

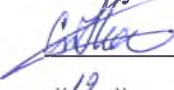
**НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ УКРАЇНИ
«КИЇВСЬКИЙ ПОЛІТЕХНІЧНИЙ ІНСТИТУТ
імені ІГОРЯ СІКОРСЬКОГО»**

Факультет робототехніки та приладобудування

**Кафедра комп'ютерно-інтегрованих технологій виробництва
приладів**

До захисту допущено:

Завідувач кафедри

 Наталія СТЕЛЬМАХ
«12» 06 2026 р.

Дипломний проєкт

на здобуття ступеня бакалавра

**за освітньо-професійною програмою «Комп'ютерно-інтегровані
системи та технології в приладобудуванні»**

**спеціальності 151 «Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані
технології»**

на тему: «Система автоматизованого поливу»

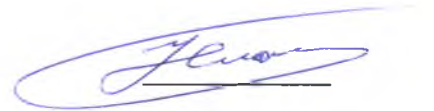
Виконав: студент IV курсу, групи ПБ-21
Сидоренко Дмитро Олександрович

Керівник:
Доц. каф. КІТВП, к.т.н., доцент,
Барандич Катерина Сергіївна

Рецензент:
Доц., к.т.н., доц. каф. АСНК
Нечай Сергій Олексійович







Засвідчую, що у цьому дипломному
проєкті немає запозичень з праць інших
авторів без відповідних посилань.

Студент



Київ 2026

ВІДОМІСТЬ ДИПЛОМНОГО ПРОЄКТУ

№ з/п	Формат	Позначення	Найменування	Кількість листів	Примітка	
1	A4		Завдання на дипломний проект	2		
2	A4	ДП.ПБ21.19.1720 ПЗ	Пояснювальна записка	82		
3	A2	ДП.ПБ21.19.1720 001	Алгоритм роботи програмного забезпечення	1		
4	A4	ДП.ПБ21.19.1720 002	Структурно-функціональна схема системи	1		
5	A4	ДП.ПБ21.19.1720 003	Схема електрична принципова	1		
6	A4	ДП.ПБ21.19.1720 004	Складальний кресленик блоку керування поливом	1		
7	A1		Лістинг програми	1		
			ДП.ПБ21.19.1720 ПЗ			
		ПІБ	Підп.	Дата		
Розроб.	Сидоренко Д.О.				Лист	Листів
Керівн.	Барандич К.С.				1	1
Консульт					Відомість дипломного проекту	
Н/контр						
Зав.каф.	Стельмах Н.В.					

Національний технічний університет України
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

Факультет робототехніки та приладобудування

Кафедра комп'ютерно-інтегрованих технологій виробництва приладів
Рівень вищої освіти – перший (бакалаврський)

Спеціальність – 151 «Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології»

Освітньо-професійна програма «Комп'ютерно-інтегровані системи та технології в приладобудуванні»

ЗАТВЕРДЖУЮ

Завідувач кафедри

 Наталія СТЕЛЬМАХ
«12» 06 2026 р.

ЗАВДАННЯ

на дипломний проєкт студенту

Сидоренку Дмитру Олександровичу

1. Тема проєкту «Система автоматизованого поливу», керівник проєкту **Барандич Катерина Сергіївна**, кандидат технічних наук, доцент, затверджені наказом по університету від «26» травня 2026 р. №1905-с
2. Термін подання студентом проєкту: «05» червня 2026 р.
3. Вихідні дані до проєкту: радіус поливу 10 м; робочий діапазон температур +5 - +45 °С; робочий діапазон вологості 0-75%.
4. Зміст пояснювальної записки: аналітичний огляд існуючих систем поливу; розрахунок витрат води та необхідного тиску; розроблення системи

керування; вибір та обґрунтування елементної бази; проектування блоку керування поливом; розроблення програмного забезпечення.

5. Перелік графічного матеріалу (із зазначенням обов'язкових креслеників, плакатів, презентацій тощо): алгоритм системи керування поливом; структурно-функціональна схема системи; схема електрична принципова; складальний кресленик блоку керування поливом; алгоритм роботи програмного забезпечення.

6. Дата видачі завдання «17» квітня 2026 р.

Календарний план

№ з/п	Назва етапів виконання дипломного проєкту	Термін виконання етапів проєкту	Примітка
1	Аналітичний огляд існуючих систем поливу	17.04-23.04.2026	
2	Розрахунок витрат води та необхідного тиску	24.04-30.04.2026	
3	Розроблення системи керування	01.05-07.05.2026	
4	Вибір та обґрунтування елементної бази	08.05-14.05.2026	
5	Проектування блоку керування поливом	15.05-21.05.2026	
6	Розроблення програмного забезпечення	21.05-28.05.2026	
7	Оформлення пояснювальної записки та презентації	29.05-04.06.2026	

Студент



Сидоренко Дмитро Олександрович

Керівник



Барандич Катерина Сергіївна

**Пояснювальна записка до дипломного
проєкту
на тему: «Система автоматизованого поливу»**

АНОТАЦІЯ

У дипломному проєкті розглянуто розробку автоматизованої системи поливу рослин із використанням мікроконтролерних технологій. Робота складається з п'яти розділів, у яких розглянуто теоретичні аспекти систем автоматизації, обґрунтування елементної бази, проєктування електричної схеми та розроблення програмного забезпечення, а також проведено верифікацію системи.

У першому та другому розділах представлено огляд сучасних методів автоматизації зрошення та визначено фізичні принципи роботи системи.

У третьому розділі представлено структурно-функціональну схему системи керування та розроблено алгоритм функціонування на базі мікроконтролера ATmega328P.

У четвертому розділі спроектовано блок керування, розроблено принципову електричну схему та 3D-модель просторового компонування системи.

У п'ятому розділі розроблено програмне забезпечення на мові C++ у середовищі Arduino IDE, проведено його верифікацію та налагодження.

Робота містить 83 сторінок, включає 33 рисунків, 2 таблиці та 30 літературних джерел.

Ключові слова: автоматизація, зрошення, мікроконтролер, Arduino, датчик вологості, сервопривід, система керування, енергоефективність.

ЗМІСТ

АНОТАЦІЯ	6
ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ ТА СКОРОЧЕНЬ	9
ВСТУП	10
РОЗДІЛ 1. АНАЛІТИЧНИЙ ОГЛЯД ІСНУЮЧИХ СИСТЕМ	
ПОЛИВУ.....	12
1.1. Класифікація систем автоматичного поливу.....	13
1.2. Розвиток проблематика систем зрошення.....	15
1.3. Огляд комерційних систем від провідних світових виробників	17
1.4 Обґрунтування розробки системи на базі мікроконтролера.....	22
Висновки до першого розділу	24
РОЗДІЛ 2. РОЗРАХУНОК ВИТРАТ ВОДИ ТА НЕОБХІДНОГО	
ТИСКУ.....	25
2.1. Визначення площі поливу та розрахунок водоспоживання	26
2.2. Розрахунок продуктивності системи та вибір дощувача.....	26
2.3 Розрахунок необхідного тиску та втрат у магістралі.....	28
Висновки до другого розділу	29
РОЗДІЛ 3. РОЗРОБЛЕННЯ СИСТЕМИ	
КЕРУВАННЯ.....	30
3.1. Структурно-функціональна схема системи керування.....	31
3.2. Алгоритм роботи системи автоматичного поливу	32
3.3. Вибір та обґрунтування елементної бази інформації.....	33

3.3.1 Мікроконтролерна платформа Arduino Uno.....	33
3.3.2 Датчик температури та вологості DHT22.....	35
3.3.3 Фоторезистор.....	36
3.3.4. LCD дисплей.....	38
3.3.5. Модуль реального часу DS1307.....	39
3.3.6 Серводвигун SG90.....	40
3.3.7 Світлодіоди.....	42
Висновки до третього розділу	44
РОЗДІЛ 4. ПРОЄКТУВАННЯ БЛОКУ КЕРУВАННЯ ПОЛИВОМ	45
4.1. Розроблення принципової електричної схеми.....	46
4.2. Моделювання роботи апаратної частини в середовищі Wokwi	47
4.3. Компонування та розробка складального кресленика.....	52
Висновки до четвертого розділу	54
РОЗДІЛ 5. ПРОЄКТУВАННЯ БЛОКУ КЕРУВАННЯ ТА	
МОДЕЛЮВАННЯ.....	55
5.1. Інструментарій та середовище розробки.....	56
5.2. Архітектура програмного забезпечення.....	56
5.3. Реалізація алгоритму керування.....	57
5.4. Верифікація та налагодження програмного забезпечення.....	58
Висновки до п'ятого розділу	61
ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ	62
СПИСОК ЛІТЕРАТУРНИХ ДЖЕРЕЛ	65
ДОДАТКИ	68

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ ТА СКОРОЧЕНЬ

Arduino – апаратна обчислювальна платформа для створення електронних пристроїв.

IDE – Integrated Development Environment (інтегроване середовище розробки).

IoT – Internet of Things (Інтернет речей).

I2C – Inter-Integrated Circuit (послідовна шина передачі даних).

LCD – Liquid Crystal Display (рідкокристалічний дисплей).

LED – Light-Emitting Diode (світлодіод).

RTC – Real-Time Clock (модуль годинника реального часу).

ШИМ – Широтно-імпульсна модуляція.

АЦП – Аналого-цифровий перетворювач.

ПЗ – Програмне забезпечення.

САПР – Система автоматизованого проектування.

UART – Universal Asynchronous Receiver-Transceiver (універсальний асинхронний прийомопередавач).

USB – Universal Serial Bus (універсальна послідовна шина).

ВСТУП

Сучасні тенденції в розвитку агроінженерії та технологій «розумного дому» вимагають впровадження інтелектуальних рішень для забезпечення ефективного використання природних та господарських ресурсів. Одним із ключових викликів у цій галузі є оптимізація водоспоживання та забезпечення оптимальних умов для вирощування рослин, що стає особливо актуальним в умовах змін клімату та необхідності автоматизації рутинних процесів догляду за зеленими насадженнями.

Традиційні системи зрошення часто вимагають постійного контролю з боку людини, що не завжди є ефективним і призводить до нераціонального витрачання води. У зв'язку з цим, розробка автоматизованих систем на базі мікроконтролерів відкриває нові можливості для створення автономних пристроїв, які здатні самостійно аналізувати параметри навколишнього середовища, такі як температура, вологість ґрунту та рівень освітленості, і приймати обґрунтовані рішення щодо інтенсивності поливу.

Проектування таких систем передбачає вирішення складних технічних завдань: вибір надійної елементної бази, розроблення структурної схеми керування та створення програмного забезпечення, здатного працювати в умовах реального часу. Особливу увагу слід приділяти надійності роботи системи в умовах підвищеної вологості, ефективності програмного коду та зручності взаємодії користувача з пристроєм через засоби візуалізації.

Для запобігання неточностям у роботі систем зрошення та забезпечення їх стабільності, доцільним є впровадження модульних рішень, що поєднують точність збору даних з датчиків з логікою багаторівневого керування. Використання мікроконтролерної платформи Arduino Uno (ATmega328P) дозволяє реалізувати гнучкий, адаптивний алгоритм поливу, який легко налаштовується під конкретні біологічні вимоги рослин.

Цей дипломний проєкт присвячений розробленню автоматизованої системи поливу рослин із використанням мікроконтролерних технологій. Робота спрямована на створення функціонального пристрою, який мінімізує потребу в ручному керуванні та забезпечує раціональний розподіл води шляхом постійного моніторингу кліматичних показників.

Даний проєкт має значний практичний інтерес, оскільки результати дослідження можуть бути застосовані для оптимізації догляду за рослинами в домашніх теплицях, на присадибних ділянках або у міському озелененні. Крім того, розроблена архітектура системи відкриває перспективи для подальших досліджень у галузі IoT-технологій та автоматизації малих гідротехнічних споруд.

РОЗДІЛ 1. АНАЛІТИЧНИЙ ОГЛЯД ІСНУЮЧИХ СИСТЕМ ПОЛИВУ

1.1 Класифікація систем автоматичного поливу

В умовах сучасного сільського господарства, ландшафтного дизайну та тепличних господарств забезпечення рослин необхідною кількістю вологи є критично важливим завданням. Традиційні методи ручного поливу є неефективними, оскільки призводять до нераціонального використання водних ресурсів, значних трудовитрат та не гарантують рівномірного зволоження ґрунту. Саме тому впровадження автоматизованих систем поливу стає об'єктивною необхідністю, що дозволяє оптимізувати витрати води, підвищити врожайність та повністю виключити негативний вплив людського фактора.

За способом подачі води сучасні системи зрошення поділяються на три основні види [1]:

- Дощувальні системи: вода розбризкується зверху через спеціальні форсунки, імітуючи природний дощ. Цей метод підходить для рівномірного зволоження великих площ, газонів та парків. Дощувачі поділяються на статичні для невеликих ділянок та роторні для великих радіусів дії.
- Системи крапельного поливу: вода подається мікродозами безпосередньо в прикореневу зону рослин через систему труб та крапельниць (або крапельних стрічок). Це найбільш економічний та цілеспрямований спосіб, який мінімізує випаровування води та запобігає появі опіків на листі.
- Внутрішньогрунтовий полив: різновид крапельного поливу, при якому пористі трубки закопуються безпосередньо в землю. Вода надходить відразу до кореневої системи, що робить цей метод ефективним для багаторічних насаджень та тепличних господарств.

Для технічного розуміння процесу подачі води та проектування систем використовуються відповідні гідравлічні схеми та кресленики [2-4], як на рис. 1.1-1.2.

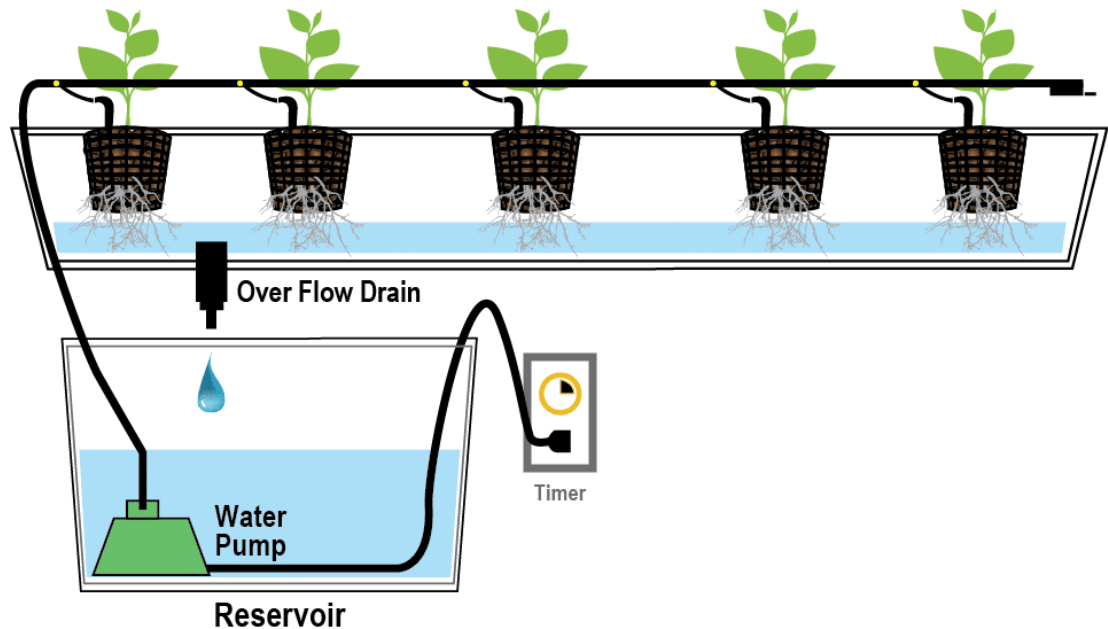


Рис.1.1. Гідравлічна схема процесу подачі води[3]

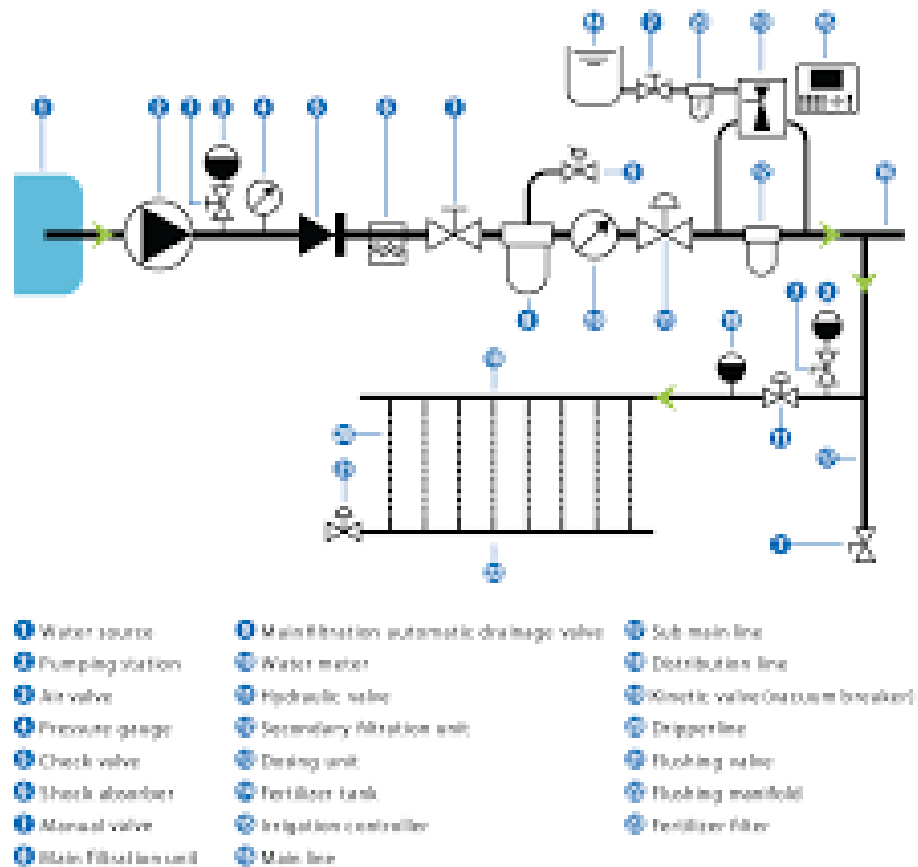


Рис.1.2. Гідравлічна схема подачі води [4]

1.2 Розвиток систем зрошення

Розвиток систем автоматичного поливу підтверджується великою кількістю патентних рішень. Патентний огляд показує, що сучасні розробки фокусуються на інтелектуалізації процесу керування. Наприклад, патент США № US8948921B2 описує інтелектуальну систему зрошення (Smart irrigation system), яка інтегрує дані про ландшафт та стан навколишнього середовища через смарт-контролер для динамічного коригування графіка подачі води та формування керуючих сигналів для клапанів [5] (рис. 1.3). Перевагою цього рішення є висока адаптивність алгоритму до зовнішніх погодних умов. Проте суттєвим недоліком є висока вартість обладнання та складна архітектура, яка важко адаптується під невеликі приватні господарства.

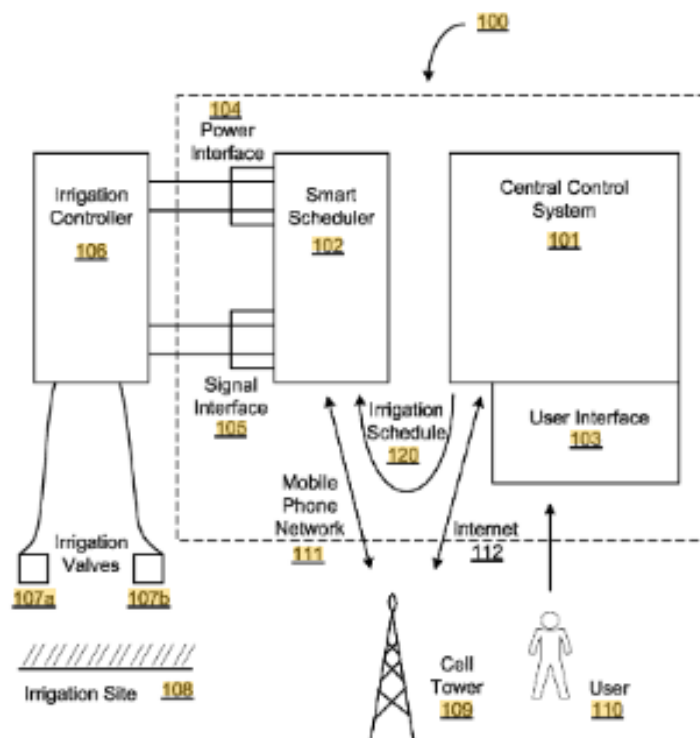


Рис. 1.3. Блок-схема інтелектуальної системи зрошення [5]

Іншим прикладом є патент України на корисну модель № 154663, що пропонує систему автоматизованого крапельного поливу з мікропроцесорним керуванням, яка забезпечує точне дозування рідини

залежно від температури навколишнього середовища та фази росту сільськогосподарських культур [6] (рис.1.4). Плюсом цієї розробки є простота локального керування та висока енергоефективність. Мінусом — обмеженість функціоналу щодо віддаленого моніторингу та складності інтеграції з додатковими сенсорами освітленості.

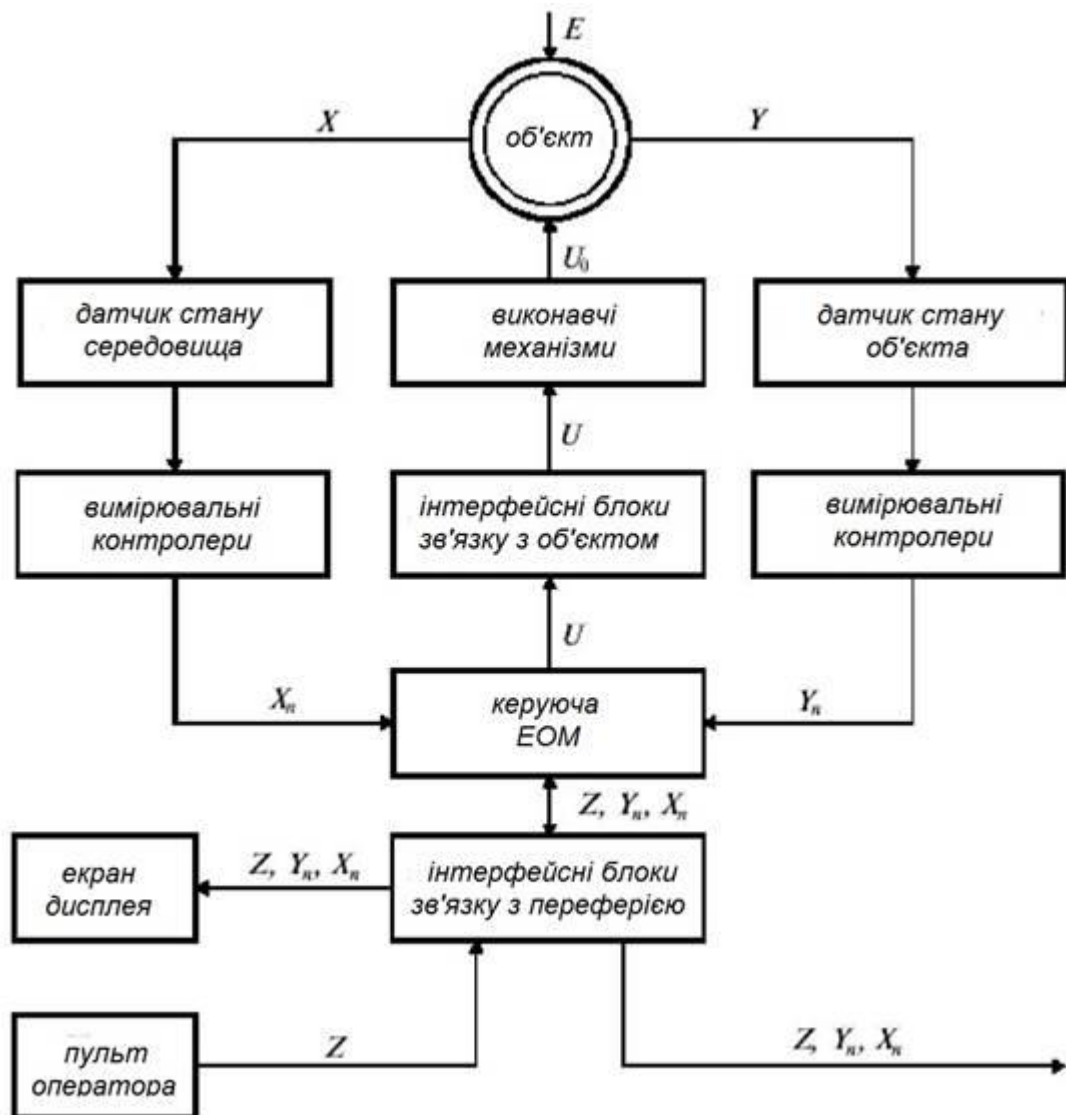


Рис. 1.4. Блок-схема систему автоматизованого крапельного поливу з мікропроцесорним керуванням [6]

Ще одним рішенням є патент США № US10506769B2, що описує модульну систему автоматизованого крапельного зрошення з локальним контролером [7]. Плюсом є модульність та можливість розширення системи додатковими клапанами. Мінусом є використання специфічних закритих протоколів зв'язку виробника, що унеможливорює використання дешевих та доступних аналогових чи цифрових датчиків (наприклад, DHT22 або звичайних фоторезисторів).

Аналіз цих патентних рішень свідчить про стійкий перехід від простих механічних таймерів до складних алгоритмів на базі мікроконтролерів. Виявлені недоліки існуючих рішень (закрита архітектура, висока вартість базових станцій, повна залежність від інтернету) чітко аргументують необхідність розробки власної системи. Запропонований у даній роботі блок керування на базі відкритої платформи (Arduino Uno) для крапельного поливу дозволить поєднати локальну надійність, гнучкість налаштувань під конкретні датчики мікроклімату та низьку собівартість впровадження.

1.3. Огляд комерційних систем від провідних світових виробників

Сучасний ринок пропонує велику кількість готових комерційних рішень закритого типу для ландшафтного та аграрного застосування [8]. Серед абсолютних лідерів галузі варто виділити наступні компанії: Hunter Industries, Rain Bird, GARDENA, Netafim, Rachio, Orbit, Toro.

Компанія Hunter Industries: спеціалізується на професійному обладнанні для ландшафтного дизайну та комерційних об'єктів (рис. 1.5). Системи Hunter відрізняються розширеними функціями автоматизації, надійними роторними спринклерами та інтелектуальними контролерами (наприклад, серія Pro-НС з підтримкою Wi-Fi та технологією Hydrowise, що коригує графік поливу на основі інтернет-даних про погоду) [9].



Рис. 1.5. Контролер Hunter Pro-NC [9]

Rain Bird: один із найстаріших виробників (на ринку з 1933 року), що пропонує інноваційні рішення. Окрім класичних роторів та клапанів, компанія відома своїми системами кореневого зрошення (Root Watering System – RWS, рис. 1.6), які забезпечують глибоке зволоження та аерацію для дерев і великих чагарників [10].



Рис. 1.6. Система кореневого зрошення Rain Bird [10]

GARDENA: Найпопулярніший бренд для приватних присадибних ділянок. Їхня лінійка GARDENA Smart System [11] дозволяє керувати поливом через мобільний додаток, а рішення Micro-Drip-System (рис. 1.7) забезпечують точний крапельний полив для живоплотів, теплиць та клумб. Продукція відрізняється простотою монтажу ("plug-and-play").



Рис. 1.7. Осцилюючий дощувач GARDENA [11]

Netafim: світовий піонер і лідер у технологіях крапельного зрошення, орієнтований на сільське та тепличне господарство [12]. Їхня флагманська система NetBeat є першою у світі системою зрошення з інтегрованим управлінням живленням рослин (рис. 1.8). Вона об'єднує датчики ґрунту, метеостанції та моделі розвитку сільськогосподарських культур у єдину хмарну платформу, що дозволяє фермерам отримувати рекомендації на основі штучного інтелекту.



Рис. 1.8. Промислова система крапельного поливу Netafim [12]

Rachio [13]: представник сучасних «смарт» рішень для розумного будинку. Компанія випускає виключно інтелектуальні контролери (Rachio 3 Smart Sprinkler Controller, рис. 1.9), які замінюють застарілі пульти керування.



Рис. 1.9. Інтелектуальний контролер Rachio 3 [13]

Orbit з лінійкою B-hyve ще один лідер у сегменті домашньої автоматизації, що робить акцент на простоті [14]. Їхні смарт-таймери (рис. 1.10) для кранів (B-hyve Smart Hose Faucet Timer) дозволяють перетворити звичайний садовий кран на елемент розумного поливу з керуванням через Wi-Fi/Bluetooth. Система легко інтегрується з голосовими асистентами Amazon Alexa та Google Assistant.



Рис. 1.10. Смарт-таймер для кранів Orbit B-hyve [14]

Toro: компанія з понад столітньою історією, що пропонує як побутові, так і надскладні системи для гольф-полів. Їхня система керування EVOLUTION (рис. 1.11) підтримує бездротові датчики вологості ґрунту Precision Soil Sensor [15], які вимірюють не лише наявність води, автоматично блокуючи графік поливу, якщо ґрунт ще має достатньо вологи для конкретного типу рослин.



Рис. 1.11. Контролер керування поливом Toro EVOLUTION [15]

1.4. Обґрунтування розробки системи на базі мікроконтролера

Незважаючи на високу надійність комерційних систем (Hunter, Rain Bird, Toro), вони мають низку суттєвих недоліків для локального використання: закриту архітектуру, високу вартість базового обладнання та обслуговування, а також складність модернізації чи інтеграції з нестандартними датчиками [16].

Актуальність розроблюваної роботи полягає в можливості використання сучасних мікроконтролерів (Arduino Uno) для створення відкритих систем автоматизації. Доступність компонентів та програмна відкритість платформи дозволяють уникнути обмежень комерційних монополістів та спроектувати пристрій під конкретні інженерні вимоги. Запропонована кастомна система здатна комплексно обробляти дані про вологість, температуру, освітлення та самостійно приймати рішення, що

робить її економічно вигідною, гнучкою та легко адаптивною альтернативою для тепличних і сільськогосподарських потреб .

Висновки до першого розділу

У першому розділі проведено аналітичний огляд сучасних систем автоматичного поливу та визначено, що найбільш ресурсоефективним методом для сільськогосподарських, тепличних та ландшафтних потреб є система крапельного зрошення.

Аналіз існуючих патентних рішень (зокрема розробок США та України) продемонстрував стійку тенденцію до інтелектуалізації процесу подачі води за допомогою мікроконтролерів. Проте більшість запатентованих систем мають суттєві недоліки, серед яких: жорстка залежність від хмарних серверів, висока вартість реалізації, а також використання закритих протоколів зв'язку, що унеможливорює підключення доступних аналогових чи цифрових сенсорів.

Огляд комерційних рішень від провідних світових виробників (Hunter, Rain Bird, GARDENA, Toro, Netafim тощо) підтвердив, що сучасний ринок пропонує переважно екосистеми закритого типу. Незважаючи на їхню високу надійність, такі системи є економічно затратними для пересічного користувача, складними в обслуговуванні та практично не піддаються модернізації чи інтеграції з нестандартними вимірювальними приладами.

На основі проведеного аналізу обґрунтовано актуальність та практичну доцільність розробки власної автоматизованої системи крапельного поливу на базі відкритої мікропроцесорної платформи. Такий підхід дозволить створити економічно вигідний, гнучкий у налаштуваннях та автономний локальний пристрій керування, здатний ефективно обробляти дані з датчиків мікроклімату та вологості ґрунту без прив'язки до дорогих комерційних монополістів.

РОЗДІЛ 2. РОЗРАХУНОК ВИТРАТ ВОДИ ТА НЕОБХІДНОГО ТИСКУ

2.1. Визначення площі поливу та розрахунок водоспоживання

Згідно з індивідуальним завданням, система має забезпечувати радіус поливу $R=10$ м. Розрахунок водоспоживання здійснюється за методом визначення площі поливу та добової норми зрошення згідно з методичними матеріалами [17].

Розрахуємо площу S , яку охоплює один круговий дощувач [17]:

$$S = \pi \times R^2 = 3.14 \times 10^2 = 314.16 \text{ м}^2 \quad (1)$$

Враховуючи робочий діапазон температур від $+5^\circ\text{C}$ до $+45^\circ\text{C}$, основною функцією системи буде забезпечення інтенсивного зволоження ґрунту. Згідно з гідравлічними нормами [17], прийmemo середньодобову функціональну норму поливу $M=6$ л/м². Тоді загальний добовий об'єм води ($V_{\text{доб}}$) становитиме [20]:

$$V_{\text{доб}} = S \times M = 314.16 \times 6 \approx 1885 \text{ л/добу} \quad (2) \quad [18]$$

Цей показник є критичним для алгоритму: при досягненні вологості $\leq 10\%$ система активує режим «Критичний полив», який має забезпечити подачу саме такого об'єму води для стабілізації стану ґрунту.

2.2. Розрахунок продуктивності системи та вибір дощувача

Для реалізації радіуса поливу 10 м доцільно використовувати роторні зрошувачі. Для розрахунку візьмемо характеристики типового ротора (наприклад Hunter), який відповідають інженерному рівню проєкту. При

робочому тиску в 3.0 бар такий дощувач має витрату води приблизно $Q \approx 0.9 \text{ м}^3/\text{год}$ [17].

Час роботи системи (t) для покриття добової норми при використанні одного такого дощувача [18]:

$$t = \frac{V_{\text{доб}}}{Q} = \frac{1.885 \text{ м}^3}{0.9 \text{ м}^3 / \text{год}} \approx 2.1 \text{ год} \quad (3)$$

Цей час (t) має бути закладений у програмний код Arduino як максимальна тривалість роботи циклу поливу для запобігання перезволоженню.

Для реалізації заданого радіуса поливу 10 м та забезпечення розрахованої продуктивності доцільно використовувати роторні зрошувачі. Для остаточного розрахунку візьмемо характеристики типового ротора (наприклад, Hunter PGP або Rain Bird 5000), які відповідають інженерному рівню проекту.

Табл. 2.1. Технічні характеристики роторних зрошувачів [17,18]

Технічна характеристика	Hunter PGP (стандартне сопло)	Rain Bird 5000 (стандартне сопло)
Радіус зрошення, м	6.4 – 15.8	7.6 – 15.2
Витрата води, м ³ /год	0.10 – 3.22	0.17 – 2.19
Рекомендований робочий тиск, бар	1.7 – 4.5	1.7 – 4.5
Траєкторія струменя	25°	25°
Діаметр підключення	3/4" внутрішня різьба	3/4" внутрішня різьба

2.3. Розрахунок необхідного тиску та втрат у магістралі

Для того, щоб система працювала коректно, необхідно забезпечити стабільний тиск. Розрахуємо необхідний тиск на вході ($P_{вх}$) [17]:

$$P_{вх} = P_{роб} + \Delta P_{лінійні} + \Delta P_{місцеві}, \quad (4)$$

де $P_{роб} = 3.0$ бар – необхідний тиск на форсунці для досягнення радіуса 10 м;

$\Delta P_{лінійні} \approx 0.4$ бар — втрати на тертя у трубі ПЕ-25 довжиною 30 м;

$\Delta P_{місцеві} \approx 0.3$ бар — втрати в електромагнітному клапані та фітингах.

Отже, необхідний тиск на вході системи складає:

$$P_{вх} = 3 + 0.4 + 0.3 = 3.7 \text{ бар.}$$

Висновки до другого розділу

У другому розділі було проведено інженерно-гідравлічні розрахунки та обґрунтовано.

На основі гідравлічних норм розраховано ключові параметри водоспоживання для заданої площі поливу (радіус 10 м). Визначено, що для забезпечення інтенсивного зволоження ґрунту необхідний добовий об'єм води становить близько 1.885 м³, а розрахунковий час безперервної роботи системи з використанням типового роторного дощувача складає 2.1 години. Ці параметри є базовими константами для налаштування таймінгів алгоритму керування виконавчими механізмами.

Комплекс проведених розрахунків та обрана архітектура датчиків підтверджують технічну доцільність запропонованого апаратного рішення. Сформована база створює необхідне технічне підґрунтя для побудови принципової електричної схеми та розробки програмного забезпечення мікроконтролера, що буде розглянуто в наступному розділі.

РОЗДІЛ 3. РОЗРОБЛЕННЯ СИСТЕМИ КЕРУВАННЯ

3.1. Структурно-функціональна схема системи керування

Система автоматизованого поливу будується за ієрархічним та модульним принципами. Її апаратна частина представлена у вигляді єдиного блоку керування, який об'єднує всі необхідні вузли. Структурно-функціональна схема (Додаток Б) поділяється на підсистеми збору даних, обробки, живлення та виконання. Центральним елементом керування є мікроконтролер на базі мікропроцесора ATmega328P [19].

Для забезпечення автономної та безперебійної роботи системи до складу апаратної частини обов'язково входить блок живлення. Він виконує функцію перетворення та стабілізації напруги до робочих рівнів (5 В), необхідних для стабільного функціонування мікроконтролера та всієї периферії, захищаючи чутливі елементи від перепадів у мережі [20].

У процесі роботи мікроконтролер безперервно бере інформацію від зовнішніх сенсорних модулів: датчика температури та вологості повітря DHT22[21], аналогового фоторезистора та модуля годинника реального часу (RTC). Отримавши ці сигнали, центральний процесор виконує їх аналіз згідно із закладеним алгоритмом. Після обробки мікроконтролер дає керуючу інформацію на виконавчі пристрої та модулі індикації.

Головним виконавчим пристроєм у схемі є серводвигун [22]. Він отримує імпульсні сигнали від мікроконтролера та виконує роль механічного приводу, що здатен точно змінювати кут повороту. Це дозволяє фізично керувати потоком води. Одночасно мікроконтролер дає інформацію на модуль візуалізації (LCD-дисплей) та блок сигнальних світлодіодів, що забезпечує користувача актуальними даними про стан системи.

3.2. Алгоритм роботи системи автоматичного поливу

Алгоритм роботи системи базується на постійній перевірці умов та значень параметрів навколишнього середовища (Додаток А). Робота починається з повної ініціалізації мікроконтролера та підключеної периферії, після чого алгоритм переходить у режим безперервного моніторингу.

Передача даних від датчиків до центрального процесора здійснюється не хаотично, а з чітко заданим інтервалом (наприклад, кожні 2 секунди). Це робиться для того, щоб уникнути перевантаження шини даних та забезпечити коректне зчитування показників без програмних збоїв.

Логіка перевірки умов спирається на зібрані значення та поточний час. Модуль RTC відіграє ключову роль в алгоритмі, дозволяючи уточнити розклад поливу. Алгоритм постійно звіряє час і може блокувати полив у період активного денного сонця (щоб уникнути випаровування та опіків листя), дозволяючи системі відкривати воду лише у визначені ранкові або вечірні години.

Перевірка значень вологості ґрунту та повітря є багатокритеріальною. Важливо зазначити, що показники порогової вологості в алгоритмі не є жорстко статичними – вони мають бути підстроєні під конкретну сільськогосподарську культуру [22]. Для вологолюбних культур алгоритм налаштовується на спрацювання при падінні вологості нижче 50%, тоді як для посухостійких рослин критичним значенням може бути 15-20%.

Отже, якщо поточна вологість падає нижче встановленого для культури порогу, система перевіряє додаткові умови (час доби та температуру). Якщо всі умови задовольняють вимоги безпечного поливу, алгоритм формує команду на відкриття клапана. При досягненні показниками норми алгоритм переводить систему назад у режим очікування [23].

3.3. Вибір та обґрунтування елементної бази

3.3.1. Мікроконтролерна платформа Arduino Uno

Платформа Arduino Uno є основою для розробки безлічі різноманітних електронних проектів завдяки своїй доступності, простоті використання та широкому колу підтримуваних компонентів. Arduino Uno є однією з найпопулярніших моделей у родині мікроконтролерів Arduino. Вона побудована на базі 8-бітного мікроконтролера ATmega328P [24], що має достатньо потужності для виконання різних завдань при мінімальних вимогах до ресурсів.

Згідно з офіційною документацією розробника [25], Arduino Uno (рис. 3.9) містить 14 цифрових входів/виходів, 6 аналогових входів, а також можливість підключення до комп'ютера через інтерфейс USB для програмування та моніторингу роботи системи. Рациональне використання цих портів є ключовим для створення ефективної системи автоматичного поливу, яка включає в себе декілька сенсорів, виконавчих пристроїв і засобів візуалізації.

У реалізованій схемі кожен порт було підібрано відповідно до специфіки підключених компонентів. Аналогові входи використовуються для зчитування даних з фоторезистора, оскільки інтенсивність світла змінюється поступово, і для її коректного визначення потрібна точна аналогова інформація. Такий тип сигналу не може бути прочитаний цифровим входом, оскільки останній розпізнає лише два стани – HIGH або LOW [25].

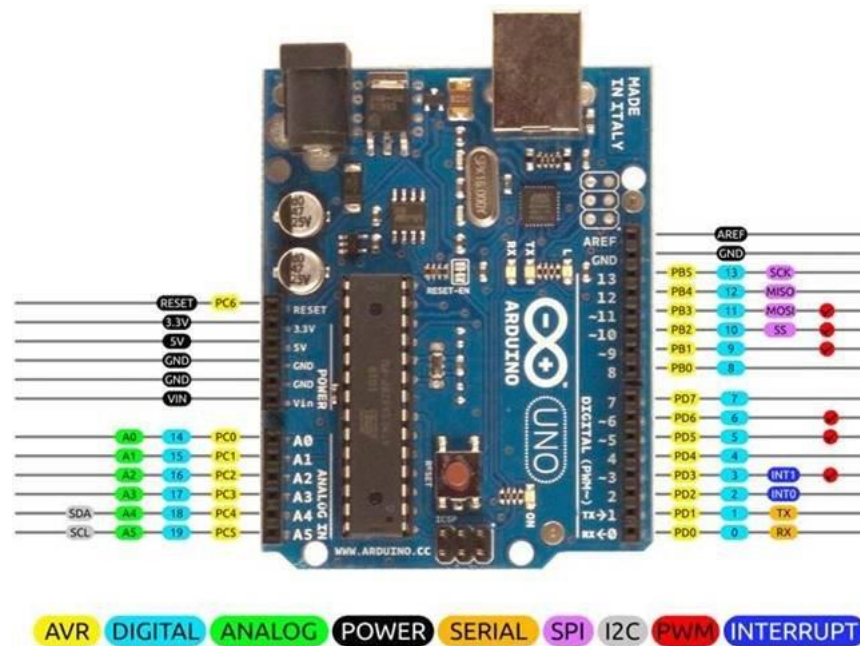


Рис. 3.9. Мікроконтролер Arduino Uno [25]

Цифрові порти задіяні для підключення таких пристроїв, як світлодіоди, які сигналізують про стан системи (критична вологість, нормальний режим тощо), для зчитування даних з цифрового датчика DHT22, що передає температуру та вологість повітря., а також сервопривід для керування поливом

У реальній гідравлічній системі цей серводвигун виступає приводом, який механічно взаємодіє безпосередньо з кульовим краном. Залежно від поданого цифрового сигналу, серводвигун повертає шток крана на відповідний кут (наприклад, на 90°), відкриваючи або закриваючи подачу води в магістраль.

Аналогові порти використовуються для підключення фоторезистора, який дозволяє системі плавно визначати рівень освітленості. Інтерфейс I2C використовується для підключення LCD-дисплея та годинника реального часу DS1307. Підключення модуля RTC та дисплея реалізовано паралельно через цифрову шину I2C: лінія SDA з'єднана з піном A4, а SCL — з піном A5. Це дозволяє здійснювати двосторонній обмін даними за допомогою лише двох проводів, що значно економить піни мікроконтролера [26].

Завдяки чіткому розмежуванню функцій портів і застосуванню відповідних типів зчитування — аналогового або цифрового — система працює стабільно та швидко реагує на зміни довкілля. Такий підхід дозволяє максимально ефективно використовувати можливості мікроконтролера Arduino Uno без перевантаження його ресурсів.

3.3.2. Датчик температури та вологості DHT22

У системі автоматичного поливу важливу роль відіграє датчик температури та вологості DHT22, який забезпечує надійне та точне зчитування двох критичних параметрів довкілля: температури повітря та його відносної вологості. На основі цих значень система приймає рішення про необхідність подачі води на рослини.

DHT22 [21] (рис. 3.3) є вдосконаленим варіантом датчика DHT11, адже має ширший діапазон вимірювання та вищу точність. Він дозволяє вимірювати температуру в межах від -40 до $+80$ °C з точністю приблизно ± 0.5 °C та відносну вологість у межах від 0 до 100% з точністю $\pm 2-5\%$. Цей модуль є цифровим, тому для його зчитування не потрібен аналого-цифровий перетворювач, що значно спрощує інтеграцію з мікроконтролером Arduino.

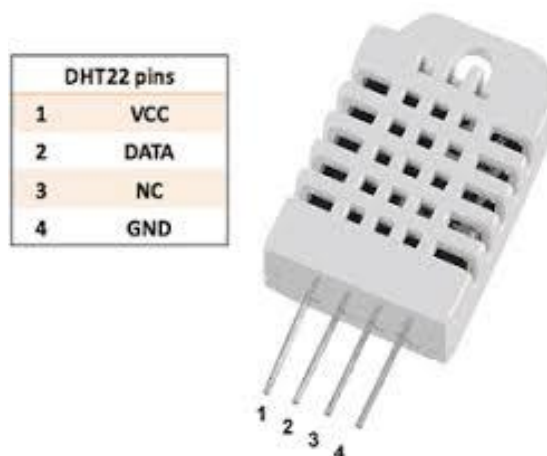


Рис. 3.3. Датчик температури та вологості DHT22 [21]

У проєкті датчик використовується для постійного моніторингу кліматичних умов. Якщо вологість повітря падає до критичного рівня (менше 10%), система активує терміновий полив. При помірному зниженні вологості (нижче 30%) також запускається полив, але без аварійного повідомлення. Крім того, температура повітря теж враховується: при її надмірному підвищенні (вище 45 °C) виконується додаткове зволоження, щоб зменшити ризик перегріву ґрунту та кореневої системи рослин.

DHT22 не потребує складного калібрування, а бібліотека DHT.h, яка використовується у програмному коді, дозволяє швидко та ефективно інтегрувати цей модуль у проєкт. Надійність, простота підключення та енергоефективність роблять його незамінним компонентом для розумних систем автоматичного зрошення.

3.3.3. Фоторезистор

Фоторезистор, або світлочутливий резистор (LDR — Light Dependent Resistor [27]), є важливим елементом у системі автоматичного поливу, оскільки дозволяє визначати рівень освітленості навколишнього середовища. Його робота базується на властивості змінювати свій опір залежно від інтенсивності світла: чим більше світла падає на фоторезистор, тим менший його опір, і навпаки — у темряві його опір зростає (рис. 3.4).



Рис. 3.4. Фоторезистор [27]

У реалізованій системі цей компонент використовується для оцінки освітлення, що впливає на ухвалення рішення про полив у спекотні сонячні дні. Зокрема, якщо рівень освітленості перевищує поріг у 500 умовних одиниць, система розцінює це як надмірне сонячне випромінювання, що може призвести до пересихання ґрунту. У такому випадку активується сервопривід для відкриття клапану з водою, та запускається полив рослин, навіть якщо рівень вологості ще не досяг критичного значення.

Таке рішення пропонується для запобігання перегріву кореневої системи рослин у відкритому ґрунті або на підвіконні. Таким чином, система виявляє не лише поточний стан вологи, а й потенційні ризики її зниження в найближчий час. Це робить полив не лише реактивним, а й частково превентивним, що значно підвищує ефективність вирощування рослин.

Варто зазначити, що значення освітленості, зчитане з фоторезистора, подається на аналоговий вхід мікроконтролера, де перетворюється на цифрове значення в діапазоні від 0 до 1023. Надалі це значення аналізується в програмному коді: якщо зчитаний показник перевищує встановлений поріг (500 умовних одиниць), мікроконтролер подає керуючий сигнал на

сервопривід для активації превентивного поливу та вмикає жовтий світлодіод індикації.

3.3.4. LCD дисплей

LCD дисплей 16x2 [28] є важливим елементом інтерфейсу в системі автоматичного поливу, оскільки він дозволяє користувачеві в реальному часі спостерігати за основними показниками стану середовища та роботи системи. Назва дисплея вказує на кількість символів — 16 у рядку та 2 рядки, чого цілком достатньо для виведення температури, вологості, рівня освітлення, повідомлень про полив або про стабільний стан (рис. 3.5).



Рис. 3.5. LCD дисплей 16x2 [28]

У даному проекті дисплей підключено до мікроконтролера за допомогою інтерфейсу I2C (Inter-Integrated Circuit), що дозволяє значно зменшити кількість задіяних виводів Arduino. У класичному підключенні LCD 16x2 потребує щонайменше шість цифрових пінів, але завдяки I2C-модулю достатньо лише двох ліній SDA (дані) та SCL (тактування). Це дуже зручно при роботі з великою кількістю компонентів, як у даному випадку, коли задіяно й інші сенсори, серводвигун, а також кілька світлодіодів.

Інформація, що відображається на дисплеї, оновлюється динамічно. У стандартному режимі на ньому виводиться температура повітря (в градусах Цельсія), рівень вологості (%) та освітленість. У разі виникнення певної події наприклад, критичного падіння вологості чи надмірної температури на дисплеї з'являються відповідні повідомлення: “Watering...” (триває полив), “Critical humidity!” (критична вологість), “High temp!” (висока температура), “System idle” (система в режимі очікування) тощо. Це значно полегшує розуміння поточного стану системи без необхідності підключення до комп'ютера.

Завдяки використанню бібліотеки `LiquidCrystal_I2C.h` виконується керування роботою дисплею в програмному коді. У підсумку, LCD 16x2 – це зручний і функціональний засіб зворотного зв'язку в системі, який робить її зручною для взаємодії з користувачем і дозволяє миттєво реагувати на зміни навколишніх умов.

3.3.5. Модуль реального часу DS1307

Модуль реального часу DS1307 є важливим компонентом у системах, де потрібно точно знати поточний час або дату. У рамках цього проекту він використовується для відображення актуального часу на дисплеї та, за потреби, може слугувати основою для впровадження поливу за розкладом, що є перспективним напрямом удосконалення системи. [26]

DS1307 [26] – це інтегральна мікросхема, яка відзначається низьким енергоспоживанням і працює за допомогою інтерфейсу I2C. До її переваг належить наявність незалежного джерела живлення у вигляді батарейки типу CR2032, що дозволяє модулю зберігати точний час навіть при вимкненому мікроконтролері. Таким чином, після перезапуску або вимкнення живлення користувач не втрачає даних про час, а система продовжує працювати стабільно.

У проєкті DS1307 (рис. 3.6) взаємодіє з Arduino Uno через шину I2C, спільно з LCD-дисплеєм, завдяки чому використовується мінімальна кількість пінів мікроконтролера. Для роботи з модулем використовується бібліотека `RTClib`, яка значно спрощує процес ініціалізації, зчитування та корекції часу.

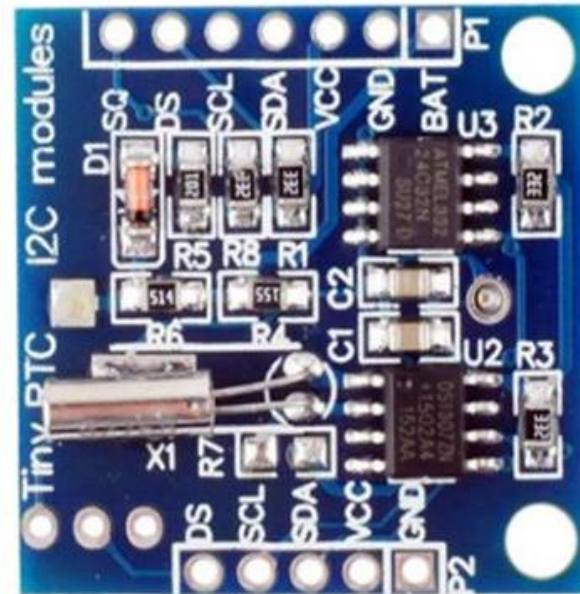
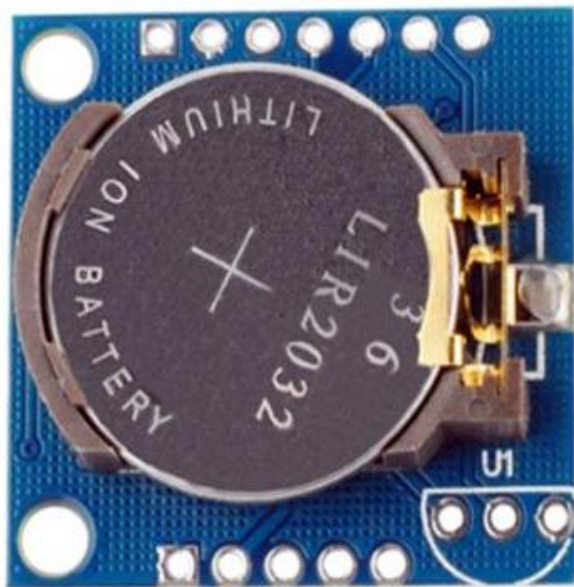


Рис. 3.6. Модуль реального часу DS1307 [26]

3.3.6. Серводвигун SG90

Серводвигун SG90 (рис. 3.7) є одним із ключових виконавчих елементів у системі автоматичного поливу. Він використовується для механічного керування положенням важеля кульового крана в магістралі водопостачання. Залежно від керуючого ШІМ-сигналу, що надходить від мікроконтролера, серводвигун повертає шток крана на кут 90° , забезпечуючи його повне відкриття або закриття, що дозволяє автоматизувати процес зрошення без участі користувача.



Рис. 3.7. Серводвигун SG90 [30]

SG90 це мініатюрний та недорогий сервопривід, який має компактні розміри та не потребує складного керування. Його конструкція включає редуктор, мотор і вбудований контролер, який приймає сигнали керування з Arduino у вигляді широтно-імпульсної модуляції (ШИМ). Для задання конкретного кута повороту (наприклад, 0° , 90° або 180°) достатньо змінити тривалість імпульсу на сигнальному дроті.

У рамках цього проекту SG90 працює в двох основних режимах:

- полив активовано: серво повертається на 90° , відкриваючи механізм подачі води;
- полив завершено: серво повертається у вихідне положення (0°), закриваючи подачу води.

Керування здійснюється за допомогою бібліотеки Servo.h, яка забезпечує просте підключення і дозволяє встановлювати кут повороту стандартною функцією `servo.write (кут)`. Завдяки цьому розробка логіки управління поливом стає інтуїтивно зрозумілою і не вимагає складного налаштування.

Перевагами SG90 є низьке споживання енергії, хороша точність позиціонування та надійна робота навіть у базових проектах.

3.3.7. Світлодіоди

Світлодіоди (LED) [27] є важливими індикаторами в системі автоматичного поливу, оскільки вони виконують функцію візуального відображення стану роботи системи. Завдяки світлодіодам користувач може отримати швидку інформацію про поточний стан поливу, рівень вологості, температурні умови, а також про інші важливі параметри, які впливають на роботу системи.

У даному проекті використовується три різнокольорові світлодіоди, кожен з яких має своє конкретне призначення (рис. 3.8).

	<code>{ "color": "green" }</code>
	<code>{ "color": "#FFFF00" }</code>
	<code>{ "label": "Status" }</code>

Рис. 3.8. Світлодіоди [27]

Призначення світлодіодів:

- червоний світлодіод: використовується для індикації критичних ситуацій, коли рівень вологості падає до небезпечних меж (менше 10%) або температура підвищується вище 45°C. Червоний

світлодіод миготить під час активації поливу, сигналізуючи про проблему, що потребує негайного втручання;

- жовтий світлодіод: сигналізує про низький рівень вологості (менше 30%) або про високі температури, коли система активує полив для покращення умов. Цей світлодіод також може включатися, коли система виявляє яскраве сонце, що вказує на необхідність поливу через природне освітлення.
- зелений світлодіод: індикатор нормальної роботи системи. Включається, коли рівень вологості, температура та освітленість знаходяться в межах допустимих значень, і система перебуває в режимі спокою без необхідності в поливі.

Світлодіоди підключаються до цифрових пінів мікроконтролера Arduino, що дозволяє ефективно керувати їх вмиканням та вимиканням в залежності від ситуації. Кожен з світлодіодів вмикається або вимикається за допомогою функцій, таких як `digitalWrite()`, які змінюють стан пінів на HIGH або LOW.

Висновки до третього розділу

У третьому розділі розроблено структурно-функціональну схему системи автоматизованого поливу, що базується на модульному підході. Центральним елементом керування обрано мікроконтролер ATmega328P, який забезпечує циклічне опитування датчиків та формування керуючих сигналів.

Розроблено алгоритм роботи автоматизованої системи поливу, який реалізує багаторівневу логіку пріоритетів: при падінні вологості ґрунту нижче 10% активується режим критичного поливу, а при показниках нижче 30% — превентивний полив. Використання шини I2C для підключення LCD-дисплея та модуля RTC DS1307 дозволило раціонально використати порти мікроконтролера, залишивши резерв для підключення додаткових сенсорів.

Впровадження системи світлодіодної індикації (червоний, жовтий, зелений діоди) забезпечує оперативний зворотний зв'язок із користувачем щодо поточного стану системи.

РОЗДІЛ 4. ПРОЄКТУВАННЯ БЛОКУ КЕРУВАННЯ ПОЛИВОМ

4.1. Розроблення принципової електричної схеми

В основі проектування блоку керування лежить раціональний розподіл ресурсів мікроконтролера Arduino Uno. Згідно з технічною документацією платформи, мікроконтролер ATmega328P забезпечує достатню кількість апаратних переривань та ШІМ-каналів для стабільної роботи периферії. Електрична принципова схема передбачає підключення датчика температури та вологості DHT22, фоторезистора, модуля реального часу DS1307, LCD-дисплея 1602, сервоприводу та світлодіодів індикації, необхідних для збору даних з навколишнього середовища та безпосереднього керування поливом.

Апаратна конфігурація блоку, що відображена на схемі рис. 4.1.

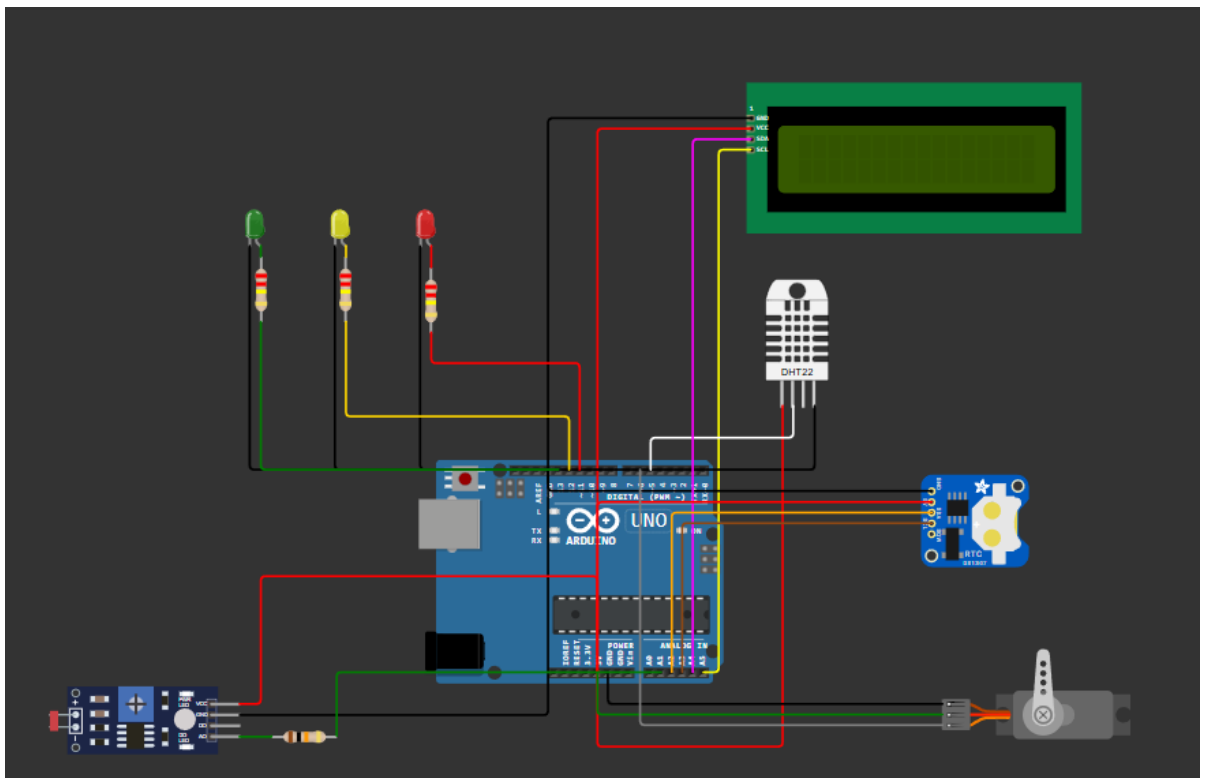


Рис. 4.1. Схема електричних з'єднань системи

Датчик температури та вологості DHT22 підключено до цифрового піна D5.

Аналоговий датчик освітленості (фоторезистор) підключено до аналогового входу A1 для зчитування лінійної зміни інтенсивності світла.

Виконавчий пристрій – сервопривід, що імітує роботу клапана водопостачання, підключено до цифрового піна D6, який підтримує апаратну широтно-імпульсну модуляцію (ШИМ).

Для мінімізації кількості задіяних портів, підключення модуля реального часу DS1307 та LCD-дисплея 1602 реалізовано через послідовну цифрову шину I2C: лінія SDA з'єднана з піном A4, а лінія SCL – з піном A5. Підключення живлення цих модулів здійснено через загальні виводи VCC та GND мікроконтролера.

Блок візуальної індикації стану системи реалізовано за допомогою трьох світлодіодів: зеленого, жовтого та червоного, які підключені до цифрових пінів 13, 12 та 11 відповідно.

4.2. Моделювання роботи апаратної частини в середовищі Wokwi

Розробка та верифікація заданої концепції блоку керування здійснювалась в інтерактивному середовищі Wokwi. Використання онлайн-симуляторів є сучасним стандартом прототипування IoT-систем, що дозволяє з високою точністю симулювати електричні процеси. Створена віртуальна модель дозволяє оцінити взаємодію всіх електронних компонентів у реальному часі на етапі проектування.

Завдяки моделюванню було протестовано коректність підключення шини I2C для дисплея та модуля RTC, а також перевірено реакцію серводвигуна на ШИМ-сигнали з відповідного цифрового порту. Усі зміни в електричній схемі застосовуються миттєво, що значно пришвидшує процес розробки та налагодження апаратної частини без ризику пошкодження фізичних компонентів.

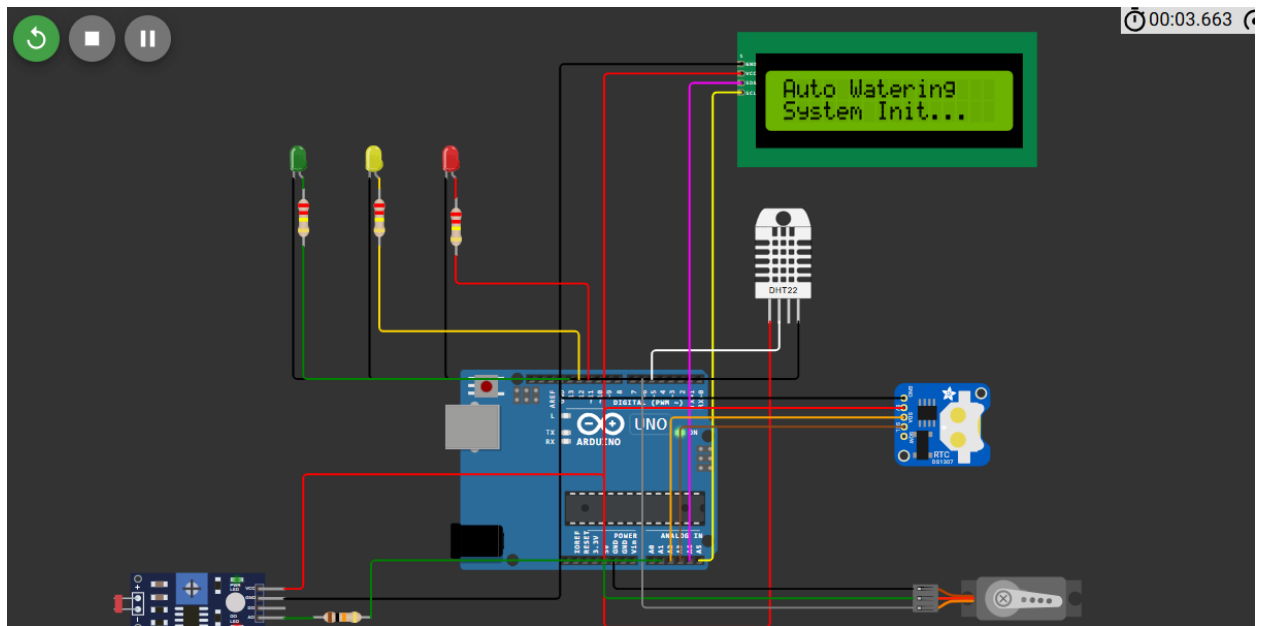


Рис. 4.3. Ініціалізація даних

Зчитування параметрів навколишнього середовища (рис. 4.4). У кожному циклі роботи система зчитує температуру, вологість повітря та рівень освітлення. Якщо якесь із значень не зчитується (наприклад, через відсутність з'єднання або помилку), воно замінюється на безпечне значення за замовчуванням (температура – 24°C, вологість – 30%, освітлення – 300 одиниць АЦП).

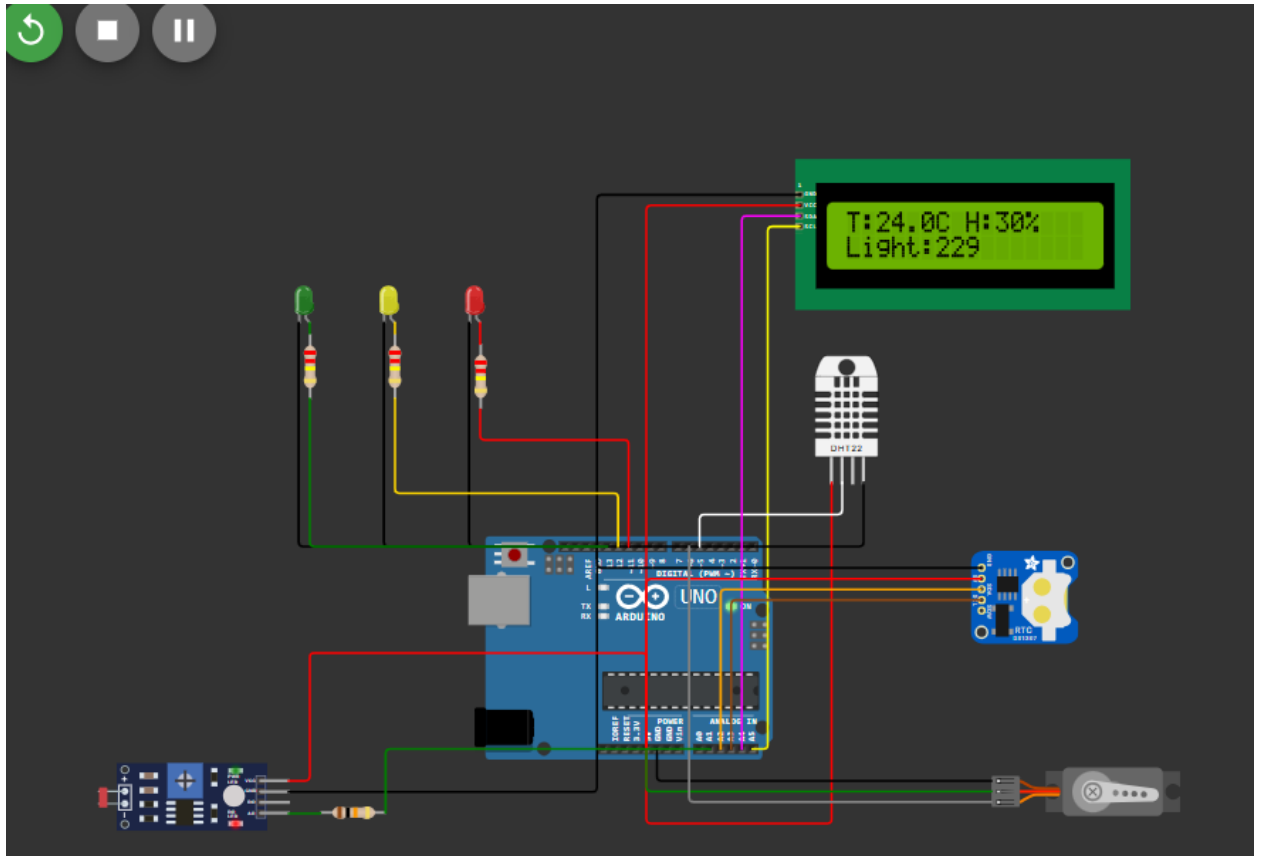


Рис. 4.4. Зчитування параметрів навколишнього середовища

Вивід інформації на дисплей (рис. 4.5). На екрані постійно оновлюється інформація про поточну температуру, вологість та рівень освітленості. Це дозволяє користувачеві відслідковувати умови в реальному часі.

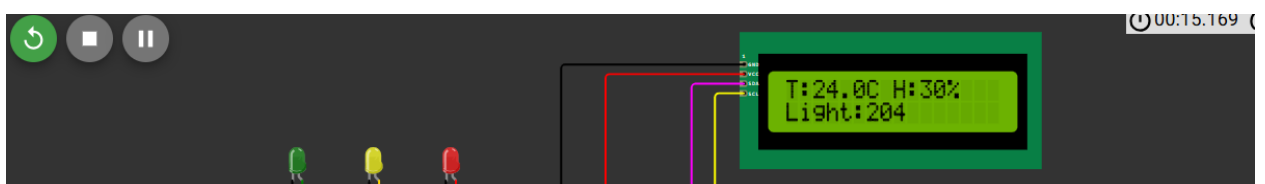


Рис. 4.5. Вивід інформації на дисплей

Критична ситуація (рис. 4.6): надзвичайно низька вологість (менше або дорівнює 10%). У разі, коли вологість падає до критичного рівня, система одразу включає полив, переводячи серводвигун у положення 90 градусів. Одночасно починає миготіти червоний світлодіод. Полив триває

до тих пір, поки вологість не підніметься хоча б на 30% від початкового критичного рівня. На дисплеї з'являється повідомлення про критичну ситуацію та активний полив. Коли рівень вологості нормалізується, з'являється повідомлення про стабілізацію, і клапан (серво) закривається.

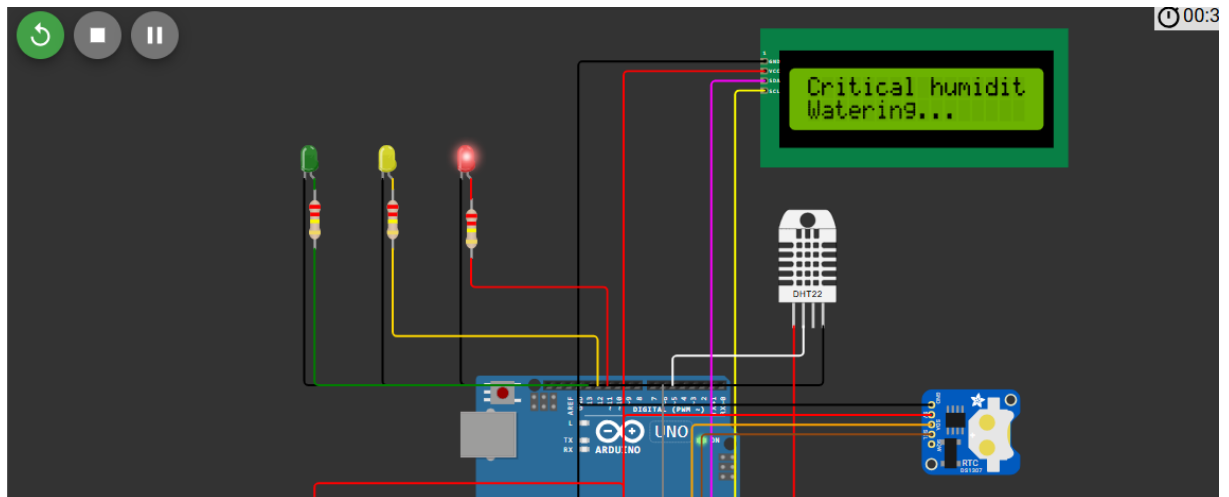


Рис. 4.6. Повідомлення про надзвичайно низьку вологість

Попередження (рис. 4.7): низька вологість (менше 30%, але більше 10%). У цьому випадку система короткочасно активує полив, серводвигун відкриває клапан, миготить жовтий світлодіод. На екрані з'являється повідомлення про низьку вологість і полив.

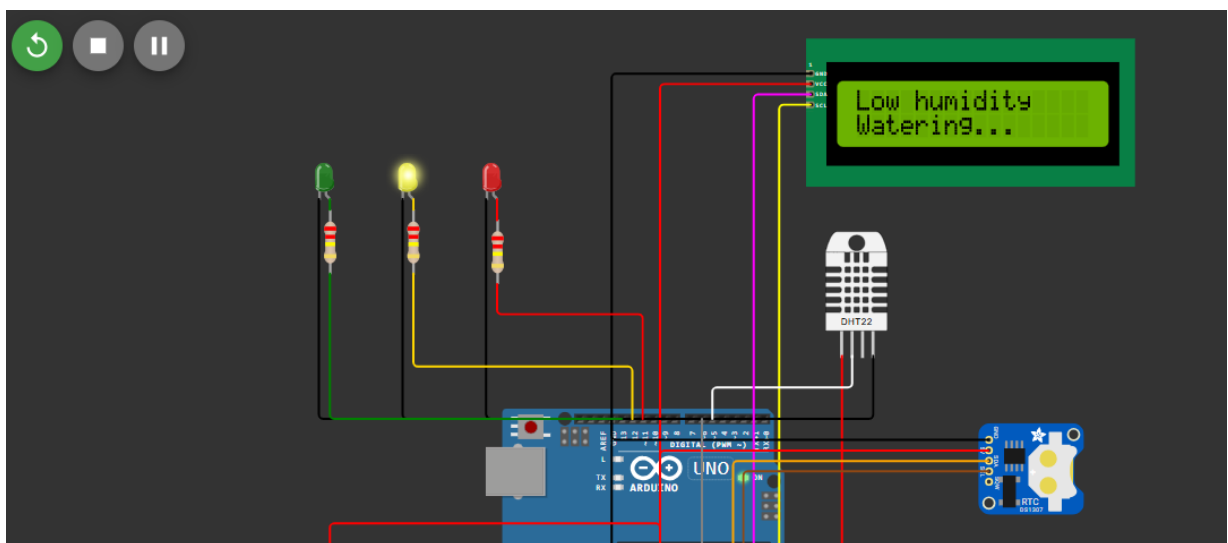


Рис. 4.7. Повідомлення про низьку вологість

Висока температура (понад 45°C), рис. 4.8. Якщо температура повітря перевищує 45°C , система реагує запуском поливу, щоб уникнути перегріву рослин або ґрунту. Ввімкнений полив супроводжується постійним світінням червоного світлодіода та повідомленням "High temp! Watering..." на дисплеї.

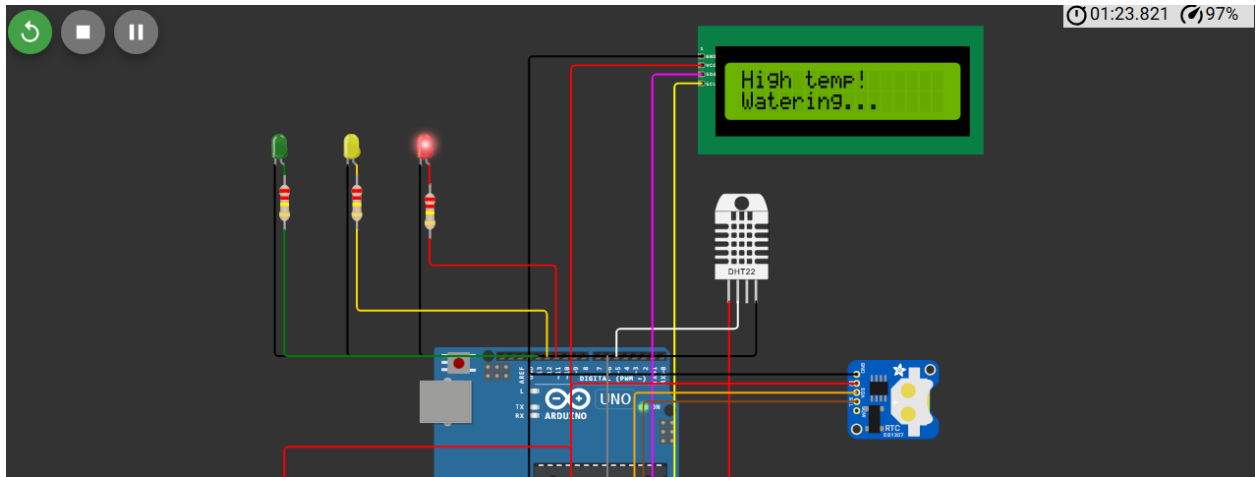


Рис. 4.8.Повідомлення про високу температуру

Сильне освітлення (понад 500 одиниць АЦП), рис. 4.9. Якщо фоторезистор фіксує інтенсивне освітлення (наприклад, яскраве сонце), система також реагує поливом. Ввімкнений полив супроводжується засвіченням жовтого світлодіода та відповідним повідомленням.

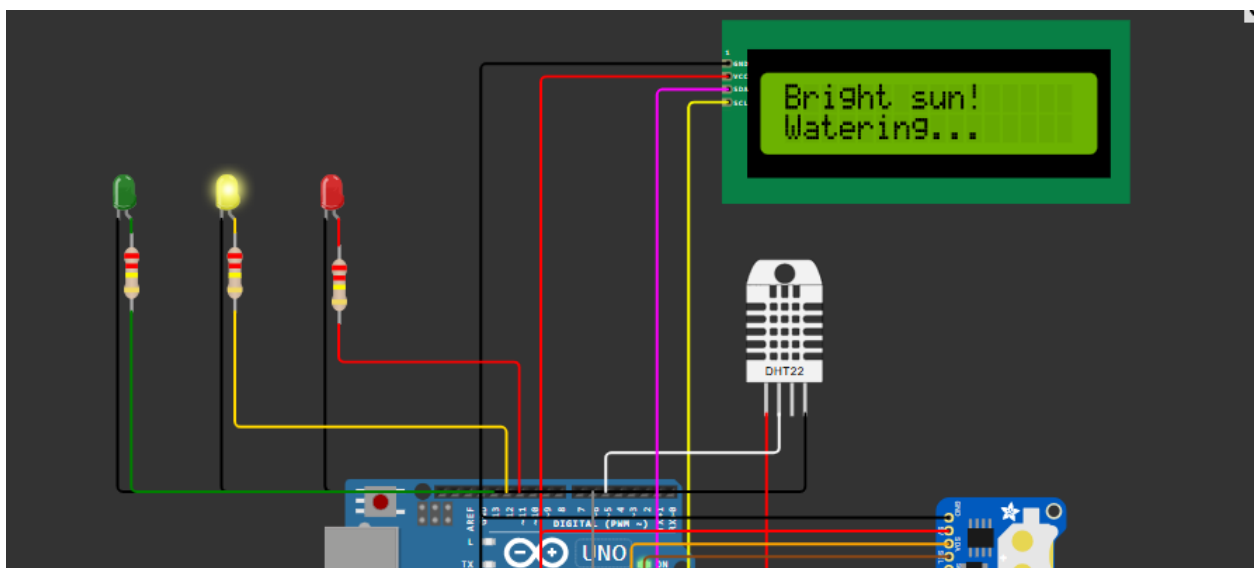


Рис. 4.9.Повідомлення про сильне освітлення

Нормальний стан (всі параметри в межах норми), рис.4.10. Коли температура, вологість і рівень освітлення залишаються в межах припустимих значень, система не виконує жодних активних дій. На дисплеї з'являється повідомлення "All OK" та "System idle", а зелений світлодіод блимає або засвічується, свідчаючи про нормальну роботу.

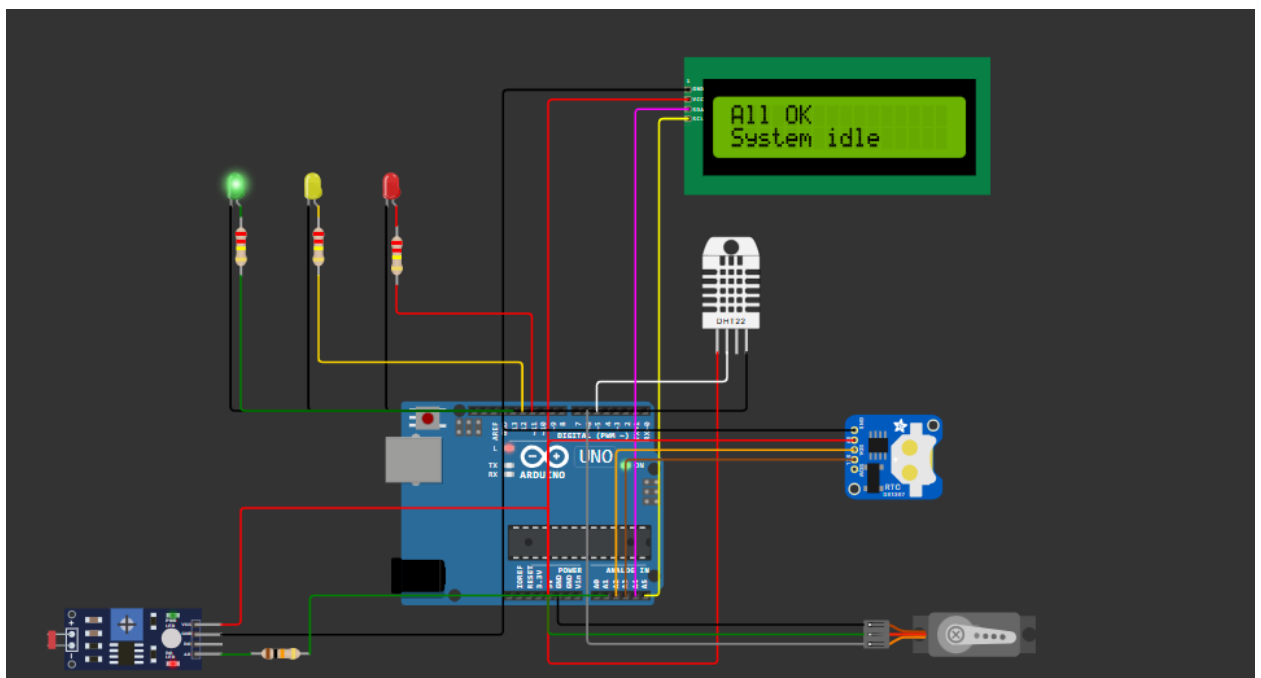


Рис.4.10.Повідомлення про нормальний стан
(всі параметри в межах норми)

Циклічність роботи. Після кожної перевірки параметрів система робить коротку паузу перед наступним зчитуванням, щоб не перевантажувати мікроконтролер та уникнути надто частих спрацювань.

4.3. Компонування та розробка складального кресленика

На основі розробленої електричної схеми і підібраної елементної бази було створено віртуальну 3D-модель, яка ілюструє зовнішній вигляд зібраної системи та просторове компонування блоку керування.

Макет відображає реальне розташування компонентів на монтажній платі: мікроконтролерної плати, модуля RTC, LCD-дисплея, кліматичних датчиків та елементів індикації. Усі елементи з'єднані відповідно до електричної схеми, що дозволяє наочно представити, як система виглядатиме в реальному середовищі експлуатації.

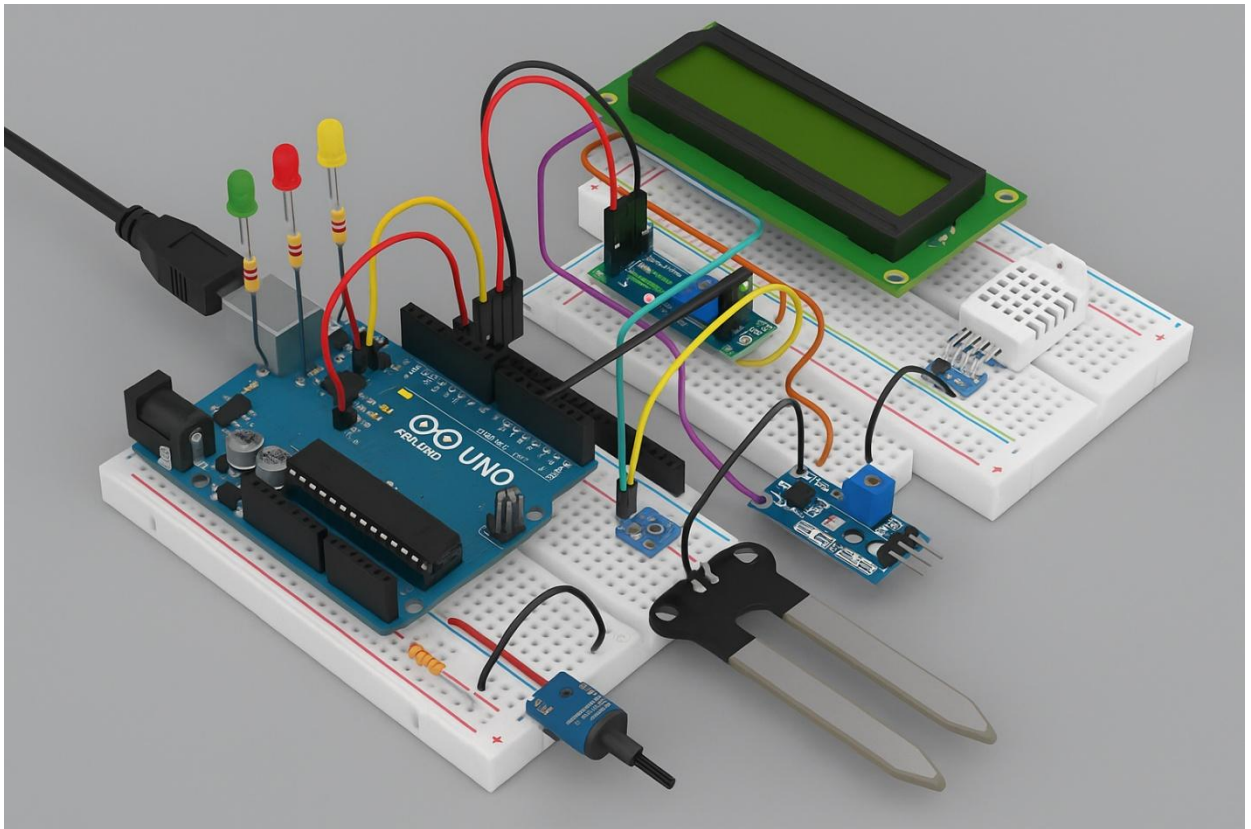


Рис. 4.11. Візуалізація мого макету системи керування на макетній платі

Компактне розміщення елементів забезпечує можливість подальшого монтажу системи у захисний пластиковий корпус відповідно до стандартів захисту IP для експлуатації в умовах підвищеної вологості (ДОДАТОК Г)

Висновок до четвертого розділу

У четвертому розділі було завершено процес проектування блоку керування системою автоматизованого поливу. На основі проведених раніше розрахунків реалізовано принципову електричну схему, яка забезпечує оптимальний розподіл ресурсів мікроконтролера ATmega328P. Рациональне використання інтерфейсу I2C для підключення дисплея та модуля реального часу дозволило суттєво розвантажити цифрові порти, зберігши гнучкість системи для подальшого масштабування.

За допомогою інтерактивного середовища Wokwi було проведено верифікацію алгоритмічної логіки системи. Моделювання підтвердило коректність реакції системи на критичні зміни параметрів довкілля: вологість ґрунту, температуру повітря та рівень освітленості. Процес симуляції довів надійність обраних порогових значень та стабільність роботи виконавчих механізмів (сервоприводу), що дозволило мінімізувати ризики помилок перед етапом фізичного монтажу.

Розробка складального кресленика та 3D-моделі продемонструвала можливість компактного розміщення компонентів на монтажній платі. Запропоноване просторове компонування не лише забезпечує ергономічність, а й відповідає вимогам до розміщення у захисному корпусі, що є критично важливим для експлуатації електронних вузлів в умовах підвищеної вологості. Таким чином, розроблений апаратний блок є повністю готовим до етапу фізичної реалізації та інтеграції в магістраль поливу, забезпечуючи надійне та енергоефективне керування технологічним процесом.

РОЗДІЛ 5. РОЗРОБЛЕННЯ ПРОГРАМНОГО ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ

5.1. Інструментарій та середовище розробки

Для реалізації програмного забезпечення обрано інтегроване середовище Arduino IDE, яке базується на компіляторі GCC та забезпечує повну сумісність з платформою Arduino Uno (мікроконтролер ATmega328P). Вибір мови C++ зумовлений її високою ефективністю у роботі з ресурсами обмежених систем (RAM 2 KB, Flash 32 KB).

Процес розробки включав етап написання коду, його компіляції, перевірки на синтаксичні помилки та завантаження через протокол UART/USB. Використання стандартних бібліотек дозволило реалізувати складні протоколи передачі даних (I2C, 1-Wire) без прямої роботи з регістрами, що значно підвищило надійність коду.

5.2. Архітектура програмного забезпечення

Програмне забезпечення системи автоматизованого поливу (Додаток Д) спроектоване з урахуванням принципів модульності та функціональної декомпозиції. Така архітектура дозволяє розділити загальний алгоритм на незалежні логічні блоки, що значно спрощує процес налагодження, модернізації та масштабування системи.

Весь програмний код розділений на три рівні абстракції:

- Рівень драйверів (бібліотек): взаємодія з апаратними компонентами (датчики, сервопривід, дисплей).
- Рівень логіки керування: обробка даних, прийняття рішень та формування керуючих сигналів.
- Рівень користувацького інтерфейсу: виведення інформації на LCD-дисплей та індикація через LED-матрицю.

Для оптимізації процесу розробки та забезпечення високої стабільності роботи системи використано наступний набір бібліотек, що надані в табл. 5.1.

Табл. 5.1. Використані програмні бібліотеки та їх функціональне призначення

Назва бібліотеки	Призначення	Обґрунтування вибору
LiquidCrystal_I2C	Керування LCD-дисплеєм	Забезпечує роботу через 2-провідну шину I2C, економлячи порти.
DHT	Робота з сенсором DHT22	Стандартизоване рішення для зчитування температури та вологості з перевіркою контрольної суми.
RTCLib	Робота з модулем часу DS1307	Дозволяє синхронізувати роботу системи з реальним часом без втрати даних при вимкненні живлення.
Servo	Керування сервоприводом	Забезпечує генерацію ШІМ-сигналу з необхідною частотою для точного позиціонування приводу клапана.

5.3. Реалізація алгоритму керування

Для забезпечення надійної роботи системи програмне забезпечення побудоване на основі багаторівневої архітектури, що дозволяє виконувати моніторинг параметрів та реагувати на критичні зміни в режимі реального часу. Повний лістинг програмного забезпечення наведено у Додатку Б, тоді як нижче описано ключові програмні вузли реалізації.

Програмна логіка керування складається з наступних функціональних блоків:

Блок ініціалізації (setup): Виконує налаштування швидкості передачі даних у послідовному порту (9600 бод), ініціалізацію бібліотек DHT, RTC, LCD, а також визначає режими роботи цифрових пінів для світлодіодів та сервоприводу.

Блок фільтрації вхідних даних (loop): Забезпечує коректну обробку даних із сенсорів. Для усунення помилок, сприйнятих як некоректні дані (NaN), реалізовано перевірку, що автоматично підставляє безпечні значення за замовчуванням (температура 24°C, вологість 30%).

Блок пріоритетної обробки подій: Реалізує ієрархічну логіку прийняття рішень, що включає:

- Критичний полив: при досягненні вологості ґрунту $\leq 10\%$ система блокує виконання інших процесів до стабілізації показників.
- Попереджувальний полив: активація виконавчого механізму при падінні вологості $< 30\%$.
- Температурна та світлова корекція: превентивне зволоження при температурі $> 45^{\circ}\text{C}$ або освітленості > 500 од. АЦП.

Блок індикації: Забезпечує візуальний зворотний зв'язок для користувача через LCD-дисплей та систему світлодіодів, що дозволяє відстежувати стан системи («System idle» — очікування, «Watering...» — полив) без використання зовнішніх засобів моніторингу.

5.4. Верифікація та налагодження програмного забезпечення

Процес верифікації програмного забезпечення був спрямований на перевірку коректності алгоритмів, стійкості до відмов (Fault Tolerance) та точності роботи виконавчих механізмів. Верифікація проводилася у три етапи: симуляція, апаратне налагодження та тестування на відмовостійкість.

Етап симуляції у Wokwi IDE. Використання інтерактивного середовища Wokwi IDE дозволило провести віртуальне тестування логіки без ризику

пошкодження фізичних компонентів. У ході симуляції було виконано наступне:

Перевірка I2C-адресації: Валідація коректності роботи дисплея та модуля реального часу на спільній шині.

Перевірка часових інтервалів: Тестування таймінгів `delay()`, щоб гарантувати, що система встигає зчитувати дані, не блокуючи виконання критичних команд для сервоприводу.

Корекція помилок: На етапі симуляції було виявлено проблему зависання алгоритму при некоректних даних з датчика DHT22 (повернення NaN). Це було вирішено введенням блоку перевірки `isnan()`, який замінює помилкові дані на безпечні значення за замовчуванням (Safe State).

Апаратне налагодження (Debugging). На етапі реального монтажу для діагностики використовувався Serial Monitor (монітор послідовного порту). Він дозволив у режимі реального часу відстежувати значення змінних `temp`, `hum` та `light`.

Калібрування: Порівнюючи показники `analogRead(PHOTO_PIN)` з фактичним освітленням, було емпіричним шляхом встановлено оптимальний поріг (500 умовних одиниць) для активації поливу при яскравому сонці.

Аналіз реакції: Serial Monitor дозволив виявити та усунути "дребезг" сервоприводу на межі перемикання умов, шляхом введення часових затримок між перемиканнями станів.

Тестування на відмовостійкість (Edge Cases). Для забезпечення високої надійності були протестовані "крайні випадки" (Edge Cases):

Аварійне відключення датчиків: Система програмно ідентифікує відсутність сигналу від DHT22 та переходить у режим безпечного функціонування з використанням константних значень (safe values), що дозволяє уникнути неконтрольованого поливу.

Циклічність при критичних станах: Реалізовано механізм while (hum <= 13), який не припиняє полив, поки вологість не стабілізується. Це виключає переривання циклу поливу при короткочасних стрибках значень вологості на самому датчику.

Енергонезалежність: Перевірено коректність роботи модуля DS1307 після відключення основного живлення - завдяки резервній батареї CR2032 системний час зберігається, що дозволяє уникнути реініціалізації при перезапуску живлення.

Виконана верифікація довела, що програмне забезпечення здатне стабільно функціонувати в умовах можливих перешкод та апаратних збоїв, що є ключовою вимогою до автоматизованих систем у сільському господарстві.

Висновки до п'ятого розділу

У п'ятому розділі було розроблено, оптимізовано та верифіковано програмне забезпечення системи автоматичного поливу. Програмна реалізація, виконана на мові C++, забезпечує високу надійність обробки вхідних даних з сенсорів, точність дотримання алгоритму керування та стабільність роботи виконавчих вузлів (сервоприводу та засобів індикації).

Завдяки застосуванню модульної архітектури коду, досягнуто високого рівня гнучкості: розроблене ПЗ дозволяє оперативно модифікувати параметри системи (порогові рівні вологості чи температури) під потреби конкретних сільськогосподарських культур без необхідності повної переробки структури алгоритму. Впроваджені механізми обробки виключень та фільтрації даних (зокрема, коректна обробка станів датчиків NaN) роблять систему стійкою до відмов та мінімізують ризики некоректного спрацювання в реальних умовах експлуатації.

Етап верифікації в інтерактивних середовищах моделювання та шляхом апаратного налагодження підтвердив відповідність програмної логіки поставленим технічним завданням. Розроблене програмне забезпечення є ресурсоефективним, не перевантажує пам'ять мікроконтролера ATmega328P і є повністю готовим до інтеграції у фізичний макет системи автоматизації зрошення.

ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ

У дипломному проєкті розглянуто розробку та впровадження автоматизованої системи поливу рослин із використанням мікроконтролерних технологій. Робота складається з п'яти розділів, у яких розглянуто теоретичні аспекти автоматизації, проведено інженерні розрахунки, спроектовано апаратну частину, розроблено програмне забезпечення та проведено експериментальну верифікацію системи.

У першому розділі представлено аналітичний огляд існуючих методів автоматизації зрошення. Проведено порівняльний аналіз патентних рішень та комерційних систем (Hunter, Rain Bird, GARDENA тощо), що дозволило обґрунтувати переваги створення власної системи на базі відкритої архітектури Arduino для забезпечення гнучкості та зниження вартості впровадження.

У другому розділі виконано інженерно-гідравлічні розрахунки, визначено параметри водоспоживання для заданої площі поливу та розраховано необхідну продуктивність системи. Виконано інженерно-гідравлічні розрахунки, згідно з якими для площі зрошення з радіусом 10 м визначено добову норму води (1885 л) та розрахунковий час безперервної роботи системи (2.1 год).

У третьому розділі розроблено структурно-функціональну схему системи автоматизованого поливу (рис. 3.1), що базується на модульному підході. Центральним елементом керування обрано мікроконтролер ATmega328P, який забезпечує циклічне опитування датчиків та формування керуючих сигналів. Розроблений алгоритм (рис. 3.2) реалізує багаторівневу логіку пріоритетів: при падінні вологості ґрунту нижче 10% активується режим критичного поливу, а при показниках нижче 30% — превентивний полив. Використання шини I2C для підключення LCD-дисплея та модуля

RTC DS1307 дозволило раціонально використати порти мікроконтролера, залишивши резерв для підключення додаткових сенсорів.

У четвертому розділі було завершено процес проєктування блоку керування системою автоматизованого поливу. На основі проведених раніше розрахунків реалізовано принципову електричну схему, яка забезпечує оптимальний розподіл ресурсів мікроконтролера ATmega328P. Раціональне використання інтерфейсу I2C для підключення дисплея та модуля реального часу дозволило суттєво розвантажити цифрові порти, зберігши гнучкість системи для подальшого масштабування. За допомогою інтерактивного середовища Wokwi було проведено верифікацію алгоритмічної логіки системи. Моделювання підтвердило коректність реакції системи на критичні зміни параметрів довкілля: вологість ґрунту, температуру повітря та рівень освітленості. Процес симуляції довів надійність обраних порогових значень та стабільність роботи виконавчих механізмів (сервоприводу), що дозволило мінімізувати ризики помилок перед етапом фізичного монтажу.

У п'ятому розділі було розроблено та верифіковано програмне забезпечення системи автоматичного поливу. Програмна реалізація, виконана на мові C++, забезпечує високу надійність обробки вхідних даних з сенсорів, точність дотримання алгоритму керування та стабільність роботи виконавчих вузлів (сервоприводу та засобів індикації). Завдяки застосуванню модульної архітектури коду, досягнуто високого рівня гнучкості: розроблене ПЗ дозволяє оперативно модифікувати параметри системи (порогові рівні вологості чи температури) під потреби конкретних сільськогосподарських культур без необхідності повної переробки структури алгоритму. Впроваджені механізми обробки виключень та фільтрації даних (зокрема, коректна обробка станів датчиків NaN) роблять систему стійкою до відмов та мінімізують ризики некоректного спрацювання в реальних умовах експлуатації.

Таким чином, розроблена система автоматизованого поливу забезпечує значне спрощення та оптимізацію процесу догляду за рослинами, дозволяючи зменшити витрати води та виключити вплив людського фактора. Результати роботи можуть бути успішно впроваджені в умовах невеликих тепличних господарств або для потреб приватного садівництва, забезпечуючи підвищення продуктивності та надійність керування технологічним процесом зрошення.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРНИХ ДЖЕРЕЛ

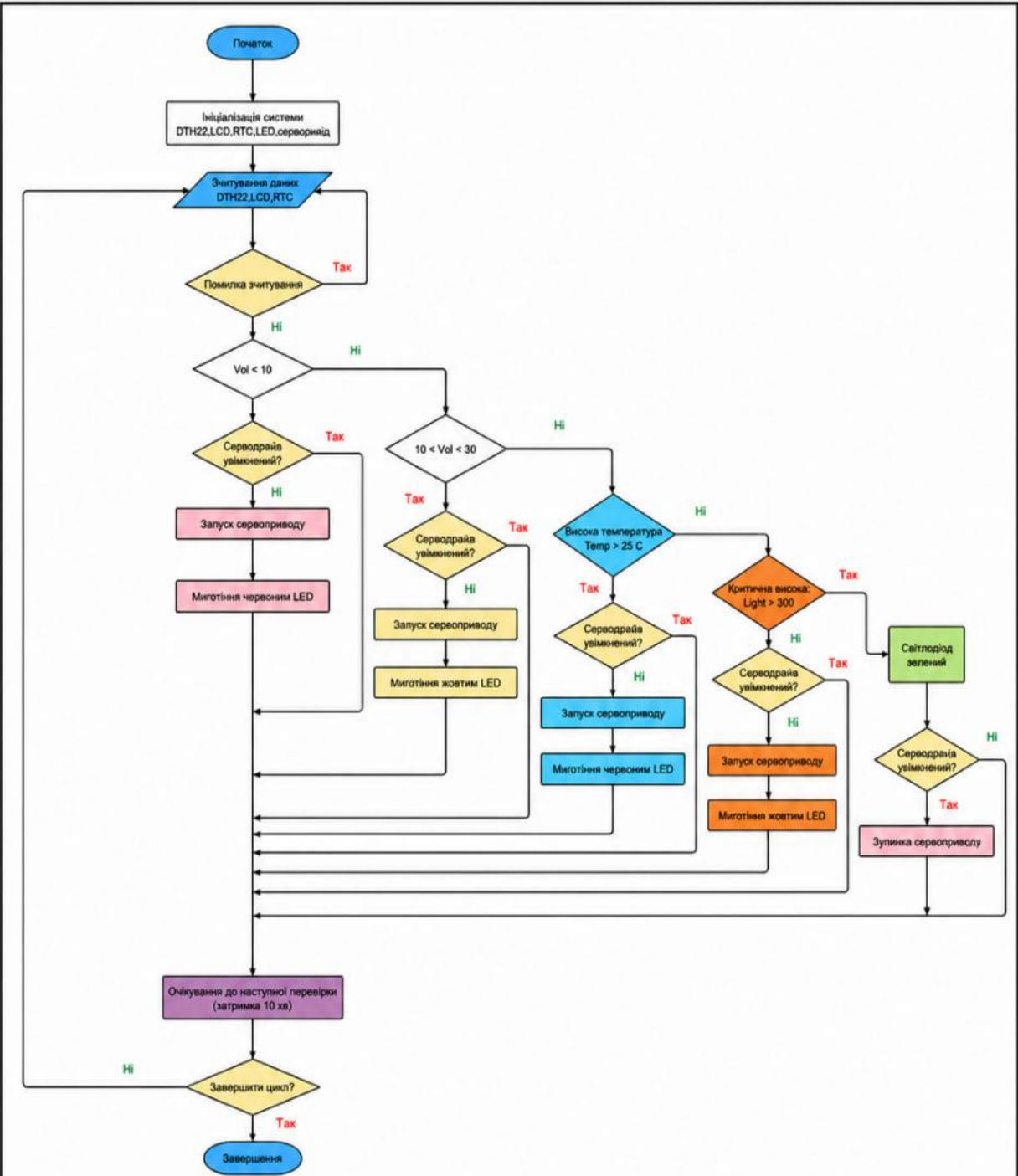
- [1] Ромащенко М. І. Сучасні технології зрошення: стан та перспективи розвитку. Київ : Аграрна наука, 2021. 142 с.
- [2] Сніжко О. О. Проєктування систем автоматизованого поливу та гідравлічних розрахунків. Харків : ХНТУСГ, 2019. 215 с.
- [3] <https://ai.thestempedia.com/project/drip-irrigation-system/>
- [4] <https://www.hawthorne-gardening.com/education/drip-irrigation-design-4-steps/>
- [5] Patent US 8948921 B2, Int. Cl. A01G 25/16. Smart irrigation system / M. Smith et al. ; publ. 03.02.2015.
- [6] Пат. 142125 Україна, МПК A01G 25/16. Система автоматизованого крапельного поливу з мікропроцесорним керуванням / заявн. і патентовласник НУБіП України. – опубл. 25.05.2020.
- [7] Patent US 10506769 B2, Int. Cl. A01G 25/16. Modular automated drip irrigation system / Johnson R. ; publ. 17.12.2019.
- [8] Довідник з ландшафтного та сільськогосподарського зрошення / за ред. В. М. Поліщука. Київ : Урожай, 2020. 180 с.
- [9] Hunter Industries: офіційний сайт компанії. URL: <https://www.hunterindustries.com/> (дата звернення: 15.05.2024).
- [10] Rain Bird: офіційний сайт компанії. URL: <https://www.rainbird.com/> (дата звернення: 15.05.2024).
- [11] GARDENA: офіційний сайт компанії. URL: <https://www.gardena.com/> (дата звернення: 15.05.2024).
- [12] Netafim: офіційний сайт компанії. URL: <https://www.netafim.com/> (дата звернення: 15.05.2024).
- [13] Rachio: офіційний сайт компанії. URL: <https://rachio.com/> (дата звернення: 15.05.2024).

- [14] Orbit B-hyve: офіційний сайт компанії. URL: <https://bhyve.orbitonline.com/> (дата звернення: 15.05.2024).
- [15] Toro: офіційний сайт компанії. URL: <https://www.toro.com/> (дата звернення: 15.05.2024).
- [16] Автоматизація сільськогосподарського виробництва / О. В. Сидоренко [та ін.]. Київ : Агроосвіта, 2022. 256 с.
- [17] Коваленко П. І., Михайлов Ю. А. Автоматизація та проєктування меліоративних систем і споруд : підручник. Київ : Аграрна наука, 2021. 312 с. (Саме звідси взяті формули для 2.1 та 2.2)
- [18] Проєктування автоматизованих систем мікрозрошення : навч.-метод. посіб. / за ред. М. І. Ромащенко. Київ : НУБіП, 2020. 145 с. (Це джерело ідеально закриває формулу 2.3 щодо розрахунку часу роботи дощувача)
- [19] ATmega328P 8-bit AVR Microcontroller with 32K Bytes In-System Programmable Flash. Datasheet. Microchip Technology Inc. URL: https://ww1.microchip.com/downloads/en/DeviceDoc/Atmel-7810-Automotive-Microcontrollers-ATmega328P_Datasheet.pdf
- [20] Гелвіг О. Проєктування систем живлення електронних засобів автоматизації. — Львів: Вища школа, 2020. — 180 с.
- [21] DHT22 Product User Manual. Temperature and Humidity Module. SparkFun Electronics. URL: <https://cdn.sparkfun.com/assets/f/7/d/9/c/DHT22.pdf>
- [22] Данієль Г. Автоматизація технологічних процесів у сучасному сільському господарстві. — Київ: Агропромвидав, 2021. — 312 с.
- [23] UM10204: I2C-bus specification and user manual. NXP Semiconductors. URL: <https://www.nxp.com/docs/en/user-guide/UM10204.pdf>
- [24] ATmega328P 8-bit AVR Microcontroller Datasheet. Microchip Technology Inc. URL: https://ww1.microchip.com/downloads/en/DeviceDoc/Atmel-7810-Automotive-Microcontrollers-ATmega328P_Datasheet.pdf
- [25] Arduino Uno Rev3 Official Documentation. Arduino. URL: <https://docs.arduino.cc/hardware/uno-rev3>

- [26]DS1307 64 x 8, Serial, I2C Real-Time Clock Datasheet. Maxim Integrated.
URL: <https://datasheets.maximintegrated.com/en/ds/DS1307.pdf>
- [27]Бойко В. І. Напівпровідникові прилади та їх застосування в автоматичі.
— Київ: Техніка, 2019. — 215 с.
- [28]UM10204: I2C-bus specification and user manual. NXP Semiconductors.
URL: <https://www.nxp.com/docs/en/user-guide/UM10204.pdf>
- [29]AM2302 (DHT22) Temperature and Humidity Sensor Datasheet. Aosong Electronics Co., Ltd. URL: <https://cdn-shop.adafruit.com/datasheets/Digital+humidity+and+temperature+sensor+AM2302.pdf>
- [30]SG90 Servo Motor Technical Specifications. TowerPro Compliance Data. Imperial College London. URL: https://www.ee.ic.ac.uk/pcheung/teaching/DE1_EE/stores/sg90_datasheet.pdf

ДОДАТОК А

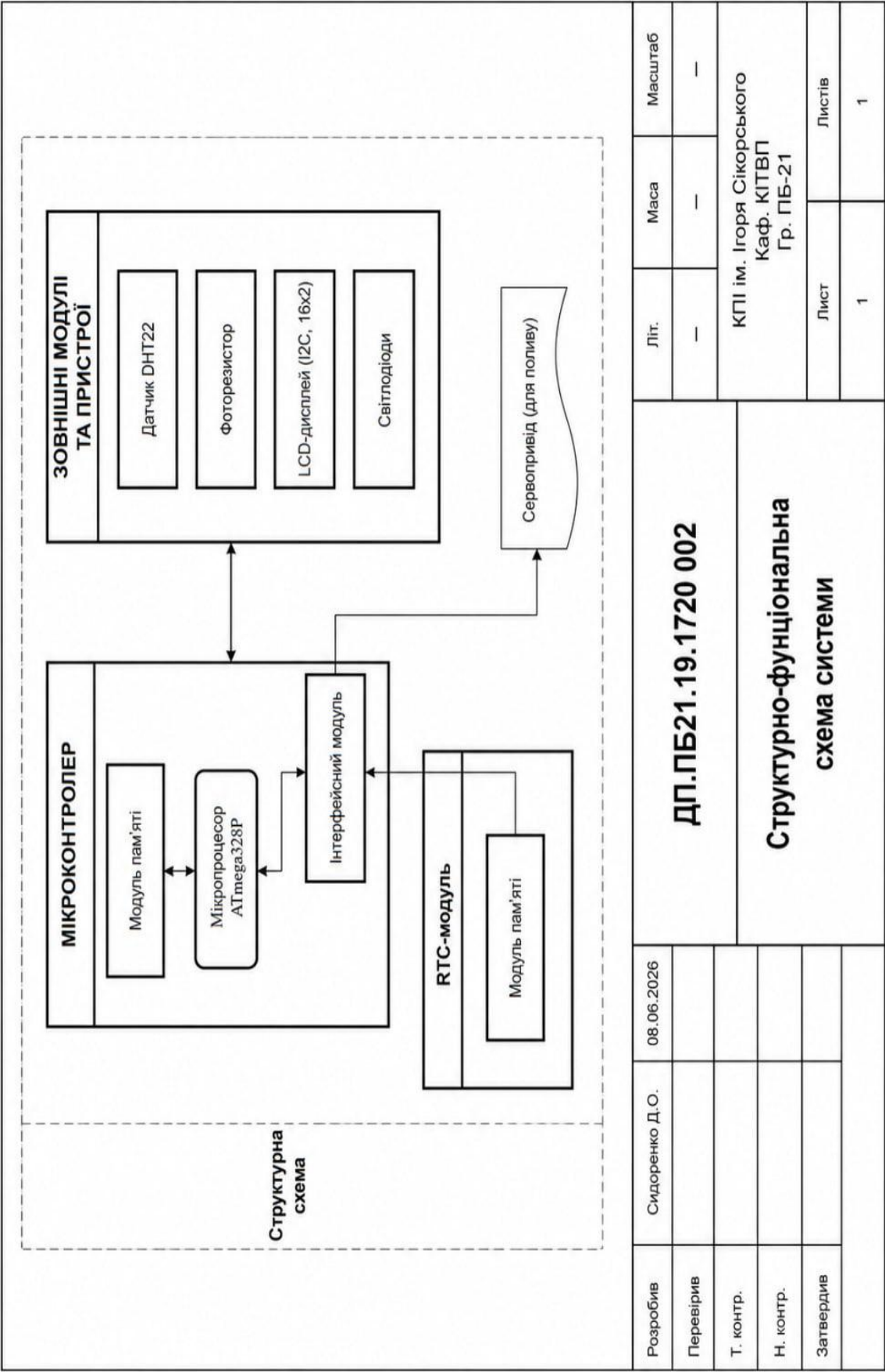
Алгоритм роботи автоматизованої системи



Розробив	Сидоренко Д.О.	08.06.2026	ДП.ПБ21.19.1720 001	Літ.	Маса	Масштаб
Перевірів				—	—	—
Т. контр.			Алгоритм роботи програмного забезпечення	КПІ ім. Ігоря Сікорського Каф. КІТВП Гр. ПБ-21		
Н. контр.						
Затвердив				Лист	Листів	
				1	1	

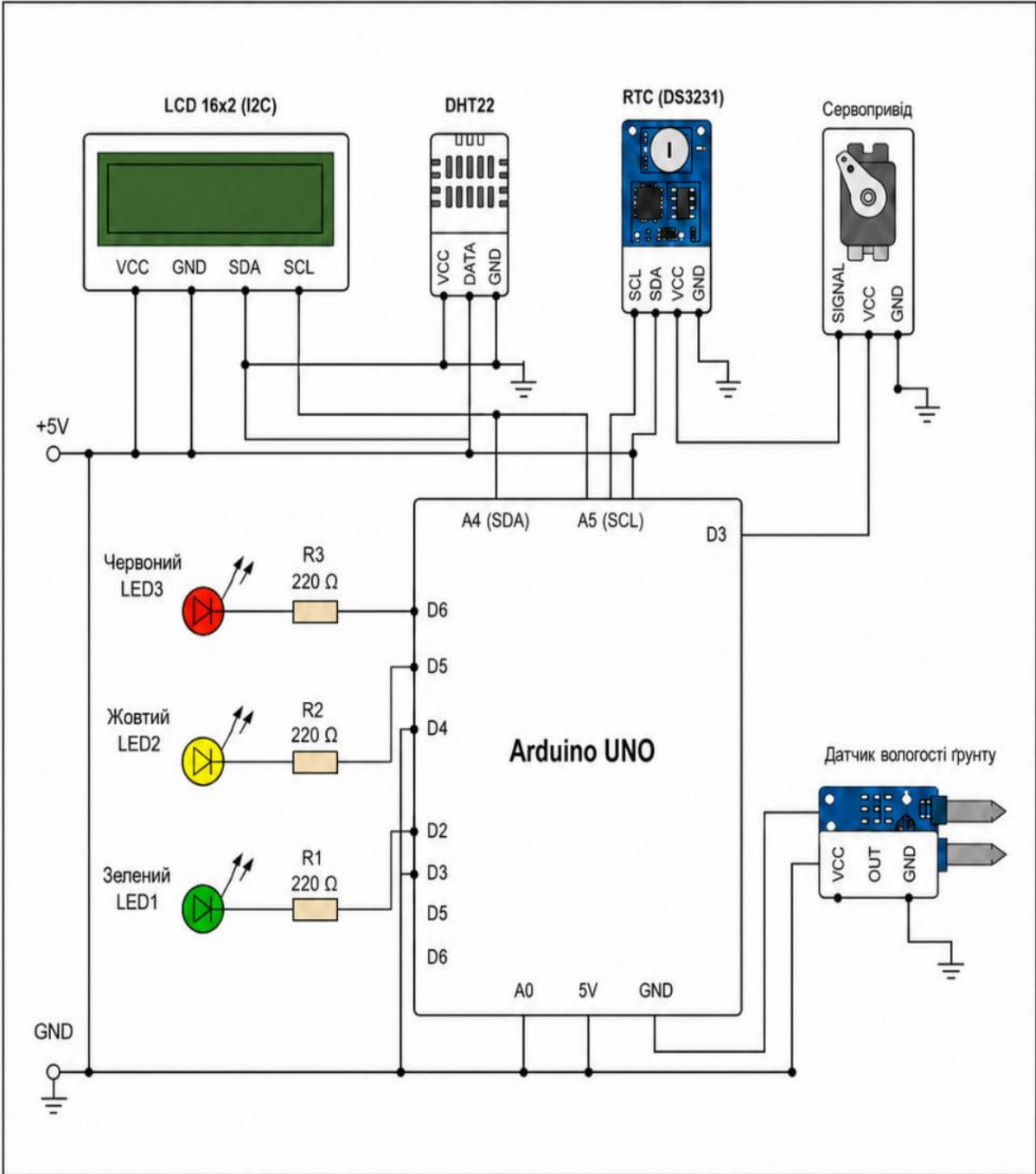
ДОДАТОК Б

Структурно-функціональна схема



ДОДАТОК В

Принципова електрична схема



Розробив	Сидоренко Д.О.	08.06.2026	ДП.ПБ21.19.1720 003	Літ.	Маса	Масштаб
Перевірив				—	—	—
Т. контр.			Електрична принципова схема	КПІ ім. Ігоря Сікорського Каф. КІТБТ Гр. ПБ-21		
Н. контр.				Лист	Листів	
Затвердив				1	1	

ДОДАТОК Г

Конструкторська документація

ДП.ПБ21.19.1720.004

120 *

160 *

70 *

1

2

3

4

5

6

7

8

9

Аксонометрична проекція

4

5

1. *Розміри для довідок

2. Невказані граничні розміри Н12, н12, ±IT12,

Поз.	Найменування	Кільк.	Прим.
1	Корпус	1	
2	Кришка	1	
3	LCD 1602(12C)	1	
4	Плата Arduino UNO R3	1	
5	Плата перетворювач DC-DC	1	
6	Датчик вологості ґрунту DHT22	1	
7	Світлодіод червоний	1	
8	Світлодіод жовтий	1	
9	Світлодіод зелений	1	

ДП.ПБ21.19.1720.004

Блок системи автоматичного поливу складальне креслення

Лист

Масштаб

0.44

1:1

Лист 1

Листов 1

КПІ ім. Ізбоя Скарського каф. КТВП

Формат А3

Інд № подл.

Подп. і дата

Взам. инв №

Инв № дубл.

Подп. и дата

Гроби №

Нерв. примен.

ЗОНДWORKS для учебных заведений. Только для обучающих целей.

Формат	Зона	Поз.	Позначення	Назва	Кіл.	Примітка
				<u>Документація</u>		
A3			ДП.ПБ21.19.1720 005 СК	Складальне креслення	1	
				<u>Деталі</u>		
		1	ДП.ПБ21.19.1720.001	Корпус	1	
		2	ДП.ПБ21.19.1720.002	Кришка	1	
				<u>Стандартні вироби</u>		
		3	ГОСТ 17475-80	Гвинт М3×10	4	
		4	ГОСТ 17475-80	Гвинт М3×16 (для LCD)	4	
		5	ГОСТ 5915-70	Гайка М3	8	
		6	ГОСТ 11371-78	Шайба 3	8	
		7	ГОСТ 22032-76	Стійка різьбова М3×15	4	
				<u>Інші вироби</u>		
		8	Arduino UNO R3	Плата керування	1	
		9	LCD 1602 I2C	РК-дисплей	1	
		10	DHT22	Датчик температури та вологості	1	
		11	DS3231	Модуль реального часу	1	
		12	FC-28	Датчик вологості ґрунту	1	
		13	SG90	Серворвивід	1	
		14	LED 5 мм зелений	Світлодіод	1	
		15	LED 5 мм жовтий	Світлодіод	1	
		16	LED 5 мм червоний	Світлодіод	1	
		17	Модуль перетворювача DC-DC (step-down)	Живлення	1	

					ДП.ПБ21.19.1720 005 СК			
					Корпус системи автоматизованого поливу. Складальне креслення	Літ.	Маса	Масштаб
								1:2
						Лист		Листів
						1		1
						Матеріал корпусу: ABS пластик, t = 5 мм		
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата				
Розробив		Сидоренко Д.О.		08.06.2025				
Перевірів								
Н. контр.								
Затвердив								

[illegible]

ДОДАТОК Д

Лістинг програми

```
#include <DHT.h>  
#include <Wire.h>
```

```

#include <LiquidCrystal_I2C.h>
#include <RTCLib.h>
#include <Servo.h>

// Визначення пінів та констант
#define DHTPIN 5
#define DHTTYPE DHT22
#define PHOTO_PIN A1
#define RED_LED 11
#define YELLOW_LED 12
#define GREEN_LED 13
#define SERVO_PIN 6

DHT dht(DHTPIN, DHTTYPE);
LiquidCrystal_I2C lcd(0x27, 16, 2);
RTC_DS1307 rtc;
Servo servo;

// Допоміжна функція миготіння світлодіодом
void blinkLed(int pin, int times = 3, int delayMs = 300) {
    for (int i = 0; i < times; i++) {
        digitalWrite(pin, HIGH); delay(delayMs);
        digitalWrite(pin, LOW); delay(delayMs);
    }
}

void setup() {
    Serial.begin(9600);
    dht.begin(); rtc.begin(); lcd.init(); lcd.backlight();

```

```

servo.attach(SERVO_PIN);

pinMode(RED_LED, OUTPUT); pinMode(YELLOW_LED, OUTPUT);
pinMode(GREEN_LED, OUTPUT);

if (!rtc.isrunning()) rtc.adjust(DateTime(F(__DATE__), F(__TIME__)));

lcd.print("Auto Watering");
delay(2000); lcd.clear();
}

void loop() {
  // Збір даних з фільтрацією виключень
  float temp = dht.readTemperature();
  float hum = dht.readHumidity();
  int light = analogRead(PHOTO_PIN);

  if (isnan(temp)) temp = 24.0;
  if (isnan(hum)) hum = 30.0;
  if (light == 0) light = 300;
  // Вивід на LCD
  lcd.setCursor(0, 0); lcd.print("T:"); lcd.print(temp, 1); lcd.print("C  H:");
  lcd.print(hum, 0); lcd.print("%");
  lcd.setCursor(0, 1); lcd.print("Light:"); lcd.print(light);

  // Ієрархія умов поливу
  if (hum <= 10) { // Пріоритет №1: Критична вологість
    lcd.clear(); lcd.print("Critical humidity!");
    while (hum <= 13) { servo.write(90); blinkLed(RED_LED, 1, 500); hum =
dht.readHumidity(); }
    servo.write(0);

```

```
    }  
    else if (hum < 30) { servo.write(90); blinkLed(YELLOW_LED, 3, 300);  
delay(3000); servo.write(0); }  
    else if (temp > 45) { servo.write(90); digitalWrite(RED_LED, HIGH);  
delay(3000); servo.write(0); digitalWrite(RED_LED, LOW); }  
    else if (light > 500) { servo.write(90); digitalWrite(YELLOW_LED, HIGH);  
delay(3000); servo.write(0); digitalWrite(YELLOW_LED, LOW); }  
    else { digitalWrite(GREEN_LED, HIGH); delay(2000);  
digitalWrite(GREEN_LED, LOW); }  
  
    delay(2000);  
}
```