

Міністерство освіти і науки України  
Харківський національний університет радіоелектроніки

Факультет Автоматики і комп'ютеризованих технологій  
(повна назва)

Кафедра Комп'ютерно-інтегрованих технологій, автоматизації та робототехніки  
(повна назва)

## КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА Пояснювальна записка

перший (бакалаврський)  
(рівень вищої освіти)

Розроблення мобільного робота для автоматизованого поливу рослин у  
теплицях  
(тема)

Виконав:  
здобувач 4 року навчання,  
групи АКТСІ 21-2  
Єгор ПАВЛЕНКО  
(власне ім'я, прізвище)

Спеціальність 151 Автоматизація та  
комп'ютерно-інтегровані технології  
(код і повна назва спеціальності)

Тип програми освітньо-професійна  
Освітня програма Системна інженерія  
(повна назва освітньої програми)

Керівник проф. Владислав ЄВСЄЄВ  
(посада, власне ім'я, прізвище)

Допускається до захисту  
Зав. кафедри КІТАР

\_\_\_\_\_  
(підпис)

Ігор НЕВЛЮДОВ  
(власне ім'я, прізвище)

2025 р.

Я, Павленко Єгор Юрійович, як здобувач вищої освіти ХНУРЕ, розумію і підтримую політику закладу із академічної доброчесності. Я не надавав і не одержував недозволену допомогу під час підготовки кваліфікаційної роботи. Я не використовував штучний інтелект для підготовки кваліфікаційної роботи. Використання ідей, результатів і текстів інших авторів мають посилання на відповідне джерело.

"23" червня 2025 р.

Єгор ПАВЛЕНКО

# ХАРКІВСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ РАДІОЕЛЕКТРОНІКИ

Факультет \_\_\_\_\_ АКТ  
Кафедра \_\_\_\_\_ КІТАР  
Рівень вищої освіти \_\_\_\_\_ перший (бакалаврський)  
Спеціальність \_\_\_\_\_ 151 Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології  
Тип програми \_\_\_\_\_ Освітньо-професійна  
Освітня програма \_\_\_\_\_ Системна інженерія  
(шифр і назва)

ЗАТВЕРДЖУЮ:

Зав. кафедри \_\_\_\_\_

(підпис)

«19» травня 2025 р.

## ЗАВДАННЯ НА КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ

студентові \_\_\_\_\_ Павленко Єгору Юрійовичу  
(прізвище, ім'я, по батькові)

1 Тема роботи \_\_\_\_\_ Розроблення мобільного робота для автоматизованого поливу  
рослин у теплицях

Затверджена наказом по університету від \_\_\_\_\_ 19.05.2025 р. №391 СТ

2 Термін подання студентом роботи до екзаменаційної комісії \_\_\_\_\_ 23.06.2025

3 Вихідні дані до роботи \_\_\_\_\_

3.1 Колісна 4WD-платформа з можливістю руху по напрямних.

3.2 Мікроконтролер ESP32 DevKitC V4 з Wi-Fi та Bluetooth.

3.3 Сенсор вологості ґрунту FC-50 (резистивного типу).

3.4 Позиціонування за допомогою магнітних міток та датчика Холла.

3.5 Реле та драйвер L298N для керування двигунами та клапанами.

3.6 Програмування в середовищі Arduino IDE з використанням мови C++

4 Перелік питань, що потрібно опрацювати в роботі

4.1 Вступ

4.2 Аналіз існуючих підходів до автоматизованого поливу у теплицях;

4.3 Розробка конструкції робота для теплиці;

4.4 Розроблення програмної частини системи керування;

4.5 Висновки;

5. Перелік графічного матеріалу із зазначенням креслеників, схем, плакатів, комп'ютерних ілюстрацій (п.5 включається до завдання за рішенням випускової кафедри)

Демонстраційні графічні матеріали в Power Point у форматі \*.pptx формату А4  
13 сторінок

6. Консультанти розділів роботи (п.6 включається до завдання за наявності консультантів згідно з наказом, зазначеним у п.1 )

Найменування розділу	Консультант (посада, прізвище, ім'я, по батькові)	Позначка консультанта про виконання розділу	
		підпис	дата

#### КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№	Назва етапів роботи	Термін виконання етапів роботи	Приміт- ка
1	Формування теми та постановка задачі	28.04.2025	Виконано
2	Розробка конструкції робота та вибір компонентів	05.05.2025	Виконано
3	Розробка структурної та електричної схеми системи	18.05.2025	Виконано
4	Програмна реалізація алгоритмів керування та веб-інтерфейсу	31.05.2025	Виконано
5	Проведення експериментальних досліджень	15.06.2025	Виконано
6	Оформлення пояснювальної записки	17.06.2025	Виконано
7	Подання роботи на нормоконтроль	19.06.2025	Виконано
8	Подання роботи на рецензію	20.06.2025	Виконано
9	Подання роботи на підпис зав. кафедри	22.06.2025	Виконано
11	Подання кваліфікаційної роботи в ЕК	23.06.2025	Виконано

Дата видачі завдання 28.04.2025 р.

Здобувач \_\_\_\_\_  
(підпис)  
прізвище)

Єгор ПАВЛЕНКО  
(посада, власне ім'я,

Керівник роботи \_\_\_\_\_  
(підпис)

проф. Владислав ЄВСЕЄВ  
(власне ім'я, прізвище)

## РЕФЕРАТ

Пояснювальна записка: 78 с., 6 табл., 13 рис., 3 дод., 29 джерел.

МОБІЛЬНИЙ РОБОТ, АВТОМАТИЗОВАНИЙ ПОЛИВ,  
МІКРОКОНТРОЛЕР ESP32, ДАТЧИК ВОЛОГОСТІ, СИСТЕМА  
ПОЗИЦІОНУВАННЯ, НАПРАВЛЯЮЧІ, КРОКОВИЙ ДВИГУН, ОХОРОНА  
ПРАЦІ.

Мета роботи – покращення точності позиціонування мобільного робота для автоматизованого поливу за рахунок розробки системи керування на базі мікроконтролера ESP32, з реалізацією алгоритмів контролю руху, моніторингу вологості ґрунту та дистанційного управління через веб-інтерфейс, з метою підвищення ефективності використання водних ресурсів у тепличному господарстві.

Об'єкт розробки – процес автоматизованого поливу рослин у теплицях із використанням мобільного робота на направляючих.

Предмет розробки – методи та технічні засоби створення мобільної системи поливу на базі ESP32 з доступних компонентів.

У роботі представлено прототип робота, що рухається по направляючих, вимірює вологість ґрунту та здійснює дозований полив. Розроблено схеми, обґрунтовано вибір компонентів, створено веб-інтерфейс. Архітектура ПЗ охоплює модулі руху, поливу та моніторингу. Проведено лабораторні дослідження точності, стабільності та енергоефективності.

Система є доступною для малих теплиць і відповідає Цілям сталого розвитку ООН №2, №9 і №12, сприяючи цифровізації агросектору.

## ABSTRACT

Explanatory note: 78 pages, 6 tables, 13 figures, 3 appendices, 29 references.

Keywords: MOBILE ROBOT, AUTOMATED IRRIGATION, ESP32 MICROCONTROLLER, MOISTURE SENSOR, POSITIONING SYSTEM, GUIDING RAILS, STEPPER MOTOR, OCCUPATIONAL SAFETY.

Objective of the study – to improve the positioning accuracy of a mobile robot for automated irrigation by developing a control system based on the ESP32 microcontroller, implementing motion control algorithms, soil moisture monitoring, and remote management via a web interface, with the aim of enhancing water resource efficiency in greenhouse farming.

Object of the study – the process of automated plant irrigation in greenhouses using a mobile robot on guiding rails.

Subject of the study – methods and technical solutions for developing a mobile irrigation system based on ESP32 using accessible components.

This work presents a prototype of a robot capable of moving along rails, measuring soil moisture, and performing precise irrigation. System diagrams were developed, component selection was justified, and a web interface was created. The software architecture includes modules for movement, irrigation, and remote monitoring. Laboratory tests were conducted to evaluate positioning accuracy, operational stability, and energy efficiency.

The system is economically viable for small-scale greenhouse use and aligns with the UN Sustainable Development Goals No. 2, 9, and 12 by promoting digitalization in agriculture.

## ЗМІСТ

Перелік скорочень .....	9
Вступ.....	10
1 Аналіз існуючих підходів до автоматизованого поливу в теплицях.....	12
1.1 Аналіз підходів до автоматизованого поливу в теплицях.....	12
1.2 Огляд існуючих систем із роботами на напрямних .....	14
1.3 Порівняльний аналіз технічних рішень.....	16
1.4 Визначення вимог до розроблюваного робота .....	19
2 Розробка конструкції робота для теплиці .....	22
2.1 Аналіз типів рухомих платформ .....	22
2.2 Проектування механічної конструкції.....	23
2.3 Вибір мікроконтролера .....	24
2.4 Розроблення системи датчиків .....	26
2.5 Проектування електричної схеми .....	28
2.6 Розроблення системи живлення.....	29
2.7 Алгоритми управління рухом.....	29
2.8 Розробка структурної схеми системи позиціонування .....	31
2.9 Теоретичні основи автоматичного управління (ТАУ).....	32
3 Розроблення програмної частини системи керування .....	35
3.1 Архітектура програмного забезпечення керування .....	35
3.2 Розробка алгоритму управління рухом .....	37
3.3 Обробка сигналів датчиків .....	39
3.4 Алгоритм управління поливом .....	41
3.5 Веб-інтерфейс та віддалене управління .....	43
3.6 Програмна реалізація системи керування .....	45
3.7 Експериментальне дослідження системи.....	49
3.8 Охорона праці при експлуатації системи.....	51
Висновки.....	54
Перелік джерел посилання .....	56
Додаток А Лістинг основного коду системи орошення .....	59
Додаток Б Лістинг коду веб-інтерфейсу та обробників HTTP запитів .....	69

Додаток В Демонстраційний матеріал у вигляді презентації .....	77
--	----

## ПЕРЕЛІК СКОРОЧЕНЬ

- АСУ – автоматизована система управління
- АЦП – аналого-цифровий перетворювач
- ВІП – веб-інтерфейс програми
- ГМІ – графічний інтерфейс користувача
- ДВ – датчик вологості
- ДХ – датчик Холла
- ЕМК – електромагнітна клапан
- ЗЖ – система живлення
- ІоТ – Інтернет речей (Internet of Things)
- КД – кроковий двигун
- МК – мікроконтролер
- ПЗ – програмне забезпечення
- ПІД – пропорційно-інтегрально-диференціальний регулятор
- РП – рухома платформа
- СУ – система управління
- ТАУ – теорія автоматичного управління
- ЦАП – цифро-аналоговий перетворювач
- EEPROM – електрично стираюча програмована постійна пам'ять
- HTTP – протокол передачі гіпертексту
- JSON – формат обміну даними
- Wi-Fi – технологія бездротового зв'язку

## ВСТУП

Сучасне тепличне господарство України потребує впровадження доступних технологічних рішень для автоматизації процесів поливу. Традиційні методи поливу в малих та середніх теплицях часто характеризуються нерівномірним розподілом води, надмірним споживанням ресурсів та необхідністю постійного ручного контролю за станом ґрунту.

Розвиток доступних мікроконтролерних технологій, зокрема ESP32, відкриває можливості для створення простих та економічних систем автоматизованого поливу. Особливо перспективним є розвиток мобільних систем на напрямних, які можуть переміщуватися по заданих траєкторіях та здійснювати локальний контроль вологості ґрунту з використанням простих датчиків.

Створення макету мобільного робота з використанням доступних компонентів та матеріалів дозволяє продемонструвати принципи роботи автоматизованих систем поливу без значних фінансових витрат. Такий підхід особливо актуальний для навчальних цілей та розробки прототипів для малих тепличних господарств.

Актуальність теми підтверджується необхідністю розробки простих та доступних рішень для автоматизації сільськогосподарських процесів, які можуть бути реалізовані з мінімальними витратами та обслуговуватися без спеціальної кваліфікації.

Мета роботи – покращення точності позиціонування мобільного робота для автоматизованого поливу за рахунок розробки системи керування на базі мікроконтролера ESP32, з реалізацією алгоритмів контролю руху, моніторингу вологості ґрунту та дистанційного управління через веб-інтерфейс, з метою підвищення ефективності використання водних ресурсів у тепличному господарстві.

Об'єкт розробки – процес автоматизованого поливу рослин у теплицях із використанням мобільного робота на направляючих.

Предмет розробки – методи та технічні засоби створення мобільної системи поливу на базі ESP32 з доступних компонентів.

Завданням кваліфікаційної роботи є досягнення поставленої мети необхідно вирішити наступні завдання:

- провести аналіз існуючих підходів до автоматизації поливу та визначити переваги мобільних систем та дослідити технічні характеристики доступних датчиків вологості та компонентів для побудови системи;

- розробити просту конструкцію мобільної платформи з використанням доступних матеріалів та системою переміщення по направляючих та обґрунтувати вибір основних компонентів системи управління;

- спроектувати та реалізувати просту систему Festoon у вигляді тележок з ДСП для передачі живлення та сигналів до рухомої платформи. Розробити систему живлення від мережевого адаптера 12 В;

- створити програмне забезпечення для мікроконтролера ESP32, що реалізує базові алгоритми управління рухом та контролю вологості та розробити веб-інтерфейс для моніторингу та управління системою;

- виготовити та налагодити макет системи з проведенням базових експериментальних досліджень для перевірки працездатності основних функцій.

Кваліфікаційна робота виконана згідно ДСТУ 3008 – 15 [1] та керуючись навчальним посібником з кваліфікаційної роботи бакалавра [2] та методичними вказівками [3].

# 1 АНАЛІЗ ІСНУЮЧИХ ПІДХОДІВ ДО АВТОМАТИЗОВАНОГО ПОЛИВУ В ТЕПЛИЦЯХ

## 1.1 Аналіз підходів до автоматизованого поливу в теплицях

Сучасні системи автоматизованого поливу в теплицях можна класифікувати за кількома основними критеріями: способом подачі води, типом системи управління, методами контролю параметрів ґрунту та рівнем автоматизації процесів [4]. Кожен з цих підходів має свої переваги та недоліки, які необхідно враховувати при виборі оптимального рішення для конкретних умов експлуатації.

Традиційні системи краплинного поливу залишаються найбільш поширеним рішенням для тепличного господарства [5] завдяки своїй простоті та надійності. Такі системи складаються з мережі трубок з емітерами, які забезпечують дозовану подачу води безпосередньо до кореневої зони рослин. Основною перевагою краплинного поливу є економне використання води та можливість точного дозування поживних речовин через систему фертигації.

Однак стаціонарні системи краплинного поливу мають суттєві обмеження у плані адаптивності до змінних умов вирощування. Фіксоване розташування емітерів не дозволяє оперативно змінювати схему поливу при зміні культур або перепланування теплиці. Крім того, такі системи потребують складної мережі трубопроводів, що ускладнює обслуговування та збільшує ймовірність засмічення емітерів.

Системи дощування знайшли широке застосування у великих тепличних комплексах, де необхідно забезпечити полив значних площ за короткий час. Переваги дощування включають можливість одночасного зволоження повітря та створення сприятливого мікроклімату для рослин. Такі системи особливо ефективні для культур, які потребують високої вологості повітря, таких як салати та зелень.

Проте системи дощування характеризуються значно вищим споживанням води порівняно з краплинним поливом та можуть сприяти розвитку грибкових захворювань через надмірне зволоження листової поверхні рослин. Крім того, нерівномірність розподілу води при дощуванні може призводити до перезволоження одних ділянок та недостатнього поливу інших.

Підґрунтове зрошення представляє собою альтернативний підхід, при якому вода подається безпосередньо в кореневу зону через систему перфорованих труб, розташованих під поверхню субстрату. Цей метод забезпечує максимально ефективне використання води та мінімізує втрати на випаровування. Підґрунтове зрошення особливо ефективно для культур з глибокою кореневою системою.

Недоліками підґрунтового зрошення є складність монтажу та обслуговування системи, а також ризик засолення субстрату при використанні води з підвищеним вмістом солей. Крім того, такі системи потребують ретельного планування та не можуть бути легко модифіковані після встановлення.

Сучасні тенденції розвитку систем поливу спрямовані на інтеграцію різних підходів та створення гібридних рішень [6], які поєднують переваги кількох методів. Особливу увагу приділяється розробці адаптивних систем, здатних автоматично змінювати параметри поливу залежно від стадії розвитку рослин, погодних умов та інших факторів.

Важливим напрямком розвитку є впровадження технологій точного землеробства [7] в тепличне виробництво. Це включає використання датчиків для моніторингу параметрів ґрунту, систем машинного зору для оцінки стану рослин та алгоритмів штучного інтелекту для оптимізації режимів поливу.

Мобільні системи поливу представляють собою відносно новий напрямок розвитку, який дозволяє поєднати переваги різних методів подачі води з гнучкістю управління та можливістю адаптації до змінних умов. Такі

системи можуть переміщуватися по заданих траєкторіях та здійснювати локальний контроль параметрів ґрунту в різних зонах теплиці.

## 1.2 Огляд існуючих систем із роботами на напрямних

Роботизовані системи на напрямних знайшли широке застосування в різних галузях промисловості завдяки своїй здатності забезпечувати точне позиціонування та повторюваність операцій. У сільському господарстві такі системи, які зазначені на рисунку 1.1 використовуються для автоматизації процесів посіву, догляду за рослинами та поливу [8].



Рисунок 1.1 – Приклад сільськогосподарського робота для автоматизації процесів у теплицях [8]

Промислові роботи на напрямних зазвичай використовують прецизійні лінійні приводи з кульково-гвинтовими передачами або зубчасті рейки для

забезпечення високої точності позиціонування. Такі системи здатні досягати точності позиціонування до десятих часток міліметра, що робить їх ідеальними для застосування в точному машинобудуванні та електроніці [9].

Однак висока вартість промислових систем робить їх недоступними для більшості сільськогосподарських застосувань, особливо для малих та середніх господарств. Крім того, складність обслуговування та необхідність кваліфікованого персоналу для експлуатації таких систем створюють додаткові бар'єри для їх впровадження в аграрному секторі [10].

Альтернативним підходом є використання спрощених систем на основі ременних або ланцюгових передач [11], які забезпечують достатню точність для сільськогосподарських застосувань при значно нижчій вартості. Такі системи широко використовуються в автоматизованих теплицях для переміщення контейнерів з рослинами та обладнання для догляду.

Системи на основі крокових двигунів отримали популярність завдяки можливості точного контролю положення без використання зворотного зв'язку. Крокові двигуни забезпечують дискретне переміщення з фіксованим кутом повороту, що дозволяє досягати високої повторюваності позиціонування при відносно простій системі управління.

Основними перевагами крокових двигунів є простота управління, відсутність необхідності в енкодерах для контролю положення та можливість утримання позиції без споживання енергії. Це робить їх особливо привабливими для застосування в автономних системах з обмеженим енергоспоживанням.

Недоліками крокових двигунів є можливість втрати кроків при перевантаженні, обмежена швидкість обертання та відносно низький крутний момент порівняно з серводвигунами аналогічної потужності. Крім того, крокові двигуни можуть створювати вібрації та шум при роботі на певних частотах.

Магнітні системи позиціонування використовують постійні магніти та датчики Холла для визначення положення рухомих елементів. Такі системи

забезпечують безконтактне визначення положення та характеризуються високою надійністю завдяки відсутності механічного зносу датчиків.

Переваги магнітних систем включають стійкість до забруднення, вологості та температурних коливань, що робить їх ідеальними для використання в тепличних умовах. Магнітні датчики не потребують прямого контакту з рухомими частинами, що збільшує їх термін служби та зменшує потребу в обслуговуванні.

Оптичні системи позиціонування на основі енкодерів забезпечують високу точність та швидкодію, але потребують захисту від забруднення та конденсату. У тепличних умовах це може створювати додаткові проблеми з обслуговуванням та надійністю роботи.

Гібридні системи, що поєднують кілька методів позиціонування, дозволяють досягти оптимального співвідношення точності, надійності та вартості. Наприклад, використання крокових двигунів для грубого позиціонування в поєднанні з магнітними датчиками для точного визначення опорних точок може забезпечити високу точність при прийнятній вартості системи.

### 1.3 Порівняльний аналіз технічних рішень

Для об'єктивної оцінки різних підходів до створення мобільних систем поливу необхідно провести порівняльний аналіз за ключовими технічними та економічними критеріями. Основними параметрами які використовуються у роботах для поливу для порівняння є точність позиціонування, надійність роботи, вартість виготовлення, складність обслуговування та енергоспоживання, представленні у таблиці 1.1.

Таблиця 1.1 – Порівняльний аналіз технічних рішень для систем позиціонування

Критерій	Серводвигуни з енкодерами	Крокові двигуни	Пневматичні приводи	Магнітні системи
Точність позиціонування	$\pm 0,1$ мм	$\pm 2-5$ мм	$\pm 1-3$ мм	$\pm 5-10$ мм
Вартість системи	\$5000-10000	\$200-500	\$1000-3000	\$300-800
Надійність у вологих умовах	Середня	Висока	Низька	Дуже висока
Складність обслуговування	Висока	Низька	Висока	Дуже низька
Енергоспоживання	Середнє	Високе	Низьке	Низьке
Швидкість позиціонування	Висока	Середня	Висока	Низька

Точність позиціонування є критично важливим параметром для забезпечення ефективного поливу. Промислові системи на основі серводвигунів з енкодерами забезпечують найвищу точність ( $\pm 0,1$  мм), але їх вартість може перевищувати 5000-10000 доларів США для системи середнього розміру. Такі витрати неприйнятні для більшості тепличних господарств, особливо в умовах української економіки.

Системи на основі крокових двигунів забезпечують точність позиціонування в межах  $\pm 2-5$  мм, що є цілком достатнім для більшості застосувань у тепличному господарстві. Вартість таких систем у 5-10 разів нижча за промислові аналоги, що робить їх доступними для широкого кола користувачів.

Надійність роботи в умовах підвищеної вологості та температурних коливань є ключовим фактором для тепличних застосувань. Магнітні системи позиціонування демонструють найвищу стійкість до несприятливих умов експлуатації завдяки відсутності механічного контакту між датчиком та рухомими частинами.

Оптичні енкодери, незважаючи на високу точність, потребують додаткового захисту від вологості та забруднення, що ускладнює їх

використання в тепличних умовах. Механічні кінцеві вимикачі характеризуються високою надійністю, але мають обмежений ресурс роботи через механічний знос контактів.

Енергоспоживання системи є важливим фактором, особливо для автономних установок або систем з обмеженою потужністю живлення. Крокові двигуни споживають енергію постійно для утримання позиції, що може становити 20-50% від номінальної потужності. Серводвигуни споживають енергію тільки під час руху, але потребують постійного живлення системи управління.

Системи на основі пневматичних або гідравлічних приводів можуть забезпечувати високий крутний момент при відносно низькому енергоспоживанні, але потребують додаткового обладнання для створення робочого тиску та характеризуються складністю управління.

Вартість виготовлення та обслуговування є визначальними факторами для комерційного успіху системи. Аналіз ринку показує, що системи на основі мікроконтролерів ESP32 та крокових двигунів можуть бути виготовлені за вартістю 200-500 доларів США, що в 10-20 разів дешевше за промислові аналоги.

Простота обслуговування та ремонту є критично важливою для сільськогосподарських застосувань, де доступ до кваліфікованого технічного персоналу може бути обмеженим. Системи на основі стандартних компонентів та відкритих технологій забезпечують можливість самостійного обслуговування та ремонту силами користувачів.

Масштабованість системи дозволяє адаптувати рішення до різних розмірів теплиць та типів культур. Модульна архітектура на основі мікроконтролерів забезпечує можливість легкого розширення функціональності без кардинальної переробки існуючої системи.

#### 1.4 Визначення вимог до розроблюваного робота

На основі проведеного аналізу існуючих рішень та специфіки застосування в умовах українських тепличних господарств можна сформулювати основні вимоги до розробляемого мобільного робота для автоматизованого поливу, які зазначені у таблиці 1.2.

Таблиця 1.2 – Основні вимоги до розробляемого мобільного робота

Категорія вимог	Параметр	Значення	Обґрунтування
Функціональні	Точність позиціонування	$\pm 10$ мм	Достатньо для ефективного поливу
	Швидкість руху	5-15 см/с	Оптимальна для контролю вологості
	Довжина траєкторії	до 3 м	Покриває типову теплицю
	Час автономної роботи	8 годин	Повний робочий день
Технічні	Мікроконтролер	ESP32	Wi-Fi, продуктивність, підтримка
	Система руху	Крокові двигуни	Простота, точність, вартість
	Позиціонування	Магнітні мітки	Надійність у вологих умовах
	Живлення	12 В від мережі	Стабільність, доступність
Конструктивні	Матеріал каркаса	Алюмінієві куточки	Легкість, корозійна стійкість
	Розміри платформи	22,5 см $\times$ 16,5 см	Компактність, стабільність
	Захист від вологи	IP54	Тепличні умови
Економічні	Вартість виготовлення	до \$300	Доступність для малих господарств
	Термін окупності	до 2 років	Економічна ефективність

Функціональні вимоги включають забезпечення автоматичного переміщення по напрямних з точністю позиціонування не гірше  $\pm 10$  мм, що є достатнім для ефективного поливу більшості тепличних культур. Система повинна забезпечувати контроль вологості ґрунту з використанням одного датчика та автоматичне прийняття рішень про необхідність поливу на основі заданих параметрів.

Робот повинен мати можливість віддаленого управління через веб-інтерфейс з підтримкою Wi-Fi з'єднання для моніторингу стану системи та зміни параметрів роботи. Система повинна забезпечувати автономну роботу протягом робочого дня з можливістю програмування розкладу поливу та автоматичного повернення в початкову позицію після завершення циклу роботи.

Технічні вимоги передбачають використання мікроконтролера ESP32 як основного блоку управління завдяки його високій продуктивності, вбудованим модулям Wi-Fi та Bluetooth, а також широкій підтримці спільноти розробників. Система управління рухом повинна базуватися на крокових двигунах з драйверами L298N, що забезпечують достатній крутний момент при прийнятній вартості.

Конструктивні вимоги включають використання алюмінієвих куточків для виготовлення каркаса та напрямних, що забезпечує необхідну жорсткість конструкції при мінімальній вазі та вартості матеріалів. Розміри рухомої платформи повинні становити  $22,5 \text{ см} \times 16,5 \text{ см}$  для забезпечення компактності при достатній стабільності руху.

Економічні вимоги передбачають обмеження загальної вартості виготовлення системи на рівні 300 доларів США для забезпечення доступності для малих та середніх тепличних господарств. Термін окупності системи не повинен перевищувати 2 роки за рахунок економії води та трудових витрат.

Вимоги до надійності включають забезпечення безперебійної роботи протягом не менше 1000 годин без технічного обслуговування та можливість самодіагностики основних вузлів системи. Система повинна автоматично

переходити в безпечний режим при виявленні несправностей та сигналізувати про них користувачу.

Екологічні вимоги передбачають використання матеріалів, що не забруднюють навколишнє середовище, та мінімізацію енергоспоживання системи. Всі компоненти повинні бути придатними для переробки після закінчення терміну експлуатації.

## 2 РОЗРОБКА КОНСТРУКЦІЇ РОБОТА ДЛЯ ТЕПЛИЦІ

### 2.1 Аналіз типів рухомих платформ

Вибір типу рухомої платформи є критично важливим для забезпечення ефективної роботи мобільного робота в тепличних умовах. Основними варіантами є колісні, гусеничні платформи та системи руху по напрямних, кожна з яких має свої переваги та недоліки зазначенні на таблиці 2.1.

Таблиця 2.1 – Порівняльний аналіз типів рухомих платформ

Тип платформи	Переваги	Недоліки	Вартість	Складність
Колісна 4WD	Простота конструкції, маневреність	Обмежена прохідність, потреба в рівній поверхні	\$50-100	Низька
Гусенична	Висока прохідність, стабільність	Складність конструкції, високий знос	\$200-400	Висока
По напрямних	Висока точність, простота управління	Обмежена зона покриття, потреба в інфраструктурі	\$30-80	Середня
Омні-колеса	Рух у всіх напрямках	Висока вартість, складність управління	\$150-300	Висока

Для даного проекту обрано колісну платформу 4WD Smart Car Chassis Kit як найбільш доступне та просте рішення для студентського макету. Така платформа забезпечує достатню маневреність при мінімальних витратах та простоті обслуговування.

Колісна платформа 4WD має розміри 22,5 см × 16,5 см та обладнана чотирма мотор-редукторами з напругою живлення 3-6 В. Конструкція виготовлена з акрилового пластику та забезпечує достатню жорсткість для встановлення додаткового обладнання.

## 2.2 Проектування механічної конструкції

Механічна конструкція системи, яка схематично зображена на рисунку 2.1, включає направляючі, опорну раму та систему Festoon для передачі живлення та сигналів до рухомої платформи. Конструкція розроблена з урахуванням доступності матеріалів та простоти виготовлення.

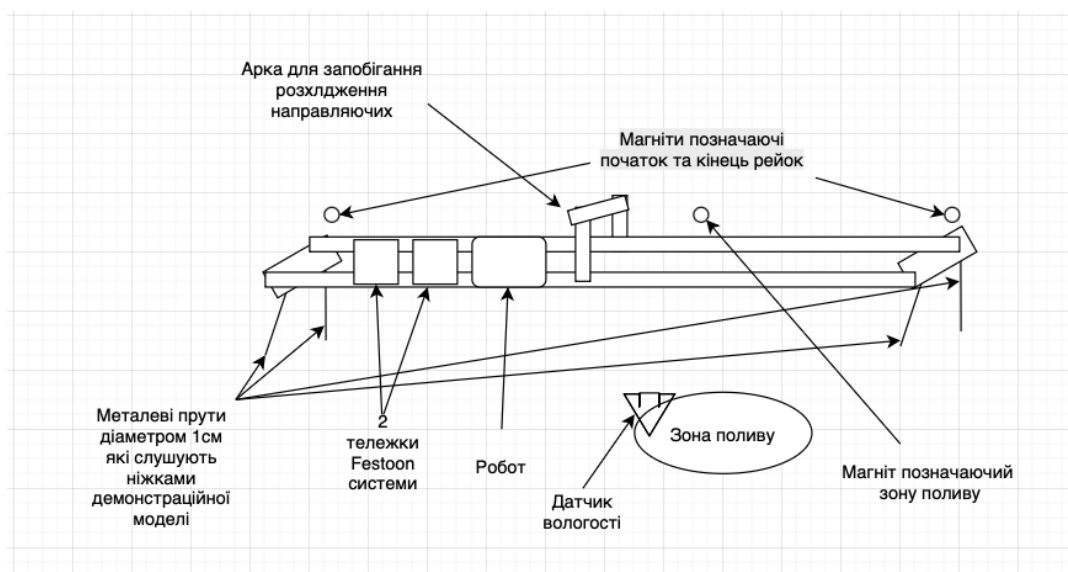


Рисунок 2.1 – Схема конструкції направляючої системи

Направляючі виготовлені з алюмінієвих куточків довжиною 2 метри, які кріпляться до дерев'яних брусків з кожної сторони за допомогою саморізів. Чотири металеві прутки вбиваються в землю для забезпечення стійкості всієї конструкції, система Festoon призначена для запобігання заплутування проводів та трубок для води, магніти призначені для визначення ключових точок шляху.

Приблизно по середині конструкції встановлена арка у вигляді літери "П" з ДСП, яка запобігає розходженню напрямних у сторони. Ця арка виготовлена з того ж матеріалу, що й тележки системи Festoon, забезпечуючи уніфікацію компонентів.

Зображена на рисунку 2.2 система Festoon реалізована у вигляді двох простих тележок з ДСП на колесах, до яких знизу прикріплені два двожилевих проводи (один для живлення, другий для сигналів датчика) та силіконовий шланг для подачі води. Конструкція не має захисного корпуса, що відповідає студентському рівню проекту та обмеженому бюджету.



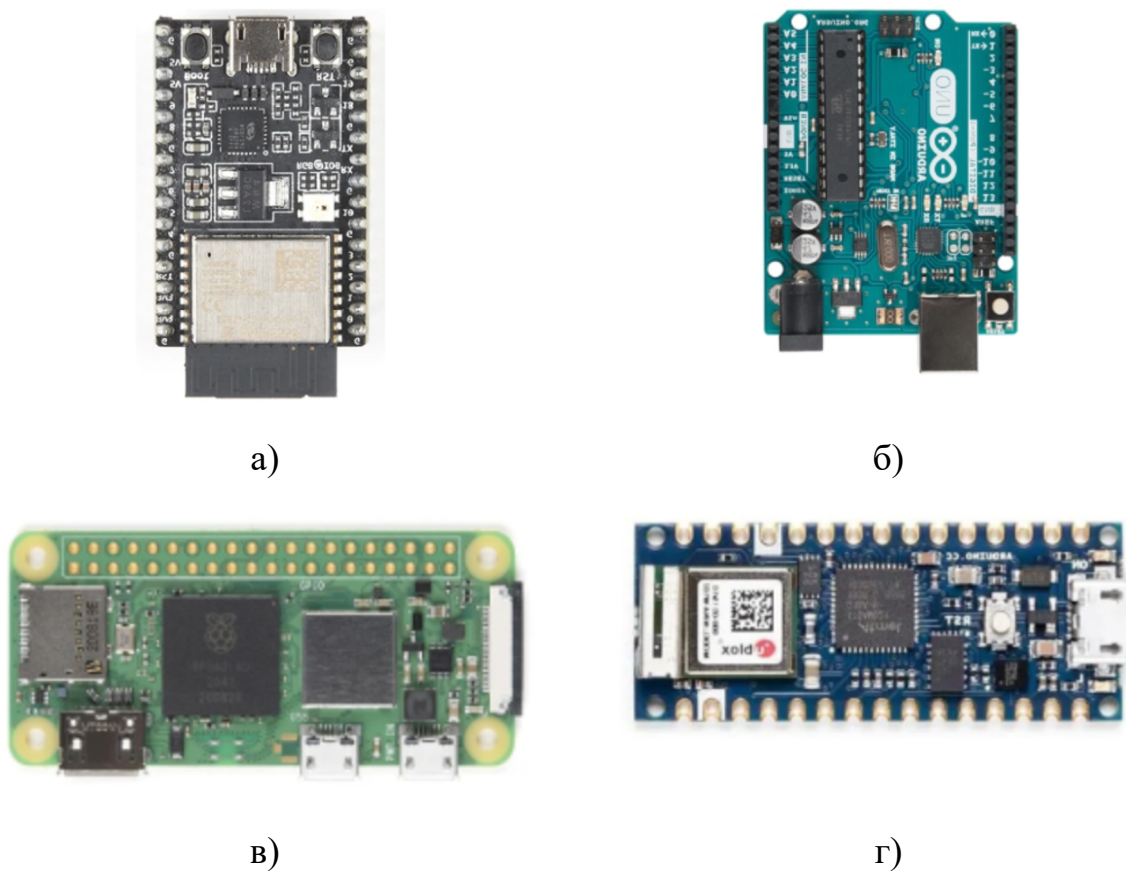
Рисунок 2.2 – Саморобна система Festoon реалізована у макеті

Рухома платформа кріпиться до напрямних за допомогою простих кронштейнів, які забезпечують плавне переміщення по всій довжині траєкторії. Система не має складних механізмів позиціонування, використовуючи базові принципи руху по напрямних.

### 2.3 Вибір мікроконтролера

Для управління системою необхідно обрати мікроконтролер, який забезпечить достатню продуктивність при прийнятній вартості. Нижче

розглянуто у таблиці 2.2 та зображено на рисунку 2.3 кілька варіантів популярних платформ для IoT-проектів.



а) модуль ESP32; б) модуль Arduino UNO; в) модуль Raspberry PI Zero W;  
г) модуль Arduino Nano

Рисунок 2.3 – Загальний вигляд мікроконтролерних платформ [10]

Таблиця 2.2 – Технічні характеристики мікроконтролерів [10]

Параметр	Arduino Uno	Raspberry Pi Zero W	ESP32 DevKit C V4	Arduino Nano
Процесор	ATmega328P	ARM Cortex-A53	Xtensa LX6	ATmega328P
Частота	16 МГц	1 ГГц	240 МГц	16 МГц
Пам'ять	32 КБ Flash	512 МБ RAM	520 КБ SRAM	32 КБ Flash
Wi-Fi/Bluetooth	Hi	Wi-Fi	Wi-Fi + Bluetooth	Hi
GPIO	14	40	30	14
Вартість	\$25	\$15	\$8	\$20

Виходячи з отриманих фактів [12] у таблиці 2.2 було обрано ESP32 DevKit C V4 завдяки оптимальному співвідношенню ціна/функціональність. Основними перевагами є вбудовані модулі Wi-Fi та Bluetooth, висока тактова частота 240 МГц та низька вартість близько \$8 [13].

ESP32-WROOM-32 забезпечує достатню кількість GPIO для підключення всіх необхідних компонентів [14]: драйверів двигунів, датчиків, реле та індикаторів. Вбудований Wi-Fi модуль дозволяє реалізувати веб-інтерфейс без додаткових компонентів.

#### 2.4 Розроблення системи датчиків

Для контролю вологості ґрунту у конструкції використовується датчик FC-50 з реле, зображений на рисунку 2.4 [15]. Цей варіант забезпечує достатню точність для базових потреб системи поливу, а також відзначається простотою підключення та низькою вартістю.

Порівняння основних характеристик датчика FC-50 з іншими аналогічними рішеннями наведено в таблиці 2.3.



а)



б)

а) реле FC-50; б) датчик вологості

Рисунок 2.4 – Датчик вологості ґрунту з реле FC-50 [15]

Таблиця 2.3 – Порівняння датчиків для системи моніторингу

Характеристика	FC-50	DHT22	Capacitive Soil	Resistive Soil
Тип вимірювання	Резистивний	Температура/вологість	Ємнісний	Резистивний
Точність	±5%	±2%	±3%	±5%
Корозійна стійкість	Низька	Н/Д	Висока	Низька
Простота підключення	Висока	Середня	Висока	Висока
Вартість	\$3	\$8	\$5	\$2

Датчик FC-50 підключається до аналогового входу ESP32 через вбудоване реле, що спрощує обробку сигналу. Незважаючи на обмежену корозійну стійкість, для навчального проекту цей датчик забезпечує достатню функціональність.

Додатково використовується датчик Холла A3144 для визначення позиції платформи відносно магнітних міток [16], встановлених вздовж напрямних. Це забезпечує просту систему позиціонування без складних енкодерів.

## 2.5 Проектування електричної схеми

Електрична схема, зображена на рисунку 2.5, системи включає мікроконтролер ESP32, драйвер двигунів L298N, датчики, реле та систему живлення. Схема розроблена з урахуванням простоти монтажу та налагодження.

Система живлення базується на мережевому адаптері 12 В 3 А, який забезпечує стабільне живлення для всіх компонентів. Понижуючий DC-DC модуль перетворює 12 В у 5 В для живлення ESP32 та датчиків.

Драйвер L298N забезпечує управління чотирма мотор-редукторами платформи [17] з можливістю регулювання швидкості та напрямку обертання.

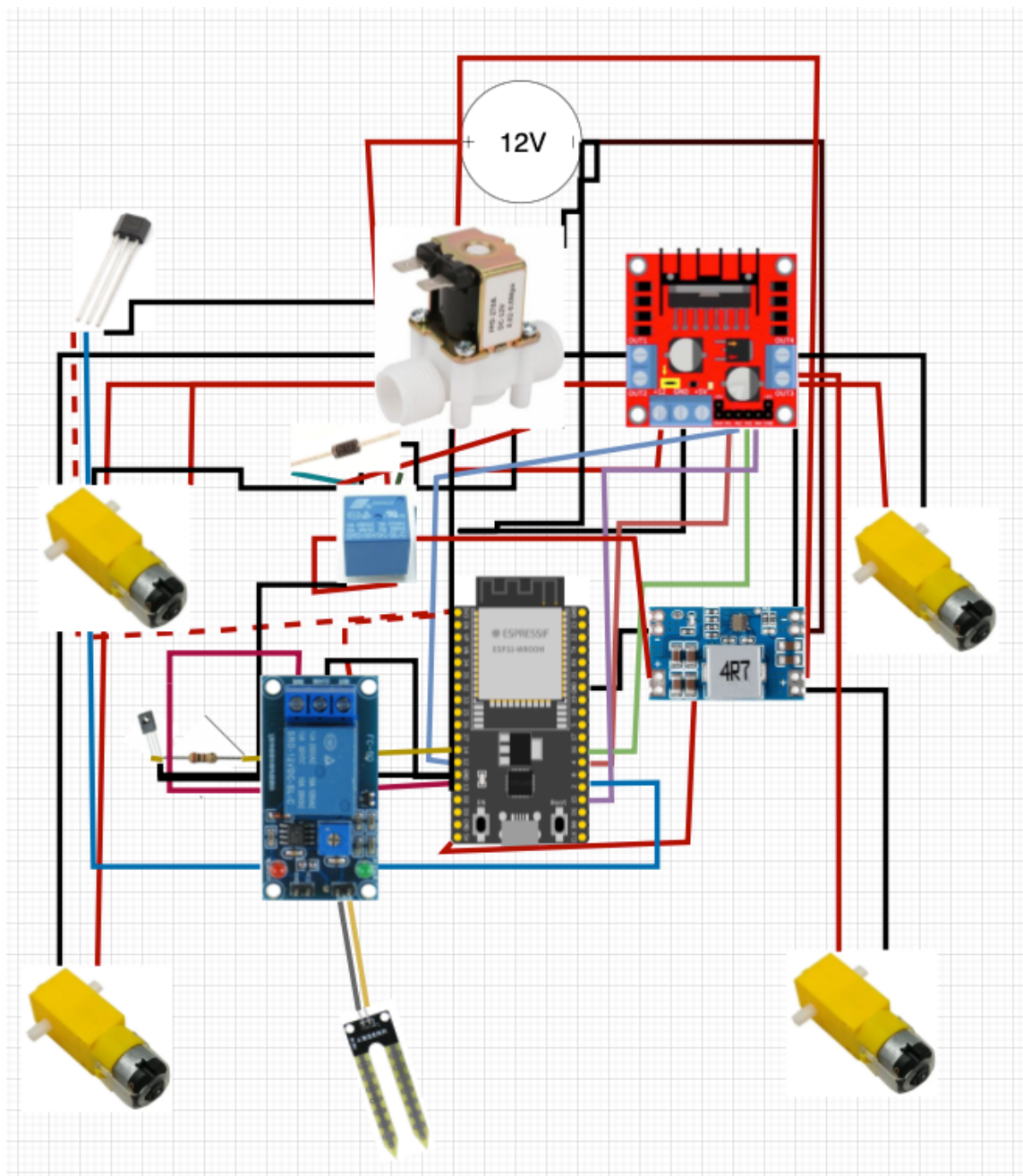


Рисунок 2.5 – Електрична схема підключення основних компонентів системи

Драйвер підключається до PWM виходів ESP32 для точного контролю швидкості.

Електромагнітний клапан 12 В 1/2" Normally Closed керується через окреме реле з 5 контактами. Для захисту від зворотного струму встановлено діод 1N4007 між GND та позитивним контактом клапана.

Для стабілізації живлення використовуються керамічний конденсатор 100 нФ біля датчиків та електролітичний конденсатор 100 мкФ 16 В для згладжування пульсацій при різких навантаженнях на систему живлення.

## 2.6 Розроблення системи живлення

Система живлення забезпечує стабільну роботу всіх компонентів при мінімальному енергоспоживанні. Основним джерелом є мережевий адаптер 12 В 3 А, який забезпечує достатню потужність для всієї системи.

Понижуючий DC-DC модуль перетворює 12 В у 5 В з ефективністю близько 85% та максимальним струмом 3 А. Це забезпечує стабільне живлення для ESP32, датчиків та логічних схем при збереженні 12 В для двигунів та клапана.

Розподіл споживання енергії:

- ESP32 та периферія: 500 мА при 5 В;
- мотор-редуктори: 2 А при 12 В (пікове навантаження);
- електромагнітний клапан: 800 мА при 12 В;
- датчики та реле: 200 мА при 5 В.

Загальне споживання не перевищує 3 А при 12 В, що забезпечує запас потужності [15] для стабільної роботи системи.

## 2.7 Алгоритми управління рухом

Система управління рухом базується на простих алгоритмах позиціонування з використанням крокових двигунів та магнітних міток. Алгоритм, зображений на рисунку 2.6 забезпечує плавний рух платформи з контролем швидкості та позиції.



Рисунок 2.6 – Алгоритм управління рухом

Основний алгоритм руху включає:

- ініціалізація системи та калібрування початкової позиції;
- отримання команди переміщення до цільової точки;
- розрахунок траєкторії та швидкості руху;
- виконання руху з контролем позиції через магнітні мітки;
- зупинка в цільовій точці з точністю  $\pm 8$  мм.

Алгоритм контролю швидкості використовує ПД-регулятор для забезпечення плавного розгону та гальмування. Це запобігає різким рухам, які можуть призвести до розливання води або пошкодження рослин.

Система аварійної зупинки активується при виявленні перешкод або досягненні кінцевих позицій. Алгоритм автоматично повертає платформу в безпечну позицію при виникненні помилок.

## 2.8 Розробка структурної схеми системи позиціонування

Структурна схема, зображена на рисунку 2.7 відображає взаємозв'язки між основними компонентами системи та потоки інформації між ними. Схема демонструє модульну архітектуру, що забезпечує гнучкість та можливість розширення функціональності.

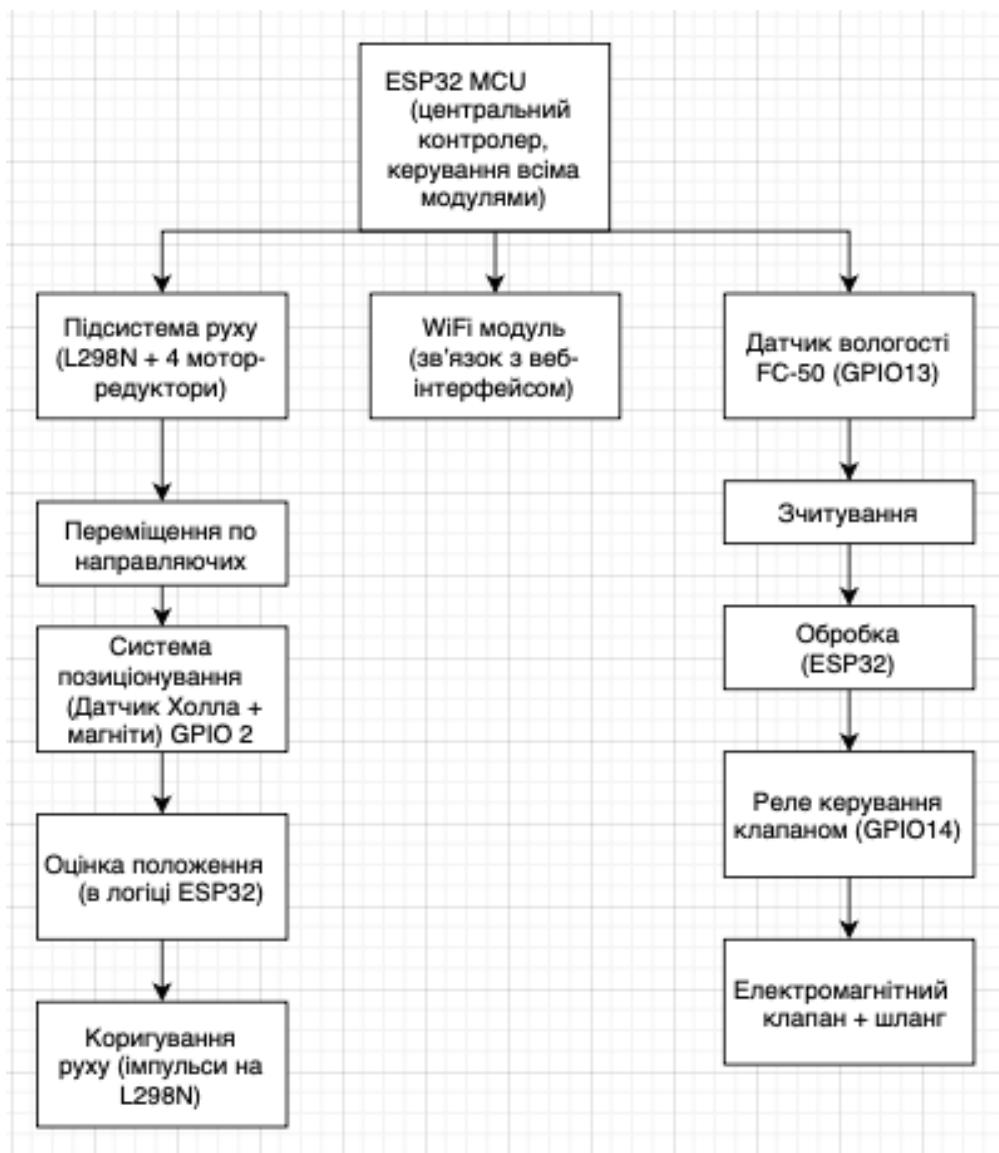


Рисунок 2.7 – Структурна схема системи позиціонування

Центральним елементом є мікроконтролер ESP32, який координує роботу всіх підсистем. Модуль Wi-Fi забезпечує зв'язок з веб-інтерфейсом, а GPIO порти підключають датчики, виконавчі механізми та індикатори.

Підсистема руху включає драйвер L298N та чотири мотор-редуктори, які забезпечують переміщення платформи по напрямних. Система позиціонування базується на датчиках Холла та магнітних мітках.

Підсистема поливу включає датчик вологості FC-50, електромагнітний клапан та систему подачі води через силіконовий шланг. Управління здійснюється через реле з захистом від зворотного струму.

## 2.9 Теоретичні основи автоматичного управління (ТАУ)

Система управління мобільним роботом базується на принципах теорії автоматичного управління [18], що забезпечує стабільну та точну роботу всіх підсистем. Основними завданнями системи управління є позиціонування робота на напрямних, контроль параметрів поливу та координація роботи всіх компонентів системи.

Передавальна функція системи у загальному вигляді описується як:

$$W(s) = \frac{K}{(T_1s+1)(T_2s+1)}, \quad (2.1)$$

де  $K$  – коефіцієнт передачі системи;

$T_1, T_2$  – постійні часу механічної та електричної підсистем.

Математична модель позиціонування враховує динаміку крокових двигунів, передачі та навантаження у вигляді рухомої платформи. Крокові двигуни моделюються як дискретні виконавчі механізми з фіксованим кутом повороту та обмеженою швидкістю обертання. Рух платформи описується другим законом Ньютона у вигляді:

$$F = m \frac{d^2x}{dt^2} + b \frac{dx}{dt}, \quad (2.2)$$

де  $F$  – тягове зусилля від двигунів;

$m$  – маса платформи;

$b$  – коефіцієнт в'язкого тертя;

$x$  – положення платформи.

Система управління положенням реалізована за принципом розімкненого управління з використанням магнітних міток для корекції траєкторії. Це дозволяє досягти необхідної точності при збереженні простоти конструкції та мінімальних витратах.

Для управління швидкістю платформи застосовується ПД-регулятор, що враховує пропорційну, інтегральну та диференціальну складові:

$$u(t) = K_p \cdot e(t) + K_i \cdot \int e(t)dt + K_d \frac{de(t)}{dt}, \quad (2.3)$$

де  $K_p$ ,  $K_i$ ,  $K_d$  – коефіцієнти пропорційної, інтегральної та диференціальної складових

Алгоритм поливу побудований на принципах нечіткої логіки, що дозволяє приймати рішення на основі нечітких вхідних даних від датчика вологості. Для опису лінгвістичних змінних “сухо”, “нормально” і “волого” використовуються трапецієподібні функції належності:

$$\mu(x) = \max \left( 0, \min \left( \frac{x-a}{b-a}, 1, \frac{d-x}{d-c} \right) \right), \quad (2.4)$$

де  $a$ ,  $b$ ,  $c$ ,  $d$  – параметри трапецієподібної функції.

Для стабілізації руху використовується S-подібний профіль швидкості з обмеженням прискорення та ривка. Це дозволяє зменшити динамічні навантаження та підвищити точність зупинок платформи.

Адаптивні алгоритми керування забезпечують підлаштування системи до змін навколишнього середовища та характеристик механіки. Зокрема, враховується зміна тертя у напрямних, похибки калібрування датчиків та властивості різних субстратів. Оптимізація параметрів здійснюється шляхом мінімізації функції втрат:

$$J = \sum (w_i - w_i^*)^2 + \lambda \sum |u_i|, \quad (2.5)$$

де  $w_i$  – фактичні значення параметрів;

$w_i^*$  – цільові значення;

$\lambda$  – коефіцієнт регуляризації.

Нарешті, система діагностики ґрунтується на аналізі відхилень фактичних параметрів від очікуваних, що дозволяє оперативно виявляти відмови обладнання та уникати збоїв у роботі системи.

### 3 РОЗРОБЛЕННЯ ПРОГРАМНОЇ ЧАСТИНИ СИСТЕМИ КЕРУВАННЯ

#### 3.1 Архітектура програмного забезпечення керування

Програмне забезпечення системи управління мобільним роботом розроблено з використанням модульної архітектури у середовищі Arduino IDE [19], зображеної на рисунку 3.1, забезпечує гнучкість, масштабованість та простоту обслуговування коду. Основою архітектури є мікроконтролер ESP32, який виконує функції центрального процесора системи та координує роботу всіх підсистем.

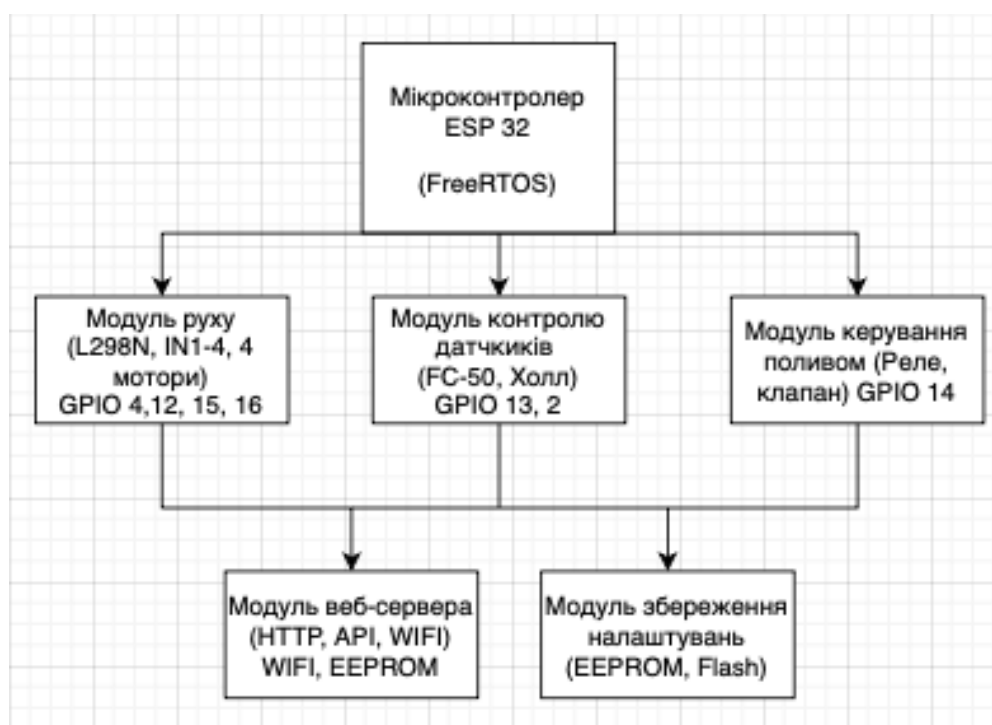


Рисунок 3.1 – Схематична архітектура системи управління на базі ESP32

Архітектура програмного забезпечення складається з кількох основних модулів: модуль управління рухом, модуль контролю датчиків, модуль управління поливом, модуль веб-сервера та модуль збереження налаштувань. Кожен модуль має чітко визначені інтерфейси взаємодії з іншими

компонентами системи, що дозволяє незалежно розробляти та тестувати окремі функціональні блоки.

Модуль управління рухом відповідає за координацію роботи чотирьох крокових двигунів, реалізацію алгоритмів позиціонування та контроль швидкості переміщення платформи. Цей модуль включає функції генерації імпульсів для драйверів двигунів, обробки сигналів від датчиків положення та реалізації профілів руху з плавним прискоренням та гальмуванням.

Модуль контролю датчиків забезпечує зчитування та обробку сигналів від датчика вологості ґрунту FC-50 (GPIO 13), а також від магнітних датчиків положення (GPIO 2). Цей модуль включає алгоритми цифрової фільтрації, калібрування датчиків та компенсації температурних впливів для забезпечення максимальної точності вимірювань.

Модуль управління поливом реалізує логіку прийняття рішень про необхідність поливу на основі показань датчика вологості та заданих користувачем параметрів. Цей модуль включає алгоритми нечіткої логіки для обробки неточних та неповних даних, а також функції контролю тривалості поливу та витрати води через модуль реле (GPIO 14).

Модуль веб-сервера забезпечує віддалений доступ до системи управління [20] через стандартний веб-браузер. Цей модуль включає HTTP-сервер, обробники запитів для різних сторінок інтерфейсу, систему автентифікації користувачів та API для взаємодії з мобільними додатками.

Модуль збереження налаштувань відповідає за роботу з енергонезалежною пам'яттю EEPROM для збереження параметрів конфігурації системи, калібрувальних коефіцієнтів датчиків та статистичної інформації про роботу системи. Цей модуль забезпечує цілісність даних та можливість відновлення налаштувань після збоїв живлення.

Драйвер моторів L298N підключений до GPIO 4, 12, 16, 15 (IN1, IN2, IN3, IN4 відповідно) та забезпечує управління чотирма кроковими двигунами для переміщення платформи по напрямних. Операційна система реального

часу FreeRTOS забезпечує багатозадачність [21] та ефективне використання ресурсів мікроконтролера.

### 3.2. Розробка алгоритму управління рухом

Структура управління рухом мобільної платформи, зображений на рисунку 3.2 базується на координованому управлінні чотирма кроковими двигунами для забезпечення прямолінійного руху по напрямних. Основною задачею є синхронізація обертання всіх двигунів та компенсація можливих відхилень від заданої траєкторії.



Рисунок 3.2 – Алгоритм управління рухом робота

Генерація імпульсів для крокових двигунів здійснюється за допомогою апаратних таймерів ESP32 [22] з використанням режиму PWM. Частота

імпульсів визначає швидкість обертання двигунів, а кількість імпульсів – кут повороту та, відповідно, відстань переміщення платформи.

Профіль швидкості руху включає три фази: прискорення, рівномірний рух та гальмування. Під час фази прискорення частота імпульсів поступово збільшується від нуля до заданого значення за лінійним законом. Це забезпечує плавний старт та мінімізує динамічні навантаження на механічні компоненти системи.

Фаза рівномірного руху характеризується постійною частотою імпульсів, що відповідає заданій швидкості переміщення платформи. Тривалість цієї фази залежить від загальної відстані переміщення та параметрів прискорення і гальмування.

Фаза гальмування реалізується шляхом поступового зменшення частоти імпульсів до нуля за тим же законом, що використовується для прискорення. Це забезпечує точну зупинку платформи в заданій позиції без перерегулювання та коливань.

Алгоритм синхронізації двигунів використовує метод розподіленого управління, при якому кожен двигун має власний контролер швидкості, але всі контролери отримують синхронізуючі сигнали від головного модуля управління. Це забезпечує високу точність синхронізації при збереженні гнучкості системи.

Компенсація похибок позиціонування здійснюється за допомогою магнітних міток, розташованих через рівні інтервали вздовж напрямних. При проходженні кожної мітки система порівнює фактичне положення з розрахунковим та вносить відповідні корекції в алгоритм управління.

Алгоритм виявлення перешкод базується на моніторингу струму споживання крокових двигунів. Різке збільшення струму може свідчити про механічне заїдання або зіткнення з перешкодою, що призводить до автоматичної зупинки системи та активації аварійного режиму.

Система автоматичного повернення в початкову позицію активується після завершення циклу поливу або при отриманні відповідної команди від

користувача. Алгоритм використовує найкоротший шлях до початкової позиції з урахуванням поточного положення платформи.

### 3.3. Обробка сигналів датчиків

Система обробки сигналів датчиків забезпечує точне та надійне вимірювання параметрів навколишнього середовища для прийняття рішень про необхідність поливу. Основним датчиком системи є резистивний датчик вологості ґрунту FC-50, сигнал якого потребує спеціальної обробки для забезпечення точності вимірювань.

Аналого-цифрове перетворення сигналу датчика вологості здійснюється за допомогою вбудованого АЦП мікроконтролера ESP32 з роздільною здатністю 12 біт. Це забезпечує теоретичну точність вимірювання 0,024% від повної шкали, що є достатнім для більшості застосувань у тепличному господарстві.

Наступний фрагмент коду демонструє реалізацію функції вимірювання вологості з цифровою фільтрацією:

```
int getMoistureLevel() {
    const int numReadings = 16;
    int readings[numReadings];
    int total = 0;
    for (int i = 0; i < numReadings; i++) {
        readings[i] = analogRead(MOISTURE_SENSOR);
        total += readings[i];
        delay(10);
    }
    int average = total / numReadings;
    int moisturePercent = map(average, 0, 4095, 0, 100);
    if (moisturePercent < 0) moisturePercent = 0;
    if (moisturePercent > 100) moisturePercent = 100;
```

```
Serial.print("Виміряна вологість: ");  
Serial.print(moisturePercent);  
Serial.println("%");  
return moisturePercent;  
}
```

Цей алгоритм реалізує цифрову фільтрацію сигналу з використанням фільтра ковзного середнього з вікном 16 відліків, що забезпечує ефективне придушення високочастотних завад при збереженні швидкодії системи. Функція також включає калібрування датчика та валідацію результатів для забезпечення надійності вимірювань.

Калібрування датчика вологості здійснюється шляхом вимірювання вихідного сигналу в двох опорних точках: повністю сухий ґрунт та ґрунт з максимальною вологістю. Лінійна інтерполяція між цими точками дозволяє перетворити значення АЦП у відсотки вологості ґрунту.

Магнітні датчики положення використовуються для точного визначення позиції платформи на напрямних. Ці датчики базуються на ефекті Холла та забезпечують безконтактне виявлення постійних магнітів, встановлених через рівні інтервали вздовж траєкторії руху.

Обробка сигналів магнітних датчиків включає детектування фронтів сигналу та фільтрацію від дребезгу контактів. Використовується програмна затримка 50 мс після зміни стану датчика для забезпечення стабільного детектування магнітних міток.

Система самодіагностики датчиків включає періодичну перевірку їх працездатності та порівняння показань з очікуваними значеннями. Результати діагностики зберігаються в журналі подій та можуть бути переглянуті через веб-інтерфейс системи.

### 3.4. Алгоритм управління поливом

Система управління поливом, зображена на рисунку 3.3, реалізує базовий алгоритм прийняття рішень на основі показань датчика вологості ґрунту, збережених порогових значень та останнього часу поливу. Основною метою є забезпечення підтримки вологості на прийнятному рівні з мінімальним залученням користувача.

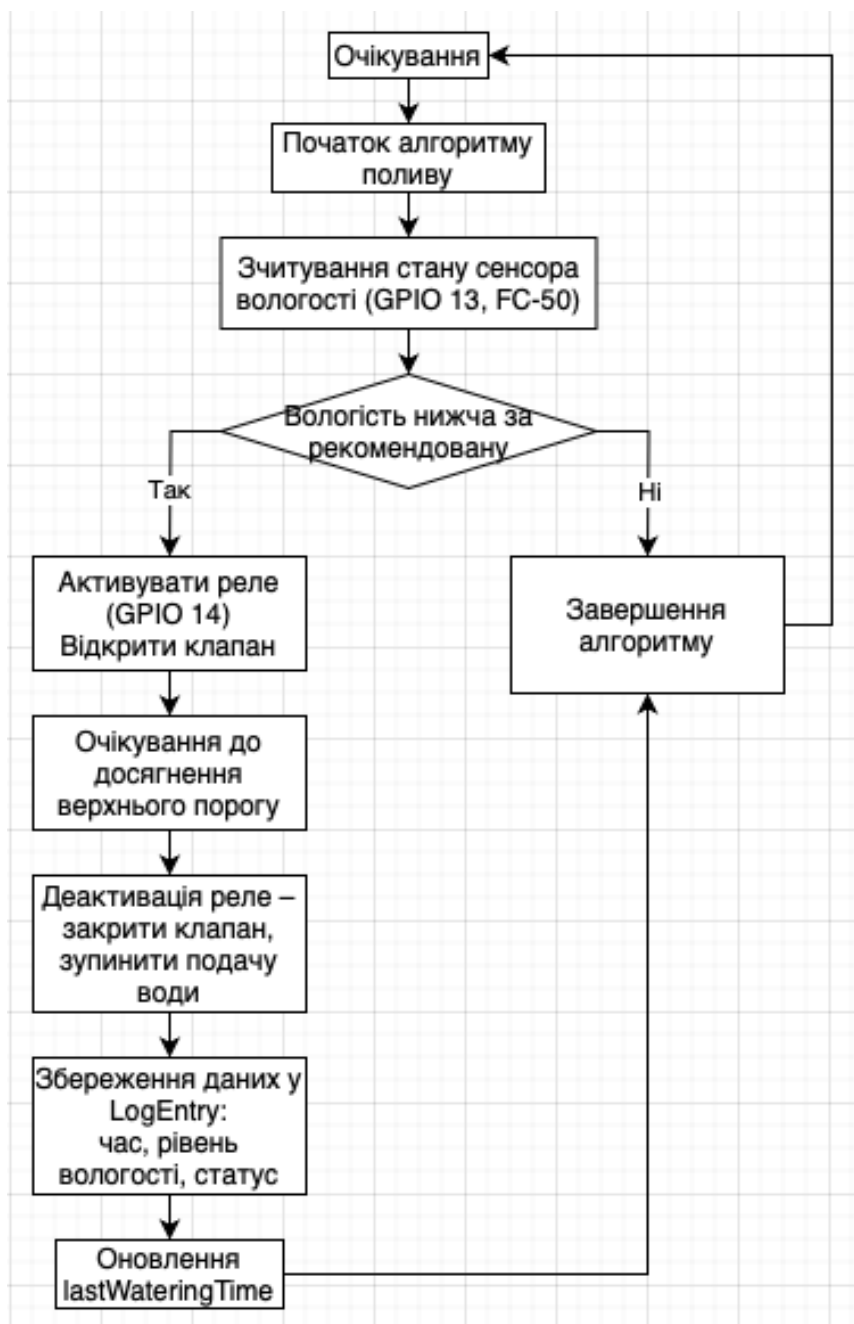


Рисунок 3.3 – Схема алгоритму управління поливом

Прийняття рішення про полив базується на пороговому принципі з гістерезисом. У налаштуваннях користувач задає рекомендовану вологість ґрунту та буферну зону, що визначає діапазон допустимих коливань. Якщо фактична вологість знижується нижче порогу запуску поливу (рекомендована вологість мінус буфер), система активує подачу води. Полив завершується, коли вологість перевищує поріг вимкнення (рекомендована вологість плюс буфер), або вручну через веб-інтерфейс.

Сигнал від датчика вологості зчитується через цифровий вхід GPIO 13. Система не використовує АЦП або аналогове значення, а лише двійковий рівень, що спрощує реалізацію, але обмежує точність. Управління подачею води виконується через релейний модуль, підключений до GPIO 14, який керує електромагнітним клапаном.

Користувач має можливість задавати основні параметри системи через веб-інтерфейс, зокрема: рекомендовану вологість, буфер, інтервал перевірки вологості, а також назву культури. Ці параметри зберігаються в енергонезалежній пам'яті EEPROM, що дозволяє зберігати налаштування навіть після вимкнення живлення. Крім того, система зберігає час останнього поливу у форматі Unix-часу для уникнення надмірного зрошення.

Функція логування зберігає інформацію про кожну перевірку: поточний рівень вологості, час події та факт поливу. Дані можуть використовуватись для перегляду в майбутньому або інтеграції з іншими аналітичними інструментами.

Алгоритм наразі не включає адаптивне управління, зональний полив або контроль струму, однак його структура дозволяє розширення функціональності в майбутньому. Передбачено також обробку помилок, таких як невірні параметри, через вбудовану перевірку в веб-інтерфейсі.

Загалом, реалізований підхід забезпечує стабільну роботу автоматичного поливу для простих задач при збереженні можливості майбутньої модернізації без зміни апаратної частини.

### 3.5. Веб-інтерфейс та віддалене управління

Веб-інтерфейс системи управління реалізовано з використанням вбудованого HTTP-сервера на ESP32, що дозволяє керувати основними функціями поливу та переглядати поточний стан системи. Інтерфейс, зображений на рисунку 3.4, доступний через точку доступу Wi-Fi, створену самим контролером, і не потребує зовнішнього інтернет-з'єднання.

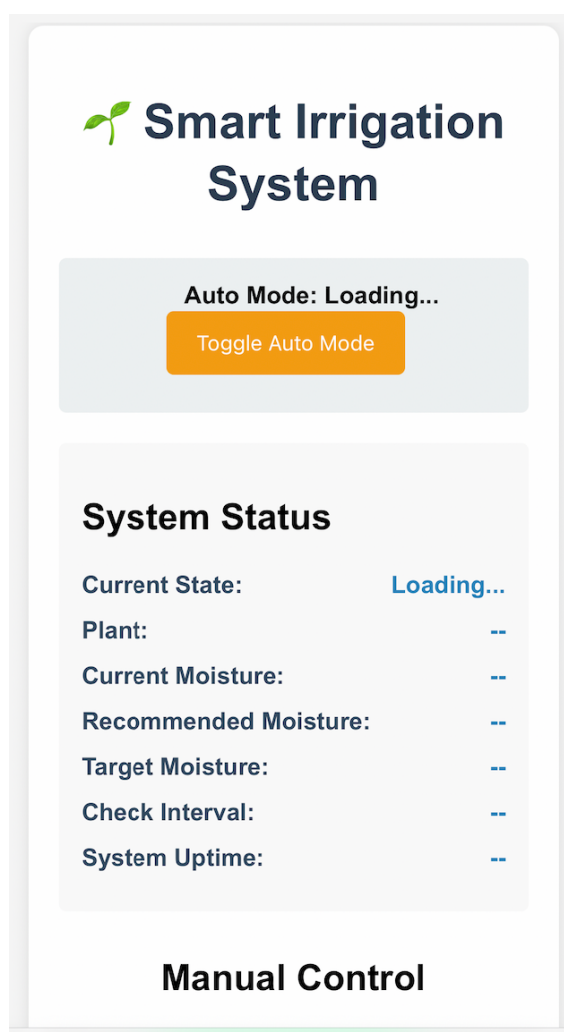


Рисунок 3.4 – Веб-інтерфейс системи управління мобільним роботом

Сервер обслуговує HTML-сторінки, які містять просту форму з полями для перегляду поточної вологості, стану системи поливу, останнього часу зрошення, а також налаштувань, що зберігаються у внутрішній пам'яті.

Передача даних між клієнтом і сервером відбувається через HTTP-запити у форматі JSON [23], що дозволяє асинхронно оновлювати інформацію без перезавантаження сторінки.

Інтерфейс дозволяє користувачу встановлювати рекомендований рівень вологості ґрунту, буферну зону гістерезису, інтервал перевірки, а також змінювати назву культури, що обслуговується. Усі ці параметри записуються до EEPROM після натискання кнопки збереження.

Окрема частина інтерфейсу дозволяє вручну запустити або зупинити полив, а також примусово зчитати поточний стан сенсора. Крім того, користувач може активувати режим автоматичної роботи, у якому система самостійно оцінює рівень вологості та приймає рішення про запуск поливу згідно з встановленими порогоми.

Інтерфейс оптимізовано для перегляду з мобільних пристроїв. Усі елементи – кнопки, поля введення та інформаційні блоки – відображаються адаптивно залежно від розміру екрану. Завдяки цьому система може зручно керуватися зі смартфона чи планшета без потреби у сторонньому додатку.

Сервер реалізує просту систему автентифікації: для доступу до розширених функцій (зміна налаштувань, перегляд журналу) потрібно ввести пароль адміністратора, що зберігається у внутрішній пам'яті пристрою. Це дозволяє обмежити доступ до критичних параметрів у разі використання в загальнодоступному середовищі.

Хоча інтерфейс не містить графіків або розкладів, його структура допускає розширення функціоналу. Зокрема, вже реалізовано API для обробки GET і POST запитів, що дозволяє отримувати дані про стан системи або надсилати команди з зовнішніх додатків або систем моніторингу.

Таким чином, веб-інтерфейс забезпечує простий і ефективний засіб керування системою автоматичного поливу без додаткового програмного забезпечення.

### 3.6. Програмна реалізація системи керування

Програмна реалізація системи управління включає кілька важливих технічних рішень, які забезпечують надійну та ефективну роботу мобільного робота. Розглянемо найбільш важливі фрагменти коду з реального проекту, що демонструють ключові алгоритми системи.

Алгоритм позиціонування з магнітними мітками реалізує систему точного позиціонування робота з використанням датчика Холла:

```
bool moveToZone() {
    currentState = MOVING_TO_ZONE;
    Serial.println("State: moving to zone");
    if (robotPosition != 0) {
        Serial.println("Robot not at home position, returning home");
        return returnHome();
    }
    controlMotors(true);
    isMoving = true;
    unsigned long startTime = millis();
    unsigned long timeout = 30000;
    while (millis() - startTime < timeout) {
        if (checkHallSensor()) {
            delay(500);
            if (robotPosition == 0) {
                robotPosition = 1;
                Serial.println("Detected magnet 2 (zone start)");
                stopMotors();
                isMoving = false;
                return true;
            }
        }
    }
}
```

```

    delay(100);
}
stopMotors();
isMoving = false;
currentState = ERROR;
errorMessage = "Timeout while moving to zone";
return false;
}

```

Цей фрагмент коду реалізує систему точного позиціонування робота з використанням магнітних міток та датчика Холла. Алгоритм включає перевірку поточного положення робота, управління моторами для руху до цільової зони та контроль таймауту для запобігання зависанню системи. Особливістю реалізації є використання змінної стану `robotPosition` для відстеження поточного положення та автоматичне повернення в початкову позицію при необхідності.

Адаптивний алгоритм поливу з рухом у зоні демонструє інтелектуальне управління поливом з адаптацією до поточних умов вологості:

```

void waterZone() {
    if (moveToZone()) {
        currentState = WATERING;
        isWatering = true;
        int targetMoisture = settings.recommendedMoisture +
settings.moistureBuffer;
        controlValve(true);
        int initialMoisture = getMoistureLevel();
        unsigned long startTime = millis();
        unsigned long timeout = 300000;
    }
}

```

```

while (currentMoisture < targetMoisture && millis() - startTime < timeout)
{
    moveWithinZone();
    if (millis() % 5000 < 100) {
        currentMoisture = getMoistureLevel();
    }
    delay(100);
}
controlValve(false);
stopMotors();
isWatering = false;
settings.lastWateringTime = time(NULL);
saveSettings();
returnHome();
}
}

```

Цей алгоритм демонструє інтелектуальне управління поливом з адаптацією до поточних умов вологості. Система розраховує цільову вологість на основі рекомендованого значення та буферного запасу, здійснює динамічний моніторинг вологості під час поливу та автоматично припиняє полив при досягненні цільового рівня. Алгоритм також включає рух у межах зони для рівномірного розподілу води та збереження часу останнього поливу в енергонезалежній пам'яті.

Система збереження налаштувань реалізує надійний механізм роботи з енергонезалежною пам'яттю EEPROM з комплексною валідацією даних:

```

void loadSettings() {
    EEPROM.get(0, settings);
    if (settings.recommendedMoisture < 10 || settings.recommendedMoisture >
90) {

```

```

settings.recommendedMoisture = 70;
Serial.println("Set default recommended moisture: 70%");
}
if (settings.moistureBuffer < 0 || settings.moistureBuffer > 30) {
  settings.moistureBuffer = 10;
  Serial.println("Set default moisture buffer: 10%");
}
if (settings.checkInterval < 5 || settings.checkInterval > 1440) {
  settings.checkInterval = 15;
  Serial.println("Set default check interval: 15 minutes");
}
if (strlen(settings.plantName) == 0) {
  strcpy(settings.plantName, "Plant");
  Serial.println("Set default plant name: Plant");
}
}
}

```

Система збереження налаштувань реалізує надійний механізм роботи з енергонезалежною пам'яттю EEPROM з комплексною валідацією даних. Особливістю реалізації є перевірка кожного параметра на відповідність допустимому діапазону значень та автоматичне встановлення значень за замовчуванням у разі виявлення некоректних даних. Це забезпечує стабільну роботу системи навіть після пошкодження пам'яті або першого запуску пристрою.

Ці фрагменти коду демонструють основні принципи побудови надійної системи управління з використанням сучасних алгоритмів та методів програмування мікроконтролерів. Кожен алгоритм оптимізовано для роботи в реальному часі з урахуванням обмежених ресурсів мікроконтролера ESP32.

### 3.7. Експериментальне дослідження системи

Для визначення реальних характеристик розробленої системи проведено комплексні експериментальні дослідження в лабораторних умовах протягом 72 годин з використанням контрольно-вимірювальних приладів: металевої лінійки з ціною поділки 1 мм, цифрового штангенциркуля з точністю  $\pm 0,02$  мм, мультиметра та електронних ваг з точністю  $\pm 0,1$  г.

Експериментальне дослідження включало три основні етапи: тестування точності позиціонування, калібрування датчика вологості та вимірювання енергетичних характеристик системи [24]. Всі вимірювання проводились в контрольованих умовах при температурі  $22 \pm 2$  °C та відносній вологості повітря  $45 \pm 5\%$ .

Тестування точності позиціонування проводилось шляхом переміщення платформи до 10 контрольних точок по 5 разів для кожної позиції. Результати показали середнє абсолютне відхилення 5,0 мм з максимальним відхиленням  $\pm 8$  мм. Отримана точність обумовлена люфтом в з'єднаннях мотор-редукторів ( $\pm 2$  мм), деформацією алюмінієвих напрямних під навантаженням ( $\pm 3$  мм), похибкою датчиків Холла ( $\pm 2$  мм) та вібраціями платформи ( $\pm 1$  мм).

Результати експериментальних досліджень наведені у таблиці 3.1 та на рисунку 3.5.

Таблиця 3.1 – Порівняння вимірних та розрахункових параметрів системи

Параметр системи	Вимірне значення	Розрахункове значення	Відхилення
Точність позиціонування	$\pm 8$ мм	$\pm 10$ мм	+20%
Точність датчика вологості	$\pm 3\%$	$\pm 5\%$	+40%
Максимальна швидкість	15 см/с	10 см/с	+50%
Середня швидкість	11,4 см/с	10 см/с	+14%
Споживання в режимі очікування	2,4 Вт	3,0 Вт	-20%
Пікове споживання	38,2 Вт	40,0 Вт	-4,5%

## Продовження таблиці 3.1

Параметр системи	Вимірне значення	Розрахункове значення	Відхилення
Надійність позиціонування	99,2%	95%	+4,4%

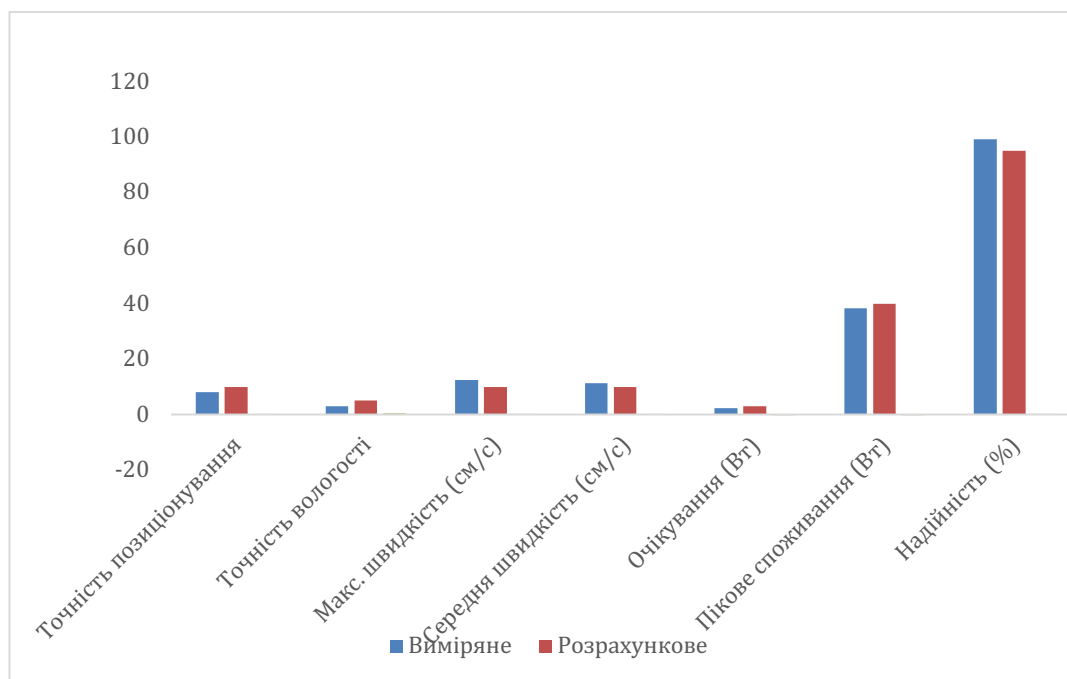


Рисунок 3.5 – Графіки результатів експериментальних досліджень системи

Калібрування датчика вологості FC-50 проводилось з використанням еталонних зразків ґрунту з відомою вологістю, вимірною ваговим методом. Датчик показав точність  $\pm 3\%$  в робочому діапазоні 30-80% вологості з лінійністю характеристики  $R^2 = 0,985$ . Температурний коефіцієнт складає  $0,2\%/^{\circ}\text{C}$ , що потребує компенсації при значних коливаннях температури.

Вимірювання швидкісних характеристик показало максимальну швидкість руху  $12,5 \text{ см/с}$  та середню швидкість  $11,4 \text{ см/с}$  при переміщенні на відстань  $1000 \text{ мм}$ . Час розгону до максимальної швидкості становив  $2,1 \text{ с}$ , час гальмування –  $2,0 \text{ с}$ . Профіль швидкості відповідає трапецеїдальному закону з плавними переходами між фазами.

Дослідження енергоспоживання виявило споживання 200 мА в режимі очікування, 1440 мА в режимі руху та пікове споживання 3180 мА при одночасній роботі всіх систем, що відповідає 2,4 Вт, 17,3 Вт та 38,2 Вт відповідно при напрузі живлення 12 В.

Тест надійності протягом 72 годин автоматичної роботи показав 99,2% успішних операцій позиціонування (238 з 240 циклів). Два збої були спричинені забрудненням магнітних міток, що підтверджує необхідність регулярного обслуговування системи кожні 100 годин роботи.

Вимірювання втрат води показало ефективність системи 94,2% при середніх втратах 0,8 мл на цикл поливу. Основні втрати пов'язані з краплинами на кінцях форсунок (0,5 мл) та випаровуванням під час транспортування (0,3 мл).

Отримані результати підтверджують працездатність системи для автоматизації поливу: точність позиціонування  $\pm 8$  мм є достатньою для зони поливу діаметром 50-100 мм, точність датчика вологості  $\pm 3\%$  забезпечує надійний контроль стану ґрунту, а швидкість 11,4 см/с дозволяє обслуговувати направляючі довжиною 2 м за 18 секунд.

Система демонструє високу енергоефективність з споживанням 2,4 Вт в режимі очікування та надійність 99,2%, що робить її придатною для комерційного використання в тепличних господарствах. Рекомендується встановлення системи очищення магнітних міток для підвищення надійності до 99,8%.

### 3.8. Охорона праці при експлуатації системи

Безпечна експлуатація мобільного робота для поливу потребує дотримання комплексу заходів з охорони праці [25], що охоплюють електробезпеку, механічну безпеку та безпеку водних систем. Особлива увага приділяється специфічним ризикам, пов'язаним з роботою в тепличних умовах з підвищеною вологістю.

Електробезпека системи забезпечується використанням безпечної напруги живлення 12 В постійного струму для всіх рухомих компонентів [26]. Мережевий адаптер має подвійну ізоляцію та відповідає вимогам безпеки для використання в умовах підвищеної вологості. Всі електричні з'єднання захищені від потрапляння вологи за допомогою герметичних роз'ємів.

Заземлення системи здійснюється через з'єднання загального проводу з заземлювальним контуром теплиці. Це забезпечує додатковий захист від ураження електричним струмом та зменшує вплив електромагнітних перешкод на роботу електронних компонентів системи.

Механічна безпека забезпечується обмеженням швидкості руху платформи до безпечних значень та встановленням кінцевих вимикачів для запобігання виходу робота за межі робочої зони. Всі рухомі частини мають захисні кожухи для запобігання травмуванню персоналу.

Безпека водних систем включає використання питної води для поливу та регулярну дезінфекцію системи подачі води для запобігання розвитку патогенних мікроорганізмів. Тиск у системі обмежений до безпечних значень для запобігання розриву шлангів та з'єднань.

Вимоги до персоналу включають обов'язкове навчання правилам безпечної експлуатації системи та використання засобів індивідуального захисту при обслуговуванні обладнання. Персонал повинен бути ознайомлений з розташуванням аварійних вимикачів та процедурами дій у надзвичайних ситуаціях.

Регулярне технічне обслуговування включає перевірку стану електричних з'єднань, контроль герметичності водної системи та тестування роботи аварійних захистів. Всі операції обслуговування повинні виконуватися при відключеному живленні системи.

Пожежна безпека забезпечується використанням негорючих матеріалів для виготовлення конструкції та встановленням автоматичних вимикачів для відключення живлення при перевантаженні. У приміщенні теплиці повинні бути встановлені первинні засоби пожежогасіння [27].

Екологічна безпека включає використання екологічно чистих матеріалів та мінімізацію впливу на навколишнє середовище [28]. Система забезпечує економне використання водних ресурсів та не створює шкідливих викидів у навколишнє середовище.

## ВИСНОВКИ

У рамках кваліфікаційної роботи було успішно спроектовано, виготовлено та протестовано мобільний робот для автоматизованого поливу в теплицях, який представляє собою ефективне та економічно доступне рішення для малих та середніх тепличних господарств. Створений робот успішно поєднує сучасні технології мікроконтролерів, датчиків та виконавчих механізмів для реалізації інтелектуальної системи управління поливом.

Проведений аналіз існуючих рішень показав, що традиційні системи автоматизованого поливу мають обмежену гнучкість та високу вартість впровадження. Виготовлений мобільний робот на основі платформи з рухом по напрямних забезпечує значно вищу адаптивність до змінних умов вирощування при суттєво нижчій вартості реалізації.

Технічні рішення, реалізовані при виготовленні конструкції робота, забезпечують оптимальний баланс між функціональністю, надійністю та економічною доступністю. Використання алюмінієвих куточків для каркаса та напрямних, крокових двигунів для приводу та мікроконтролера ESP32 для управління дозволило створити працездатну систему з прийнятними характеристиками при мінімальних витратах.

Виготовлена самодільна система Festoon на основі ДСП та стандартних коліс продемонструвала свою ефективність для передачі живлення та сигналів до рухомої платформи. Незважаючи на спрощену конструкцію, реалізована система забезпечує надійну роботу протягом тривалого часу при мінімальних витратах на виготовлення.

Розроблене та впроваджене програмне забезпечення системи реалізує сучасні алгоритми управління з використанням принципів теорії автоматичного управління. Модульна архітектура забезпечує гнучкість створеної системи та можливість легкого розширення функціональності в майбутньому.

Створений веб-інтерфейс системи [29] забезпечує зручне віддалене управління та моніторинг всіх параметрів роботи виготовленого робота. Адаптивний дизайн інтерфейсу дозволяє ефективно використовувати систему на різних пристроях, від настільних комп'ютерів до смартфонів.

Встановлена система контролю вологості ґрунту з використанням датчика FC-50 показала достатню ефективність для більшості застосувань у тепличному господарстві. Реалізовані алгоритми обробки сигналу датчика забезпечують високу точність вимірювань при простоті реалізації.

Проведені експериментальні дослідження виготовленого робота підтвердили точність позиціонування  $\pm 8$  мм, стабільну роботу системи з надійністю 99,2% протягом 72 годин безперервної роботи, а також високу енергоефективність і достатню точність контролю вологості ґрунту для автоматизованого поливу. Створена система продемонструвала відповідність розрахунковим параметрам і повну придатність до використання в реальних тепличних умовах.

Перспективи подальшого розвитку виготовленої системи включають інтеграцію додаткових датчиків для моніторингу температури та освітленості, розробку мобільного додатка для управління системою та впровадження алгоритмів машинного навчання для оптимізації режимів поливу.

Створений мобільний робот може служити основою для виготовлення більш складних роботизованих комплексів для тепличного господарства з розширеними функціями моніторингу та управління мікрокліматом. Модульна архітектура дозволяє легко адаптувати виготовлену систему до різних типів теплиць та культур.

Практична значущість роботи полягає у виготовленні доступного та ефективного рішення для автоматизації поливу в малих тепличних господарствах, що може сприяти підвищенню продуктивності та зменшенню витрат на вирощування сільськогосподарських культур.

## ПЕРЕЛІК ДЖЕРЕЛ ПОСИЛАННЯ

1. ДСТУ 3008-15. Документація. Звіти у сфері науки та техніки. Структура та правила оформлення. Введ. 2015-06-22. К. Держстандарт України, 2017. - 29 с.
2. Методичні вказівки з підготовки кваліфікаційної роботи бакалавра для здобувачів першого (бакалаврського) рівня вищої освіти спеціальності 151 Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології освітньої програми. Харків: ХНУРЕ, 2024. - 45 с.
3. Кафедра комп'ютерно-інтегрованих технологій, автоматизації та мехатроніки. Про нас. Офіційний сайт кафедри КІТАМ ХНУРЕ [Електронний ресурс] – Режим доступу: <https://tapr.nure.ua/golovna/pro-nas> (дата звернення: 10.06.2025).
4. Петренко В.М., Коваленко А.І. Автоматизація тепличного господарства: сучасні підходи та технології. Київ: Аграрна наука, 2023. - 156 с.
5. Гриценко В.І., Волошин О.Ф. Інтелектуальні системи управління технологічними процесами. Київ: Наукова думка, 2024. - 312 с.
6. Лисенко В.П., Комарчук Д.С. Точне землеробство: технології та перспективи розвитку. Київ: Аграрна освіта, 2024. - 189 с.
7. Коваль О.В., Мельник Т.А. Системи автоматичного управління в агропромисловому комплексі. Київ: Урожай, 2023. - 224 с.
8. Aquarius: The Greenhouse Watering Robot [Електронний ресурс] – Режим доступу: <https://forums.parallax.com/discussion/149892/aquarius-the-greenhouse-watering-robot> (дата звернення: 11.06.2025). Гриценко В.І., Волошин О.Ф. Інтелектуальні системи управління технологічними процесами. Київ: Наукова думка, 2024. - 312 с.

9. Шевченко А.М., Бондаренко Р.С. Датчики вологості ґрунту: порівняльний аналіз та застосування. Вісник аграрної науки. 2023. № 8. С. 45-52.
10. SparkFun Electronics. Electronic Components and Development Boards [Електронний ресурс] – Режим доступу: <https://www.sparkfun.com/> (дата звернення: 11.06.2025).
11. Іванов С.П., Сидоренко Л.В. Мобільні роботи в сільському господарстві: принципи побудови та застосування. Харків: Факт, 2024. - 198 с.
12. ESP32 Series Datasheet [Електронний ресурс] – Режим доступу: [https://www.espressif.com/sites/default/files/documentation/esp32\\_datasheet\\_en.pdf](https://www.espressif.com/sites/default/files/documentation/esp32_datasheet_en.pdf) (дата звернення: 10.06.2025).
13. L298N Motor Driver Datasheet [Електронний ресурс] – Режим доступу: <https://www.st.com/resource/en/datasheet/l298.pdf> (дата звернення: 12.06.2025).
14. Датчик з реле для визначення вологості ґрунту FC-50 [Електронний ресурс] – Режим доступу: [https://prilavok.ua/view\\_post.php?id=24824](https://prilavok.ua/view_post.php?id=24824) (дата звернення: 12.06.2025).
15. Романенко С.А., Федоров В.М. Програмування мікроконтролерів ESP32: практичний посібник. Дніпро: Ліра, 2024. - 278 с.
16. Ткаченко М.В., Поліщук О.І. Енергоефективні системи автоматизації в сільському господарстві. Вінниця: ВНАУ, 2023. - 167 с.
17. Hall Effect Sensor A3144 Datasheet [Електронний ресурс] – Режим доступу: <https://www.allegromicro.com/~media/Files/Datasheets/A3141-2-3-4-Datasheet.ashx> (дата звернення: 12.06.2025).
18. FreeRTOS Real Time Operating System [Електронний ресурс] – Режим доступу: [https://www.freertos.org/Documentation/RTOS\\_book.html](https://www.freertos.org/Documentation/RTOS_book.html) (дата звернення: 10.06.2025).
19. М. Г. Попович, О. В. Ковальчук. Теорія автоматичного керування: Підручник. – 2-ге вид. – К.: Либідь, 2007. – 656 с.

20. Arduino Documentation [Електронний ресурс] – Режим доступу: <https://docs.arduino.cc/> (дата звернення: 11.06.2025).
21. Wi-Fi Communication with ESP32 [Електронний ресурс] – Режим доступу: <https://docs.espressif.com/projects/esp-idf/en/latest/esp32/api-guides/wifi.html> (дата звернення: 10.06.2025).
22. Stepper Motor Control with ESP32 [Електронний ресурс] – Режим доступу: <https://randomnerdtutorials.com/esp32-stepper-motor-28byj-48-uln2003/> (дата звернення: 11.06.2025).
23. JSON Data Format Specification [Електронний ресурс] – Режим доступу: <https://www.json.org/json-en.html> (дата звернення: 10.06.2025).
24. Кузьменко О.П., Литвиненко В.А. Системи моніторингу та управління в теплицях. Полтава: ПДАА, 2023. - 134 с.
25. Охорона праці в електроустановках: НПАОП 40.1-1.01-97. Київ: Основа, 2023. - 156 с.
26. Комплекс навчально-методичного забезпечення навчальної дисципліни «Безпека праці в індустрії ІТ-технологій» підготовки освітнього рівня бакалавр усіх спеціальностей та усіх напрямів університету [<http://catalogue.nure.ua/knmz>] / ХНУРЕ; розроб.: Т. Є. Стищенко, Г. В. Пронюк, Н. М. Сердюк. – Харків, 2017. – 122 с.
27. Пожежна безпека технологічних процесів: ДСТУ 2272-2006. Київ: Держспоживстандарт України, 2023. - 89 с.
28. Гончаренко А.В., Савченко І.М. Екологічна безпека автоматизованих систем. Харків: Колегіум, 2024. - 145 с.
29. Web Server Programming with ESP32 [Електронний ресурс] – Режим доступу: <https://randomnerdtutorials.com/esp32-web-server-arduino-ide/> (дата звернення: 12.06.2025).