

Міністерство освіти і науки України

Луцький національний технічний університет

(повне найменування закладу вищої освіти)

Факультет комп'ютерних та інформаційних технологій

(повне найменування факультету)

Кафедра комп'ютерної інженерії та охоронних систем

(повне найменування кафедри)

**КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА
ЗА СТУПЕНЕМ ВИЩОЇ ОСВІТИ «БАКАЛАВР»**

**АПАРАТНО-ПРОГРАМНИЙ МОДУЛЬ ДЛЯ
АВТОМАТИЗОВАНОГО ВНЕСЕННЯ ДОБРИВ НА БАЗІ
МІКРОКОНТРОЛЕРА**

**HARDWARE AND SOFTWARE MODULE FOR AUTOMATED
FERTILIZER APPLICATION BASED ON A
MICROCONTROLLER**

спеціальність 123 Комп'ютерна інженерія

(шифр і назва спеціальності)

освітня програма Комп'ютерна інженерія

(назва освітньої програми)

Виконав: здобувач вищої освіти
групи КІ-42

Мигель Назар Андрійович

(підпис)

Керівник:

к.т.н., доцент

Гринюк Сергій Васильович

(підпис)

Кваліфікаційну роботу

допущено до захисту

« » червня 2026 р.

Гарант освітньої програми:

к.т.н., доцент

Лавренчук Світлана Василівна

(підпис)

Луцьк – 2026 року

ЛУЦЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ

Факультет комп'ютерних та інформаційних технологій

Кафедра комп'ютерної інженерії та безпеки

Ступінь вищої освіти: бакалавр

Галузь знань: 12 Інформаційні технології

Спеціальність: 123 Комп'ютерна інженерія

Освітня програма: «Комп'ютерна інженерія»

ЗАТВЕРДЖУЮ

Завідувач кафедри

доц. Т. Терлецький

« 23 » 12 2025 р.

ЗАВДАННЯ НА КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ ЗДОБУВАЧУ ВИЩОЇ ОСВІТИ

Мигелю Назару Андрійовичу

(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема кваліфікаційної роботи Апаратно-програмний модуль для автоматизованого внесення добрив на базі мікроконтролера

Керівник роботи к.т.н., доцент Гринюк Сергій Васильович

затверджені наказом закладу вищої освіти від «20» грудня 2025 року № 536/01-02

2. Строк подання здобувачем вищої освіти кваліфікаційної роботи 28.05.2026 р.

3. Вихідні дані до роботи Джерелом розробки є науково-технічна література та публікації в періодичних виданнях з даного питання, опубліковані зарубіжні та вітчизняні роботи в даній області, різні інтернет-ресурси технічного спрямування

4. Зміст пояснювальної записки (перелік питань, які потрібно розробити):

Вступ

Аналіз технологій автоматизованого внесення добрив у сучасному агровиробництві

Розробка апаратної частини модуля автоматизованого внесення добрив

Практична реалізація модуля автоматизованого внесення добрив

Висновки

5. Перелік графічного (ілюстративного) матеріалу:

Структура сенсорного блоку модуля автоматизованого внесення добрив

Логіка обробки даних із сенсорного блоку в модулі автоматизованого внесення добрив

Структура виконавчої частини системи дозування добрив

Структурна схема апаратно-програмного модуля автоматизованого внесення добрив

Монтаж та підключення компонентів модуля

6. Консультанти розділів роботи

Розділ	Прізвище, ініціали та посада консультанта	Підпис	
		завдання видав	завдання прийняв
<i>Аналіз технологій автоматизованого внесення добрив у сучасному агровиробництві</i>	<i>Гринюк С.В., доцент</i>		
<i>Розробка апаратної частини модуля автоматизованого внесення добрив</i>	<i>Гринюк С.В., доцент</i>		
<i>Практична реалізація модуля автоматизованого внесення добрив</i>	<i>Гринюк С.В., доцент</i>		
<i>Нормоконтроль</i>	<i>Багнюк Н.В., доцент</i>		
<i>Гарант ОП</i>	<i>Лавренчук С.В., доцент</i>		
<i>Показник запозичень тексту</i>	<i>%</i>		
<i>Академічна доброчесність</i>	<i>Міскевич О.І., ст. викладач</i>		

7. Дата видачі завдання

23.12.2025 р.

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№ з/п	Назва етапів кваліфікаційної роботи	Строк виконання етапів роботи	Примітка
1.	<i>Огляд літератури із досліджуваної проблеми, аналіз предметної області та наявних рішень</i>	до 10.02.2026 р.	
2.	<i>Аналіз технологій автоматизованого внесення добрив у сучасному агровиробництві</i>	до 02.03.2026 р.	
3.	<i>Розробка апаратної частини модуля автоматизованого внесення добрив</i>	до 02.04.2026 р.	
4.	<i>Практична реалізація модуля автоматизованого внесення добрив</i>	до 10.04.2026 р.	
5.	<i>Представлення остаточного варіанту кваліфікаційної роботи керівникові</i>	до 10.05.2026 р.	
6.	<i>Нормоконтроль</i>	до 23.05.2026 р.	
7.	<i>Інструментальна перевірка на академічний плагіат</i>	до 25.05.2026 р.	
8.	<i>Здача кваліфікаційної роботи та всіх супровідних документів на кафедру</i>	до 28.05.2026 р.	

Здобувач вищої освіти

(підпис)

Назар МИГЕЛЬ

(прізвище, ініціали)

Керівник кваліфікаційної роботи

(підпис)

Сергій ГРИНЮК

(прізвище, ініціали)

АНОТАЦІЯ

Мигель Н. І. Апаратно-програмний модуль для автоматизованого внесення добрив на базі мікроконтролера. Рукопис.

Кваліфікаційна робота бакалавра ОП «Комп'ютерна інженерія» спеціальності 123 Комп'ютерна інженерія. Луцький національний технічний університет. Луцьк, 2026.

Кваліфікаційна робота складається з вступу, трьох розділів, висновків, переліку використаних джерел, додатків.

У першому розділі проаналізовано принципи побудови та застосування автоматизованих систем внесення добрив, розглянуто методи контролю й дозування, особливості використання мікроконтролерів у системах агротехнічного моніторингу та керування, а також наведено огляд апаратних і програмних рішень для автоматизації цього процесу.

У другому розділі обґрунтовано вибір апаратних компонентів для реалізації модуля. Як центральний керуючий елемент обрано Arduino Uno R3. Для контролю параметрів середовища та процесу дозування запропоновано використати датчик вологості ґрунту, датчик температури, датчик рівня добрива та датчик витрати рідини.

У третьому розділі описано алгоритм функціонування апаратно-програмного модуля, програмну реалізацію керування процесом дозування добрив, режими роботи системи, індикацію станів, створення дослідного зразка та проведення експериментальної перевірки. Результати роботи підтвердили можливість використання мікроконтролерної системи для автоматизації процесу внесення добрив у навчальних, дослідних і малих агротехнічних установах.

Ключові слова: апаратно-програмний модуль, автоматизоване внесення добрив, мікроконтролер, Arduino Uno R3, сенсорний блок, виконавчий механізм, дозування добрив, агротехнічна система.

ANNOTATION

Miguel N. Hardware and software module for automated fertilizer application based on a microcontroller. Manuscript.

Bachelor's qualification work of the EP «Computer Engineering» specialty 123 Computer Engineering. Lutsk National Technical University. Lutsk, 2026.

The qualification work consists of an introduction, three sections, conclusions, a list of sources used, and appendices.

The first section analyzes the principles of construction and application of automated fertilizer application systems, considers control and dosing methods, features of using microcontrollers in agrotechnical monitoring and control systems, and also provides an overview of hardware and software solutions for automating this process.

The second section justifies the choice of hardware components for implementing the module. Arduino Uno R3 was chosen as the central control element. To control the parameters of the environment and the dosing process, it is proposed to use a soil moisture sensor, temperature sensor, fertilizer level sensor and liquid flow sensor.

The third section describes the algorithm for the functioning of the hardware and software module, the software implementation of the fertilizer dosing process control, system operating modes, status indication, creation of a prototype and experimental testing. The results of the work confirmed the possibility of using a microcontroller system to automate the fertilizer application process in educational, research and small agrotechnical installations.

Keywords: hardware-software module, automated fertilizer application, microcontroller, Arduino Uno R3, sensor unit, actuator, fertilizer dosing, agrotechnical system.

ЗМІСТ

ВСТУП.....	8
РОЗДІЛ 1 АНАЛІЗ ТЕХНОЛОГІЙ АВТОМАТИЗОВАНОГО ВНЕСЕННЯ ДОБРІВ У СУЧАСНОМУ АГРОВИРОБНИЦТВІ.....	11
1.1 Роль автоматизованих систем внесення добрив у сучасному аграрному виробництві	11
1.2 Аналіз методів контролю та дозування добрив у сільськогосподарських процесах.....	15
1.3 Особливості використання мікроконтролерів у системах агротехнічного моніторингу та керування.....	20
1.4 Огляд апаратних і програмних рішень для автоматизації внесення добрив	25
РОЗДІЛ 2 РОЗРОБКА АПАРАТНОЇ ЧАСТИНИ МОДУЛЯ АВТОМАТИЗОВАНОГО ВНЕСЕННЯ ДОБРІВ	31
2.1 Обґрунтування вибору мікроконтролерної платформи для керування модулем	31
2.2 Вибір сенсорного блоку для контролю параметрів середовища та процесу внесення добрив	34
2.3 Формування виконавчої частини системи дозування добрив	39
2.4 Розробка структурної та принципової схеми апаратно-програмного модуля автоматизованого внесення добрив	44
РОЗДІЛ 3 ПРАКТИЧНА РЕАЛІЗАЦІЯ МОДУЛЯ АВТОМАТИЗОВАНОГО ВНЕСЕННЯ ДОБРІВ.....	49
3.1 Розробка алгоритму функціонування апаратно-програмного модуля	49
3.2 Розробка програмного забезпечення для мікроконтролера Arduino Uno R3.....	51
3.3 Реалізація програмного керування процесом дозування добрив	52
3.4 Апаратно-програмна реалізація модуля автоматизованого внесення добрив	54

3.5 Аналіз результатів експериментальної перевірки та оцінювання ефективності роботи модуля	58
ВИСНОВКИ	61
ПЕРЕЛІК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ	64

ВСТУП

Сучасний розвиток аграрного виробництва все більше орієнтується на впровадження автоматизованих, енергоефективних та ресурсозберігаючих технологій, які дають змогу підвищити продуктивність сільськогосподарських процесів і зменшити витрати матеріальних ресурсів. Одним із важливих напрямів такого розвитку є автоматизація процесу внесення добрив, оскільки від точності дозування та своєчасності їх подачі значною мірою залежить якість живлення рослин, рівномірність розвитку культур, урожайність і раціональне використання агрохімічних речовин.

Традиційні способи внесення добрив часто передбачають значну участь людини, що може призводити до нерівномірного розподілу речовини, перевитрати добрив, зниження ефективності їх використання та підвищення навантаження на ґрунтове середовище. У зв'язку з цим актуальним є створення апаратно-програмних модулів, здатних автоматизувати процес дозування і подачі добрив на основі мікроконтролерного керування. Такі системи можуть забезпечувати контроль робочих параметрів, керування виконавчими механізмами, обробку даних із сенсорів та адаптацію режимів роботи до умов експлуатації.

Особливе значення у таких пристроях має використання мікроконтролера, який виконує функцію центрального керуючого елемента. Завдяки мікроконтролерній платформі можна реалізувати алгоритми автоматизованого керування, забезпечити взаємодію між сенсорним блоком, виконавчими механізмами, елементами живлення та засобами індикації. Це дає змогу створити компактний, доступний і функціональний модуль, який може бути використаний як у навчальних цілях, так і в малих агротехнічних системах або дослідних установках.

Актуальність теми полягає в необхідності розробки технічних рішень, які забезпечують автоматизоване, контрольоване та більш точне внесення добрив із використанням доступної мікроконтролерної елементної бази. Створення такого

модуля сприяє підвищенню ефективності агротехнічних процесів, зменшенню впливу людського чинника та формуванню основ для подальшого впровадження елементів точного землеробства.

Метою кваліфікаційної роботи є розробка апаратно-програмного модуля для автоматизованого внесення добрив на базі мікроконтролера, який забезпечує керування процесом дозування, взаємодію з сенсорними та виконавчими компонентами, а також перевірку працездатності системи в умовах експериментального тестування.

Об'єктом дослідження є процес автоматизованого внесення добрив у сільськогосподарських та дослідних агротехнічних системах.

Предметом дослідження є апаратні засоби, програмні алгоритми та мікроконтролерні рішення для керування модулем автоматизованого внесення добрив.

Для досягнення поставленої мети в роботі необхідно вирішити такі завдання:

- проаналізувати принципи побудови та застосування автоматизованих систем внесення добрив;
- розглянути особливості використання мікроконтролерів у системах агротехнічного керування;
- обґрунтувати вибір апаратних компонентів для реалізації модуля автоматизованого внесення добрив;
- розробити структурну та принципову схему підключення основних компонентів системи;
- сформулювати алгоритм роботи апаратно-програмного модуля;
- реалізувати програмне керування процесом дозування добрив;
- провести експериментальну перевірку працездатності розробленого модуля та оцінити результати його роботи.

Практичне значення роботи полягає у можливості використання розробленого апаратно-програмного модуля як основи для створення компактної автоматизованої системи внесення добрив. Запропоноване рішення може бути

застосоване для навчального моделювання агротехнічних процесів, дослідного тестування алгоритмів дозування, а також для подальшого вдосконалення систем точного землеробства на базі мікроконтролерних платформ.

РОЗДІЛ 1

АНАЛІЗ ТЕХНОЛОГІЙ АВТОМАТИЗОВАНОГО ВНЕСЕННЯ ДОБРІВ У СУЧАСНОМУ АГРОВИРОБНИЦТВІ

1.1 Роль автоматизованих систем внесення добрив у сучасному аграрному виробництві

Сучасне аграрне виробництво поступово переходить від традиційних методів обробітку ґрунту та догляду за рослинами до більш точних, контрольованих і технологічно керованих процесів. Одним із важливих напрямів такого розвитку є автоматизація внесення добрив, оскільки саме цей процес безпосередньо впливає на живлення рослин, інтенсивність їх росту, якість урожаю та економічну ефективність вирощування сільськогосподарських культур. У межах сучасного точного землеробства добрива розглядаються не лише як агрохімічний ресурс, а як елемент керованої технологічної системи, у якій важливими є точність дозування, своєчасність подачі, контроль параметрів ґрунту та мінімізація втрат поживних речовин [1]. Дослідження з точного землеробства підтверджують, що технології GPS-навігації, дистанційного зондування, сенсорного контролю та змінного дозування добрив сприяють підвищенню ефективності використання поживних речовин і зменшенню надмірного внесення агрохімікатів.

Автоматизовані системи внесення добрив виконують роль технічного посередника між агрономічними вимогами культури та фактичними умовами поля. Якщо у традиційній системі норма внесення часто задається однаково для всієї площі, то автоматизована система може враховувати різницю між окремими ділянками ґрунту, поточний стан рослин, рівень вологості, задану норму добрива та швидкість переміщення робочого агрегата. Завдяки цьому добрива подаються більш рівномірно або диференційовано, відповідно до потреб конкретної зони. Такий підхід є особливо важливим для зменшення перевитрат, оскільки надмірне внесення добрив не завжди підвищує врожайність, але збільшує собівартість продукції та може негативно впливати на ґрунтове середовище [2]. У сучасних

оглядах підкреслюється, що site-specific nutrient management спрямований на врахування просторової неоднорідності ґрунту, підвищення врожайності та зменшення екологічного навантаження.

Загальну роль автоматизованої системи внесення добрив у структурі аграрного виробництва подано на рисунку 1.1.

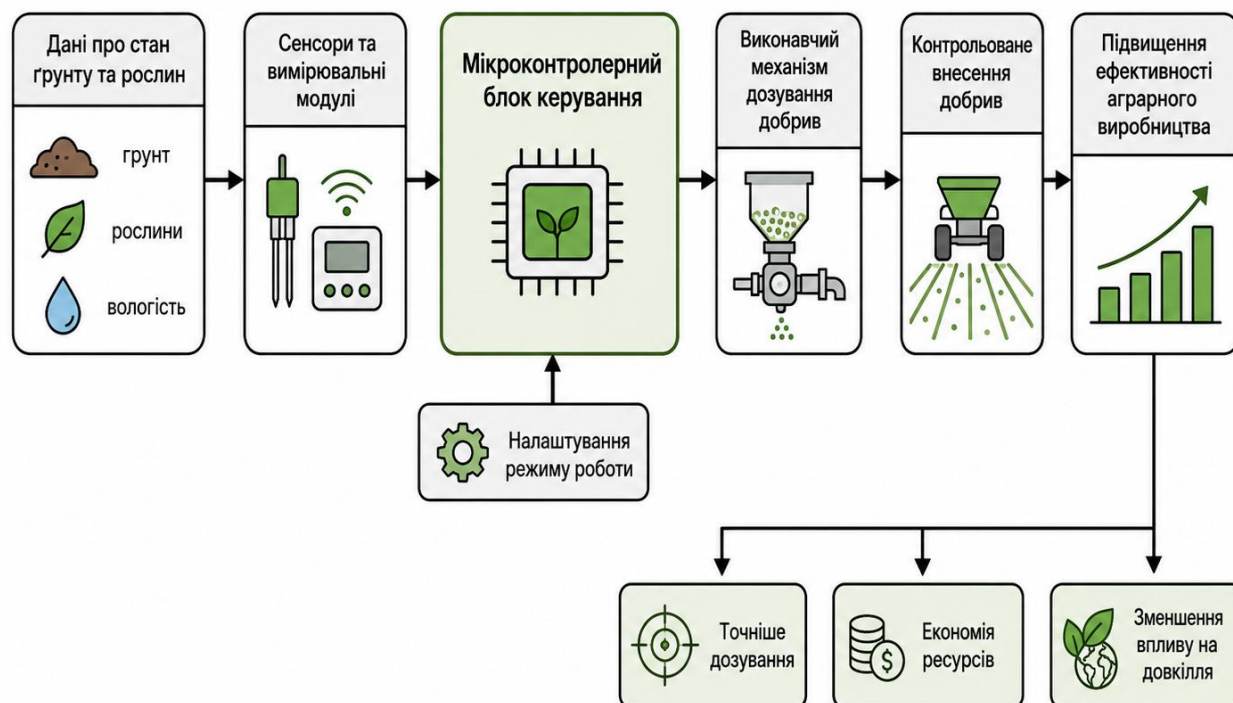


Рисунок 1.1 – Роль автоматизованої системи внесення добрив у сучасному аграрному виробництві [1]

У технічному аспекті автоматизована система внесення добрив може включати сенсорний блок, мікроконтролер, виконавчий механізм, блок живлення, елементи індикації та програмний алгоритм керування. Сенсорний блок забезпечує отримання вхідних даних про параметри середовища або стан системи. Мікроконтролер обробляє ці дані та формує керуючі сигнали. Виконавчий механізм, наприклад насос, сервопривід, електромагнітний клапан або дозувальний шнек, безпосередньо здійснює подачу добрива. Саме взаємодія апаратної та програмної частин дає змогу перейти від ручного керування до

автоматизованого режиму роботи, у якому дозування виконується за попередньо заданим алгоритмом або відповідно до показників сенсорів.

Важливою перевагою автоматизованих систем є зменшення впливу людського чинника. Під час ручного внесення добрив точність залежить від досвіду оператора, стабільності його дій, умов праці та можливості контролювати рівномірність розподілу речовини. У разі використання мікроконтролерного модуля процес стає більш повторюваним і прогнозованим. Система може працювати за чітко визначеним циклом: зчитування параметрів, порівняння з установленими порогами, прийняття рішення, увімкнення виконавчого механізму, контроль тривалості подачі та перехід до очікування наступного циклу. Такий принцип роботи є доцільним для малогабаритних аграрних пристроїв, тепличних систем, навчальних стендів, дослідних установок і прототипів для точного землеробства.

Окрему роль автоматизовані системи внесення добрив відіграють у ресурсозбереженні. Добрива є одним із важливих витратних матеріалів у сільському господарстві, тому їх нераціональне використання збільшує виробничі витрати. Крім того, неправильне дозування може призводити до нерівномірного розвитку рослин: на одних ділянках культура може отримувати недостатню кількість поживних речовин, а на інших - надлишкову. У результаті знижується стабільність урожаю та ускладнюється контроль якості продукції. Автоматизація дає змогу формувати більш точну норму внесення та забезпечувати кращу узгодженість між потребами рослин і фактичною подачею добрив. Систематичні огляди показують, що технології точного землеробства, зокрема змінне дозування, сенсорний контроль і картографування, застосовуються для оптимізації використання хімічних добрив та підвищення ефективності управління поживними речовинами [1].

Структуру взаємодії основних складових автоматизованого модуля внесення добрив доцільно подати у вигляді схеми, наведеної на рисунку 1.2.

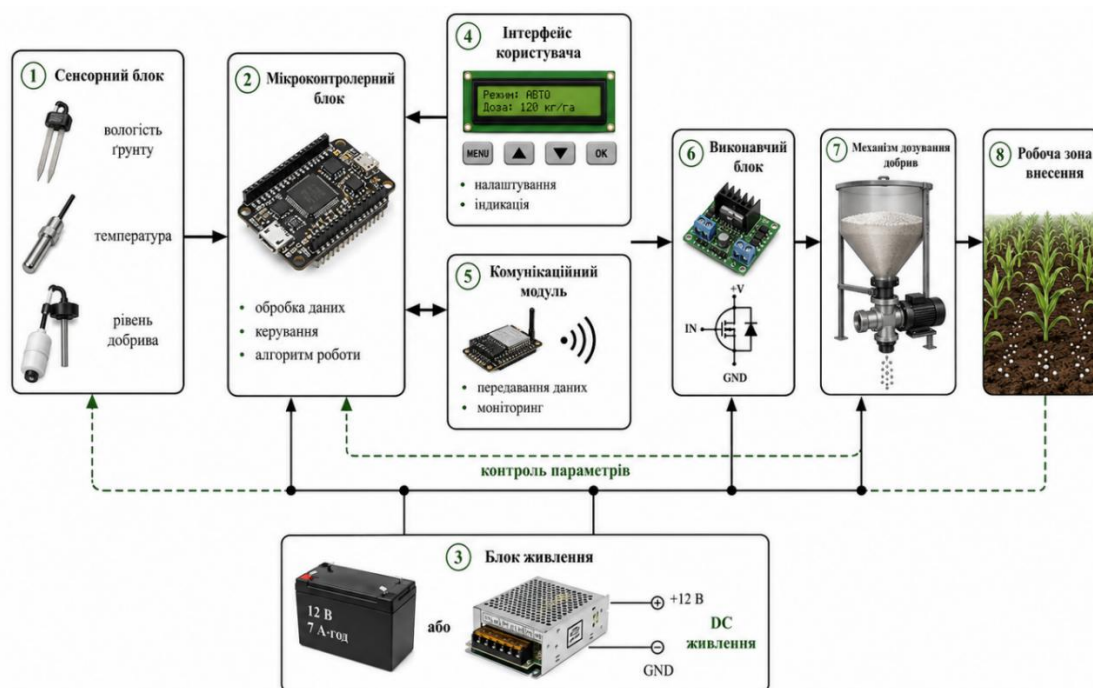


Рисунок 1.2 – Узагальнена структура апаратно-програмного модуля для автоматизованого внесення добрив [2]

Автоматизовані системи внесення добрив не обов'язково повинні бути складними промисловими комплексами. На початковому рівні така система може бути реалізована на базі доступного мікроконтролера, кількох сенсорів і простого виконавчого механізму. Наприклад, у навчальному або дослідному прототипі мікроконтролер може керувати подачею рідкого добрива через насос або клапан, а також відображати стан системи за допомогою дисплея чи світлодіодної індикації. Така реалізація дає можливість практично продемонструвати принципи автоматизованого керування, взаємодію апаратної та програмної частин, а також базові підходи до дозування агротехнічних речовин.

З науково-технічної точки зору роль таких систем полягає у поєднанні аграрних задач із засобами комп'ютерної інженерії. У межах цієї роботи мікроконтролерний модуль можна розглядати як компактну кіберфізичну систему, у якій фізичний процес внесення добрив керується програмним алгоритмом. Вхідними даними для системи можуть бути показники сенсорів або задані користувачем параметри, а вихідною дією – керування дозатором. Саме

такий підхід відповідає сучасній тенденції розвитку аграрних технологій, де важливу роль відіграють автоматизація, збір даних, локальна обробка інформації та точне керування виконавчими пристроями [3]. Огляди технологій site-specific nutrient management показують, що подальший розвиток цього напрямку пов'язаний із сенсорними технологіями, машинним навчанням, моделями прогнозування та технічними засобами точного внесення поживних речовин.

Автоматизовані системи внесення добрив є важливою складовою сучасного аграрного виробництва, оскільки вони забезпечують точніше дозування, зменшують участь людини в рутинних операціях, сприяють економії ресурсів і створюють передумови для впровадження елементів точного землеробства. Для розробки бакалаврського проєкту особливе значення має можливість реалізувати таку систему на базі мікроконтролера, що дозволяє поєднати сенсорний контроль, програмне керування та виконавчі механізми в одному апаратно-програмному модулі. Це робить тему роботи практично значущою, технічно обґрунтованою та актуальною для напрямку комп'ютерної інженерії.

1.2 Аналіз методів контролю та дозування добрив у сільськогосподарських процесах

Ефективність внесення добрив у сільськогосподарському виробництві значною мірою залежить від правильного визначення норми, способу подачі та рівномірності розподілу поживних речовин у робочій зоні. У традиційних технологіях внесення добрив часто використовується фіксована норма для всієї площі поля або ділянки, що не завжди відповідає фактичним потребам рослин. Такий підхід може бути достатньо простим у реалізації, однак він не враховує неоднорідність ґрунту, різний рівень вологості, особливості розвитку рослин та зміну агротехнічних умов у межах однієї ділянки. Саме тому в сучасному аграрному виробництві дедалі більшого значення набувають методи контролю та

автоматизованого дозування добрив, які дають змогу точніше керувати процесом живлення рослин [4].

У науковій літературі методи дозування добрив умовно поділяють на кілька груп: ручне дозування, механізоване дозування з фіксованою нормою, автоматизоване дозування за заданим алгоритмом, сенсорне дозування та диференційоване внесення добрив на основі карт-завдань. Кожен із цих підходів має свої переваги та обмеження. Ручне дозування є найпростішим, однак воно залежить від оператора і має невисоку повторюваність. Механізоване дозування забезпечує вищу продуктивність, але часто працює за сталою нормою. Автоматизовані та сенсорні методи є більш перспективними, оскільки дають можливість поєднати вимірювання параметрів середовища з керуванням виконавчим механізмом у реальному часі. У системах *variable rate technology* виділяють два основні підходи: *sensor-based*, тобто керування за показниками сенсорів, і *map-based*, тобто керування на основі попередньо сформованої карти-завдання внесення добрив.

Загальну класифікацію методів контролю та дозування добрив подано на рисунку 1.3.



Рисунок 1.3 – Класифікація методів контролю та дозування добрив у сільськогосподарських процесах [4]

Ручний метод внесення добрив передбачає безпосередню участь людини у визначенні кількості речовини та способу її подачі. Його перевагою є простота реалізації, відсутність складного обладнання та можливість застосування у малих господарствах або навчальних умовах. Водночас такий метод має низку суттєвих недоліків: низьку точність, залежність від досвіду оператора, складність повторення однакової норми внесення та підвищену ймовірність нерівномірного розподілу добрив. У межах бакалаврської роботи цей метод доцільно розглядати як базовий рівень, порівняно з яким можна оцінювати переваги автоматизованого модуля.

Механізоване дозування передбачає використання технічних засобів, які забезпечують подачу добрив за допомогою механічного вузла. До таких вузлів можуть належати бункери, шнекові механізми, дозувальні барабани, клапани, насоси або розподільні пристрої. Основна особливість цього підходу полягає в тому, що добриво подається з певною сталою інтенсивністю. Такий метод є більш продуктивним, ніж ручне внесення, однак у більшості випадків він не передбачає автоматичної адаптації до зміни умов середовища. Тому за неоднорідності ґрунту або різних потреб рослин однакова норма внесення може бути недостатньо ефективною.

Автоматизоване дозування базується на використанні керуючого пристрою, який формує сигнали для виконавчого механізму. У простих апаратно-програмних модулях таким пристроєм може бути мікроконтролер. Він отримує вхідні дані, порівнює їх із заданими параметрами та визначає, коли і на який час необхідно увімкнути механізм подачі добрив. Наприклад, для рідких добрив може використовуватися насос або електромагнітний клапан, а для гранульованих – шнековий дозатор або сервопривідний механізм відкривання заслінки. У сучасних дослідженнях точного внесення добрив значну увагу приділяють саме точності керування виконавчими механізмами, оскільки від їхньої стабільності залежить фактична кількість внесеної речовини.

Сенсорний метод дозування передбачає використання даних, отриманих від датчиків. У такій системі мікроконтролер може враховувати вологість ґрунту,

температуру, рівень добрива у резервуарі, електропровідність розчину або інші параметри, які характеризують умови внесення. Наприклад, якщо вологість ґрунту є нижчою за заданий рівень, система може змінювати режим подачі рідкого добрива або призупиняти його внесення до стабілізації умов. Якщо датчик рівня показує нестачу добрива в резервуарі, система може зупинити виконавчий механізм та подати сигнал користувачу. Дослідження IoT-систем моніторингу ґрунту підтверджують доцільність використання датчиків вологості та електропровідності для контролю агротехнічних параметрів у реальному часі.

Диференційоване внесення добрив є більш складним методом, який передбачає зміну норми подачі залежно від конкретної ділянки поля. У *map-based* підході попередньо формується карта-завдання, у якій для різних зон указано різні норми внесення. Така карта може створюватися на основі аналізу ґрунтових проб, даних урожайності, супутникових або дронівих знімків, показників NDVI та інших джерел інформації. Під час руху технічного засобу система визначає своє положення за допомогою навігаційного модуля та автоматично змінює норму внесення відповідно до карти. У *sensor-based* підході система не потребує попередньо сформованої карти, оскільки рішення про дозування приймається на основі поточних показників сенсорів. Обидва підходи використовуються у технологіях точного землеробства та спрямовані на підвищення ефективності використання добрив.

Для апаратно-програмного модуля, що розробляється в межах цієї бакалаврської роботи, найбільш доцільним є поєднання автоматизованого та сенсорного підходів. Це пояснюється тим, що така система може бути реалізована на доступній елементній базі, не потребує складної GPS-навігації або картографічного програмного забезпечення, але водночас дає змогу продемонструвати основні принципи автоматичного контролю. У такому випадку мікроконтролер виконує функцію центрального блока керування, сенсори забезпечують отримання інформації про стан середовища, а виконавчий механізм здійснює подачу добрива відповідно до програмного алгоритму.

Послідовність роботи методу автоматизованого дозування добрив подано на рисунку 1.4.

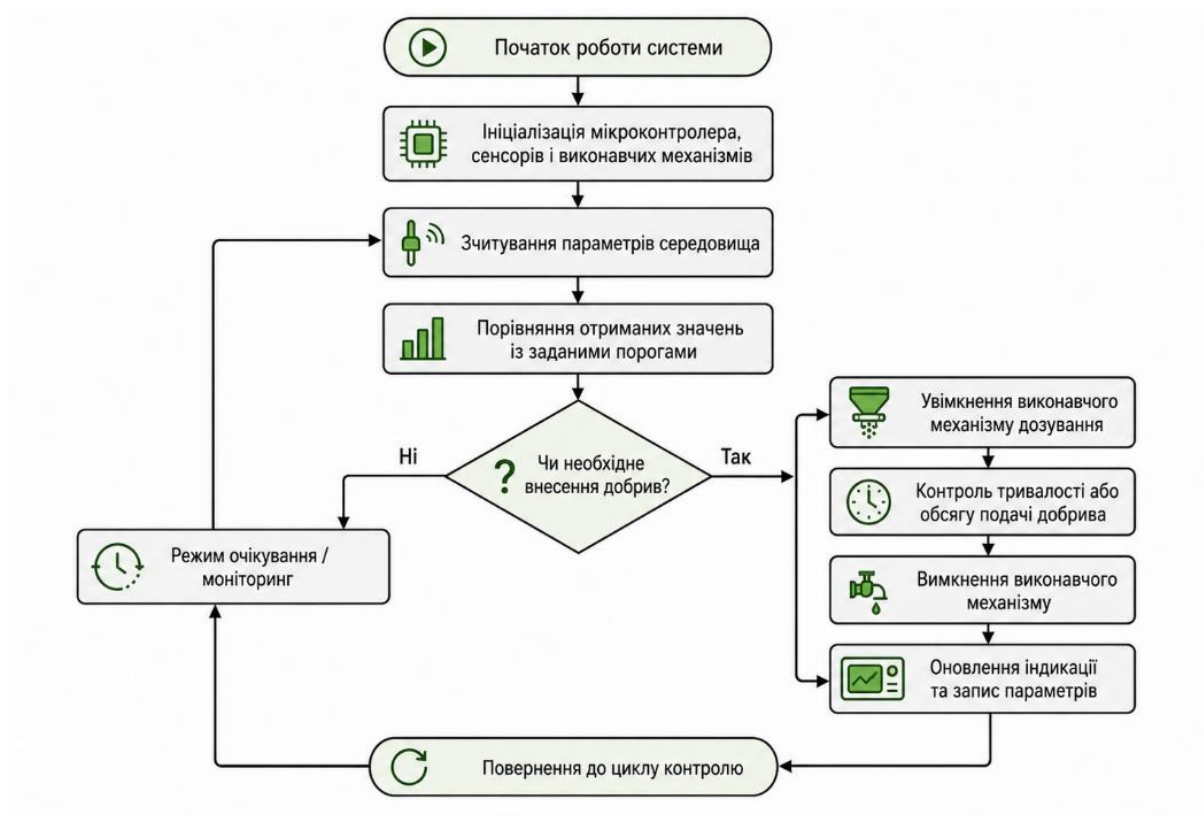


Рисунок 1.4 – Узагальнений алгоритм контролю та дозування добрив на базі мікроконтролера [5]

З практичної точки зору контроль дозування може здійснюватися за часом, за кількістю імпульсів, за масою, за об'ємом або за показниками витрати. Найпростішим для навчального прототипу є часовий метод, коли мікроконтролер вмикає насос або інший виконавчий механізм на певний проміжок часу. Такий підхід є нескладним у програмній реалізації, однак потребує попереднього калібрування, оскільки фактична кількість внесеного добрива залежить від продуктивності насоса, діаметра трубок, в'язкості рідини або конструкції дозатора. Більш точним є дозування за об'ємом або витратою, коли система використовує додатковий датчик витрати. Для гранульованих добрив може застосовуватися контроль кількості обертів шнека або дозувального барабана.

У межах розробки апаратно-програмного модуля важливо передбачити не лише сам процес подачі добрив, а й контроль безпечної та стабільної роботи системи. До таких функцій можна віднести перевірку наявності добрива в резервуарі, обмеження тривалості безперервної роботи насоса, захист виконавчого механізму від перевантаження, індикацію режиму роботи та можливість ручного налаштування параметрів. Наявність таких функцій підвищує надійність пристрою та робить його ближчим до реальних технічних систем, які застосовуються в аграрному виробництві [6].

Методи контролю та дозування добрив розвиваються від простого ручного внесення до складних автоматизованих і сенсорних систем. Для бакалаврської роботи найбільш обґрунтованим є створення модуля, у якому процес дозування виконується на основі мікроконтролерного керування, а контроль параметрів забезпечується сенсорним блоком. Такий підхід дає змогу поєднати простоту реалізації, технічну наочність і практичну цінність, оскільки він демонструє основні принципи автоматизації агротехнічного процесу внесення добрив.

1.3 Особливості використання мікроконтролерів у системах агротехнічного моніторингу та керування

У сучасних системах агротехнічного моніторингу та керування мікроконтролер виконує роль центрального обчислювального і керуючого елемента, який забезпечує взаємодію між сенсорним блоком, виконавчими механізмами, засобами індикації та модулями передавання даних. На відміну від суто механічних пристроїв, мікроконтролерні системи дають змогу не лише вмикати або вимикати певний механізм, а й реалізовувати програмний алгоритм прийняття рішень. Це особливо важливо для аграрних процесів, де параметри середовища постійно змінюються, а рішення щодо внесення добрив, поливу чи контролю стану ґрунту мають прийматися на основі фактичних вимірювань [7]. У наукових оглядах із точного землеробства зазначається, що сенсори, IoT-пристрої та системи збору даних є важливими складовими сучасного аграрного

моніторингу, оскільки забезпечують отримання актуальної інформації про вологість, температуру, рН, електропровідність ґрунту та стан рослин [8].

Для апаратно-програмного модуля автоматизованого внесення добрив мікроконтролер є основою, яка поєднує фізичний процес дозування з програмною логікою керування. Він отримує сигнали від датчиків, перетворює їх у цифрові значення, порівнює з установленими порогами та формує керуючі сигнали для насоса, клапана, сервопривода або іншого виконавчого механізму. Завдяки цьому система може працювати за заздалегідь визначеним алгоритмом: зчитувати параметри середовища, визначати потребу у внесенні добрив, контролювати тривалість подачі та оновлювати інформацію для користувача. Такий підхід відповідає загальній логіці розумних аграрних систем, у яких вбудовані пристрої, сенсори, телеметрія, IoT-технології та алгоритми керування використовуються для підвищення ефективності агротехнічних процесів [9].

Загальну роль мікроконтролера в агротехнічній системі моніторингу та керування подано на рисунку 1.5.



Рисунок 1.5 – Роль мікроконтролера в системі агротехнічного моніторингу та керування

Однією з важливих особливостей використання мікроконтролерів в аграрних системах є можливість роботи з різними типами сенсорів. У системах моніторингу можуть застосовуватися датчики вологості ґрунту, температури, вологості повітря, рівня рідини, електропровідності, освітленості або кислотності середовища. Для модуля автоматизованого внесення добрив найбільш доцільними є датчики, які дають змогу оцінити умови подачі речовини та стан самої системи: датчик вологості ґрунту, датчик рівня добрива у резервуарі, датчик температури та, за потреби, датчик витрати рідини. На основі цих даних мікроконтролер може визначати, чи потрібно активувати дозувальний механізм, чи достатньо добрива в ємності, а також чи не виникають умови, за яких роботу системи варто обмежити. У дослідженнях IoT-систем для сільського господарства підкреслюється, що саме поєднання сенсорів із мікроконтролерними або вбудованими платформами забезпечує можливість моніторингу параметрів у реальному часі [10].

Ще однією перевагою мікроконтролерних систем є можливість керування виконавчими пристроями. Сам мікроконтролер зазвичай не може безпосередньо жити потужні електромеханічні компоненти, тому між ним і навантаженням використовують проміжні елементи: релейні модулі, транзисторні ключі, MOSFET-драйвери або модулі керування двигунами. У контексті внесення добрив такими виконавчими елементами можуть бути перистальтичний насос, електромагнітний клапан, сервопривід заслінки, шнековий механізм або невеликий мотор-редуктор. Мікроконтролер формує керуючий сигнал, а силовий модуль забезпечує подачу необхідної напруги та струму на виконавчий пристрій. Такий принцип дає змогу безпечно розділити логічну частину системи і силову частину, що є важливим для надійності апаратно-програмного модуля. Сучасні дослідження смарт-іригації також акцентують увагу на використанні мікроконтролерних платформ для роботи з датчиками, виконавчими механізмами та локальними алгоритмами керування [11].

Для реалізації подібних пристроїв можуть застосовуватися різні мікроконтролерні платформи, зокрема Arduino Uno, Arduino Nano, ESP32,

STM32 або інші сумісні плати. Arduino-платформи часто використовуються в навчальних і прототипних розробках завдяки простоті підключення сенсорів, великій кількості бібліотек і зрозумілому середовищу програмування. ESP32 є доцільним варіантом у випадках, коли потрібно реалізувати бездротове передавання даних, оскільки ця платформа широко використовується в IoT - рішеннях. STM32 або інші продуктивніші мікроконтролери можуть бути доцільними для складніших систем, де потрібно більше обчислювальних ресурсів або точніше керування периферією. Для бакалаврського проєкту вибір конкретної платформи має ґрунтуватися на кількості необхідних входів і виходів, типах сенсорів, способі керування виконавчим механізмом, потребі у зв'язку та доступності компонентів.

Загальну взаємодію мікроконтролера з основними компонентами апаратно-програмного модуля подано на рисунку 1.6.

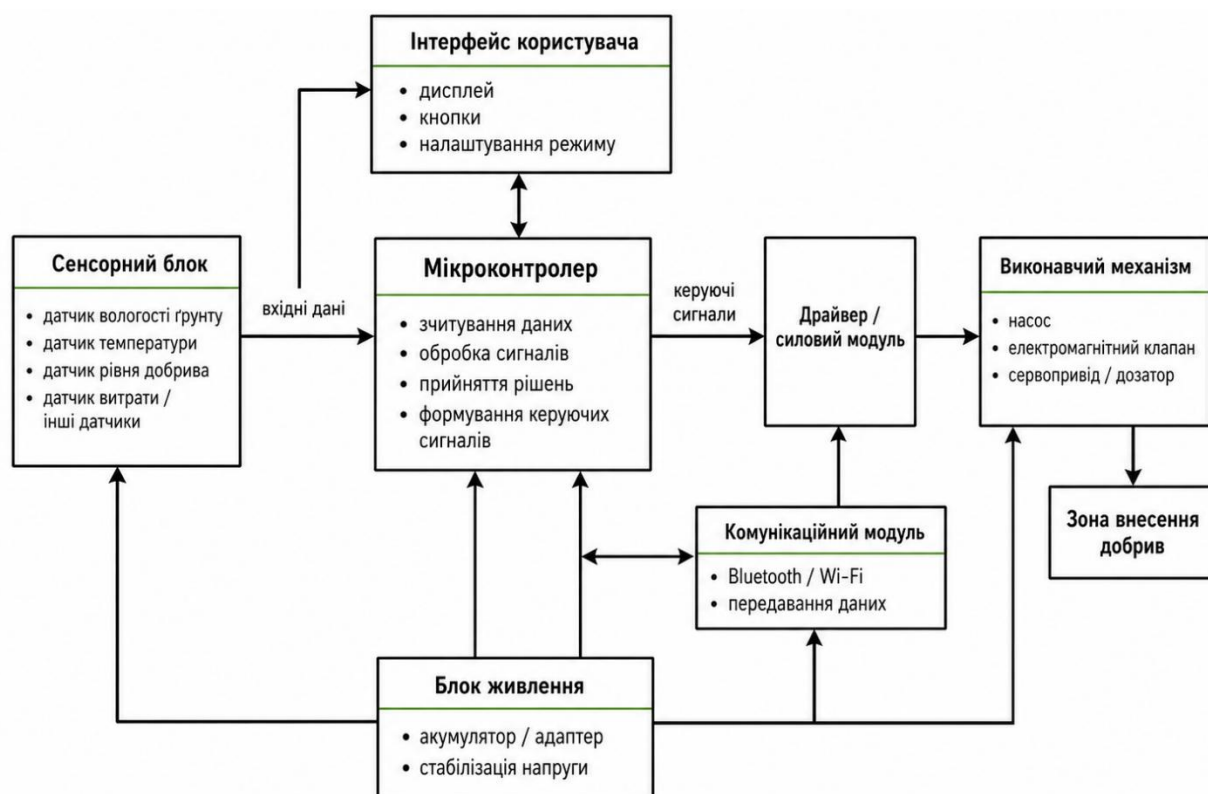


Рисунок 1.6 – Взаємодія мікроконтролера з компонентами модуля автоматизованого внесення добрив

У програмному аспекті мікроконтролер забезпечує виконання циклічного алгоритму. Після запуску системи відбувається ініціалізація портів, сенсорів, дисплея, комунікаційного модуля та виконавчих елементів. Далі система переходить до основного циклу, у якому періодично зчитуються дані з датчиків. Отримані значення можуть фільтруватися, усереднюватися або порівнюватися з контрольними порогами. Якщо умови відповідають заданому критерію, мікроконтролер подає сигнал на виконавчий механізм і контролює час або обсяг внесення добрива. Після завершення операції система оновлює індикацію та повертається до режиму моніторингу. Такий підхід є типовим для вбудованих систем керування, оскільки поєднує безперервне спостереження за параметрами та виконання керуючих дій у разі потреби.

У системах агротехнічного моніторингу важливо також враховувати обмеження мікроконтролерних платформ. До таких обмежень належать обмежена кількість входів і виходів, невеликий обсяг пам'яті, обмежена обчислювальна потужність, чутливість до нестабільного живлення та необхідність захисту від вологи, пилу й механічних впливів. У реальних умовах експлуатації аграрні пристрої можуть працювати на відкритому повітрі, тому електронні компоненти потребують корпусу, стабілізованого живлення, захисту контактів і надійного з'єднання проводів. Для навчального або дослідного прототипу ці вимоги можуть бути реалізовані частково, однак їх потрібно враховувати на етапі проєктування, щоб модуль був не лише функціональним, а й достатньо надійним.

Застосування мікроконтролера в модулі автоматизованого внесення добрив дає змогу сформувати компактну кіберфізичну систему, у якій програмний алгоритм безпосередньо впливає на фізичний процес подачі речовини. Така система може працювати як автономно, так і з можливістю участі користувача через кнопки, дисплей або бездротовий інтерфейс. У простому варіанті користувач задає норму або режим роботи, а мікроконтролер виконує дозування відповідно до встановлених параметрів. У складнішому варіанті система може

автоматично змінювати режим подачі залежно від показників сенсорів або передавати дані на мобільний пристрій чи комп'ютер для подальшого аналізу.

Мікроконтролери відіграють ключову роль у побудові сучасних агротехнічних систем моніторингу та керування. Вони забезпечують обробку даних із сенсорів, реалізацію алгоритмів прийняття рішень, керування виконавчими механізмами та взаємодію з користувачем. У межах розробки апаратно-програмного модуля для автоматизованого внесення добрив мікроконтролер доцільно розглядати як центральний елемент системи, який поєднує вимірювання параметрів, логіку керування та фізичне дозування добрив. Саме завдяки використанню мікроконтролера запропонований пристрій може бути гнучким, доступним для реалізації та придатним для подальшого вдосконалення.

1.4 Огляд апаратних і програмних рішень для автоматизації внесення добрив

Автоматизація внесення добрив у сучасному аграрному виробництві реалізується за допомогою поєднання апаратних компонентів, програмного забезпечення та алгоритмів керування. Якщо у попередніх підпунктах було розглянуто роль автоматизованих систем, методи дозування та значення мікроконтролера, то в цьому підпункті доцільно узагальнити основні технічні рішення, які можуть бути використані під час створення апаратно-програмного модуля. У наукових дослідженнях останніх років автоматизація внесення добрив найчастіше пов'язується з технологіями точного землеробства, змінного дозування, сенсорного контролю, IoT-моніторингу та локального мікроконтролерного керування [12]. Огляди *variable rate technology* підкреслюють, що такі системи можуть змінювати норму подачі добрив відповідно до даних сенсорів, карт-завдань або параметрів руху аграрного агрегата.

З апаратної точки зору системи автоматизованого внесення добрив можуть мати різний рівень складності. Найпростішими є мікроконтролерні модулі, у яких використовується один або кілька датчиків, блок керування, виконавчий механізм і джерело живлення. Такі рішення є зручними для навчальних, лабораторних і дослідних проєктів, оскільки дають змогу практично реалізувати принцип автоматичного дозування без складної навігації або спеціалізованого промислового обладнання. У складніших системах застосовуються GPS-модулі, карти-завдання, датчики NDVI, сенсори стану ґрунту, пропорційні клапани, насоси, контролери витрати, бездротові модулі та програмні сервіси для зберігання даних. Наприклад, у дослідженнях систем змінного внесення рідких добрив описуються рішення, де мікроконтролер отримує сигнал від сенсора, обробляє його та керує пропорційним клапаном, насосом і допоміжними вузлами подачі речовини [13].

Загальну класифікацію апаратних і програмних рішень для автоматизації внесення добрив подано на рисунку 1.7.

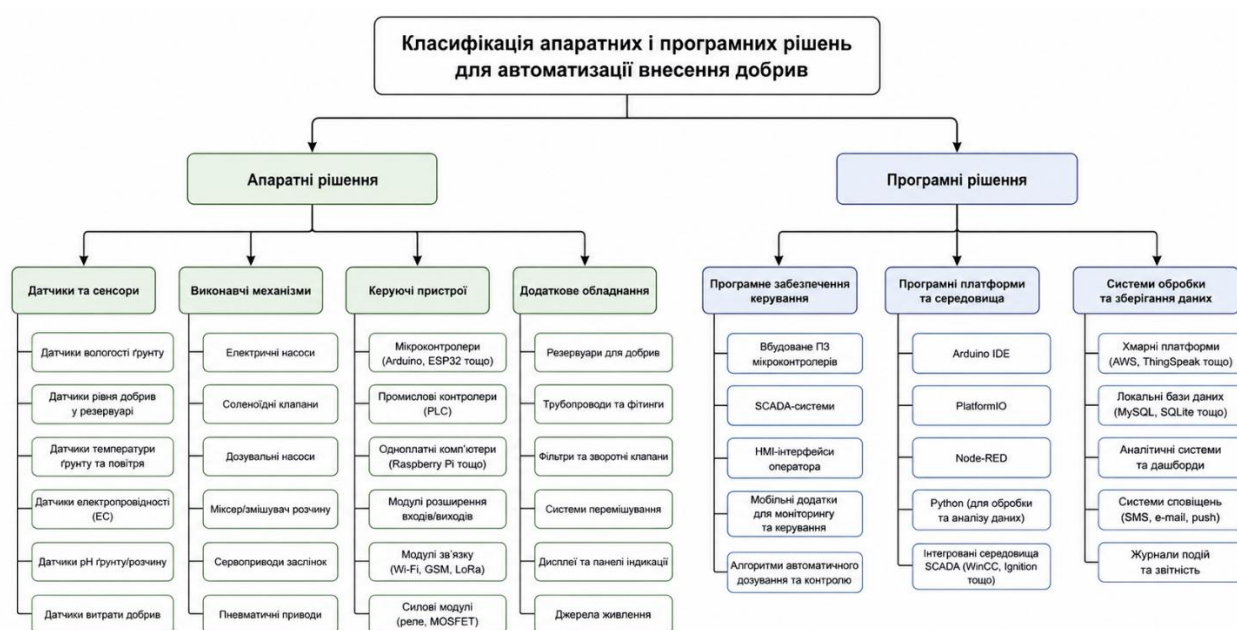


Рисунок 1.7 – Класифікація апаратних і програмних рішень для автоматизації внесення добрив

До основних апаратних компонентів автоматизованих систем внесення добрив належать сенсори, мікроконтролер або вбудований контролер, силовий модуль, виконавчий механізм, ємність для добрива, система подачі, блок живлення та засоби індикації. Сенсори забезпечують отримання інформації про параметри середовища або стан системи. У практичних рішеннях можуть використовуватися датчики вологості ґрунту, температури, рівня рідини, електропровідності, рН, витрати рідини або положення механічного вузла. Мікроконтролер обробляє отримані значення та формує керуючі сигнали. Силовий модуль потрібний для безпечного керування навантаженням, оскільки насос, клапан або двигун зазвичай споживають більший струм, ніж може забезпечити вихід мікроконтролера.

Виконавча частина системи може будуватися по-різному залежно від типу добрива. Для рідких добрив доцільним є використання насоса, електромагнітного клапана або перистальтичного механізму. Для гранульованих добрив можуть застосовуватися шнековий дозатор, бункер із заслінкою, сервопривідний механізм відкривання або мотор-редуктор. У дослідженнях точного внесення добрив особлива увага приділяється стабільності фактичної подачі, оскільки неточна робота виконавчого механізму може призвести до відхилення реальної норми від заданої [14]. Саме тому у складніших системах використовують датчики витрати, контролери тиску, зворотний зв'язок і калібрування продуктивності дозатора.

Програмна частина автоматизованого модуля виконує не менш важливу роль, ніж апаратна. Вона забезпечує послідовність роботи всієї системи: ініціалізацію компонентів, зчитування показників сенсорів, обробку даних, порівняння значень із порогоми, формування керуючого сигналу, контроль тривалості роботи виконавчого механізму та оновлення індикації. У найпростішому варіанті програмний алгоритм може бути побудований на пороговому принципі, коли система вмикає дозатор лише за виконання певної умови. Наприклад, якщо рівень вологості ґрунту або інший контрольований параметр відповідає встановленому критерію, мікроконтролер активує насос на

заданий час. Такий підхід є достатнім для навчального прототипу, оскільки він простий у реалізації та дає змогу наочно показати логіку автоматизованого керування.

Більш складні програмні рішення можуть передбачати використання широтно-імпульсної модуляції для регулювання швидкості двигуна, PID – керування для стабілізації витрати, роботу з картами-завданнями, збереження журналу подій, передавання даних до хмарного сервісу або відображення параметрів у веб-інтерфейсі. У сучасних IoT-рішеннях для сільського господарства часто застосовуються мікроконтролери ESP32 або подібні платформи, які можуть збирати дані з датчиків, керувати обладнанням і передавати інформацію на віддалену панель моніторингу. Дослідження IoT - систем розумного зрошення та удобрення показують, що поєднання сенсорів, ESP32, бази даних у реальному часі та веб-інтерфейсу дає змогу реалізувати як автоматичний, так і ручний режими керування [15]. найбільш доцільним є вибір такого рішення, яке поєднує технічну простоту, доступність компонентів і можливість практичного тестування. Тому до складу апаратно-програмного модуля доцільно включити мікроконтролерну плату, датчик вологості ґрунту або датчик рівня добрива, виконавчий механізм подачі, силовий модуль, блок живлення та простий інтерфейс індикації. За потреби систему можна доповнити комунікаційним модулем для передавання даних на смартфон або комп'ютер. Така структура дозволяє реалізувати базову модель автоматизованого внесення добрив і водночас залишає можливість подальшого вдосконалення.

Порівняльну характеристику основних типів рішень подано в таблиці 1.1.

Таблиця 1.1 – Порівняння апаратно-програмних рішень для автоматизації внесення добрив

Тип рішення	Основні компоненти	Переваги	Обмеження
Простий мікроконтролерний дозатор	Мікроконтролер, насос або клапан, датчик, блок живлення	Доступність, простота реалізації, придатність для прототипу	Обмежена точність без калібрування

Продовження таблиці 1.1

Тип рішення	Основні компоненти	Переваги	Обмеження
Сенсорна система дозування	Сенсори ґрунту, мікроконтролер, виконавчий механізм	Реакція на поточні параметри середовища	Потребує надійних датчиків
IoT-система удобрення	ESP32, сенсори, веб-інтерфейс, база даних	Віддалений моніторинг, збереження даних	Складніша програмна реалізація
Система змінного дозування	GPS, карта-завдання, контролер, дозатор	Висока точність для різних зон поля	Вища вартість і складність
Промисловий агрегат точного внесення	Контролер, навігація, датчики, виконавчі вузли	Продуктивність, масштабованість	Недоцільний для простого навчального прототипу

Загальну структуру апаратно-програмного рішення для автоматизації внесення добрив подано на рисунку 1.8.



Рисунок 1.8 – Узагальнена структура апаратно-програмного рішення для автоматизації внесення добрив

Окремо варто зазначити, що програмне забезпечення таких систем повинно бути не лише функціональним, а й достатньо надійним. У процесі роботи модуль

має передбачати обробку помилкових або нестабільних показників датчиків, контроль відсутності добрива в резервуарі, обмеження часу безперервної роботи виконавчого механізму, захист від повторного запуску без паузи та індикацію аварійного стану. Для реального використання також важливими є калібрування дозатора, перевірка продуктивності насоса, стабільність живлення та захист електроніки від вологи. У межах бакалаврської роботи ці вимоги можуть бути реалізовані на базовому рівні, але їх необхідно врахувати під час проєктування.

Апаратні та програмні рішення для автоматизації внесення добрив можуть варіюватися від простих мікроконтролерних дозаторів до складних систем точного землеробства з GPS-навігацією, картами-завданнями та IoT - моніторингом. Для розробки апаратно-програмного модуля на базі мікроконтролера найбільш обґрунтованим є використання сенсорного контролю, локального алгоритму керування, силового модуля та виконавчого механізму дозування. Такий підхід забезпечує достатню функціональність для практичної реалізації, дозволяє продемонструвати принципи автоматизованого керування та створює основу для подальшого розвитку системи.

РОЗДІЛ 2

РОЗРОБКА АПАРАТНОЇ ЧАСТИНИ МОДУЛЯ АВТОМАТИЗОВАНОГО ВНЕСЕННЯ ДОБРИВ

2.1 Обґрунтування вибору мікроконтролерної платформи для керування модулем

Вибір мікроконтролерної платформи є одним із ключових етапів розробки апаратно-програмного модуля для автоматизованого внесення добрив, оскільки саме мікроконтролер забезпечує зчитування даних із сенсорів, обробку вхідних сигналів, прийняття керуючих рішень і формування сигналів для виконавчих механізмів. У межах цієї роботи мікроконтролерна платформа повинна забезпечувати стабільну роботу з датчиками вологості ґрунту, температури, рівня добрива, кнопками керування, дисплеєм, а також із виконавчим механізмом дозування, наприклад насосом, сервоприводом або електромагнітним клапаном.

Під час вибору платформи для реалізації модуля було враховано кілька основних критеріїв: кількість цифрових та аналогових входів, простоту програмування, доступність компонентів, сумісність із типовими сенсорами, можливість керування виконавчими пристроями через релейний або транзисторний модуль, стабільність роботи, вартість і зручність використання в умовах бакалаврського проєкту. Для навчально-дослідної розробки важливо, щоб платформа була не лише функціональною, а й достатньо простою для монтажу, налагодження та пояснення принципу роботи системи [17].

Для порівняння було розглянуто три поширені варіанти мікроконтролерних платформ: Arduino Uno R3, ESP32 та Arduino Uno R4 WiFi. Arduino Uno R3 побудована на мікроконтролері ATmega328P, має 14 цифрових входів/виходів, 6 аналогових входів, 16 МГц тактової частоти, USB-підключення, роз'єм живлення та є однією з найпоширеніших плат для навчальних і прототипних розробок. ESP32 є потужнішою платформою з вбудованими Wi-Fi та Bluetooth, більшою кількістю GPIO і ширшими можливостями для IoT-рішень. Arduino Uno R4 WiFi має 32-бітний мікроконтролер Renesas RA4M1 та модуль ESP32-S3 для

бездротового зв'язку, тому може бути доцільною для складніших систем із віддаленим моніторингом [18].

Порівняльну характеристику мікроконтролерних платформ подано в таблиці 2.1.

Таблиця 2.1 – Порівняння мікроконтролерних платформ для модуля автоматизованого внесення добрив

Критерій порівняння	Arduino Uno R3	ESP32	Arduino Uno R4 WiFi
Основне призначення	Навчальні і прототипні системи керування	IoT-пристрої та бездротові системи	Розширені прототипи з Wi-Fi
Мікроконтролер	ATmega328P	ESP32	Renesas RA4M1 + ESP32-S3
Цифрові входи/виходи	14	До 34 GPIO залежно від модуля	Достатньо для складніших прототипів
Аналогові входи	6	Більше аналогових каналів, залежно від плати	Розширені можливості порівняно з Uno R3
Бездротовий зв'язок	Немає вбудованого	Wi-Fi, Bluetooth	Wi-Fi, Bluetooth
Складність програмування	Низька	Середня	Середня

З урахуванням мети бакалаврської роботи для реалізації апаратно-програмного модуля доцільно обрати Arduino Uno R3. Такий вибір пояснюється тим, що ця плата має достатню кількість цифрових та аналогових входів для підключення базових сенсорів і виконавчих компонентів, підтримує просте програмування в середовищі Arduino IDE, має велику кількість прикладів, бібліотек і сумісних модулів. Для розробки пристрою автоматизованого внесення добрив Arduino Uno R3 забезпечує необхідний рівень функціональності без надмірного ускладнення апаратної та програмної частин. Офіційна документація Arduino також визначає Uno R3 як плату на базі ATmega328P з базовим набором інтерфейсів, достатнім для типових навчальних і прототипних задач.

У межах запропонованого модуля Arduino Uno R3 може виконувати такі функції: зчитування сигналів із датчика вологості ґрунту, отримання даних від датчика рівня добрива, обробку значень відповідно до заданих порогів, керування насосом або клапаном через релеийний модуль, виведення інформації

на дисплей та приймання команд від користувача через кнопки. За потреби систему можна доповнити зовнішнім комунікаційним модулем, наприклад Bluetooth або Wi-Fi, однак базова робота пристрою не залежить від наявності бездротового зв'язку. Це підвищує надійність прототипу та спрощує його тестування.

Перевагою Arduino Uno R3 для цієї розробки є також робота з логічним рівнем 5 В, що спрощує підключення багатьох навчальних сенсорів, релейних модулів і дисплеїв. У системі автоматизованого внесення добрив це є важливим, оскільки більшість виконавчих механізмів не підключаються безпосередньо до мікроконтролера, а керуються через проміжні силові елементи. Arduino формує лише керуючий сигнал, тоді як релейний модуль або MOSFET забезпечує вмикання насоса, клапана чи двигуна дозатора. Такий підхід дає змогу відокремити логічну частину системи від силової, що позитивно впливає на безпечність і стабільність роботи пристрою.

Платформа ESP32 також є технічно привабливою, оскільки має вбудовані Wi-Fi та Bluetooth, значну кількість GPIO і ширші можливості для створення IoT - систем. Однак для базового бакалаврського прототипу автоматизованого внесення добрив її використання не є обов'язковим, якщо основна мета полягає у демонстрації локального алгоритму зчитування параметрів і керування дозуванням. ESP32 доцільно розглядати як перспективний варіант модернізації системи, коли потрібно реалізувати передавання даних на смартфон, веб-інтерфейс або хмарний сервіс. Згідно з документацією Espressif, модулі ESP32 підтримують Wi-Fi, Bluetooth/BLE та мають розвинену систему GPIO, що робить їх зручними для бездротових IoT-рішень.

Arduino Uno R4 WiFi є сучаснішим рішенням порівняно з Arduino Uno R3, оскільки використовує 32-бітний мікроконтролер Renesas RA4M1 і має ESP32-S3 для Wi-Fi та Bluetooth. Проте для простої системи дозування добрив ця плата може бути надлишковою, оскільки її можливості не будуть повністю використані на етапі базового прототипу. Водночас Arduino Uno R4 WiFi можна розглядати як альтернативу для подальшого розвитку проєкту, коли виникне потреба у

віддаленому моніторингу, розширеній індикації або підключенні до мережесервісів [19].

Для апаратно-програмного модуля автоматизованого внесення добрив найбільш обґрунтованим вибором є Arduino Uno R3. Вона забезпечує достатню кількість входів і виходів для підключення сенсорів, дисплея та виконавчого механізму, має просте середовище програмування, доступну елементну базу та добру сумісність із типовими модулями. Такий вибір відповідає рівню бакалаврської роботи, дозволяє реалізувати працездатний прототип і залишає можливість подальшого вдосконалення системи шляхом додавання ESP32 або іншого комунікаційного модуля.

2.2 Вибір сенсорного блоку для контролю параметрів середовища та процесу внесення добрив

Сенсорний блок є важливою складовою апаратно-програмного модуля для автоматизованого внесення добрив, оскільки саме він забезпечує отримання первинних даних про стан середовища та робочі параметри системи. Якщо мікроконтролер виконує функцію обробки інформації та керування, то сенсори формують вхідні сигнали, на основі яких приймається рішення про необхідність внесення добрив, контроль рівня речовини в резервуарі або перевірку стабільності роботи виконавчого механізму [20]. У межах цієї роботи сенсорний блок доцільно розглядати не як окремий вимірювальний вузол, а як частину загальної системи автоматизованого керування.

Для розроблюваного модуля було визначено кілька параметрів, які мають практичне значення для процесу внесення добрив: вологість ґрунту, температура середовища або ґрунту, рівень добрива в резервуарі та, за потреби, витрата рідкого добрива під час подачі. Вибір саме цих параметрів пояснюється тим, що вони безпосередньо впливають на умови роботи системи. Наприклад, показник вологості ґрунту може використовуватися як один із критеріїв доцільності внесення рідкого добрива, датчик рівня дає змогу контролювати наявність

речовини в ємності, а датчик витрати може застосовуватися для оцінювання фактичної кількості поданого добрива [20, 22, 23].

У складі сенсорного блоку доцільно передбачити такі основні компоненти: ємнісний датчик вологості ґрунту, цифровий датчик температури DS18B20, датчик рівня рідини в резервуарі та датчик витрати рідини. Ємнісний датчик вологості ґрунту є більш доцільним для прототипу, ніж простий резистивний датчик, оскільки його принцип роботи не потребує прямого вимірювання провідності між відкритими металевими електродами, що зменшує ризик швидкого окиснення контактів у вологому середовищі [20]. Наприклад, ємнісний датчик вологості ґрунту DFRobot SEN0193 працює в діапазоні живлення 3,3-5,5 В, має аналоговий вихід 0-3,0 В і споживає близько 5 мА, що робить його сумісним із мікроконтролерними платформами типу Arduino Uno R3 [20].

Загальну структуру сенсорного блоку для модуля автоматизованого внесення добрив подано на рисунку 2.1.



Рисунок 2.1 – Структура сенсорного блоку модуля автоматизованого внесення добрив [20]

Для контролю температури доцільно використати цифровий датчик DS18B20 у герметичному виконанні. Його перевагою є використання інтерфейсу 1-Wire, завдяки чому для передавання даних потрібна лише одна сигнальна лінія та спільна земля [21]. DS18B20 забезпечує цифрове вимірювання температури з роздільною здатністю від 9 до 12 біт і може працювати в діапазоні від -55°C до $+125^{\circ}\text{C}$ [21]. Для агротехнічного прототипу це є достатнім, оскільки датчик може використовуватися для контролю температури ґрунту, резервуара або навколишнього середовища.

Датчик рівня добрива потрібний для того, щоб система могла визначити наявність рідини в резервуарі та не запускала насос у режимі «сухого ходу». Для цього доцільно застосувати безконтактний датчик рівня типу ХКС-У25, який працює за ємнісним принципом і може фіксувати наявність рідини через стінку пластикової ємності [22]. Такий підхід є зручним для навчального прототипу, оскільки датчик не потрібно занурювати в агрохімічний розчин, а отже зменшується ризик забруднення або пошкодження його контактів. Залежно від модифікації датчик ХКС-У25 може працювати з живленням 5-12 В або 24 В та формувати дискретний вихідний сигнал, який можна використати для підключення до мікроконтролера через відповідну схему узгодження [22].

Для контролю фактичної подачі рідкого добрива може застосовуватися датчик витрати типу YF-S201. Він установлюється в розрив трубопроводу та формує імпульсний сигнал за рахунок обертання внутрішньої крильчатки й роботи датчика Холла [23]. Підрахунок імпульсів дає можливість орієнтовно визначити об'єм рідини, що пройшла через датчик. У технічному описі YF-S201 зазначено, що датчик має три дроти: живлення, землю та імпульсний вихід, а кожен імпульс приблизно відповідає певному об'єму рідини [23]. Водночас такий датчик потребує калібрування, якщо необхідна вища точність вимірювання, тому в межах бакалаврського прототипу його доцільно використовувати як допоміжний засіб контролю, а не як високоточний вимірювальний прилад [23].

Порівняльну характеристику сенсорів, які можуть бути використані в модулі, подано в таблиці 2.2.

Таблиця 2.2 – Характеристика сенсорів для модуля автоматизованого внесення добрив

Сенсор	Контрольований параметр	Тип сигналу	Призначення в системі
Ємнісний датчик вологості ґрунту	Вологість ґрунту	Аналоговий	Визначення умов для внесення добрив
DS18B20	Температура ґрунту або середовища	Цифровий, 1-Wire	Контроль температурних умов роботи
XKC-Y25	Рівень рідини в резервуарі	Дискретний	Захист насоса від роботи без добрива
YF-S201	Витрата рідини	Імпульсний	Орієнтовне вимірювання об'єму подачі

Підключення сенсорного блоку до Arduino Uno R3 повинно враховувати тип вихідного сигналу кожного датчика. Ємнісний датчик вологості ґрунту доцільно підключити до аналогового входу мікроконтролера, оскільки його вихідна напруга змінюється залежно від вологості [20]. DS18B20 підключається до цифрового входу за інтерфейсом 1-Wire з використанням підтягувального резистора [21]. Датчик рівня може підключатися до цифрового входу як дискретний сигнал «є рідина / немає рідини» [22]. Датчик витрати рідини підключається до цифрового входу, який може обробляти імпульси, що дає змогу підраховувати кількість обертів внутрішнього ротора [23].

З практичної точки зору важливо врахувати, що показники сенсорів можуть бути нестабільними через вологість, забруднення, коливання живлення, механічне положення датчика або неоднорідність ґрунту. Тому в програмній частині доцільно передбачити усереднення кількох вимірювань, фільтрацію випадкових відхилень, калібрування мінімального й максимального значення вологості та встановлення порогів спрацювання [20], [23]. Наприклад, перед початком тестування ємнісний датчик вологості можна відкалібрувати у сухому та зволоженому ґрунті, після чого отримані значення використовувати як орієнтири для формування програмного рішення [20].

Орієнтовну логіку обробки даних із сенсорного блоку подано на рисунку 2.3.

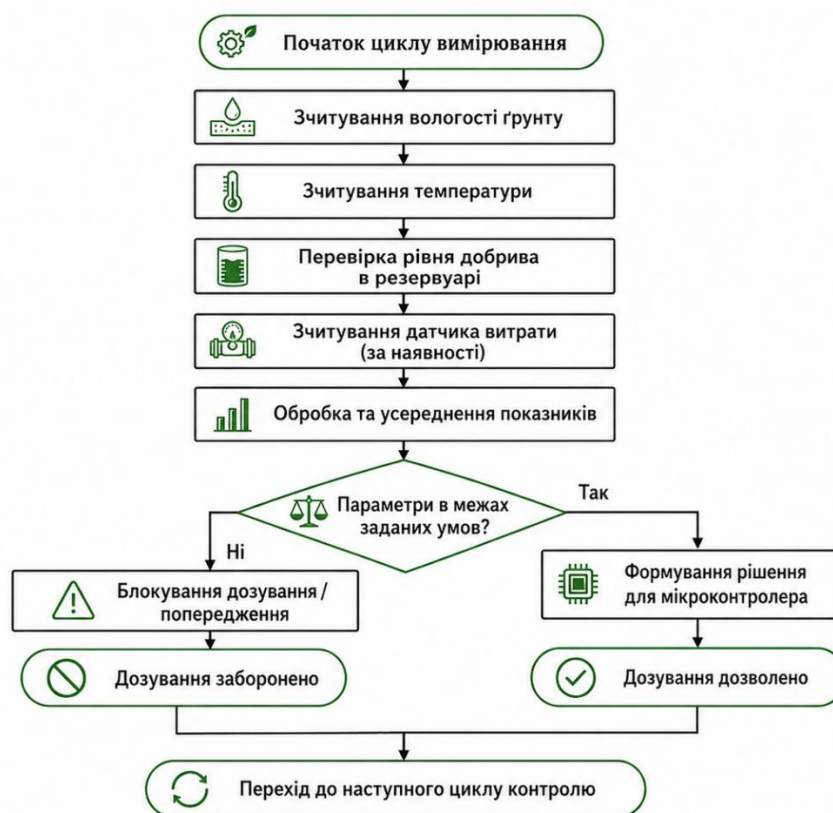


Рисунок 2.3 – Логіка обробки даних із сенсорного блоку в модулі автоматизованого внесення добрив

Складові сенсорного блоку є достатнім для створення функціонального прототипу. Основним сенсором виступає датчик вологості ґрунту, оскільки він безпосередньо пов'язаний із параметрами середовища [20]. Датчик температури виконує допоміжну функцію контролю умов роботи [21]. Датчик рівня добрива підвищує надійність системи, оскільки не дозволяє запускати виконавчий механізм за відсутності рідини [22]. Датчик витрати може бути використаний для експериментальної оцінки об'єму подачі, але потребує окремого калібрування [23].

Для апаратно-програмного модуля автоматизованого внесення добрив доцільно сформувати сенсорний блок із датчика вологості ґрунту, датчика температури, датчика рівня добрива та, за потреби, датчика витрати рідини. Такий набір компонентів забезпечує контроль основних параметрів середовища та робочого процесу, є сумісним з Arduino Uno R3 і дає змогу реалізувати базовий алгоритм автоматизованого дозування [20, 23]. Вибрані сенсори відповідають

рівню бакалаврського прототипу, оскільки поєднують доступність, простоту підключення та достатню функціональність для перевірки роботи модуля.

2.3 Формування виконавчої частини системи дозування добрив

Виконавча частина апаратно-програмного модуля є тією складовою системи, яка безпосередньо реалізує фізичний процес подачі добрив у робочу зону. Якщо сенсорний блок забезпечує отримання вхідних даних, а мікроконтролер виконує їх обробку, то виконавчий блок перетворює керуючі сигнали Arduino Uno R3 у реальну механічну дію – увімкнення насоса, відкриття клапана або приведення в рух дозувального механізму. У межах цієї роботи виконавчу частину доцільно розглядати як поєднання силового модуля, дозувального пристрою, елементів живлення та засобів електричного захисту.

Для модуля автоматизованого внесення добрив найбільш доцільним є використання виконавчого механізму, який може забезпечити контрольовану подачу рідкого добрива. Такий варіант є зручним для бакалаврського прототипу, оскільки рідке добриво простіше дозувати за часом роботи насоса або за кількістю імпульсів датчика витрати. Як основний виконавчий елемент можна використати перистальтичний насос або малогабаритний 12 В насос, а як допоміжний елемент – електромагнітний клапан, який відкриває або перекриває канал подачі. Перистальтичні насоси застосовуються для подачі невеликих об'ємів рідини, а в технічній документації DFRobot зазначено, що цифровий перистальтичний насос може керуватися сигналом типу PPM і є сумісним з Arduino та іншими мікроконтролерами [24].

Одним із найбільш придатних варіантів для навчального прототипу є перистальтичний насос. Його особливість полягає в тому, що рідина переміщується всередині гнучкої трубки під дією роликів, які послідовно стискають її та проштовхують рідину в напрямку виходу. Перевагою такого рішення є те, що добриво не контактує безпосередньо з механічними частинами насоса, а проходить лише через трубку. Це спрощує обслуговування системи,

зменшує ризик забруднення робочих елементів і робить насос зручним для дозування невеликих об'ємів рідини. У технічному описі DFRobot для цифрового перистальтичного насоса вказано, що він призначений для кількісної подачі рідини, має просту структуру, низький рівень шуму та може використовуватися в системах гідропоніки й краплинного поливу [24]

Загальну структуру виконавчої частини системи дозування добрив подано на рисунку 2.4.



Рисунок 2.4 – Структура виконавчої частини системи дозування добрив [24]

Для перекривання або відкривання каналу подачі рідини може застосовуватися електромагнітний клапан. Він доцільний у тих випадках, коли потрібно не регулювати швидкість подачі, а забезпечити чіткий режим «відкрито / закрито». Наприклад, клапан може встановлюватися після насоса або на виході з резервуара для запобігання самовільному витіканню добрива. У документації DFRobot для клапана FIT0617 зазначено, що він призначений для керування потоком рідини, має номінальну напругу 12 В DC, споживаний струм 100 мА та може відкриватися або закриватися під керуванням релейного модуля [25].

Оскільки Arduino Uno R3 не може безпосередньо жити насос або клапан, між мікроконтролером і виконавчим механізмом необхідно встановити силовий модуль. У простому варіанті для цього можна використати релейний модуль 5 В. Реле працює як електрично керований перемикач: слабкий сигнал з Arduino керує контактами, через які подається живлення на навантаження. У навчальних матеріалах щодо підключення реле до Arduino зазначено, що модуль SRD-05VDC-SL-C має силові контакти NC, C, NO для підключення навантаження та низьковольтні контакти GND, VCC, Signal для підключення до Arduino [26].

Альтернативним рішенням є MOSFET-ключ, який доцільно використовувати для керування двигуном насоса або іншим навантаженням постійного струму. На відміну від реле, MOSFET не має механічних контактів, працює швидше, не створює характерного клацання та краще підходить для частого вмикання або широтно-імпульсного керування. Для таких задач може застосовуватися логічний N-канальний MOSFET, наприклад IRLZ44N, який у технічній документації Infineon подано як силовий MOSFET у корпусі TO-220 [27]. У разі використання MOSFET до схеми бажано додати захисний діод паралельно індуктивному навантаженню, щоб зменшити вплив імпульсів самоіндукції під час вимикання насоса або клапана.

Порівняльну характеристику можливих виконавчих рішень подано в таблиці 2.3.

Таблиця 2.3 – Порівняння виконавчих механізмів для системи дозування добрив

Виконавчий елемент	Призначення	Переваги	Обмеження	Доцільність використання
Перистальтичний насос	Дозована подача рідкого добрива	Добриво проходить через трубку, зручно дозувати малі об'єми	Потребує калібрування продуктивності	Основний варіант для прототипу
Міні-насос 12 В	Подача рідини з резервуара	Доступність, проста схема керування	Менша точність без датчика витрати	Можливий бюджетний варіант

Електромагнітний клапан	Відкривання або перекривання потоку	Чіткий режим «відкрито / закрито»	Самостійно не створює тиск подачі	Допоміжний елемент
-------------------------	-------------------------------------	-----------------------------------	-----------------------------------	--------------------

Продовження таблиці 2.3

Виконавчий елемент	Призначення	Переваги	Обмеження	Доцільність використання
Сервопривід із заслінкою	Керування отвором для гранульованого добрива	Простий принцип роботи	Складніше забезпечити точне дозування	Доцільний для сипких добрив
Шнековий дозатор	Подача гранульованого добрива	Підходить для сипких речовин	Потребує механічного виготовлення вузла	Перспективний варіант модернізації

У межах цієї роботи найбільш обґрунтованим є використання насоса для подачі рідкого добрива, оскільки такий варіант є простішим у реалізації та тестуванні порівняно з механізмом для гранульованих речовин. Для керування насосом Arduino Uno R3 формує цифровий сигнал, який подається на силовий модуль. Якщо використовується реле, то сигнал Arduino переводить контакти реле в активний стан, після чого на насос подається напруга живлення. Якщо використовується MOSFET-ключ, то цифровий сигнал відкриває транзистор, і струм починає протікати через навантаження. У двох випадках мікроконтролер не живить насос безпосередньо, а лише керує силовим елементом.

Функціональна послідовність роботи виконавчої частини може бути такою: після отримання дозволу від програмного алгоритму Arduino активує силовий модуль; силовий модуль подає живлення на насос або клапан; добриво надходить із резервуара до робочої зони; після завершення заданого часу подачі або досягнення потрібного об'єму Arduino вимикає виконавчий механізм. Якщо в системі передбачено датчик витрати, то мікроконтролер може не лише вмикати насос на певний час, а й орієнтовно контролювати фактичний об'єм поданої рідини за імпульсами датчика.

Орієнтовну схему взаємодії Arduino Uno R3 із виконавчим механізмом подано на рисунку 2.5.

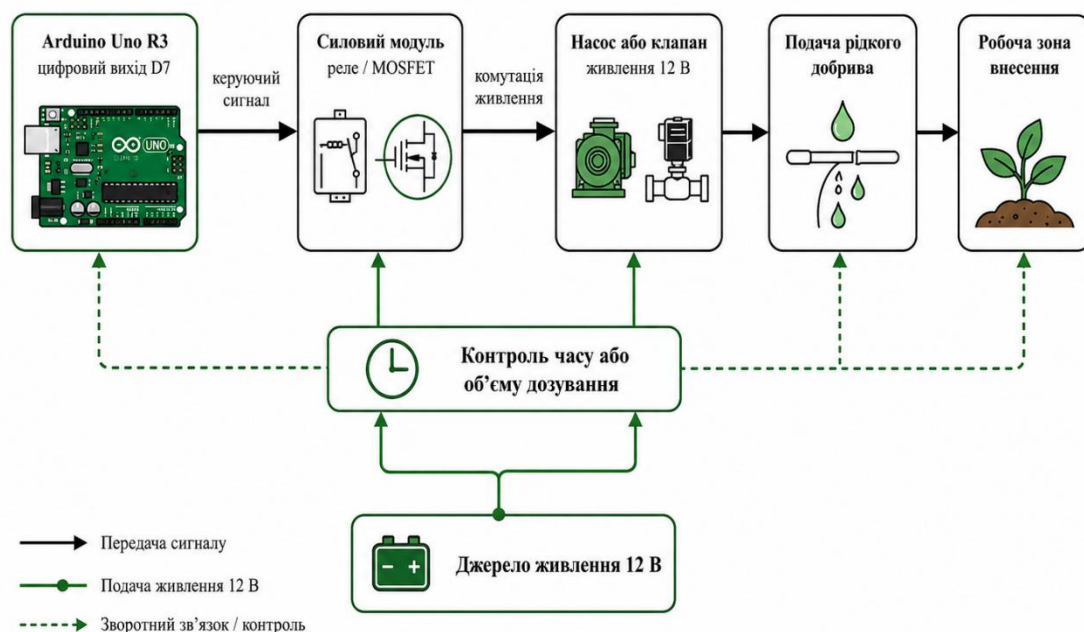


Рисунок 2.5 – Принцип взаємодії Arduino Uno R3 із виконавчим механізмом дозування [27]

Важливою умовою правильної роботи виконавчої частини є наявність окремого або достатньо потужного джерела живлення для насоса та інших силових елементів. Живлення Arduino через USB або малопотужний адаптер не можна використовувати для безпосереднього живлення виконавчих механізмів. Наприклад, у документації DFRobot для перистальтичного насоса вказано, що через споживання потужності близько 5 Вт бажано використовувати зовнішнє джерело живлення, оскільки USB-порт має обмежену потужність [24]. Тому в системі доцільно передбачити окрему лінію живлення для виконавчого механізму та спільну «землю» між Arduino і силовим модулем.

Також потрібно враховувати питання електричного захисту. Для індуктивних навантажень, таких як двигуни насосів або електромагнітні клапани, під час вимикання можуть виникати короточасні імпульси напруги. Щоб зменшити їхній вплив на мікроконтролер і силовий модуль, доцільно використовувати захисний діод, оптронну розв'язку релейного модуля,

запобіжник у ланцюзі живлення та стабілізоване джерело напруги. Такі заходи підвищують надійність роботи пристрою та зменшують ризик пошкодження електронних компонентів.

Виконавча частина модуля автоматизованого внесення добрив повинна забезпечувати контрольовану подачу речовини відповідно до сигналів, сформованих мікроконтролером. Для бакалаврського прототипу найбільш доцільним є використання насоса для рідкого добрива, силового модуля на основі реле або MOSFET-ключа, а також, за потреби, електромагнітного клапана для перекривання потоку. Така структура є технічно простою, доступною для реалізації та достатньою для перевірки алгоритму автоматизованого дозування.

2.4 Розробка структурної та принципової схеми апаратно-програмного модуля автоматизованого внесення добрив

Розробка структурної та принципової схеми є важливим етапом створення апаратно-програмного модуля автоматизованого внесення добрив, оскільки саме на цьому етапі визначається взаємодія всіх функціональних блоків системи, порядок передавання сигналів, спосіб живлення компонентів і логіка підключення сенсорів та виконавчих механізмів до мікроконтролера. Структурна схема дає змогу подати загальну архітектуру пристрою, а принципова схема уточнює електричні з'єднання між окремими модулями.

У межах цієї роботи апаратно-програмний модуль автоматизованого внесення добрив побудовано на базі мікроконтролерної плати Arduino Uno R3. Вона виконує функцію центрального блока керування, який отримує дані від сенсорів, обробляє їх відповідно до програмного алгоритму та формує керуючі сигнали для виконавчого механізму дозування. До складу системи входять сенсорний блок, виконавчий блок, силовий модуль, блок живлення, засоби індикації та, за потреби, комунікаційний модуль для передавання даних [17, 20].

Структурна схема модуля відображає логічний зв'язок між основними частинами пристрою. Сенсорний блок передає до Arduino Uno R3 інформацію

про вологість ґрунту, температуру, рівень добрива в резервуарі та, за наявності, витрату рідини. Мікроконтролер аналізує отримані значення та визначає, чи потрібно активувати виконавчий механізм. Якщо умови відповідають заданим параметрам, Arduino подає сигнал на силовий модуль, який вмикає насос, електромагнітний клапан або інший дозувальний механізм [24, 25].

Загальну структурну схему апаратно-програмного модуля автоматизованого внесення добрив подано на рисунку 2.6.

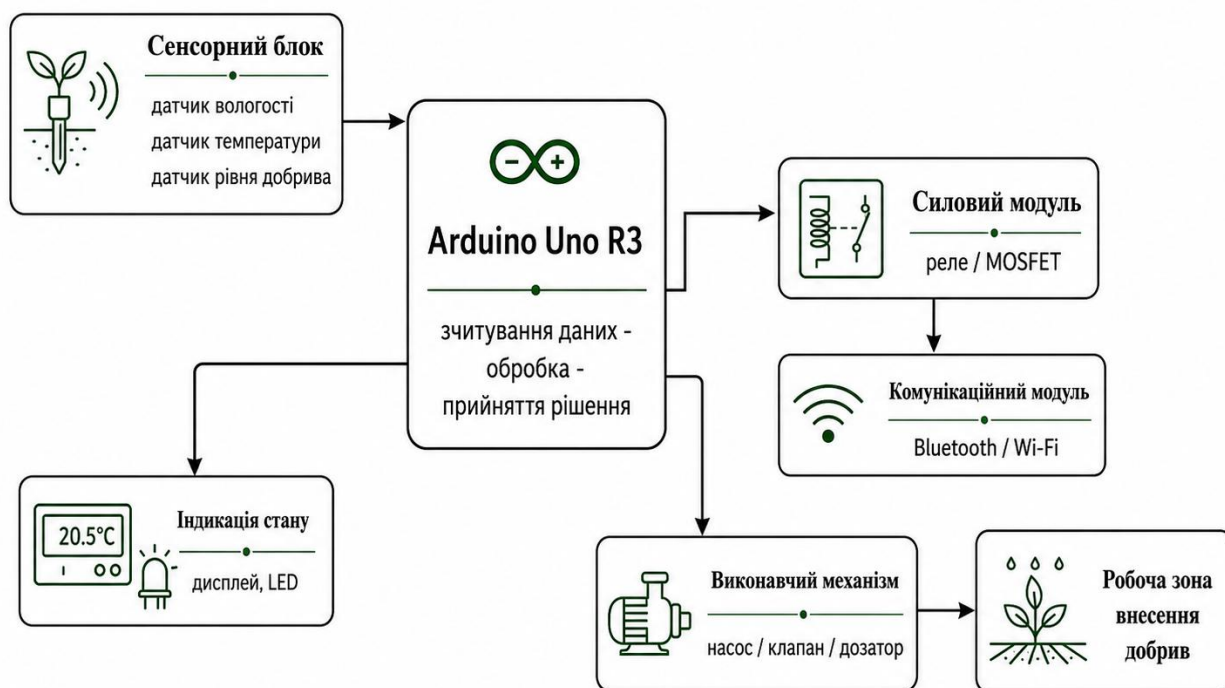


Рисунок 2.6 – Структурна схема апаратно-програмного модуля автоматизованого внесення добрив [25]

Зі структурної схеми видно, що Arduino Uno R3 є центральним елементом системи. Всі інші компоненти або передають до нього інформацію, або отримують від нього керуючі сигнали. Такий принцип побудови є доцільним для бакалаврського прототипу, оскільки він забезпечує зрозумілу архітектуру, просте налагодження та можливість поетапної перевірки працездатності окремих

блоків. Спочатку можна перевірити роботу сенсорів, потім протестувати індикацію, після цього - силовий модуль і виконавчий механізм.

Принципова схема підключення деталізує, до яких контактів Arduino Uno R3 підключаються сенсори, індикація та силові елементи. Ємнісний датчик вологості ґрунту доцільно підключити до аналогового входу A0, оскільки його вихідний сигнал змінюється залежно від вологості ґрунту [20]. Датчик температури DS18B20 підключається до цифрового входу з використанням підтягувального резистора, оскільки він працює за інтерфейсом 1-Wire [21]. Датчик рівня добрива може бути підключений до цифрового входу Arduino як дискретний сигнал, що вказує на наявність або відсутність рідини в резервуарі [22].

Виконавчий механізм, наприклад насос або електромагнітний клапан, не підключається безпосередньо до Arduino Uno R3. Це пояснюється тим, що цифрові виходи мікроконтролера призначені лише для формування керуючих сигналів і не можуть забезпечити достатній струм для живлення силового навантаження. Тому між Arduino та виконавчим механізмом використовується релейний модуль або MOSFET-ключ [26, 27]. Такий підхід дозволяє відокремити логічну частину системи від силової та підвищити надійність пристрою.

Принципову схему підключення основних компонентів модуля подано на рисунку 2.7.

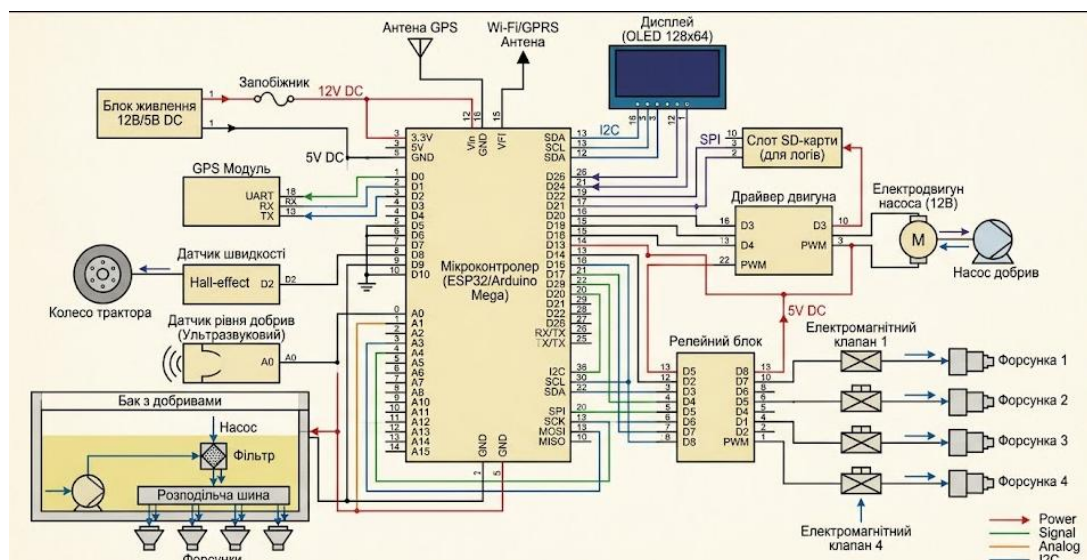


Рисунок 2.7 – Принципова схема підключення компонентів апаратно-програмного модуля автоматизованого внесення добрив

Для кращого розуміння електричних з'єднань доцільно подати призначення основних контактів Arduino Uno R3 у вигляді таблиці. Це полегшує подальше складання прототипу та дає змогу уникнути помилок під час монтажу компонентів.

Таблиця 2.4 – Призначення контактів Arduino Uno R3 у модулі автоматизованого внесення добрив

Контакт Arduino Uno R3	Підключений компонент	Тип сигналу	Призначення
A0	Датчик вологості ґрунту	Аналоговий	Зчитування рівня вологості ґрунту
D2	DS18B20	Цифровий, 1-Wire	Зчитування температури
D3	Датчик рівня добрива	Цифровий	Контроль наявності добрива в резервуарі
D4	Датчик витрати YF-S201	Імпульсний	Підрахунок імпульсів витрати рідини
D7	Реле або MOSFET	Цифровий вихід	Керування насосом або клапаном
A4	LCD I2C, SDA	I2C	Передавання даних на дисплей
A5	LCD I2C, SCL	I2C	Тактовий сигнал для дисплея
5V	Сенсори, дисплей, логічна частина	Живлення	Живлення малопотужних компонентів
GND	Усі компоненти	Загальна земля	Формування спільного електричного потенціалу

Під час розробки принципової схеми важливо враховувати особливості живлення компонентів. Arduino Uno R3 та малопотужні сенсори можуть працювати від напруги 5 В, тоді як насос або електромагнітний клапан зазвичай потребують окремого джерела живлення 12 В. Тому в схемі доцільно використовувати окрему лінію живлення для виконавчого механізму. При цьому потрібно забезпечити спільне з'єднання GND між Arduino, силовим модулем і джерелом живлення, інакше керуючий сигнал може працювати нестабільно або взагалі не сприйматися силовим модулем.

Окрему увагу необхідно приділити захисту електронних компонентів. Під час вимикання індуктивних навантажень, зокрема насоса або електромагнітного

клапана, можуть виникати імпульси зворотної напруги. Для зменшення їхнього впливу доцільно використовувати захисний діод, запобіжник у ланцюзі живлення, стабілізатор напруги та, за можливості, релейний модуль з оптронною розв'язкою. Це дозволяє зменшити ризик пошкодження Arduino Uno R3 та підвищити загальну надійність системи [26, 27].

Функціонування розробленої схеми можна описати так: після запуску системи Arduino Uno R3 ініціалізує всі підключені компоненти, зчитує показники сенсорів, перевіряє рівень добрива в резервуарі та визначає, чи дозволено виконувати дозування. Якщо рівень добрива достатній, а показники середовища відповідають установленим умовам, мікроконтролер активує вихід D7. Сигнал із цього виходу надходить на силовий модуль, який подає живлення на насос або клапан. Після завершення заданого часу роботи виконавчий механізм вимикається, а система повертається до режиму моніторингу.

Розроблена структурна та принципова схема забезпечує узгоджену роботу сенсорного, керуючого, силового та виконавчого блоків. Структурна схема відображає загальну архітектуру апаратно-програмного модуля, а принципова схема конкретизує підключення компонентів до Arduino Uno R3. Запропоноване схемотехнічне рішення є достатнім для створення бакалаврського прототипу автоматизованого внесення добрив, оскільки поєднує простоту реалізації, доступність компонентів, можливість подальшого розширення та відповідність основним вимогам до мікроконтролерних систем керування.

РОЗДІЛ 3

ПРАКТИЧНА РЕАЛІЗАЦІЯ МОДУЛЯ АВТОМАТИЗОВАНОГО ВНЕСЕННЯ ДОБРІВ

3.1 Розробка алгоритму функціонування апаратно-програмного модуля

Після визначення апаратної структури модуля автоматизованого внесення добрив важливим етапом є розробка алгоритму його функціонування. На відміну від попереднього розділу, де основна увага була зосереджена на виборі компонентів, схемотехнічній побудові та підключенні елементів, у цьому розділі розглядається практична логіка роботи системи, програмне керування, порядок складання дослідного зразка та перевірка його працездатності.

Алгоритм роботи апаратно-програмного модуля побудований за циклічним принципом. Це означає, що після запуску система постійно виконує послідовність дій: ініціалізує підключені модулі, зчитує параметри із сенсорів, перевіряє умови внесення добрив, приймає рішення про дозування, керує виконавчим механізмом і повертається до повторного контролю. Такий підхід є доцільним для мікроконтролерних систем, оскільки Arduino Uno R3 працює в безперервному циклі виконання основної програми.

У розробленому модулі основними вхідними параметрами є значення вологості ґрунту, стан датчика рівня добрива в резервуарі та, за наявності, показники датчика температури або витрати рідини. На основі цих даних програма визначає, чи дозволено запускати дозування. Якщо рівень добрива в резервуарі є недостатнім, система блокує роботу насоса або клапана, оскільки запуск виконавчого механізму без рідини може призвести до його перегрівання або некоректної роботи. Якщо рівень добрива достатній, а показники вологості відповідають заданим умовам, мікроконтролер активує силовий модуль на визначений проміжок часу.

Загальну послідовність функціонування апаратно-програмного модуля подано на рисунку 3.1.

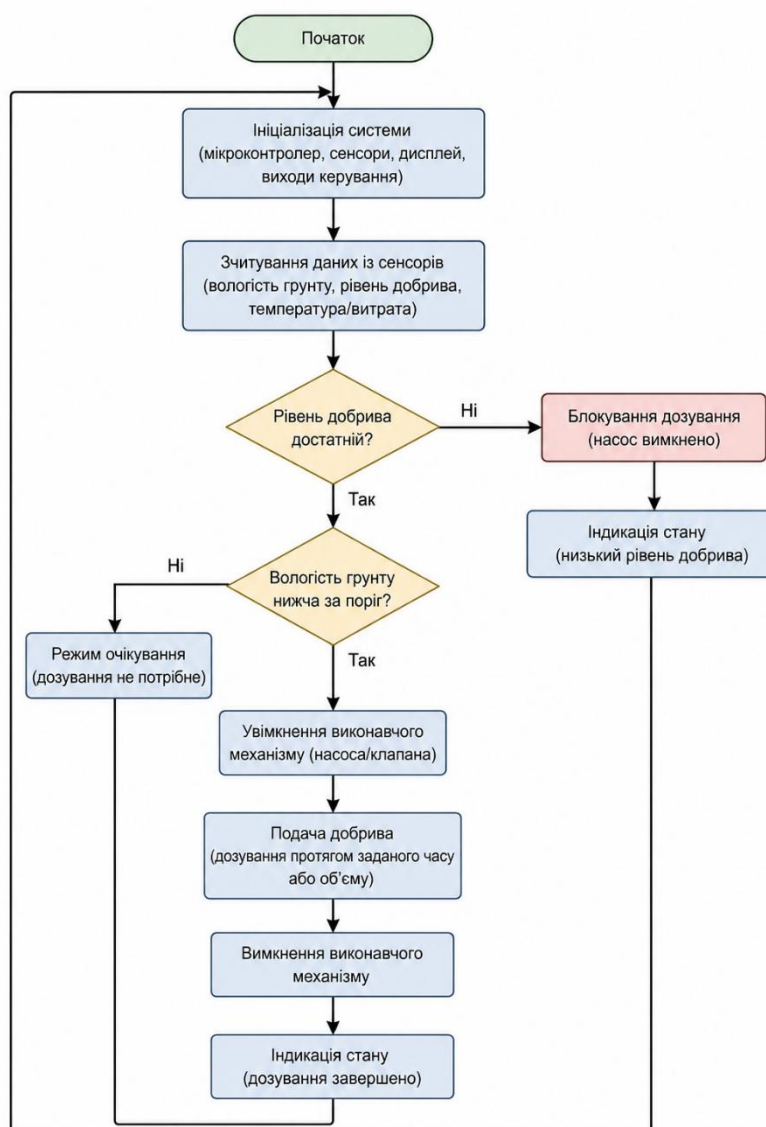


Рисунок 3.1 – Алгоритм функціонування апаратно-програмного модуля автоматизованого внесення добрив

Особливістю запропонованого алгоритму є наявність блокування дозування за відсутності добрива в резервуарі. Це підвищує надійність роботи пристрою, оскільки система не лише виконує подачу речовини, а й контролює базові умови безпечної експлуатації. Додатково в алгоритмі передбачено індикацію стану системи, завдяки якій користувач може бачити, у якому режимі перебуває модуль: очікування, дозування, відсутність добрива або завершення циклу.

3.2 Розробка програмного забезпечення для мікроконтролера Arduino Uno R3

Програмне забезпечення для мікроконтролера Arduino Uno R3 призначене для реалізації логіки автоматизованого керування процесом внесення добрив. Його основними функціями є зчитування вхідних сигналів із сенсорного блоку, обробка отриманих значень, порівняння їх із заданими порогами, формування керуючого сигналу для силового модуля та виведення інформації про стан системи на засоби індикації.

Структуру програмного забезпечення модуля подано на рисунку 3.2.

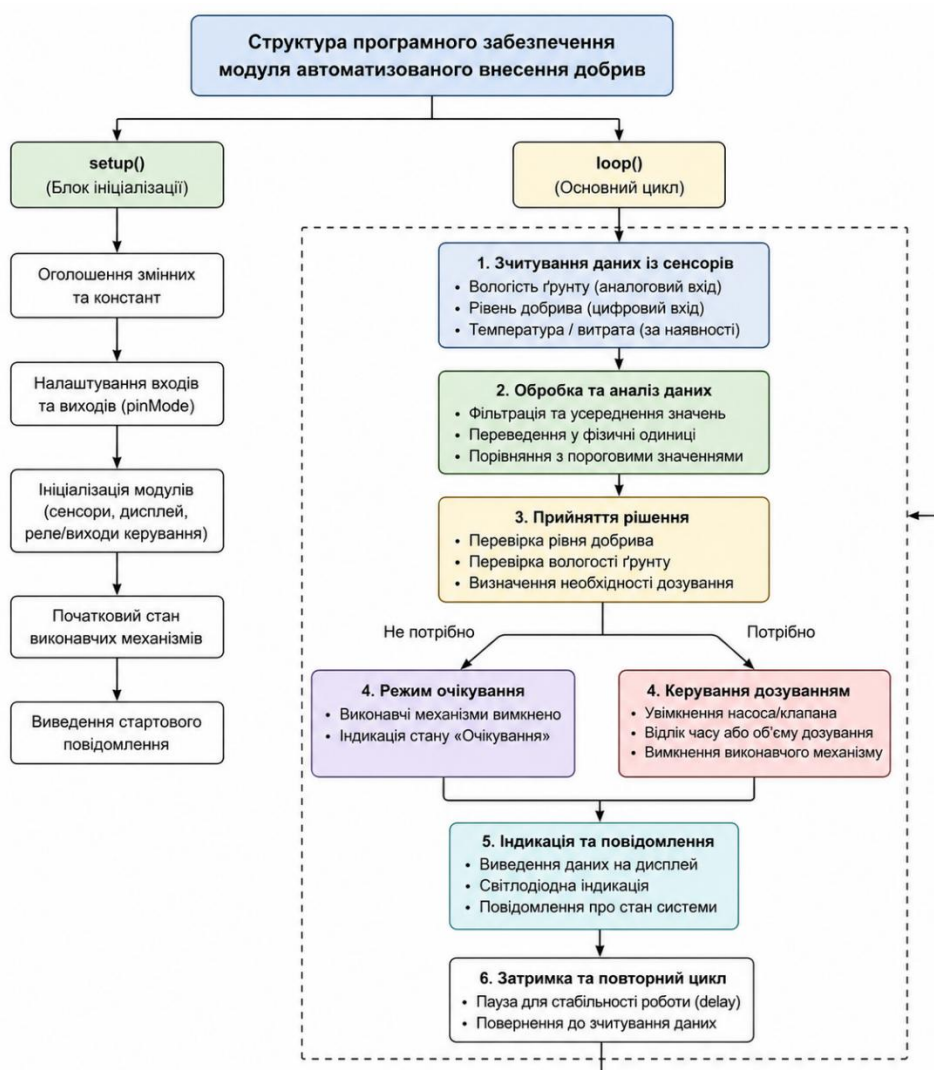


Рисунок 3.2 – Структура програмного забезпечення модуля автоматизованого внесення добрив

Структура програми складається з двох основних частин: блоку початкового налаштування та основного циклу роботи. У блоці початкового налаштування задаються номери контактів Arduino, режими роботи входів і виходів, початковий стан виконавчого механізму, параметри дисплея та змінні для збереження показників сенсорів. В основному циклі програма багаторазово зчитує показники, аналізує їх і приймає рішення щодо запуску або блокування дозування.

Програму доцільно поділити на такі логічні блоки: блок оголошення змінних, блок ініціалізації, блок зчитування даних, блок перевірки умов дозування, блок керування виконавчим механізмом, блок індикації та блок повернення до моніторингу. Такий поділ спрощує подальше налагодження програми, оскільки кожен блок можна перевіряти окремо.

У реальній програмі для Arduino замість текстових команд використовуються функції `pinMode()`, `digitalRead()`, `analogRead()`, `digitalWrite()` та часові затримки або таймери. Для зчитування аналогового сигналу з датчика вологості застосовується функція `analogRead()`, яка повертає числове значення у діапазоні від 0 до 1023. Це значення можна перетворити у відсоткову шкалу вологості або використовувати безпосередньо для порівняння з порогом.

Для керування виконавчим механізмом використовується цифровий вихід Arduino. Якщо на цей вихід подається логічна одиниця, силовий модуль активується та подає живлення на насос або клапан. Якщо на виході встановлюється логічний нуль, виконавчий механізм вимикається. Такий принцип програмного керування є простим, наочним і достатнім для бакалаврського дослідного зразка.

3.3 Реалізація програмного керування процесом дозування добрив

Програмне керування процесом дозування добрив у розробленому модулі ґрунтується на перевірці умов, за яких дозволяється або забороняється подача речовини. Основною метою такого керування є забезпечення контрольованого

внесення добрив без постійної участі користувача. У цьому випадку мікроконтролер виконує функцію автоматичного регулятора, який порівнює поточні значення сенсорів із попередньо заданими умовами.

У межах розробки було передбачено два основні варіанти керування дозуванням: за часом роботи виконавчого механізму та за станом контрольованих параметрів. У першому випадку після отримання дозволу на внесення добрив насос або клапан вмикається на визначений проміжок часу, наприклад на 3-5 секунд. Такий спосіб є простим у реалізації та не потребує складних обчислень. У другому випадку система враховує додаткові умови, наприклад рівень добрива в резервуарі або значення вологості ґрунту.

Логіку програмного керування процесом дозування подано на рисунку 3.3.

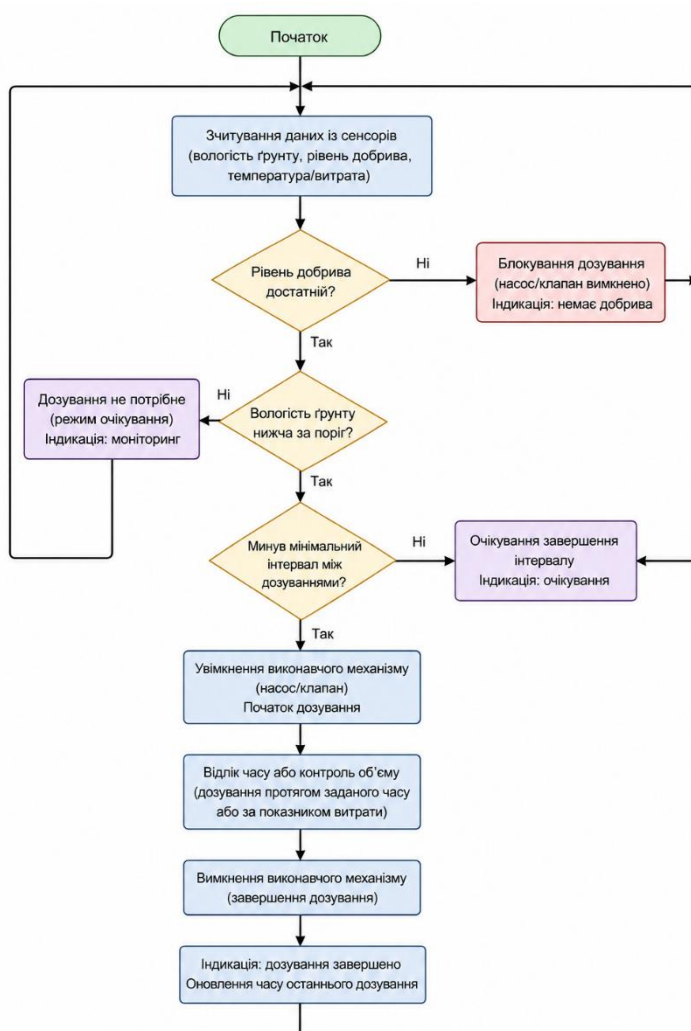


Рисунок 3.3 – Логіка програмного керування процесом дозування добрив

Під час роботи програма спочатку перевіряє стан датчика рівня добрива. Якщо датчик показує, що в резервуарі відсутня достатня кількість рідини, команда на запуск насоса не формується. Це дозволяє уникнути роботи виконавчого механізму без навантаження. Якщо рівень добрива достатній, система переходить до аналізу значення вологості ґрунту. У разі, коли вологість нижча за встановлений поріг, мікроконтролер формує сигнал на силовий модуль і запускає процес дозування.

Для уникнення надмірного внесення добрив у програмі доцільно передбачити часове обмеження роботи насоса. Наприклад, після кожного циклу дозування система може переходити в режим очікування на певний проміжок часу. Це потрібно для того, щоб рідина встигла розподілитися в ґрунті, а сенсор вологості міг зафіксувати зміну параметра. Без такої паузи система може кілька разів поспіль активувати насос, що призведе до перевитрати добрива.

Орієнтовну логіку дозволу на дозування можна описати так: дозування дозволяється лише тоді, коли резервуар містить достатню кількість добрива, сенсор вологості показує потребу у внесенні, виконавчий механізм не перебуває в режимі охолодження після попереднього циклу, а система не зафіксувала аварійного стану. Якщо хоча б одна з цих умов не виконується, подача добрив блокується.

Такий підхід забезпечує більш керовану роботу модуля порівняно з простим ручним увімкненням насоса. Програма не лише подає сигнал на виконавчий механізм, а й виконує елементарний контроль умов роботи. Це робить розроблений модуль ближчим до реальних автоматизованих систем, у яких важливими є не лише факт виконання дії, а й контроль її доцільності.

3.4 Апаратно-програмна реалізація модуля автоматизованого внесення добрив

Практична реалізація модуля внесення добрив передбачає складання апаратної частини, завантаження програмного забезпечення в мікроконтролер,

перевірку електричних з'єднань і пробний запуск системи. На цьому етапі основна увага приділяється не повторному опису вибору компонентів, а саме процесу створення працездатного зразка на основі вже розробленої схеми.

Монтаж дослідного зразка доцільно виконувати поетапно. Спочатку на монтажній основі або макетній платі розміщується Arduino Uno R3. Далі підключається сенсорний блок, після чого перевіряється коректність зчитування значень у середовищі Arduino IDE через послідовний порт. Наступним етапом є підключення дисплея або світлодіодної індикації. Після перевірки вхідних та інформаційних елементів до системи підключається силовий модуль, а вже через нього - насос, клапан або інший виконавчий механізм.

Особливу увагу під час створення дослідного зразка потрібно приділити організації живлення. Arduino та малопотужні сенсори можуть живитися від напруги 5 В, тоді як виконавчий механізм потребує окремої лінії 12 В. Тому живлення виконавчої частини не повинно подаватися безпосередньо з плати Arduino. У схемі необхідно забезпечити спільну землю між джерелом живлення, Arduino та силовим модулем. Це потрібно для правильної передачі керуючого сигналу.

Етапи створення модуля наступні:

1. Підготовка компонентів (рис. 3.4).

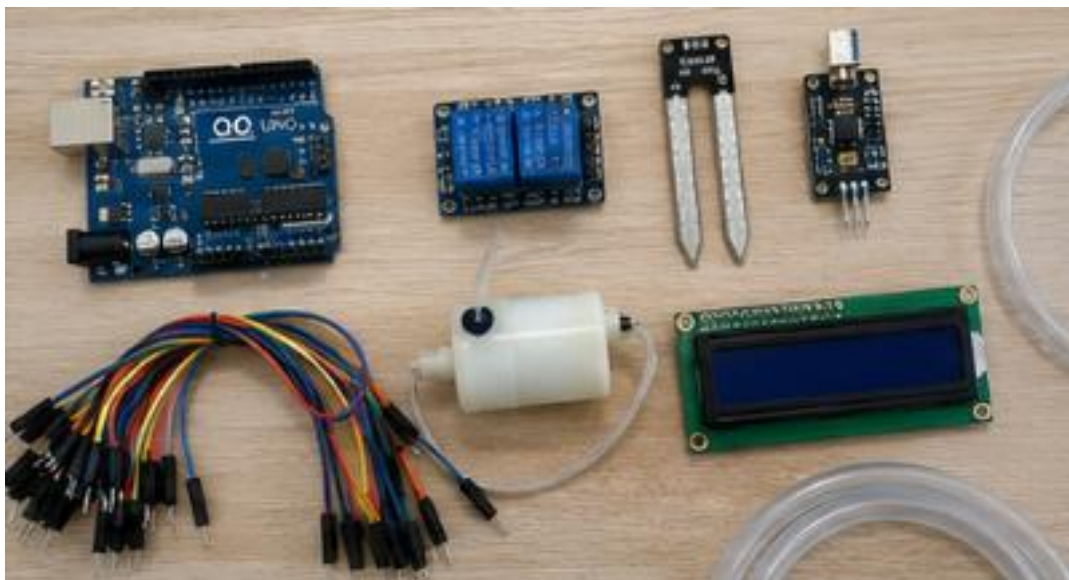


Рисунок 3.4 – Компоненти модуля

2. Монтаж та підключення електронної частини (рис. 3.5).

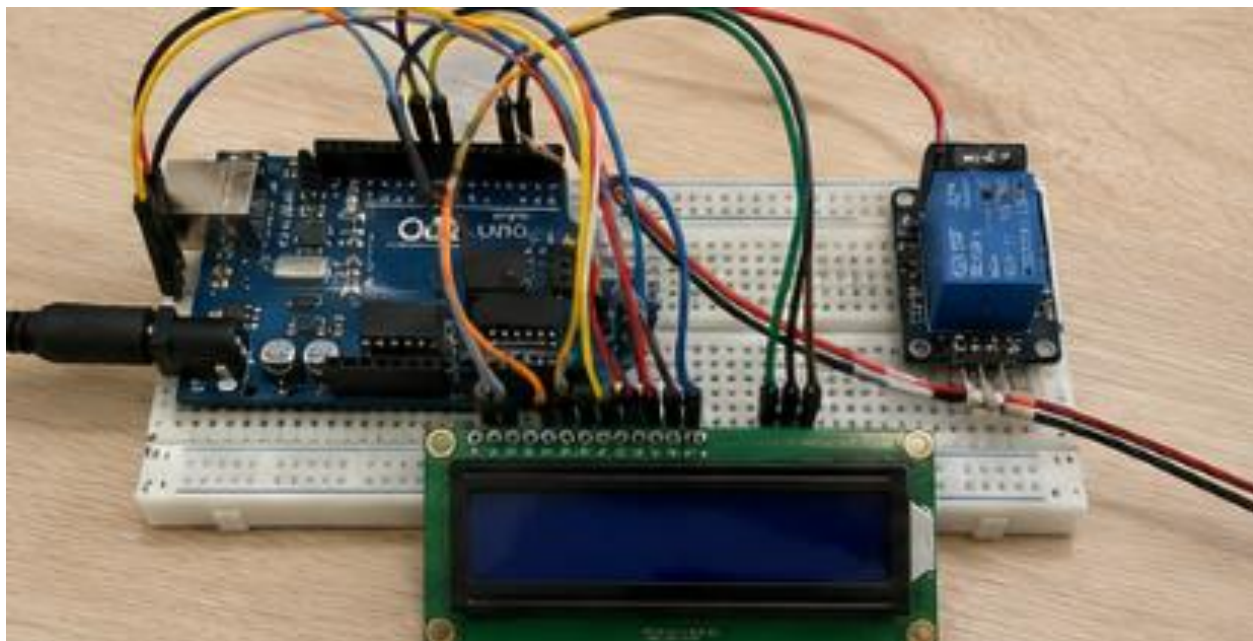


Рисунок 3.5 – Монтаж та підключення компонентів модуля

3. Підключення виконавчого механізму (рис. 3.6).

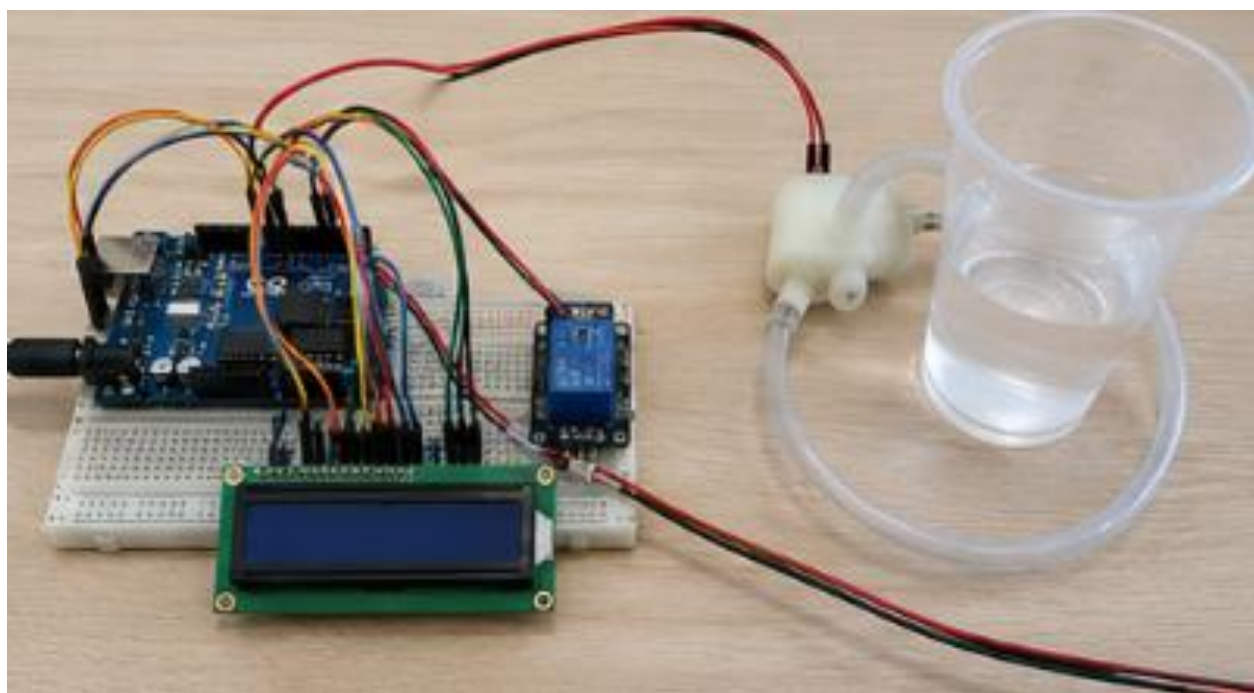


Рисунок 3.6 – Монтаж та підключення компонентів модуля

4. Підключення сенсорів і датчиків (рис. 3.7).

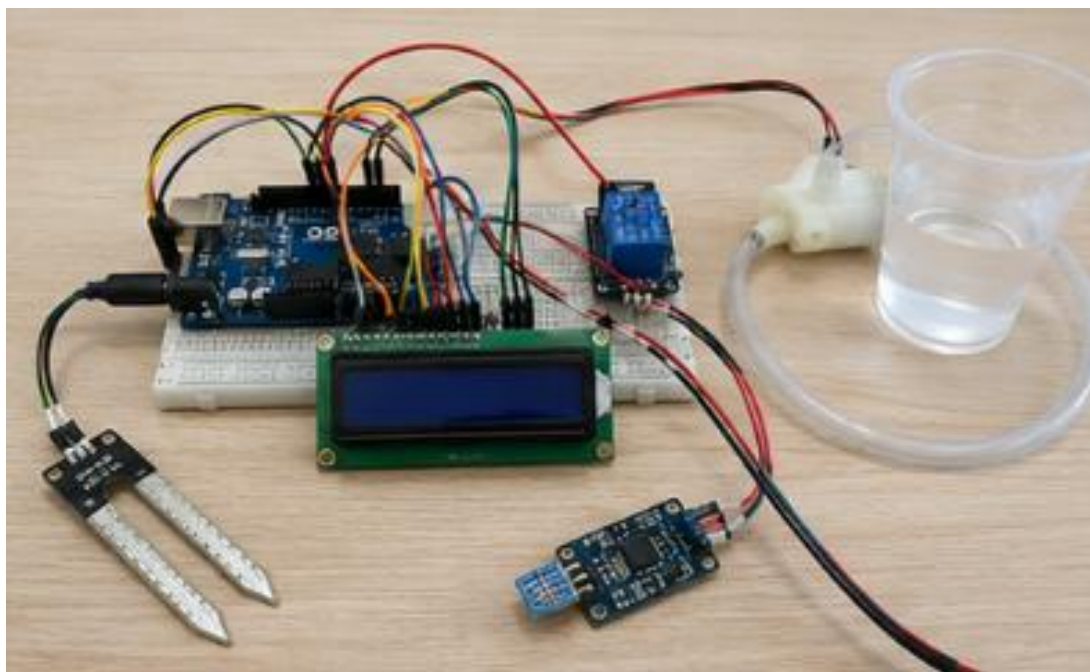


Рисунок 3.7 – Монтаж та підключення компонентів модуля

5. Перевірка роботи системи (рис. 3.8).

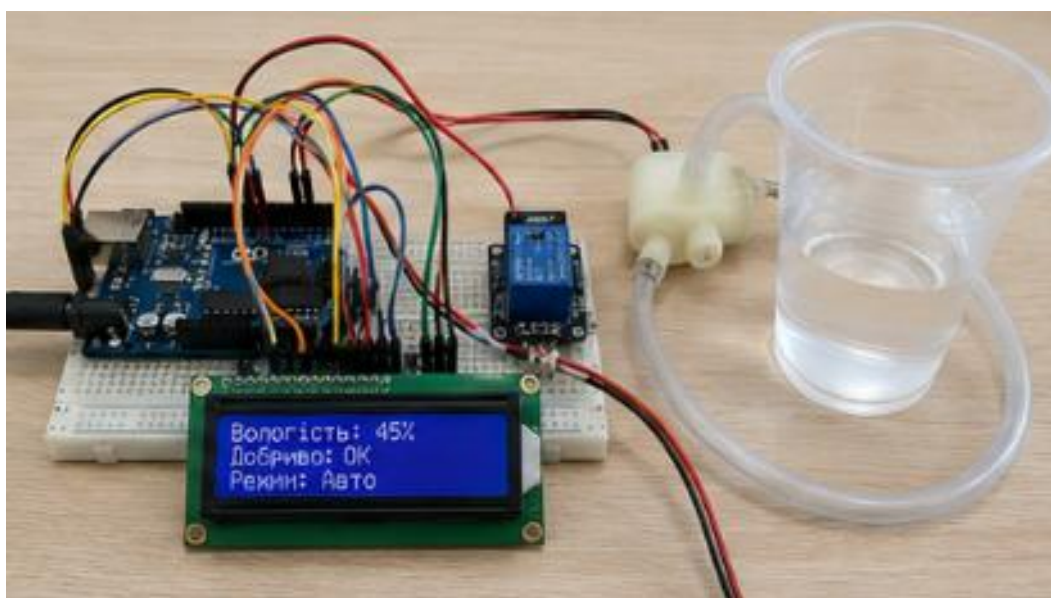


Рисунок 3.8 – Монтаж та підключення компонентів модуля

Практичне складання модуля можна описати так. На першому етапі перевіряється працездатність Arduino Uno R3 шляхом завантаження тестової програми. На другому етапі підключається датчик вологості ґрунту та перевіряється зміна його показників у сухому й зволоженому середовищі. На

третьому етапі підключається датчик рівня добрива, який має фіксувати наявність або відсутність рідини в резервуарі. На четвертому етапі підключається силовий модуль і виконавчий механізм. На п'ятому етапі система перевіряється в цілісному режимі: сенсорні дані обробляються програмою, після чого виконується або блокується подача добрива.

На основі схеми виконавчої частини система працює таким чином: Arduino Uno R3 формує керуючий сигнал, силовий модуль комутує живлення, виконавчий механізм отримує напругу 12 В, добриво з резервуара подається до робочої зони, після чого система повертається до режиму моніторингу. Наявність захисного діода або запобіжника підвищує безпеку роботи силової частини, а індикація дозволяє контролювати поточний стан пристрою.

У процесі створення модуля важливо не лише правильно підключити компоненти, а й забезпечити механічну зручність конструкції. Резервуар із добривом має бути розміщений так, щоб трубка подачі не перегибалася, а насос або клапан були доступні для обслуговування. Проводи сигнальних ліній бажано відокремлювати від силових проводів живлення виконавчого механізму, щоб зменшити вплив електричних завад на сенсорні показники.

3.5 Аналіз результатів експериментальної перевірки та оцінювання ефективності роботи модуля

Результати експериментальної перевірки дають змогу оцінити, наскільки розроблений апаратно-програмний модуль відповідає поставленій меті. Основними критеріями оцінювання є коректність зчитування даних із сенсорів, правильність прийняття програмного рішення, стабільність роботи виконавчого механізму, наявність блокування в аварійних умовах та зручність контролю стану системи користувачем.

За результатами тестування можна зробити висновок, що запропонована логіка роботи забезпечує базову автоматизацію процесу внесення добрив. Система здатна самостійно перевіряти умови роботи, визначати потребу в

дозуванні та активувати виконавчий механізм лише за наявності дозволених умов. Особливо важливим є те, що програма блокує роботу насоса за відсутності добрива в резервуарі. Це підвищує надійність дослідного зразка і зменшує ризик пошкодження виконавчого механізму.

Позитивним результатом також є можливість налаштування порогового значення вологості та тривалості дозування. Завдяки цьому модуль може бути адаптований до різних умов експериментального використання. Наприклад, для сухого ґрунту можна встановити менший поріг спрацювання, а для більш вологого середовища – інший режим. Це робить систему гнучкішою порівняно з простим пристроєм ручного керування.

Водночас під час оцінювання роботи модуля потрібно враховувати певні обмеження. Дозування за часом роботи насоса є простим, але не завжди абсолютно точним способом, оскільки фактична кількість поданої рідини залежить від продуктивності насоса, стану трубок, рівня рідини в резервуарі та стабільності живлення. Для підвищення точності в майбутньому доцільно використовувати датчик витрати або виконати калібрування насоса для різних режимів роботи.

Узагальнену оцінку роботи системи подано в таблиці 3.4.

Таблиця 3.1 – Оцінювання ефективності роботи апаратно-програмного модуля

Критерій оцінювання	Результат перевірки	Оцінка
Зчитування показників вологості	Показники змінюються залежно від стану ґрунту	Працездатно
Контроль рівня добрива	Система фіксує наявність або відсутність рідини	Працездатно
Програмне прийняття рішення	Дозування запускається лише за заданих умов	Працездатно
Керування насосом або клапаном	Виконавчий механізм вмикається через силовий модуль	Працездатно
Індикація стану	Користувач отримує повідомлення про режим роботи	Працездатно
Захист від роботи без добрива	Насос блокується за порожнього резервуара	Реалізовано
Точність дозування	Залежить від калібрування насоса	Потребує вдосконалення

Отримані результати підтверджують доцільність використання Arduino Uno R3 для створення навчально-дослідного модуля автоматизованого внесення добрив. Розроблена система не є промисловим комплексом точного землеробства, однак вона демонструє основні принципи автоматизації агротехнічного процесу: зчитування даних, аналіз параметрів, керування виконавчим механізмом і контроль стану системи.

Подальше вдосконалення розробки може бути пов'язане з додаванням бездротового зв'язку, мобільного застосунку, датчика рН, датчика електропровідності розчину, системи збереження статистики та точнішого контролю об'єму внесеного добрива. Також перспективним є використання ESP32 замість Arduino Uno R3 або як додаткового комунікаційного модуля, що дозволить передавати дані на смартфон чи веб-панель моніторингу.

В результаті виконання роботи розроблено алгоритм функціонування модуля, описано структуру програмного забезпечення, реалізовано логіку керування процесом дозування, визначено режими роботи та індикації, описано створення дослідного зразка і проведено експериментальну перевірку його працездатності. Запропоноване рішення підтверджує можливість створення компактного апаратно-програмного модуля для автоматизованого внесення добрив на базі мікроконтролера.

ВИСНОВКИ

У кваліфікаційній роботі було розроблено апаратно-програмний модуль для автоматизованого внесення добрив на базі мікроконтролера. У процесі виконання роботи встановлено, що автоматизація агротехнічних процесів є важливим напрямом підвищення ефективності сучасного аграрного виробництва, оскільки дає змогу забезпечити більш точне дозування добрив, зменшити перевитрати агрохімічних речовин, скоротити вплив людського чинника та підвищити контрольованість процесу живлення рослин. Особливо доцільним є використання мікроконтролерних систем, які поєднують сенсорний контроль, програмну обробку даних і керування виконавчими механізмами.

У роботі проаналізовано принципи побудови та застосування автоматизованих систем внесення добрив. Визначено, що такі системи можуть функціонувати на основі фіксованого дозування, сенсорного контролю, програмного керування або диференційованого внесення залежно від умов середовища. Для розроблюваного модуля найбільш доцільним виявився підхід, за якого рішення про внесення добрив приймається на основі показників сенсорів і заданих програмних умов. Такий варіант є технічно доступним, зрозумілим для реалізації в межах бакалаврської роботи та достатнім для створення дослідного зразка.

Розглянуто особливості використання мікроконтролерів у системах агротехнічного керування. Обґрунтовано, що мікроконтролер є центральним елементом апаратно-програмного модуля, оскільки саме він забезпечує зчитування сигналів із датчиків, аналіз отриманих значень, порівняння їх із заданими порогоми та формування керуючих сигналів для виконавчого механізму. Використання мікроконтролерної платформи дозволяє реалізувати гнучкий алгоритм роботи системи, передбачити різні режими функціонування та забезпечити взаємодію між сенсорним, силовим і виконавчим блоками.

У ході роботи обґрунтовано вибір апаратних компонентів для реалізації модуля автоматизованого внесення добрив. Як основну платформу керування

обрано Arduino Uno R3, оскільки вона має достатню кількість входів і виходів, підтримує роботу з аналоговими та цифровими сенсорами, є доступною, простою у програмуванні та придатною для створення навчально-дослідного прототипу. До складу сенсорного блоку запропоновано включити датчик вологості ґрунту, датчик температури, датчик рівня добрива в резервуарі та, за потреби, датчик витрати рідини. Такий набір компонентів дає змогу контролювати основні параметри середовища та робочого процесу.

Розроблено структурну та принципову схему підключення основних компонентів системи. Структурна схема відображає загальну архітектуру апаратно-програмного модуля, у якій Arduino Uno R3 взаємодіє із сенсорним блоком, силовим модулем, виконавчим механізмом, індикацією та джерелом живлення. Принципова схема конкретизує підключення датчиків, дисплея, релейного або MOSFET-модуля, насоса чи електромагнітного клапана. Визначено, що виконавчий механізм не повинен живитися безпосередньо від мікроконтролера, тому для його керування необхідно використовувати окремий силовий модуль і джерело живлення.

У роботі сформовано алгоритм функціонування апаратно-програмного модуля. Його логіка передбачає початкову ініціалізацію системи, зчитування даних із сенсорів, перевірку рівня добрива в резервуарі, аналіз вологості ґрунту, прийняття рішення щодо необхідності внесення добрив, увімкнення виконавчого механізму на заданий проміжок часу та повернення до режиму моніторингу. Важливим елементом алгоритму є блокування дозування за відсутності добрива, що підвищує надійність роботи пристрою та зменшує ризик пошкодження насоса або клапана.

Реалізовано програмне керування процесом дозування добрив. Програмна логіка передбачає обробку сигналів із датчиків, порівняння отриманих значень із пороговими параметрами, керування силовим модулем і виведення інформації про стан системи. Передбачено можливість роботи модуля в режимі моніторингу, активного дозування, очікування та блокування. Такий підхід дозволяє зробити процес внесення добрив більш контрольованим і зручним для користувача.

У процесі експериментальної перевірки оцінено працездатність розробленого модуля. Перевірка передбачала тестування сенсорного блоку, аналіз реакції системи на зміну вологості ґрунту, перевірку датчика рівня добрива, роботу силового модуля та виконавчого механізму. Результати тестування підтвердили, що модуль здатний зчитувати параметри середовища, приймати рішення щодо дозування та керувати подачею добрив відповідно до заданої логіки. Водночас встановлено, що для підвищення точності подачі добрив у майбутньому доцільно виконати калібрування насоса або використати датчик витрати рідини.

Практичне значення роботи полягає в тому, що запропонований апаратно-програмний модуль може бути використаний як основа для створення компактної автоматизованої системи внесення добрив. Розробка має навчальну, дослідну та прикладну цінність, оскільки демонструє принципи взаємодії мікроконтролера, сенсорів, силового модуля та виконавчого механізму в межах єдиної системи керування. Надалі модуль може бути вдосконалений шляхом додавання бездротового зв'язку, мобільного застосунку, датчиків рН та електропровідності, системи збереження даних і точнішого контролю об'єму внесеного добрива.

В результаті виконання роботи розроблено апаратно-програмний модуль для автоматизованого внесення добрив на базі мікроконтролера, обґрунтовано вибір його апаратних компонентів, сформовано структурну та принципову схему, розроблено алгоритм роботи, реалізовано програмне керування процесом дозування та проведено експериментальну перевірку працездатності системи. Отримані результати підтверджують доцільність використання мікроконтролерних рішень для автоматизації агротехнічних процесів і створюють основу для подальшого розвитку систем точного землеробства..

ПЕРЕЛІК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Precision agriculture techniques for optimizing chemical fertilizer use and environmental sustainability: a systematic review. *Frontiers in Agronomy*. URL: <https://www.frontiersin.org/journals/agronomy/articles/10.3389/fagro.2025.1665444/full> (date of access: 15.01.2026).
2. Precision agriculture technologies for soil site-specific nutrient management: a comprehensive review. *Artificial Intelligence in Agriculture*. URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2589721725000200> (date of access: 18.01.2026).
3. Variable rate fertilizer application technology for nutrient management: a review. *International Journal of Agricultural and Biological Engineering*. URL: <https://ijabe.org/index.php/ijabe/article/view/7671> (date of access: 20.01.2026).
4. Evolution and application of precision fertilizer: a review. *Agronomy*. URL: <https://www.mdpi.com/2073-4395/15/8/1939> (date of access: 24.01.2026).
5. Smart sensors and smart data for precision agriculture: a review. *Sensors*. URL: <https://www.mdpi.com/1424-8220/24/8/2647> (date of access: 28.01.2026).
6. Integration of smart sensors and IoT in precision agriculture: trends, challenges, and future prospects. *Frontiers in Plant Science*. URL: <https://www.frontiersin.org/journals/plant-science/articles/10.3389/fpls.2025.1587869/full> (date of access: 01.02.2026).
7. IoT-based smart irrigation management system to enhance agricultural practice. *Results in Engineering*. URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2590123024010843> (date of access: 05.02.2026).
8. Automatic equipment to increase sustainability in agricultural fertilization. *Agriculture*. URL: <https://www.mdpi.com/2077-0472/13/2/490> (date of access: 09.02.2026).
9. Optimization of irrigation and fertigation in smart agriculture: an IoT-based micro-services framework. *Smart Agricultural Technology*. URL:

<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2772375525001182> (date of access: 13.02.2026).

10. Development of a sensor-based embedded system for on-the-go variable-rate fertilizer applicator in maize crop. *Results in Engineering*. URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2590123025039040> (date of access: 17.02.2026).

11. Smart farming experiment: IoT-enhanced greenhouse design for rice cultivation with foliar and soil fertilization. *AgriEngineering*. URL: <https://www.mdpi.com/2624-7402/7/11/380> (date of access: 21.02.2026).

12. IoT-based smart fertigation system for citrus plants using fuzzy logic control. *Journal of Information Systems and Informatics*. URL: <https://journal-isi.org/index.php/isi/article/view/1318> (date of access: 25.02.2026).

13. IoT-based smart irrigation and fertilization system with realtime cloud integration. *Jurnal Nasional Teknik Elektro dan Teknologi Informasi*. URL: <https://journal.ugm.ac.id/v3/JNTETI/article/download/23124/6836/> (date of access: 01.03.2026).

14. Variable rate technology and its application in precision agriculture. *Gainesville : University of Florida IFAS Extension*. URL: <https://edis.ifas.ufl.edu> (date of access: 05.03.2026).

15. Arduino UNO R3. *Arduino Docs*. URL: <https://docs.arduino.cc/hardware/uno-rev3/> (date of access: 09.03.2026).

16. Arduino. Arduino UNO R3 Datasheet. *Arduino Docs*. URL: <https://docs.arduino.cc/resources/datasheets/A000066-datasheet.pdf> (date of access: 12.03.2026).

17. Arduino. Arduino IDE 2 Documentation. *Arduino Docs*. URL: <https://docs.arduino.cc/software/ide-v2> (date of access: 16.03.2026).

18. Arduino. Arduino Language Reference. *Arduino Docs*. URL: <https://docs.arduino.cc/language-reference/> (date of access: 19.03.2026).

19. Espressif Systems. ESP32-WROOM-32 Datasheet. *Espressif Systems*. URL: https://www.espressif.com/sites/default/files/documentation/esp32-wroom-32_datasheet_en.pdf (date of access: 23.03.2026).
20. DFRobot. Gravity: corrosion resistant capacitive soil moisture sensor for Arduino & Raspberry Pi. *DFRobot Wiki*. URL: <https://wiki.dfrobot.com/sen0193> (date of access: 26.03.2026).
21. Analog Devices. DS18B20 programmable resolution 1-Wire digital thermometer: Datasheet. *Analog Devices*. URL: <https://www.analog.com/media/en/technical-documentation/data-sheets/ds18b20.pdf> (date of access: 30.03.2026).
22. XKC Sensor. XKC-Y25 non-contact liquid level sensor. *XKC Sensor*. URL: <https://www.xkc-sensor.com/detail/1432.html> (date of access: 03.04.2026).
23. Adafruit. YF-S201 hall effect water flow meter / sensor. *Adafruit Learning System*. URL: <https://www.adafruit.com/product/828> (date of access: 07.04.2026).
24. DFRobot. Gravity: digital peristaltic pump SKU: DFR0523. *DFRobot Wiki*. URL: <https://wiki.dfrobot.com/DFR0523> (date of access: 11.04.2026).
25. DFRobot. Liquid flow control solenoid valve SKU: FIT0617. *DFRobot Wiki*. URL: <https://wiki.dfrobot.com/fit0617> (date of access: 15.04.2026).
26. Infineon Technologies. IRLZ44N power MOSFET: datasheet. *Infineon Technologies*. URL: https://www.infineon.com/dgdl/Infineon-IRLZ44N-DataSheet-v01_01-EN.pdf?fileId=5546d462533600a40153567217c32725 (date of access: 18.04.2026).
27. New Jersey Institute of Technology. Relay on an Arduino: SRD-05VDC-SL-C5V relay. *NJIT*. URL: <https://ecelabs.njit.edu/fed101/resources/Powe0on%20an%20Arduino.pdf> (date of access: 20.04.2026).

