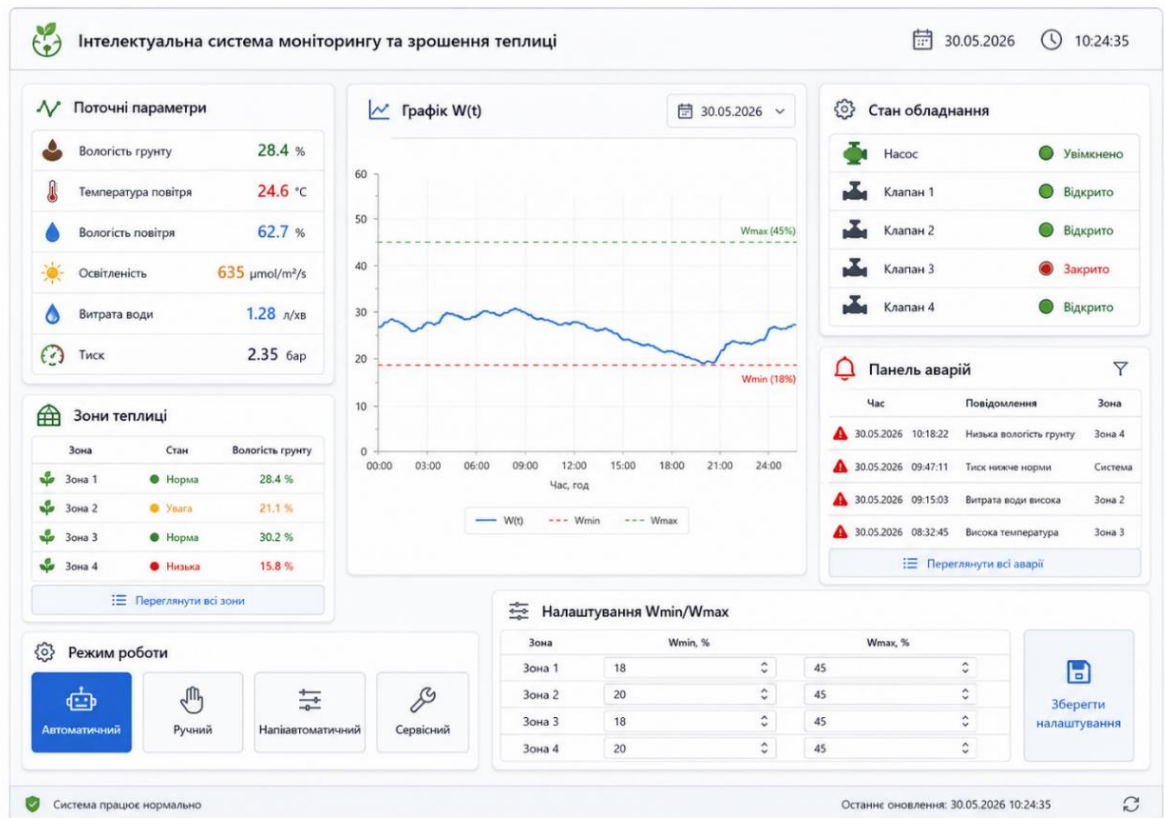


Рисунок 2.6 — Макет головного екрана інтерфейсу користувача

До основних функцій інтерфейсу належать: перегляд поточних показників, вибір зони теплиці, перегляд історії вимірювань, контроль стану обладнання, перегляд подій поливу, отримання аварійних повідомлень, зміна порогів вологості та перехід між автоматичним, ручним, напівавтоматичним і сервісним режимами. Для захисту системи доцільно передбачити авторизацію користувачів і розмежування прав доступу: оператор може переглядати дані й запускати ручний полив, а адміністратор — змінювати критичні налаштування.

Обмін між контролером і програмним рівнем може здійснюватися через MQTT або HTTP. MQTT є доцільним для IoT-систем, оскільки підтримує легку модель обміну повідомленнями між пристроями та сервером [27]. У промисловому варіанті для взаємодії контролерів, модулів введення-виведення та SCADA доцільно використовувати Modbus RTU або Modbus TCP [25].

Таким чином, програмна архітектура системи забезпечує повний цикл керування: отримання даних, їх перевірку, обробку, прийняття рішення, виконання керуючої дії, контроль результату, збереження інформації та візуалізацію для оператора.

2.6 Висновок до другого розділу

У другому розділі розроблено проєктну основу інтелектуальної системи моніторингу та оптимізації витрат води в середовищі тепличного комплексу. Запропоновано багаторівневу архітектуру, що включає сенсорний, контролерний, виконавчий, інформаційний та операторський рівні. Обґрунтовано вибір технічних засобів автоматизації, зокрема контролера ESP32, датчиків вологості ґрунту, температури, вологості повітря, освітленості, витрати води й тиску, а також насоса, електромагнітних клапанів і модулів зв'язку.

Розроблено функціональну логіку роботи системи, визначено основні режими керування, описано інформаційну модель і структуру бази даних. Запропонована програмна архітектура охоплює модулі збору, фільтрації, прийняття рішень, керування виконавчими пристроями, архівування, візуалізації, налаштувань і аварійної діагностики. Отримані проєктні рішення створюють основу для подальшого формалізованого опису математичної моделі водоспоживання та алгоритму інтелектуальної оптимізації в спеціальній частині роботи.

3 СПЕЦІАЛЬНА ЧАСТИНА

Спеціальна частина роботи присвячена формалізації інтелектуальної складової системи моніторингу та оптимізації витрат води. Якщо у проєктній частині було визначено архітектуру, технічні засоби, інформаційну модель і програмну структуру системи, то в цьому розділі розглядається логіка прийняття рішень, математичний опис процесу зволоження, критерії оптимізації та модельна перевірка працездатності запропонованого рішення.

Основна увага приділяється побудові спрощеної інженерної моделі водоспоживання тепличної зони, розробленню адаптивного алгоритму з елементами нечіткої логіки, аналізу сценаріїв роботи системи та оцінюванню очікуваної ефективності. Розділ не передбачає опису реальних польових експериментів; наведені результати слід розглядати як модельні та розрахункові, придатні для обґрунтування проєктного рішення.

3.1 Математична модель водоспоживання тепличної зони

Для автоматизованого керування поливом необхідно мати формалізований опис зміни вологості ґрунту або субстрату в часі. Повна агрофізична модель водного режиму рослин є складною, оскільки потребує врахування типу культури, кореневої системи, структури субстрату, випаровування, транспірації, дренажу та параметрів мікроклімату. Для бакалаврського проєкту доцільно використати спрощену інженерну модель, яка описує основні зв'язки між подачею води, втратами вологи та поточним станом кореневої зони [1], [7].

Баланс вологості тепличної зони можна подати у вигляді:

$$W(t + \Delta t) = W(t) + \Delta W_{in}(t) - \Delta W_{loss}(t) \quad (3.1)$$

де $W(t)$ — поточна вологість ґрунту або субстрату в момент часу t ;
 $\Delta W_{in}(t)$ — приріст вологості внаслідок подачі води; $\Delta W_{loss}(t)$ — втрати вологи

за інтервал Δt через випаровування, транспірацію, дренаж і нерівномірність розподілу.

Надходження води до зони залежить від витрати $Q(t)$, тривалості поливу та стану виконавчих механізмів. Якщо керуючий вплив $U(t)$ дорівнює 1, клапан відкритий і насос увімкнений; якщо $U(t)$ дорівнює 0, подача води відсутня. Тоді спрощено:

$$\Delta W_{in}(t) = k_q \cdot Q(t) \cdot U(t) \cdot \Delta t, \quad (3.2)$$

де k_q — коефіцієнт перетворення поданої води у приріст вологості ґрунту; $Q(t)$ — витрата води, л/хв; Δt — інтервал часу, хв; $U(t)$ — керуючий вплив.

Втрати вологи можна описати через оціночну функцію $E(t)$, яка враховує температуру повітря, відносну вологість і освітленість:

$$\Delta W_{loss}(t) = E(t) \cdot \Delta t, \quad (3.2)$$

$$E(t) = k_e \cdot K_f(T(t), H(t), L(t)), \quad (3.3)$$

де k_e — базовий коефіцієнт втрат вологи; K_f — коригувальний коефіцієнт мікроклімату; $T(t)$ — температура повітря, °C; $H(t)$ — відносна вологість повітря, %; $L(t)$ — освітленість, лк. Значення K_f збільшується за високої температури та освітленості і зменшується за високої відносної вологості повітря. Такий підхід узгоджується з принципом урахування *evapotranspiration* у системах керування зрошенням, але використовується в спрощеній формі, придатній для реалізації на контролері [1], [8].

Для прийняття рішення вводяться межі допустимої вологості: W_{min} — нижня межа, W_{max} — верхня межа, W_{opt} — цільове значення. Завдання системи полягає в тому, щоб підтримувати $W(t)$ у межах $W_{min} \leq W(t) \leq W_{max}$ і не подавати воду тоді, коли вологість уже достатня. Відхилення від цільового значення можна визначити як:

$$eW(t) = W_{opt} - W(t). \quad (3.4)$$

Якщо $eW(t)$ додатне та значне, система повинна збільшити пріоритет поливу. Якщо $eW(t)$ близьке до нуля, полив не потрібний. Якщо $eW(t)$ від'ємне, подача води має бути заблокована.

Таблиця 3.1 — Основні змінні математичної моделі водоспоживання

Позначення	Зміст	Одиниця вимірювання
$W(t)$	Поточна вологість ґрунту або субстрату	%, відн. од. або $\text{м}^3/\text{м}^3$
W_{min}	Нижня допустима межа вологості	%, відн. од. або $\text{м}^3/\text{м}^3$
W_{max}	Верхня допустима межа вологості	%, відн. од. або $\text{м}^3/\text{м}^3$
W_{opt}	Цільове значення вологості	%, відн. од. або $\text{м}^3/\text{м}^3$
$Q(t)$	Поточна витрата води	л/хв або $\text{м}^3/\text{год}$
$T(t)$	Температура повітря	$^{\circ}\text{C}$
$H(t)$	Відносна вологість повітря	%
$L(t)$	Освітленість	лк
$E(t)$	Оціночні втрати вологи	%/хв або %/год
$U(t)$	Керуючий вплив	0/1
Δt	Дискретний інтервал часу	с або хв
$eW(t)$	Відхилення вологості від цільового значення	% або відн. од.

Запропонована модель не претендує на повний біофізичний опис водного режиму рослин, однак вона є достатньою для інженерного проєктування системи керування. Вона дозволяє визначати момент запуску поливу, обмежувати тривалість подачі води, враховувати мікрокліматичні фактори та прогнозувати зміну вологості після виконання керуючої дії.

3.2 Розроблення алгоритму інтелектуальної оптимізації витрат води

Інтелектуальна складова системи полягає в тому, що рішення про полив приймається не лише за одним порогом вологості, а на основі сукупності параметрів: $W(t)$, $T(t)$, $H(t)$, $L(t)$, $Q(t)$, $P(t)$, стану насоса, клапанів і достовірності сенсорних даних. Просте порогове керування працює за правилом: якщо вологість нижча за задане значення, потрібно ввімкнути полив. Такий підхід є

зрозумілим, але недостатньо гнучким, оскільки не враховує швидкість висихання субстрату та поточні мікрокліматичні умови.

Для проєктованої системи запропоновано комбінований адаптивний алгоритм з елементами нечіткої логіки. Його перевага полягає в можливості формалізувати експертні правила типу “низька вологість”, “висока температура”, “значна освітленість”, “нормальний тиск”, не обмежуючись жорсткими бінарними порогами. Нечітка логіка є доцільною для керування об’єктами, у яких частина параметрів має неповну визначеність або змінюється поступово [18], [19], [20].

Критерій оптимізації можна сформулювати так:

$$J = \sum Q(t) \cdot U(t) \cdot \Delta t \rightarrow \min, \quad (3.5)$$

за умов:

$$\begin{aligned} W_{\min} &\leq W(t) \leq W_{\max}, \\ P(t) &\geq P_{\min}, \\ Q(t) &> 0 \text{ при } U(t) = 1, \\ Q(t) &= 0 \text{ при } U(t) = 0. \end{aligned} \quad (3.6)$$

Тобто потрібно мінімізувати сумарну витрату води, не допускаючи виходу вологості ґрунту за агротехнічно допустимі межі та забезпечуючи справність гідравлічного контуру.

Алгоритм прийняття рішень має такі логічні блоки: перевірка достовірності даних; оцінювання вологості; оцінювання мікрокліматичного навантаження; перевірка гідравлічного стану; формування команди поливу; контроль фактичної витрати; завершення або аварійне блокування.

Для нечіткої частини алгоритму можна використати лінгвістичні змінні: “вологість низька”, “вологість оптимальна”, “вологість висока”, “температура помірна”, “температура висока”, “освітленість низька”, “освітленість значна”.

Таблиця 3.2 — Правила прийняття рішень в алгоритмі оптимізації поливу

Умова	Рішення системи	Призначення правила
$W(t) < W_{min}$	Запустити полив відповідної зони	Усунення дефіциту вологи
$W(t)$ близька до W_{min} , $T(t)$ висока, $L(t)$ значна	Виконати короткий профілактичний полив	Запобігання швидкому висиханню субстрату
$W_{min} \leq W(t) \leq W_{max}$, $T(t)$ помірна	Полив не виконувати	Запобігання непродуктивній витраті води
$W(t) > W_{max}$	Заборонити полив	Захист від перезволоження
$U(t) = 1$, але $Q(t) = 0$	Сформувати аварію	Виявлення засмічення, відсутності води або несправності насоса
$U(t) = 0$, але $Q(t) > 0$	Сформувати аварію	Виявлення можливого витоку
$P(t) < P_{min}$	Заблокувати насос і клапани	Захист обладнання та гідравлічної системи
Відсутні дані критичного датчика	Перейти в безпечний режим	Уникнення неконтрольованого поливу

Псевдокод алгоритму можна подати так:

Лістинг 3.1 Псевдокод алгоритму

Початок

Завантажити налаштування зон: W_{min} , W_{max} , W_{opt} , T_{max} , P_{min}

Ініціалізувати датчики, насос, клапани, модуль зв'язку

Поки система активна:

Зчитати $W(t)$, $T(t)$, $H(t)$, $L(t)$, $Q(t)$, $P(t)$

Перевірити коректність даних

Якщо критичний датчик несправний:

перейти в безпечний режим

записати аварію в журнал

продовжити цикл

Для кожної тепличної зони:

обчислити $eW(t) = W_{opt} - W(t)$

оцінити мікрокліматичний коефіцієнт K_f

перевірити умови аварій $Q(t)$, $P(t)$, стан клапана

Якщо аварія виявлена:

вимкнути насос

закрити клапани

записати аварію

Інакше якщо $W(t) < W_{min}$:

відкрити клапан зони

увімкнути насос

контролювати $Q(t)$ і $P(t)$

Інакше якщо $W(t)$ близька до W_{min} і K_f високий:

виконати короткий адаптивний полив

Інакше якщо $W(t) > W_{max}$:

заблокувати полив

Інакше:

залишити полив вимкненим

Записати дані в базу

Оновити інтерфейс оператора

Очікувати наступний інтервал Δt

Кінець

Такий алгоритм забезпечує поєднання порогової надійності та адаптивності. Порогова частина гарантує зрозумілу реакцію на критичні значення вологості, а нечіткі правила дають змогу враховувати мікрокліматичні умови й уникати зайвих поливів.

3.3 Моделювання роботи системи та сценарії функціонування

Для перевірки логіки роботи системи доцільно використати імітаційне моделювання. Модельна перевірка дає змогу оцінити поведінку алгоритму в типових і аварійних умовах без проведення реальних польових експериментів. Моделювання може бути реалізоване в Python, MATLAB/Simulink, Node-RED, Proteus, CODESYS або іншому середовищі, яке дозволяє відтворити зміну $W(t)$, $T(t)$, $H(t)$, $L(t)$, $Q(t)$, $P(t)$ і стан виконавчих пристроїв.

У межах цієї роботи моделювання розглядається як сценарний аналіз. Для кожного сценарію задаються початкові умови, вхідні параметри, очікуване рішення алгоритму та результат. Такий підхід дозволяє перевірити не лише штатний режим, а й аварійні ситуації, які є важливими для безпечної експлуатації автоматизованої системи [8], [9], [11].

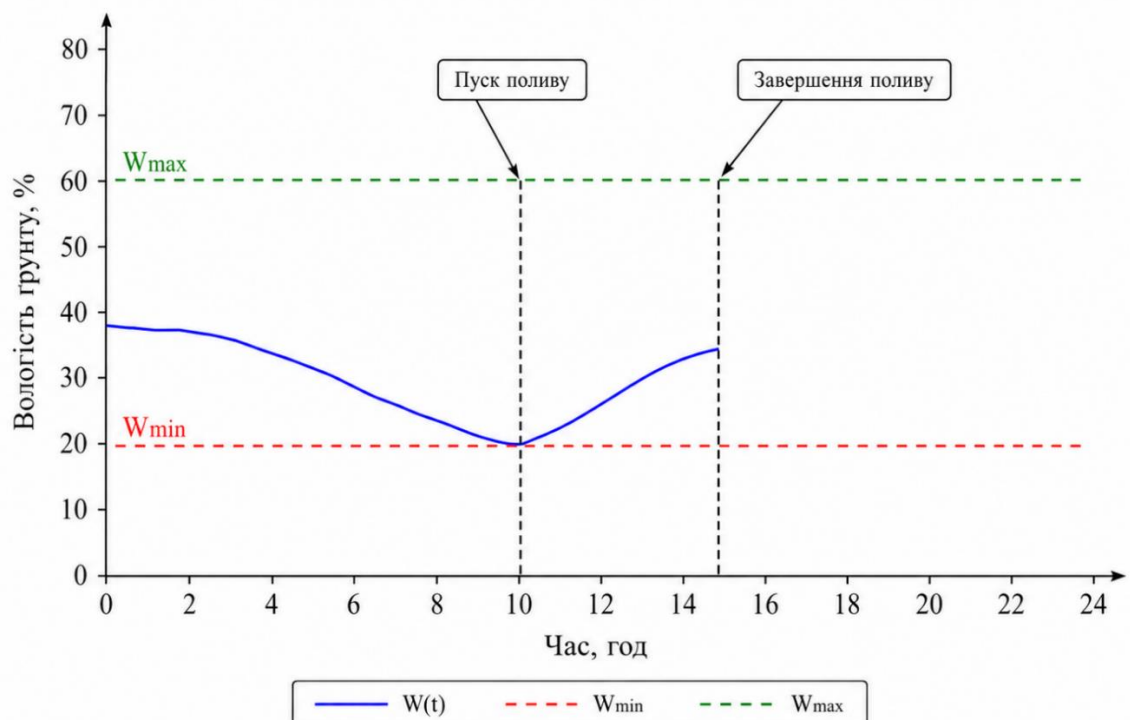


Рисунок 3.1 — Приклад зміни вологості ґрунту під час роботи системи

Таблиця 3.3 — Сценарії моделювання роботи системи

Сценарій	Початкові умови	Рішення алгоритму	Очікуваний результат
Нормальна робота	$W(t)$ у межах $W_{\min}$ – $W_{\max}$, тиск нормальний	Полив не запускається або виконується за потреби	Вологість підтримується в допустимому діапазоні
Висока температура	$W(t)$ близька до $W_{\min}$, $T(t)$ висока, $L(t)$ значна	Короткий адаптивний полив	Запобігання швидкому зниженню вологості
Низька вологість ґрунту	$W(t) < W_{\min}$	Відкриття клапана, запуск насоса	Вологість поступово повертається до норми
Надмірна вологість	$W(t) > W_{\max}$	Блокування поливу	Уникнення перезволоження
Різде зростання витрати	$Q(t) > 0$ при закритому клапані	Формування аварії “можливий витік”	Насос вимикається, оператор отримує повідомлення
Відсутність витрати	$U(t) = 1$, але $Q(t) = 0$	Аварія “немає подачі води”	Полив припиняється, подія записується в журнал
Втрата зв’язку з датчиком	Немає даних $W(t)$	Перехід у безпечний режим	Полив не запускається без достовірних даних
Ручний режим	Оператор подає команду	Виконання команди з аварійними обмеженнями	Ручне керування без вимкнення захисту

У нормальному сценарії система працює в режимі періодичного моніторингу. Якщо $W(t)$ перебуває в допустимому діапазоні, насос і клапани залишаються вимкненими. При поступовому зменшенні вологості до $W_{\min}$ алгоритм запускає полив, контролює фактичну витрату $Q(t)$, а після досягнення $W_{\text{орт}}$ або обмеження за об’ємом завершує цикл. Подія зберігається в базі даних.

У сценарії високої температури система не очікує критичного падіння вологості, якщо $W(t)$ уже близька до нижньої межі. Мікрокліматичний коефіцієнт K_f збільшує пріоритет поливу, тому алгоритм може виконати короткий профілактичний цикл. У сценарії надмірної вологості полив блокується незалежно від температури та освітленості, оскільки головним обмеженням є недопущення перезволоження. Аварійні сценарії перевіряють узгодженість між командою та фактичним станом системи. Якщо витрата води фіксується без команди на полив, це інтерпретується як можливий витік. Якщо команда на полив активна, але витрати немає, імовірними є засмічення,

відсутність води, несправність насоса або закритий клапан. У таких випадках система має перейти в аварійний режим, припинити подачу води та повідомити оператора.

3.4 Оцінювання ефективності запропонованого рішення

Ефективність інтелектуальної системи моніторингу та оптимізації витрат води доцільно оцінювати не лише за фактом зменшення водоспоживання, а за комплексом показників. Основними критеріями є сумарна витрата води, точність підтримання вологості в заданому діапазоні, кількість запусків поливу, час роботи насоса, кількість виявлених аварійних ситуацій, стабільність роботи системи та зручність операторського контролю [8], [9], [12].

Порівняння доцільно проводити між трьома режимами: ручним, таймерним та інтелектуальним адаптивним. Ручний режим залежить від досвіду оператора й має найбільшу похибку. Таймерний режим стабільніший, але не враховує фактичну вологість ґрунту. Інтелектуальний режим використовує зворотний зв'язок і коригує рішення відповідно до сенсорних даних.

Таблиця 3.4 — Порівняння режимів керування поливом

Режим керування	Принцип роботи	Переваги	Обмеження
Ручний полив	Оператор самостійно визначає час і тривалість	Простота реалізації	Високий вплив людського фактора
Таймерний полив	Полив виконується за фіксованим графіком	Передбачуваність і просте налаштування	Не враховує $W(t)$, $T(t)$, $H(t)$, $L(t)$
Інтелектуальний адаптивний полив	Рішення приймається за сенсорними даними та правилами алгоритму	Менша непродуктивна витрата води, аварійна діагностика	Вища складність реалізації

Для модельного оцінювання можна прийняти умовний добовий цикл роботи тепличної зони. У ручному режимі оператор задає полив із запасом, тому можливі перевитрати. У таймерному режимі вода подається за розкладом навіть тоді, коли $W(t)$ перебуває в допустимому діапазоні. В інтелектуальному

режимі полив запускається лише за потреби, а його тривалість обмежується досягненням W_{opt} або заданого об'єму. Для прийнятих умов сценарного моделювання очікувана економія води може становити орієнтовно 15–25 % порівняно з таймерним режимом; це значення є розрахунковим і потребує уточнення під час експериментальної перевірки на реальному об'єкті.

Таблиця 3.5 — Показники ефективності запропонованої системи

Показник	Спосіб оцінювання	Очікуваний ефект
Сумарна витрата води	$\sum Q(t) \cdot U(t) \cdot \Delta t$	Зменшення непродуктивного водоспоживання
Відхилення вологості	Середнє значення $ W_{opt} - W(t) $	Точніше підтримання кореневої зони
Кількість запусків поливу	Підрахунок IrrigationEvent	Зменшення зайвих циклів
Час роботи насоса	Сума тривалостей активного $U(t)$	Зменшення навантаження на обладнання
Кількість аварій	Записи в Alerts	Підвищення діагностичної інформативності
Виявлення витоків	Порівняння $Q(t)$ і стану клапанів	Швидше реагування на несправності
Зручність моніторингу	Наявність графіків і журналу подій	Підвищення керованості процесу

Запропонована система підвищує ефективність не лише завдяки зменшенню витрат води, а й завдяки підвищенню прозорості технологічного процесу. Оператор отримує доступ до історії вимірювань, подій поливу, аварійних сигналів і поточних параметрів тепличного середовища. Це дає змогу приймати обґрунтовані рішення щодо налаштування порогів, режимів роботи та обслуговування обладнання.

3.5 Надійність, безпека та перспективи розвитку системи

Надійність інтелектуальної системи визначається здатністю зберігати працездатність у разі змін умов середовища, похибок вимірювання, часткової відмови обладнання або порушення зв'язку. Для тепличного комплексу особливо важливими є захист насоса, контроль витоків, перевірка достовірності показників датчиків і можливість переходу в безпечний режим.

Першим напрямом підвищення надійності є програмна перевірка даних. Кожне виміряне значення повинно перевірятися на належність фізично можливому діапазону. Наприклад, від’ємна вологість ґрунту або температура, що різко змінюється на десятки градусів за кілька секунд, мають розглядатися як некоректні дані. Для зменшення впливу шуму доцільно застосовувати усереднення або ковзне середнє. Другим напрямом є аварійний захист гідравлічної системи. Насос не повинен працювати за відсутності води, критичного падіння тиску або відсутності витрати при відкритому клапані. Водночас система повинна виявляти ситуації, коли витрата води є при закритих клапанах, оскільки це може свідчити про витік або несправність запірної арматури. Третім напрямом є захист обладнання від умов тепличного середовища. Електронні компоненти потрібно розміщувати у вологозахищених корпусах, силові кола відокремлювати від сигнальних, а живлення стабілізувати. Для промислового варіанта доцільно використовувати PLC, промислові датчики, Modbus RTU/TCP та SCADA або HMI-систему [25], [26]. Для IoT-варіанта важливо забезпечити контроль доступу, авторизацію користувачів і обмеження ручного керування [27].

Таблиця 3.6 — Ризики експлуатації системи та засоби їх зменшення

Ризик	Можливий наслідок	Засіб зменшення ризику
Відмова датчика вологості	Некоректне рішення про полив	Перевірка діапазону, резервний датчик, безпечний режим
Витік води	Перевитрата води, пошкодження обладнання	Контроль $Q(t)$ при закритих клапанах
Відсутність тиску	Неефективний полив або робота насоса без води	Датчик $P(t)$, аварійне вимкнення насоса
Засмічення контуру	Відсутність поливу при активній команді	Порівняння $U(t)$, $Q(t)$ і $P(t)$
Збій живлення	Зупинка системи	Стабілізація живлення, захист, журнал відновлення
Втрата зв’язку	Неможливість дистанційного моніторингу	Локальний автономний режим контролера
Несанкціоноване керування	Небажаний запуск поливу	Авторизація, права доступу, журнал дій
Підвищена вологість середовища	Корозія або коротке замикання	Вологозахищені корпуси, герметизація з’єднань

Перспективи розвитку системи пов'язані з розширенням її функціональності. На наступних етапах система може бути інтегрована з керуванням вентиляцією, обігрівом, освітленням і живленням рослин. Накопичені дані можуть використовуватися для прогнозування водоспоживання, автоматичного налаштування W_{min} і W_{max} , виявлення аномалій та застосування методів машинного навчання [16], [17]. Також можливе масштабування системи до багатьох тепличних зон із централізованим моніторингом через SCADA або вебплатформу.

Таким чином, запропонована система не обмежується функцією автоматичного поливу. Вона формує основу для комплексної комп'ютерно-інтегрованої системи керування тепличним середовищем, у якій водоспоживання оптимізується на основі сенсорних даних, алгоритмічної обробки, журналювання та аварійної діагностики.

3.6 Висновок до третього розділу

У третьому розділі побудовано спрощену інженерну математичну модель водоспоживання тепличної зони, яка описує зміну вологості ґрунту через баланс надходження води та втрат, пов'язаних із випаровуванням, транспірацією й дренажем. Запропоновано критерій оптимізації, що передбачає мінімізацію сумарної витрати води за умови підтримання $W(t)$ у межах W_{min} – W_{max} і забезпечення справності гідравлічного контуру.

Розроблено адаптивний алгоритм з елементами нечіткої логіки, який враховує вологість ґрунту, температуру, відносну вологість повітря, освітленість, витрату води, тиск і стан виконавчих пристроїв. Розглянуто сценарії модельної перевірки системи, визначено показники ефективності та проаналізовано питання надійності, безпеки й перспектив розвитку. Отримані результати підтверджують доцільність використання сенсорного моніторингу й адаптивного керування для зменшення непродуктивних витрат води в тепличному комплексі.

4 ОХОРОНА ПРАЦІ ТА БЕЗПЕКА В НАДЗВИЧАЙНИХ СИТУАЦІЯХ

4.1 Питання щодо охорони праці

Під час проєктування, монтажу та експлуатації інтелектуальної системи моніторингу й оптимізації витрат води в середовищі тепличного комплексу необхідно враховувати вимоги охорони праці, оскільки система поєднує електронні засоби вимірювання, елементи автоматизованого керування, насосне обладнання, електромагнітні клапани, комунікаційні модулі та програмне забезпечення. Особливістю такого об'єкта є те, що технічне обладнання працює в умовах підвищеної вологості, можливого утворення конденсату, наявності водопровідних ліній, електричних кіл живлення та рухомих або вібраційних елементів насосної установки.

Основними потенційно небезпечними факторами під час роботи з системою є ураження електричним струмом, коротке замикання через потрапляння вологи в електричні з'єднання, перегрів або перевантаження силових елементів, механічне травмування під час обслуговування насоса, падіння на вологій підлозі, пошкодження кабелів, неправильне підключення датчиків або виконавчих пристроїв, а також помилки оператора під час ручного керування системою. Додатковими шкідливими факторами можуть бути підвищена температура та вологість повітря в теплиці, недостатня вентиляція, незручна робоча поза під час монтажу датчиків і тривала робота з комп'ютерним інтерфейсом.

Для зниження ризику ураження електричним струмом усі електричні кола системи мають бути розділені на низьковольтну частину керування та силову частину живлення насоса й клапанів. Контролер ESP32 або PLC, датчики та модулі зв'язку доцільно живити від стабілізованих джерел низької напруги. Силові кола насоса повинні підключатися через реле, контактор або інший комутаційний пристрій, розрахований на відповідне навантаження. Необхідно передбачити захист від короткого замикання, перевантаження, витоку струму, а також надійне заземлення металевих корпусів обладнання. У вологих зонах

слід використовувати герметичні корпуси, кабельні вводи, ізольовані клеми та обладнання з відповідним ступенем захисту від пилу й вологи.

Монтаж і технічне обслуговування системи повинні виконуватися лише після знеструмлення відповідних електричних кіл. Перед початком робіт необхідно перевірити відсутність напруги, справність інструменту, цілісність кабелів, надійність кріплення датчиків, клапанів і трубопроводів. Заборонено виконувати перепідключення проводів, заміну реле, датчиків або елементів живлення при ввімкненому насосі чи активному живленні силової частини. Після завершення монтажу слід перевірити правильність підключень, роботу аварійного вимкнення, герметичність з'єднань і відсутність відкритих струмопровідних частин.

Під час експлуатації системи оператор повинен працювати з інтерфейсом користувача відповідно до встановленого режиму доступу. Ручне керування насосом і клапанами має бути обмежене правами користувача та не повинно скасовувати аварійні блокування. Це важливо, оскільки помилковий запуск насоса при відсутності води або відкриття клапана при пошкодженому трубопроводі може призвести до аварійної ситуації. У програмному забезпеченні доцільно передбачити повідомлення про критичні події: низький тиск, відсутність витрати при активному поливі, витрату при закритому клапані, несправність датчика, втрату зв'язку з контролером або перевищення допустимої вологості.

Окрему увагу слід приділяти ергономії роботи оператора з комп'ютерним інтерфейсом. Робоче місце має бути достатньо освітленим, монітор розміщується на зручній відстані, а інформація на екрані повинна бути структурованою та легко сприйматися. Інтерфейс системи має чітко відображати поточні параметри, стан насоса й клапанів, аварійні повідомлення та журнал подій. Кольорові індикатори повинні бути зрозумілими: зелений — нормальний стан, жовтий — попередження, червоний — аварія. Це зменшує ймовірність помилкових дій оператора.

Працівники, які виконують монтаж, налаштування або обслуговування системи, повинні пройти інструктаж з охорони праці, знати порядок безпечного

вимкнення обладнання, правила роботи з електроінструментом, засоби індивідуального захисту та порядок дій у разі аварії. До засобів індивідуального захисту можуть належати діелектричні рукавички, захисне взуття з неслизькою підошвою, окуляри під час монтажних робіт, а також спецодяг, що не заважає рухам і не створює ризику зачеплення за елементи обладнання.

Отже, безпечна експлуатація інтелектуальної системи моніторингу та оптимізації витрат води забезпечується поєднанням технічних, організаційних і програмних заходів. До них належать правильне електричне підключення, захист силових кіл, використання вологозахищених корпусів, регулярна перевірка стану обладнання, обмеження ручного керування, навчання персоналу та впровадження аварійної діагностики. Дотримання цих вимог дозволяє зменшити ризик травмування працівників, пошкодження обладнання та порушення технологічного процесу вирощування рослин.

4.2 Питання щодо безпеки в надзвичайних ситуаціях

Тепличний комплекс, у якому експлуатується інтелектуальна система моніторингу та оптимізації витрат води, може бути об'єктом виникнення надзвичайних ситуацій техногенного, природного або воєнного характеру. Для такого об'єкта найбільш імовірними є пожежа внаслідок короткого замикання, задимлення або перегріву електрообладнання, аварія насосного обладнання, розрив трубопроводу й підтоплення, відмова системи живлення, ураження персоналу електричним струмом, пошкодження конструкцій теплиці внаслідок сильного вітру, граду чи інших несприятливих погодних умов. Також в умовах України слід враховувати можливість повітряної тривоги, перебоїв електропостачання та необхідність організованого припинення роботи персоналу згідно з вимогами цивільного захисту. Кодекс цивільного захисту України визначає загальні засади захисту населення, територій, майна й довкілля від надзвичайних ситуацій.

Першочерговим завданням у разі надзвичайної ситуації є збереження життя і здоров'я людей. Тому в тепличному комплексі мають бути визначені

шляхи евакуації, місця розташування первинних засобів пожежогасіння, електрощитів, аварійних вимикачів, аптечки, засобів зв'язку та пункту збору персоналу. Проходи між тепличними зонами, насосним обладнанням і шафами керування повинні залишатися вільними. Не допускається складування інструментів, кабелів, тари, добрив або інших матеріалів у місцях, які можуть перешкоджати евакуації чи доступу до засобів аварійного вимкнення.

Однією з основних загроз є пожежа, що може виникнути через пошкодження ізоляції, перевантаження силових кіл, неякісне з'єднання кабелів, потрапляння вологи в електричні компоненти або несправність насосного обладнання. Для зменшення пожежного ризику необхідно використовувати справні автоматичні вимикачі, захисні пристрої, заземлення, вологозахищені електричні шафи та кабельні лінії з відповідним перерізом. Поблизу електричних шаф і насосного вузла мають бути розміщені вогнегасники, придатні для гасіння електрообладнання. У разі появи запаху горілого, диму, іскріння або перегріву обладнання оператор повинен негайно знеструмити систему, припинити роботу насоса, повідомити відповідальних осіб і за необхідності викликати аварійні служби.

Другою важливою групою ризиків є гідравлічні аварії: прорив трубопроводу, витік води, різке падіння тиску, засмічення контуру або неконтрольована подача води. Такі події можуть призвести до підтоплення, пошкодження електронних компонентів, слизької поверхні підлоги, зупинки технологічного процесу та підвищеного ризику ураження електричним струмом. Для попередження таких ситуацій у системі передбачено контроль витрати $Q(t)$, тиску $P(t)$, стану клапанів і насоса. Якщо витрата фіксується при закритому клапані, система повинна сформувати повідомлення про можливий витік. Якщо насос увімкнений, але витрати води немає, це може свідчити про засмічення, відсутність води або несправність насоса. У таких випадках необхідно автоматично заблокувати полив, вимкнути насос і зафіксувати подію в журналі.

У разі аварійного вимкнення електропостачання система повинна переходити у безпечний стан. Для цього клапани мають закриватися, насос —

вимикатися, а після відновлення живлення контролер повинен виконати самодіагностику, перевірити стан датчиків, клапанів, тиску, витрати води та лише після цього відновити автоматичний режим. Доцільно передбачити збереження останнього стану системи в журналі подій, щоб оператор міг визначити, у якому режимі перебувало обладнання перед збоєм. Для критичних вузлів може використовуватися резервне живлення, однак воно повинно забезпечувати не безперервний полив, а коректне завершення роботи та передавання аварійного повідомлення.

Під час повітряної тривоги або іншої загрози воєнного характеру персонал повинен діяти відповідно до встановленого на об'єкті порядку цивільного захисту. Роботу з електричним обладнанням, насосами та відкритими трубопроводами необхідно припинити. За можливості система переводиться в безпечний режим: насос вимикається, клапани закриваються, ручне керування блокується, а дані про стан системи зберігаються. Після завершення загрози повернення до роботи має виконуватися лише після огляду приміщення, перевірки цілісності електропроводки, трубопроводів, контролера, датчиків і виконавчих механізмів.

У разі природних надзвичайних ситуацій, зокрема сильного вітру, буревію, граду, різкого зниження температури або пошкодження конструкцій теплиці, необхідно припинити роботи всередині небезпечної зони, вивести персонал, знеструмити обладнання, перекрити подачу води та оцінити стан конструкцій. Відновлення роботи системи допускається лише після усунення небезпечних факторів. Якщо пошкоджено датчики, клапани або лінії зв'язку, система не повинна автоматично запускати полив без підтвердження оператора.

Інформаційна складова системи також має значення для безпеки в надзвичайних ситуаціях. Журнал подій, аварійні повідомлення, індикатори стану обладнання та історія вимірювань дозволяють швидко встановити причину порушення роботи системи. Інтерфейс оператора повинен чітко відображати критичні стани: «низький тиск», «можливий витік», «відсутня витрата», «несправність датчика», «перевищення вологості», «втрата зв'язку з

контролером». Для уникнення помилкових дій у надзвичайних умовах ручне керування повинно мати підтвердження дії та обмеження за правами доступу.

Таким чином, безпека в надзвичайних ситуаціях для тепличного комплексу забезпечується поєднанням організаційних заходів, технічного захисту, аварійного вимкнення, контролю гідравлічних параметрів, пожежної профілактики, евакуаційної готовності та програмної діагностики. Запропонована інтелектуальна система не лише виконує функції моніторингу й оптимізації витрат води, а й підвищує рівень безпеки об'єкта завдяки своєчасному виявленню аварійних режимів, автоматичному блокуванню небезпечних дій і збереженню інформації про критичні події.

ВИСНОВКИ

У бакалаврській кваліфікаційній роботі розроблено проєкт інтелектуальної системи моніторингу та оптимізації витрат води в середовищі тепличного комплексу. У процесі виконання роботи тепличний комплекс розглянуто як багатопараметричний об'єкт автоматизації, у якому ефективність поливу залежить від вологості ґрунту або субстрату, температури й відносної вологості повітря, освітленості, стану гідравлічного контуру, витрати води та працездатності виконавчих механізмів.

В аналітичній частині досліджено технологічний процес водозабезпечення тепличного комплексу, визначено основні фактори, що впливають на потребу рослин у воді, та проаналізовано сучасні підходи до автоматизації поливу. Встановлено, що ручний і таймерний режими не забезпечують достатньої адаптивності, оскільки не враховують фактичний стан кореневої зони та зміну мікрокліматичних умов. Обґрунтовано доцільність використання сенсорного моніторингу, автоматизованого керування насосом і клапанами, журналювання подій та алгоритмічної оптимізації витрат води.

У проєктній частині розроблено структурну основу системи, що включає сенсорний, контролерний, виконавчий, інформаційний та операторський рівні. Як базовий навчально-прикладний варіант запропоновано реалізацію на основі ESP32, датчиків вологості ґрунту, температури й вологості повітря, освітленості, витрати води та тиску. Для промислового масштабування передбачено можливість застосування PLC, Modbus, Ethernet, SCADA або HMI-панелі. Також описано функціональну логіку роботи, режими керування, інформаційну модель бази даних і програмну архітектуру системи.

У спеціальній частині побудовано спрощену інженерну математичну модель водоспоживання тепличної зони, яка описує зміну вологості $W(t)$ через баланс надходження води та втрат, пов'язаних із випаровуванням, транспірацією й дренажем. Сформульовано критерій оптимізації, що полягає в мінімізації сумарної витрати води за умови підтримання вологості ґрунту в межах $W_{\min}$ – $W_{\max}$. Запропоновано адаптивний алгоритм з елементами

нечіткої логіки, який враховує не лише вологість ґрунту, а й температуру, відносну вологість повітря, освітленість, витрату води, тиск і стан виконавчих пристроїв.

Проведений сценарний аналіз показав, що запропонована система здатна працювати в нормальному, автоматичному, ручному, напівавтоматичному, сервісному та аварійному режимах. Вона може запускати полив за фактичною потребою, блокувати його при перезволоженні, виявляти можливий витік, відсутність тиску, засмічення або несправність насоса. Очікуваний ефект від застосування системи полягає у зменшенні непродуктивних витрат води, підвищенні стабільності підтримання вологості, зниженні впливу людського фактора та підвищенні інформативності контролю.

Запропоноване рішення може бути використане як основа для навчально-прикладного прототипу або подальшого промислового впровадження в тепличному комплексі. Перспективами розвитку є інтеграція системи з керуванням вентиляцією, обігрівом, освітленням і живленням рослин, застосування прогнозних моделей водоспоживання, машинного навчання та централізованого моніторингу багатьох тепличних зон.

ПЕРЕЛІК ДЖЕРЕЛ

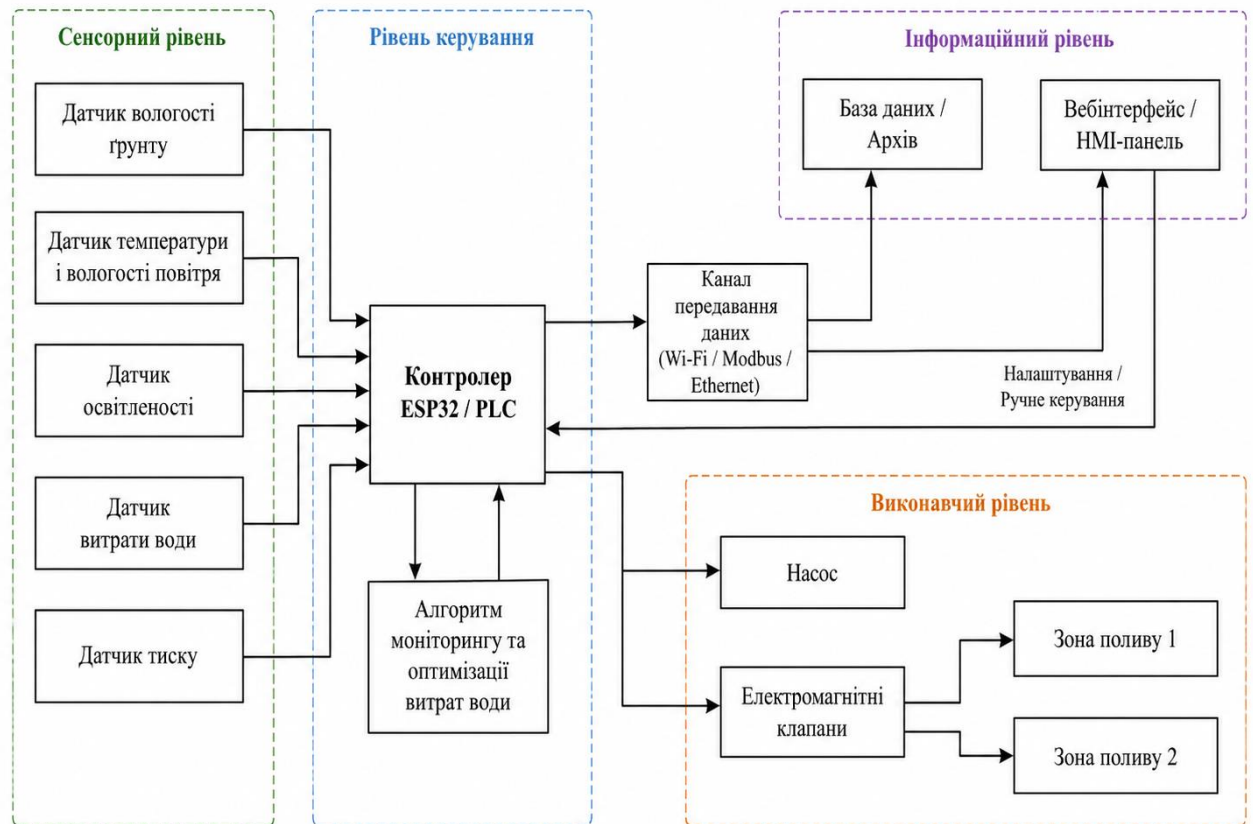
- 1 Allen, R. G., Pereira, L. S., Raes, D., & Smith, M. (1998). Crop evapotranspiration: Guidelines for computing crop water requirements (FAO Irrigation and Drainage Paper No. 56). Food and Agriculture Organization of the United Nations.
- 2 Food and Agriculture Organization of the United Nations. (n.d.). AQUASTAT: FAO's global information system on water and agriculture. FAO.
- 3 Food and Agriculture Organization of the United Nations. (2017). Water for sustainable food and agriculture. FAO.
- 4 Hanan, J. J. (1998). Greenhouses: Advanced technology for protected horticulture. CRC Press. <https://doi.org/10.1201/9780203719824>
- 5 Raviv, M., & Lieth, J. H. (Eds.). (2008). Soilless culture: Theory and practice. Elsevier.
- 6 Shamshiri, R. R., Kalantari, F., Ting, K. C., Thorp, K. R., Hameed, I. A., Weltzien, C., Ahmad, D., & Shad, Z. (2018). Advances in greenhouse automation and controlled environment agriculture: A transition to plant factories and urban agriculture. *International Journal of Agricultural and Biological Engineering*, 11(1), 1–22. <https://doi.org/10.25165/j.ijabe.20181101.3210>
- 7 Jones, H. G. (2004). Irrigation scheduling: Advantages and pitfalls of plant-based methods. *Journal of Experimental Botany*, 55(407), 2427–2436. <https://doi.org/10.1093/jxb/erh213>
- 8 García, L., Parra, L., Jimenez, J. M., Lloret, J., & Lorenz, P. (2020). IoT-based smart irrigation systems: An overview on the recent trends on sensors and IoT systems for irrigation in precision agriculture. *Sensors*, 20(4), 1042. <https://doi.org/10.3390/s20041042>
- 9 Kamienski, C., Soininen, J. P., Taumberger, M., Dantas, R., Toscano, A., Cinotti, T. S., Maia, R. F., & Torre Neto, A. (2019). Smart water management platform: IoT-based precision irrigation for agriculture. *Sensors*, 19(2), 276. <https://doi.org/10.3390/s19020276>

- 10 Gutiérrez, J., Villa-Medina, J. F., Nieto-Garibay, A., & Porta-Gándara, M. Á. (2014). Automated irrigation system using a wireless sensor network and GPRS module. *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, 63(1), 166–176. <https://doi.org/10.1109/TIM.2013.2276487>
- 11 Navarro-Hellín, H., Martínez-del-Rincon, J., Domingo-Miguel, R., Soto-Valles, F., & Torres-Sánchez, R. (2016). A decision support system for managing irrigation in agriculture. *Computers and Electronics in Agriculture*, 124, 121–131. <https://doi.org/10.1016/j.compag.2016.04.003>
- 12 Obaideen, K., Yousef, B. A. A., AlMallahi, M. N., Tan, Y. C., Mahmoud, M., Jaber, H., & Ramadan, M. (2022). An overview of smart irrigation systems using IoT. *Energy Nexus*, 7, 100124. <https://doi.org/10.1016/j.nexus.2022.100124>
- 13 Khanna, A., & Kaur, S. (2019). Evolution of Internet of Things and its significant impact in the field of precision agriculture. *Computers and Electronics in Agriculture*, 157, 218–231. <https://doi.org/10.1016/j.compag.2018.12.039>
- 14 Tzounis, A., Katsoulas, N., Bartzanas, T., & Kittas, C. (2017). Internet of Things in agriculture, recent advances and future challenges. *Biosystems Engineering*, 164, 31–48. <https://doi.org/10.1016/j.biosystemseng.2017.09.007>
- 15 Ayaz, M., Ammad-Uddin, M., Sharif, Z., Mansour, A., & Aggoune, E.-H. M. (2019). Internet-of-Things-based smart agriculture: Toward making the fields talk. *IEEE Access*, 7, 129551–129583. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2019.2932609>
- 16 Wolfert, S., Ge, L., Verdouw, C., & Bogaardt, M. J. (2017). Big data in smart farming: A review. *Agricultural Systems*, 153, 69–80. <https://doi.org/10.1016/j.agry.2017.01.023>
- 17 Kamilaris, A., & Prenafeta-Boldú, F. X. (2018). Deep learning in agriculture: A survey. *Computers and Electronics in Agriculture*, 147, 70–90. <https://doi.org/10.1016/j.compag.2018.02.016>
- 18 Zadeh, L. A. (1965). Fuzzy sets. *Information and Control*, 8(3), 338–353. [https://doi.org/10.1016/S0019-9958\(65\)90241-X](https://doi.org/10.1016/S0019-9958(65)90241-X)
- 19 Mamdani, E. H. (1974). Application of fuzzy algorithms for control of simple dynamic plant. *Proceedings of the Institution of Electrical Engineers*, 121(12), 1585–1588. <https://doi.org/10.1049/piee.1974.0328>

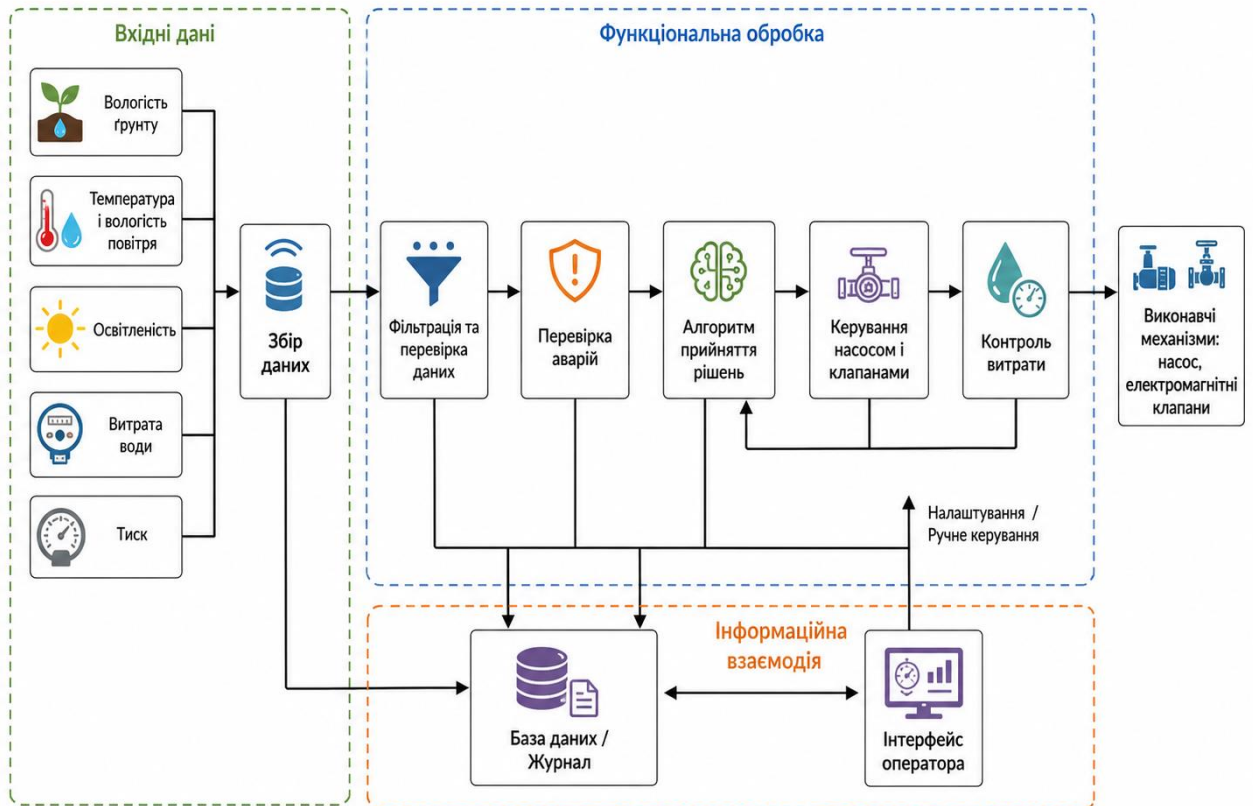
- 20 Ross, T. J. (2017). Fuzzy logic with engineering applications (4th ed.). Wiley.
- 21 Espressif Systems. (2025). ESP32 Series Datasheet. Espressif Systems.
- 22 Sensirion. (2022). Datasheet SHT3x-DIS: Humidity and temperature sensor. Sensirion.
- 23 Bosch Sensortec. (2023). BME280 combined humidity and pressure sensor: Datasheet. Bosch Sensortec.
- 24 ROHM Semiconductor. (2011). BH1750FVI: Digital 16-bit serial output type ambient light sensor IC. ROHM Semiconductor.
- 25 Modbus Organization. (2012). MODBUS application protocol specification V1.1b3. Modbus Organization.
- 26 International Electrotechnical Commission. (2025). IEC 61131-3:2025 Programmable controllers — Part 3: Programming languages. IEC.
- 27 OASIS Open. (2019). MQTT version 5.0: OASIS standard. OASIS Open.
- 28 Микитишин А.Г., Митник М.М., Стухляк П.Д. Телекомунікаційні системи та мережі: навчальний посібник для студентів спеціальності 151 «Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології» – Тернопіль: ТНТУ ім.Івана Пулюя, 2017 – 384 с
- 29 Stanko, A., Palka, O., Matiichuk, L., Martsenko, N., & Matsiuk, O. (2021, September). Smart City: A Review of Model Architecture and Technology. In 2021 IEEE 16th International Conference on Computer Sciences and Information Technologies (CSIT) (Vol. 2, pp. 273–277). IEEE.
- 30 Duda, O., Mykytyshyn, A., Mytnyk, M., & Stanko, A. Information technology sets formation and" TNTU Smart Campus" services network support. Proceedings of the 3rd International Workshop on ITТАР 2023,Ternopil, Ukraine, Opole, Poland, November 22–24, 2023.
- 31 Безпека в надзвичайних ситуаціях. Методичний посібник для здобувачів освітнього ступеня «магістр» всіх спеціальностей денної та заочної (дистанційної) форм навчання / укл.: Стручок В. С. Тернопіль: ФОП Паляниця В. А., 2022. 156 с.

ДОДАТКИ

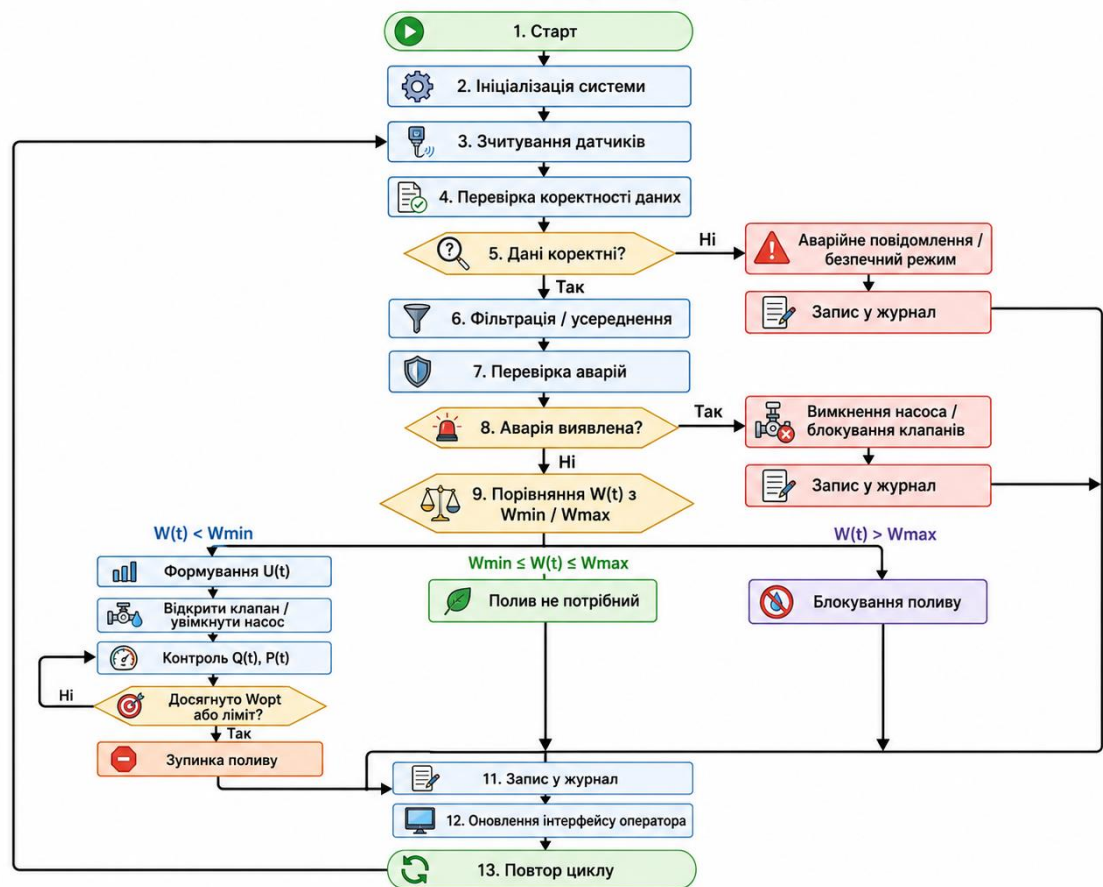
Структурна схема інтелектуальної системи моніторингу та оптимізації витрат води



Функціональна схема системи керування поливом



Блок-схема алгоритму керування поливом



Візуалізація інтелектуальної системи моніторингу

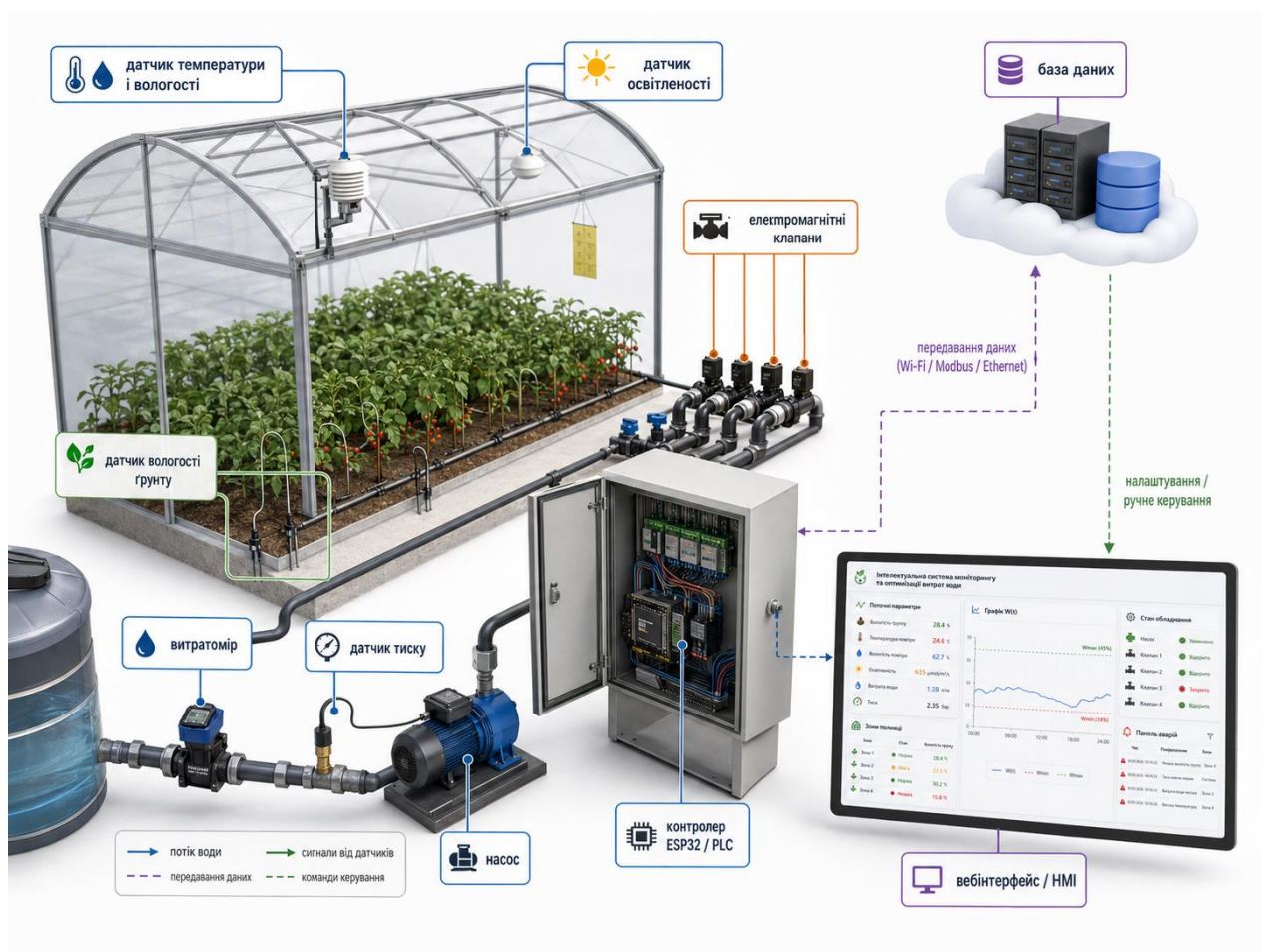
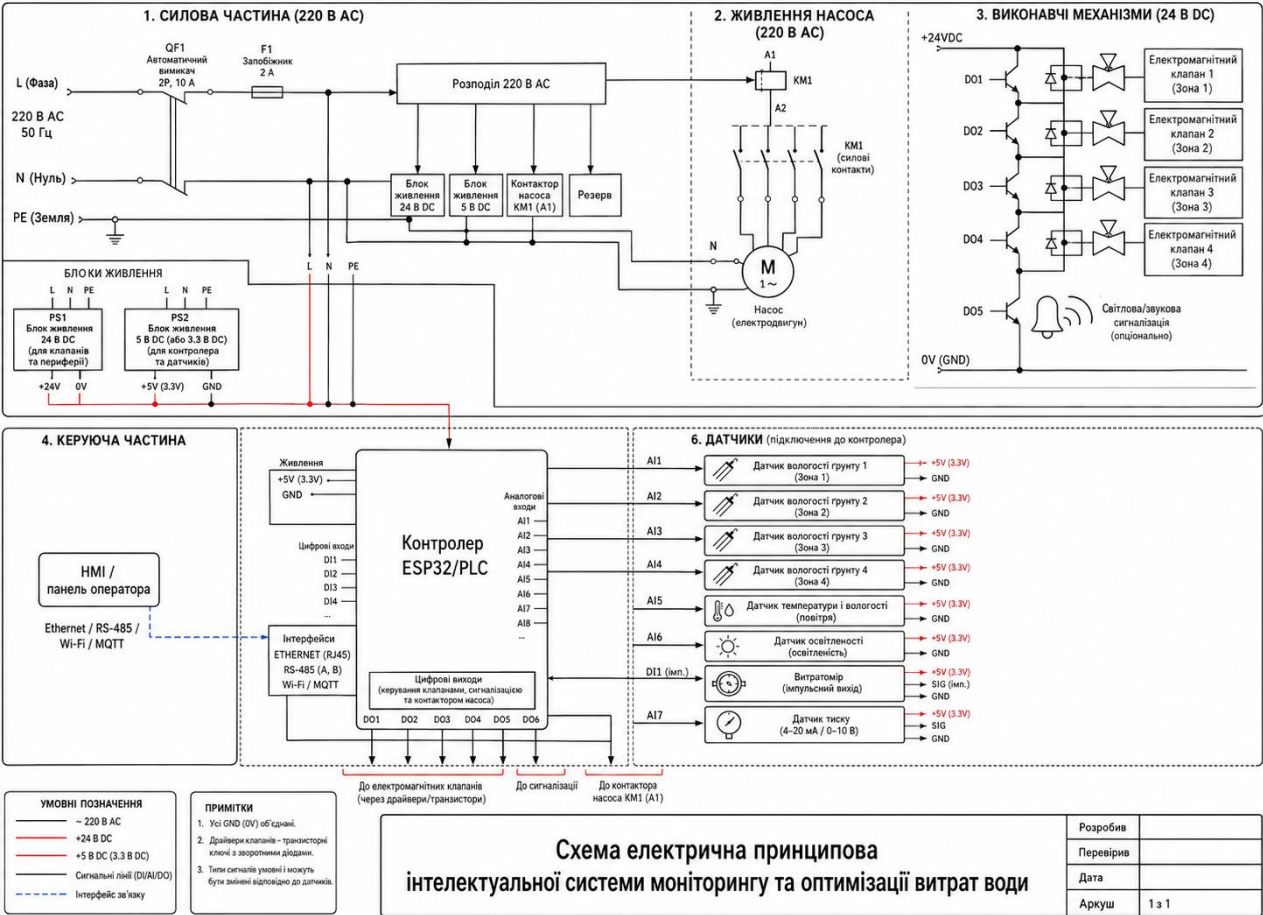
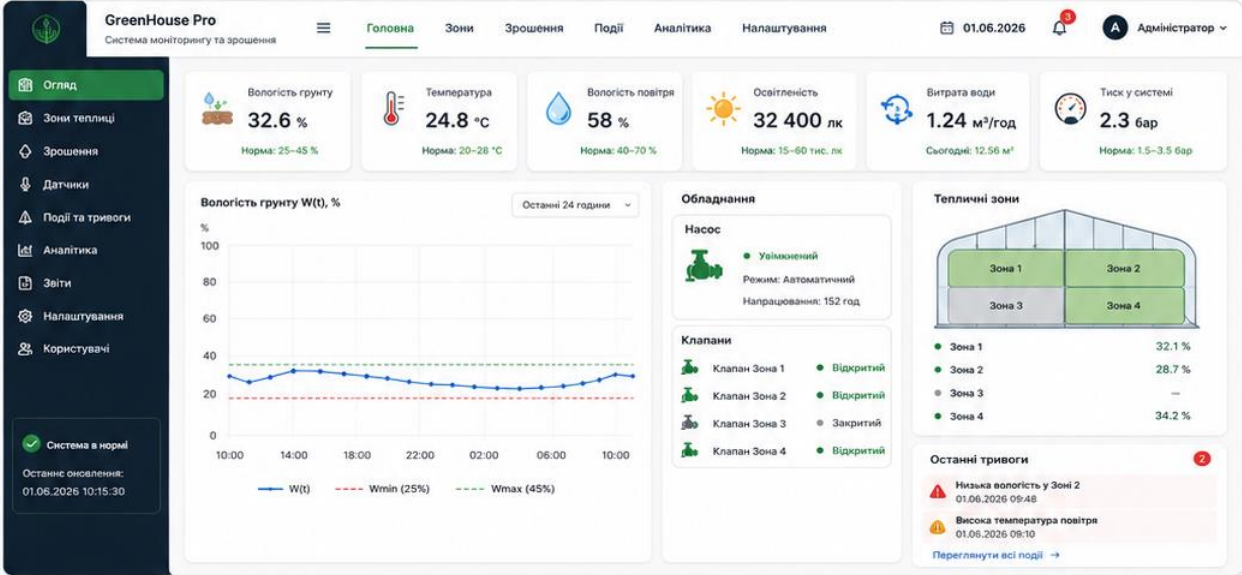


Схема електрична принципова системи

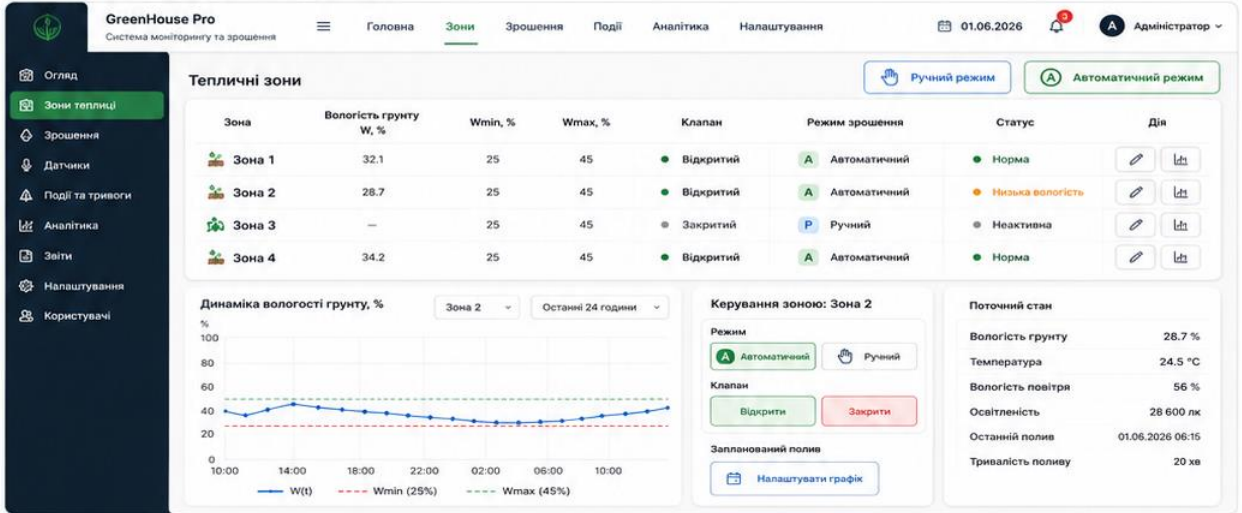


Макети інтерфейсу користувача системи моніторингу

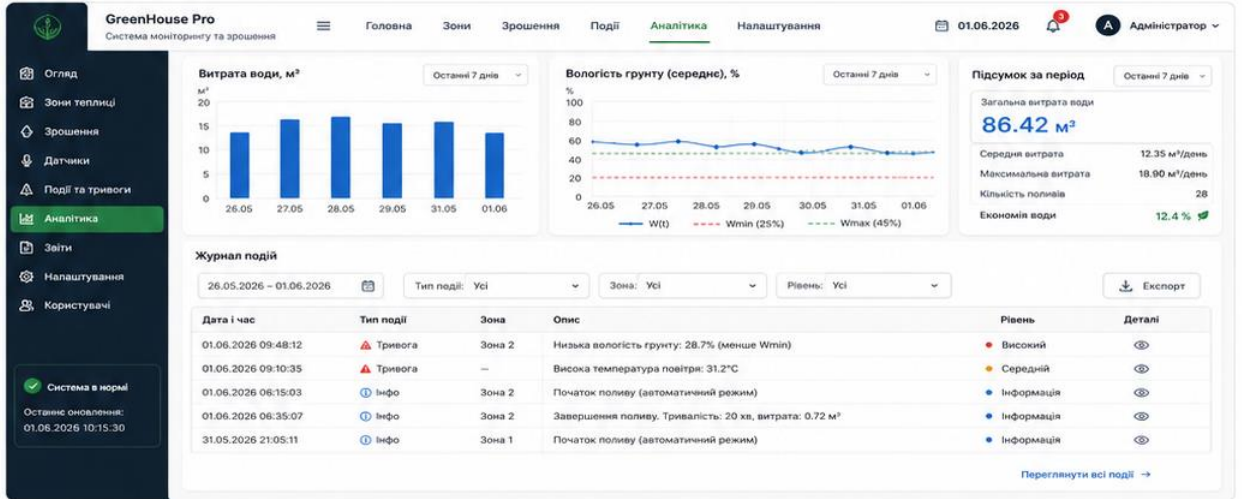
1. Головна панель моніторингу (огляд)



2. Сторінка зон та керування зрошенням



3. Сторінка подій та аналітики



Фрагменти програмного коду контролера та програмних модулів**Д.1. Фрагмент програмного коду контролера ESP32**

```
#include <Arduino.h>

#define SOIL_SENSOR_PIN 34
#define PRESSURE_PIN 35
#define FLOW_SENSOR_PIN 27

#define PUMP_RELAY_PIN 18
#define VALVE_1_PIN 19
#define VALVE_2_PIN 21

#define ADC_MIN_WET 1200
#define ADC_MAX_DRY 3200

#define FLOW_K_FACTOR 450.0
#define PRESSURE_MAX_BAR 5.0

volatile uint32_t flowPulseCount = 0;

struct SensorData {
    float soilMoisture;
    float airTemperature;
    float airHumidity;
    float lightLevel;
    float flowRate;
    float pressure;
    bool valid;
};

struct ZoneSettings {
    float wMin;
    float wMax;
    float wOpt;
    uint8_t valvePin;
    bool automaticMode;
};

ZoneSettings zone1 = {
    .wMin = 18.0,
    .wMax = 45.0,
    .wOpt = 32.0,
    .valvePin = VALVE_1_PIN,
    .automaticMode = true
};

void IRAM_ATTR onFlowPulse() {
    flowPulseCount++;
}

void setup() {
    Serial.begin(115200);

    pinMode(PUMP_RELAY_PIN, OUTPUT);
    pinMode(VALVE_1_PIN, OUTPUT);
    pinMode(VALVE_2_PIN, OUTPUT);
    pinMode(FLOW_SENSOR_PIN, INPUT_PULLUP);

    digitalWrite(PUMP_RELAY_PIN, LOW);
    digitalWrite(VALVE_1_PIN, LOW);
    digitalWrite(VALVE_2_PIN, LOW);

    attachInterrupt(digitalPinToInterrupt(FLOW_SENSOR_PIN), onFlowPulse, RISING);

    Serial.println("Система моніторингу та керування поливом ініціалізована");
}
```

Д.2. Зчитування та перетворення сенсорних даних

```
float readSoilMoisturePercent(uint8_t pin) {
    int adcValue = analogRead(pin);

    float moisture = map(adcValue, ADC_MAX_DRY, ADC_MIN_WET, 0, 100);

    if (moisture < 0) {
        moisture = 0;
    }

    if (moisture > 100) {
        moisture = 100;
    }

    return moisture;
}

float readPressureBar(uint8_t pin) {
    int adcValue = analogRead(pin);

    float voltage = (adcValue / 4095.0) * 3.3;
    float pressure = (voltage / 3.3) * PRESSURE_MAX_BAR;

    return pressure;
}

float calculateFlowRate() {
    static uint32_t previousTime = 0;
    static uint32_t previousPulseCount = 0;

    uint32_t currentTime = millis();
    uint32_t elapsedTime = currentTime - previousTime;

    if (elapsedTime < 1000) {
        return 0.0;
    }

    uint32_t pulses = flowPulseCount - previousPulseCount;
    previousPulseCount = flowPulseCount;
    previousTime = currentTime;

    float frequency = pulses / (elapsedTime / 1000.0);
    float flowRate = frequency / FLOW_K_FACTOR * 60.0;

    return flowRate;
}

SensorData readSensors() {
    SensorData data;

    data.soilMoisture = readSoilMoisturePercent(SOIL_SENSOR_PIN);
    data.airTemperature = 24.6;    // приклад значення з цифрового датчика
    SHT31/BME280
    data.airHumidity = 62.7;        // приклад значення з цифрового датчика
    SHT31/BME280
    data.lightLevel = 635.0;        // приклад значення з датчика освітленості
    BH1750
    data.flowRate = calculateFlowRate();
    data.pressure = readPressureBar(PRESSURE_PIN);
    data.valid = true;

    return data;
}
```

Д.3. Перевірка коректності даних і виявлення аварій

```
bool validateSensorData(const SensorData& data) {
    if (data.soilMoisture < 0 || data.soilMoisture > 100) {
        return false;
    }

    if (data.airTemperature < -10 || data.airTemperature > 70) {
        return false;
    }

    if (data.airHumidity < 0 || data.airHumidity > 100) {
        return false;
    }

    if (data.pressure < 0 || data.pressure > PRESSURE_MAX_BAR) {
        return false;
    }

    return true;
}

bool detectEmergency(const SensorData& data, bool pumpState, bool
valveState) {
    const float MIN_PRESSURE = 0.4;
    const float MIN_FLOW = 0.05;

    if (pumpState && data.pressure < MIN_PRESSURE) {
        Serial.println("Аварія: тиск нижче допустимого рівня");
        return true;
    }

    if (pumpState && valveState && data.flowRate < MIN_FLOW) {
        Serial.println("Аварія: відсутня витрата води при активному поливі");
        return true;
    }

    if (!valveState && data.flowRate > MIN_FLOW) {
        Serial.println("Аварія: можлива неконтрольована витрата або витік");
        return true;
    }

    return false;
}
```

Д.4. Алгоритм прийняття рішення про полив

```
bool shouldStartIrrigation(const SensorData& data, const ZoneSettings&
zone) {
    if (!zone.automaticMode) {
        return false;
    }

    if (data.soilMoisture < zone.wMin) {
        return true;
    }

    bool nearLowerLimit = data.soilMoisture <= (zone.wMin + 3.0);
    bool highTemperature = data.airTemperature >= 30.0;
    bool highLight = data.lightLevel >= 600.0;

    if (nearLowerLimit && highTemperature && highLight) {
        return true;
    }

    return false;
}

bool shouldStopIrrigation(const SensorData& data, const ZoneSettings&
zone) {
    if (data.soilMoisture >= zone.wOpt) {
        return true;
    }

    if (data.soilMoisture >= zone.wMax) {
        return true;
    }

    return false;
}
```

Д.5. Керування насосом і електромагнітними клапанами

```
void startIrrigation(uint8_t valvePin) {
    digitalWrite(valvePin, HIGH);
    delay(300);
    digitalWrite(PUMP_RELAY_PIN, HIGH);

    Serial.println("Полив запущено");
}

void stopIrrigation(uint8_t valvePin) {
    digitalWrite(PUMP_RELAY_PIN, LOW);
    delay(300);
    digitalWrite(valvePin, LOW);

    Serial.println("Полив зупинено");
}

void controlIrrigationCycle(ZoneSettings& zone) {
    static bool irrigationActive = false;
    static uint32_t irrigationStartTime = 0;

    const uint32_t MAX_IRRIGATION_TIME = 10UL * 60UL * 1000UL;

    SensorData data = readSensors();
    data.valid = validateSensorData(data);

    if (!data.valid) {
        stopIrrigation(zone.valvePin);
        irrigationActive = false;
        Serial.println("Перехід у безпечний режим: некоректні дані датчиків");
        return;
    }

    bool valveState = digitalRead(zone.valvePin);
    bool pumpState = digitalRead(PUMP_RELAY_PIN);

    if (detectEmergency(data, pumpState, valveState)) {
        stopIrrigation(zone.valvePin);
        irrigationActive = false;
        Serial.println("Аварійне блокування поливу");
        return;
    }

    if (!irrigationActive && shouldStartIrrigation(data, zone)) {
        startIrrigation(zone.valvePin);
        irrigationActive = true;
        irrigationStartTime = millis();
    }

    if (irrigationActive) {
        bool stopByMoisture = shouldStopIrrigation(data, zone);
        bool stopByTime = (millis() - irrigationStartTime) >=
MAX_IRRIGATION_TIME;

        if (stopByMoisture || stopByTime) {
            stopIrrigation(zone.valvePin);
            irrigationActive = false;
        }
    }
}

void loop() {
    controlIrrigationCycle(zone1);
    delay(3000);
}
```

Д.6. Формування JSON-пакета телеметрії

```
String createTelemetryJson(const SensorData& data, const char* zoneId) {
    String json = "{";

    json += "\"zone_id\":\":";
    json += zoneId;
    json += "\", ";

    json += "\"soil_moisture\":\":";
    json += String(data.soilMoisture, 1);
    json += ", ";

    json += "\"air_temperature\":\":";
    json += String(data.airTemperature, 1);
    json += ", ";

    json += "\"air_humidity\":\":";
    json += String(data.airHumidity, 1);
    json += ", ";

    json += "\"light_level\":\":";
    json += String(data.lightLevel, 1);
    json += ", ";

    json += "\"flow_rate\":\":";
    json += String(data.flowRate, 2);
    json += ", ";

    json += "\"pressure\":\":";
    json += String(data.pressure, 2);

    json += "}";

    return json;
}
```


Д.7. Фрагмент серверного модуля приймання телеметрії

```
from fastapi import FastAPI
from pydantic import BaseModel
from datetime import datetime

app = FastAPI(title="Greenhouse Irrigation Monitoring API")

class TelemetryPacket(BaseModel):
    zone_id: str
    soil_moisture: float
    air_temperature: float
    air_humidity: float
    light_level: float
    flow_rate: float
    pressure: float

@app.post("/api/telemetry")
def receive_telemetry(packet: TelemetryPacket):
    record = {
        "timestamp": datetime.now().isoformat(),
        "zone_id": packet.zone_id,
        "soil_moisture": packet.soil_moisture,
        "air_temperature": packet.air_temperature,
        "air_humidity": packet.air_humidity,
        "light_level": packet.light_level,
        "flow_rate": packet.flow_rate,
        "pressure": packet.pressure
    }

    save_sensor_data(record)
    check_alerts(record)

    return {
        "status": "ok",
        "message": "Telemetry packet received",
        "zone_id": packet.zone_id
    }

def save_sensor_data(record: dict):
    print("Запис сенсорних даних:", record)

def check_alerts(record: dict):
    if record["soil_moisture"] < 18:
        print("Аварійне повідомлення: низька вологість ґрунту")

    if record["pressure"] < 0.4:
        print("Аварійне повідомлення: тиск нижче допустимого рівня")
```

Д.8. Фрагмент програмного модуля прийняття рішень

```
from dataclasses import dataclass

@dataclass
class ZoneConfig:
    zone_id: str
    w_min: float
    w_max: float
    w_opt: float
    automatic_mode: bool

@dataclass
class SensorState:
    soil_moisture: float
    air_temperature: float
    air_humidity: float
    light_level: float
    flow_rate: float
    pressure: float

def microclimate_factor(state: SensorState) -> float:
    factor = 1.0

    if state.air_temperature > 30:
        factor += 0.2

    if state.air_humidity < 45:
        factor += 0.1

    if state.light_level > 600:
        factor += 0.1

    return factor

def make_irrigation_decision(state: SensorState, config: ZoneConfig) -> dict:
    if not config.automatic_mode:
        return {
            "action": "no_action",
            "reason": "manual_mode"
        }
    if state.soil_moisture > config.w_max:
        return {
            "action": "block_irrigation",
            "reason": "soil_moisture_above_wmax"
        }
    if state.pressure < 0.4:
        return {
            "action": "emergency_stop",
            "reason": "low_pressure"
        }
    kf = microclimate_factor(state)
    if state.soil_moisture < config.w_min:
        return {
            "action": "start_irrigation",
            "reason": "soil_moisture_below_wmin",
            "priority": "high",
            "microclimate_factor": kf
        }
    if state.soil_moisture <= config.w_min + 3 and kf > 1.2:
        return {
            "action": "short_irrigation",
            "reason": "near_wmin_and_high_evaporation_risk",
            "priority": "medium",
            "microclimate_factor": kf
        }
    return {
        "action": "no_irrigation",
        "reason": "soil_moisture_in_allowed_range",
        "microclimate_factor": kf
    }
```

Д.9. Фрагмент SQL-схеми бази даних

```
CREATE TABLE GreenhouseZone (  
    zone_id          VARCHAR(20) PRIMARY KEY,  
    crop_type        VARCHAR(80),  
    area             REAL,  
    substrate_type   VARCHAR(80),  
    moisture_min     REAL NOT NULL,  
    moisture_max     REAL NOT NULL  
);  
  
CREATE TABLE SensorData (  
    id               INTEGER PRIMARY KEY AUTOINCREMENT,  
    timestamp        DATETIME NOT NULL,  
    sensor_id        VARCHAR(40),  
    zone_id          VARCHAR(20),  
    parameter_type   VARCHAR(40),  
    value            REAL,  
    unit             VARCHAR(20),  
    status           VARCHAR(20),  
    FOREIGN KEY (zone_id) REFERENCES GreenhouseZone(zone_id)  
);  
  
CREATE TABLE IrrigationEvent (  
    event_id         INTEGER PRIMARY KEY AUTOINCREMENT,  
    start_time       DATETIME NOT NULL,  
    end_time         DATETIME,  
    zone_id          VARCHAR(20),  
    water_volume     REAL,  
    reason           VARCHAR(120),  
    mode             VARCHAR(30),  
    FOREIGN KEY (zone_id) REFERENCES GreenhouseZone(zone_id)  
);  
  
CREATE TABLE DeviceStatus (  
    device_id        VARCHAR(40) PRIMARY KEY,  
    device_type      VARCHAR(40),  
    zone_id          VARCHAR(20),  
    state            VARCHAR(30),  
    last_update      DATETIME,  
    error_code       VARCHAR(40),  
    FOREIGN KEY (zone_id) REFERENCES GreenhouseZone(zone_id)  
);  
  
CREATE TABLE UserSettings (  
    setting_id       INTEGER PRIMARY KEY AUTOINCREMENT,  
    zone_id          VARCHAR(20),  
    operation_mode   VARCHAR(30),  
    threshold_value  REAL,  
    irrigation_limit REAL,  
    FOREIGN KEY (zone_id) REFERENCES GreenhouseZone(zone_id)  
);  
  
CREATE TABLE Alerts (  
    alert_id         INTEGER PRIMARY KEY AUTOINCREMENT,  
    timestamp        DATETIME NOT NULL,  
    zone_id          VARCHAR(20),  
    type             VARCHAR(50),  
    description      TEXT,  
    status           VARCHAR(30),  
    FOREIGN KEY (zone_id) REFERENCES GreenhouseZone(zone_id)  
);
```

Д.10. Фрагмент модуля оновлення вебінтерфейсу

```
async function loadCurrentState() {
    const response = await fetch("/api/current-state");
    const data = await response.json();

    document.getElementById("soilMoisture").innerText =
        `${data.soil_moisture.toFixed(1)} %`;

    document.getElementById("airTemperature").innerText =
        `${data.air_temperature.toFixed(1)} °C`;

    document.getElementById("airHumidity").innerText =
        `${data.air_humidity.toFixed(1)} %`;

    document.getElementById("flowRate").innerText =
        `${data.flow_rate.toFixed(2)} л/хв`;

    document.getElementById("pressure").innerText =
        `${data.pressure.toFixed(2)} бар`;

    updateDeviceIndicators(data.devices);
    updateAlertPanel(data.alerts);
}

function updateDeviceIndicators(devices) {
    devices.forEach(device => {
        const indicator = document.getElementById(device.device_id);

        if (!indicator) {
            return;
        }

        indicator.className = device.state === "on"
            ? "indicator indicator-green"
            : "indicator indicator-red";
    });
}

function updateAlertPanel(alerts) {
    const container = document.getElementById("alerts");
    container.innerHTML = "";

    alerts.forEach(alert => {
        const row = document.createElement("div");
        row.className = "alert-row";
        row.innerHTML = `${alert.timestamp} — ${alert.description}`;
        container.appendChild(row);
    });
}

setInterval(loadCurrentState, 5000);
```

Д.11. Приклад структуры проекта программного обеспечения

```
greenhouse-irrigation-system/
├── firmware/
│   ├── main_controller.ino
│   ├── sensors.cpp
│   ├── actuators.cpp
│   └── config.h
├── backend/
│   ├── app.py
│   ├── decision_module.py
│   ├── database.py
│   ├── alerts.py
│   └── models.py
├── database/
│   └── schema.sql
├── frontend/
│   ├── index.html
│   ├── dashboard.js
│   └── styles.css
└── README.md
```