

Міністерство освіти і науки України
Криворізький національний університет
Факультет інформаційних технологій
Кафедра автоматизації, комп'ютерних наук і технологій

КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА

на здобуття ступеня вищої освіти – бакалавр
за освітньо-професійною програмою
«Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології»

зі спеціальності
174 – Автоматизація, комп'ютерно-інтегровані технології та
робототехніка

тема роботи:

«Автоматизована система дистанційного керування поливом рослин»

Виконав студент гр. АКІТР-23ск _____ Морозов І.С.

Керівник _____ Бурнасов П.В.

Нормоконтроль _____ Маринич І. А.

Завідувач кафедри _____ Рубан С. А.

КРИВОРІЗЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ

Факультет: інформаційних технологій

Кафедра: автоматизації, комп'ютерних наук і технологій

Ступінь вищої освіти: Бакалавр

Спеціальність: 174 – Автоматизація, комп'ютерно-інтегровані технології та робототехніка

ЗАТВЕРДЖУЮ

Зав. кафедрою: к.т.н. Рубан С.А.

« 26 » січня 2026 р.

ЗАВДАННЯ

на кваліфікаційну роботу бакалавра

студентові групи АКІТР-23ск Морозову Івану Сергійовичу

1. Тема кваліфікаційної роботи: «Автоматизована система дистанційного керування поливом рослин»

затверджено наказом по університету № 172с від 30.03.2026 р.

2. Термін здачі кваліфікаційної роботи: 10.06.2026 р.

3. Склад кваліфікаційної роботи: Пояснювальна записка обсягом 63 с., презентація у Microsoft PowerPoint (15 слайдів) в електронному та друкованому вигляді

4. Консультанти кваліфікаційної роботи:

Розділ 1-2

ст. викл. Бурнасов П.В.

Нормоконтроль

доц. Маринич І. А.

5. Календарний план:

№	Етапи роботи	Термін виконання
1	<i>Вступ</i>	<i>01.03.26</i>
2	<i>Розділ 1</i>	<i>05.04.26</i>
3	<i>Розділ 2</i>	<i>01.05.26</i>
4	<i>Висновки</i>	<i>25.05.26</i>
5	<i>Оформлення кваліфікаційної роботи</i>	<i>28.05.26</i>
6	<i>Підготовка презентації та графічного матеріалу</i>	<i>20.05.26</i>
7	<i>Підготовка доповіді до захисту</i>	<i>05.06.25</i>

6. Дата видачі завдання: 28.01.2026р.

Керівник _____ / Бурнасов П.В./

7. **Запевнення:** Я, Морозов Іван Сергійович, запевняю, що ця кваліфікаційна робота виконана самостійно, не містить академічного плагіату, фабрикації, фальсифікації. Використання ідей, результатів і текстів інших авторів мають посилання на відповідне джерело.

Із чинним Положенням про академічну доброчесність Криворізького національного університету ознайомлений.

Чітко усвідомлюю, що в разі виявлення у кваліфікаційній роботі умисних порушень робота не допускається до захисту або оцінюється незадовільно.

Студент _____ / Морозов І.С./

АНОТАЦІЯ

Морозов І.С. Автоматизована система дистанційного керування поливом рослин: кваліфікаційна робота бакалавра : 174 – Автоматизація, комп'ютерно-інтегровані технології та робототехніка. Кривий Ріг. Криворізький національний університет, 2026. 63 с.

Об'єктом дослідження є процеси управління зрошенням присадибної ділянки з різними овочевими культурами та садом, що характеризуються нерівномірністю потреб рослин у вологості залежно від виду культури, фази вегетації, стану ґрунту та метеорологічних умов.

Метою роботи є розробка автоматизованої системи дистанційного керування поливом рослин на присадибній ділянці з різними овочевими культурами та садом.

У першому розділі проведено аналіз технічних рішень автоматизації систем дистанційного керування поливом, виконано детальний огляд наявних комерційних рішень, а також систематизовано сучасні фізичні методи контролю параметрів що впливають на розвиток рослин з оцінкою їхньої придатності для інтеграції в сучасну інфраструктуру «розумного будинку».

У другому розділі розроблено систему автоматичного поливу присадибної ділянки, інтегровану в екосистему «розумного будинку», яка забезпечує комплексний моніторинг, визначення потреби поливу в різних зонах та автоматичне нормування. Складна аналітична обробка, зокрема розрахунок евапотранспірації за формулою Харгрейвса-Самані, дозволяє враховувати погодні умови та агрономічні вимоги при визначенні норми поливу.

АВТОМАТИЗОВАНА СИСТЕМА, РОЗУМНИЙ БУДИНОК, HOME ASSISTANT, WI-FI, BLUETOOTH, IOT, МІКРОКОНТРОЛЕР, ВБУДОВАНІ СИСТЕМИ, NODE-RED, ESPHOME.

					КНУ КРБ.174.26.05.00.ПЗ				
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата					
Розроб.		Морозов І.С.			АНОТАЦІЯ	Літ.		Арк.	Аркушів
Перевір.		Бурнасов П.В.						4	1
						КНУ АКІТР-23ск			
Н. Контр.		Маринич І.А.							
Затверд.		Маринич І.А.							

ЗМІСТ

ВСТУП.....	6
РОЗДІЛ 1 АНАЛІЗ СИСТЕМ КЕРУВАННЯ ПОЛИВОМ РОСЛИН	10
1.1 Характеристика об'єкту автоматизації.....	10
1.2 Порівняльний аналіз мікроконтролерних платформ.....	14
1.3 Аналіз протоколів бездротового зв'язку	16
1.4 Аналіз виконавчих пристроїв	17
1.5 Аналіз програмних платформ та інструментів розробки.....	18
1.6 Аналіз архітектурних рішень побудови системи	19
1.7 Формування вимог до системи, що проєктується	20
1.8 Висновки до розділу 1	22
РОЗДІЛ 2 РОЗРОБКА СИСТЕМИ АВТОМАТИЧНОГО ПОЛИВУ	24
2.1 Архітектура системи керування поливом	24
2.2 Вибір технічних засобів реалізації системи.....	27
2.3 Програмна частина системи.....	37
2.4 Алгоритми прийняття рішень.....	41
2.5 Монтаж та підключення	47
2.6 Налаштування Home Assistant	48
2.7 MQTT-брокер Mosquitto, Node-RED, InfluxDB	53
2.8 Очікувані результати впровадження.....	54
2.9 Висновки до розділу 2	55
ВИСНОВКИ.....	58
СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ	61

					КНУ КРБ.174.26.05.00.ПЗ					
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата	ЗМІСТ			Літ.	Арк.	Аркушів
Розроб.		Морозов І.С.								
Перевір.		Бурнасов П.В.							5	1
								КНУ АКІТР-23ск		
Н. Контр.		Маринич І.А.								
Затверд.		Маринич І.А.								

ВСТУП

Забезпечення раціонального використання водних ресурсів є одним із ключових викликів сталого розвитку в умовах глобального потепління та зростаючого антропогенного навантаження на екосистеми. За даними Продовольчої та сільськогосподарської організації ООН (ФАО), сільськогосподарське зрошення є найбільшим споживачем прісної води у світі – на його частку припадає від 60 до 70 відсотків загального обсягу водозабору [1]. При цьому значна частина поданої на полив води витрачається неефективно через нераціональні режими зрошення, несвоєчасне реагування на зміни вологості ґрунту та відсутність засобів автоматизованого контролю. Запровадження сучасних автоматизованих систем керування поливом здатне скоротити споживання води на 30 – 50 відсотків порівняно з традиційним ручним поливом без зниження врожайності.

В умовах України присадибні ділянки з овочевими культурами та садом є невід'ємною частиною побуту значної частини міського і сільського населення. За даними Державної служби статистики, понад 6 мільйонів домогосподарств ведуть городництво та садівництво як на присадибних, так і на дачних ділянках. Полив є однією з найбільш трудомістких операцій у рослинництві: він вимагає регулярності, прив'язаності до місця та врахування різних потреб окремих культур – томатів, огірків, перцю, ягідних кущів, плодових дерев. Тривала відсутність господаря, що є типовою ситуацією для городників, у поєднанні зі спекотною погодою може призвести до критичного водного стресу рослин і суттєвих втрат врожаю.

Традиційні методи організації поливу – ручний шланг, краплинна стрічка з таймером або механічний зрошувач не вирішують задачі адаптивного зрошення.

					КНУ КРБ.174.26.05.00.ПЗ						
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата							
Розроб.		Морозов І.С.			ВСТУП			Лім.	Арк.	Аркушів	
Перевір.		Бурнасов П.В.								6	4
								КНУ АКІТР-23ск			
Н. Контр.		Маринич І.А.									
Затверд.		Маринич І.А.									

Механічні таймери подають воду за фіксованим розкладом незалежно від реального стану ґрунту і погодних умов: полив відбувається навіть під час дощу або після нього, коли ґрунт уже насичений вологою. Ручний полив є нерегулярним за своєю природою і залежить від присутності та уважності господаря. Готові комерційні рішення для автоматизації поливу, представлені на ринку, або не мають датчиків вологості ґрунту і приймають рішення лише на основі метеопрогнозу, або є закритими дорогими системами з обмеженою гнучкістю налаштування. Жодне з доступних масових рішень не забезпечує повноцінного зонального контролю для ділянки з різнорідними культурами, кожна з яких має власну агротехнічну норму поливу.

Концепція точного землеробства (Precision Agriculture), що активно розвивається у глобальній агровиробничій практиці, передбачає ухвалення управлінських рішень на основі вимірюваних даних про стан ґрунту, мікроклімат і стан рослин, а не на підставі усереднених нормативів або суб'єктивних спостережень. Технологічною основою реалізації цього підходу в умовах приватного господарства є Інтернет речей (IoT) – сукупність малогабаритних, енергоефективних сенсорів і мікроконтролерних пристроїв, здатних у реальному часі вимірювати параметри ґрунту і мікроклімату та передавати їх до системи управління по бездротових каналах зв'язку. Використання IoT-рішень дозволяє впровадити принципи точного зрошення навіть у масштабах невеликої присадибної ділянки, реалізуючи полив за потребою рослин, а не за розкладом.

Паралельний розвиток концепції «розумного будинку» (Smart Home) створює природну інфраструктурну платформу для інтеграції системи керування поливом у єдину екосистему управління домашнім господарством. Сучасні відкриті платформи, зокрема Home Assistant, забезпечують централізований збір і аналіз даних з датчиків, реалізацію складних сценаріїв автоматизації з урахуванням множини умов, двосторонній зв'язок із мобільним застосунком і голосовими асистентами. Включення модуля поливу в екосистему «розумного будинку» дозволяє господарю контролювати стан

					КНУ КРБ.174.26.05.00.ПЗ	Арк.
						7
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

ділянки та дистанційно керувати поливом зі смартфона незалежно від місцезнаходження, отримувати сповіщення про критичні відхилення і переглядати аналітику водоспоживання в розрізі кожної зони і культури.

Розробка автоматизованої системи дистанційного керування поливом рослин є задачею, що комплексно охоплює весь ланцюг проектування комп'ютеризованої системи управління: від аналізу об'єкта управління і формулювання вимог до вибору сенсорної бази, проектування апаратної архітектури на мікроконтролері ESP32, розробки алгоритмів прийняття рішень з урахуванням агрономічних критеріїв, програмування вбудованої системи та серверної частини до реалізації людино-машинного інтерфейсу і мобільного застосунку. Така задача інтегрує компетентності у галузях теорії автоматичного управління, схемотехніки, вбудованих систем, мережеских технологій та програмної інженерії, що повністю відповідає освітньо-науковому профілю підготовки фахівців відповідної кваліфікації.

Мета дослідження – розробка автоматизованої системи дистанційного керування поливом рослин на присадибній ділянці з різними овочевими культурами та садом, що забезпечує безперервний моніторинг вологості і температури ґрунту в кожній зоні вирощування, адаптивне керування подачею води на основі агрономічних критеріїв та дистанційне управління і сповіщення через мобільний застосунок у складі екосистеми «розумного будинку».

Для досягнення поставленої мети необхідно вирішити такі **завдання дослідження**:

- Провести аналіз існуючих методів і технічних засобів автоматизації поливу, готових комерційних рішень та їхньої придатності для зонального керування на присадибній ділянці з різнорідними культурами.
- Обґрунтувати вибір сенсорної бази системи: датчиків вологості ґрунту, датчиків температури ґрунту і повітря, датчика дощу та датчиків витрати води для кожної зони поливу.

					КНУ КРБ.174.26.05.00.ПЗ	Арк.
						8
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

- Розробити структурну та функціональну схеми системи, визначити склад апаратних вузлів: мікроконтролерних модулів ESP32, виконавчих електромагнітних клапанів, реле і насосного обладнання.
- Розробити алгоритми прийняття рішень про полив із урахуванням вологості ґрунту, температури повітря, наявності атмосферних опадів та агрономічних норм зрошення для конкретних культур.
- Реалізувати програмне забезпечення вбудованої системи на базі платформи ESPHome, що включає модулі опитування датчиків, керування клапанами та підтримки автономного режиму роботи за збереженим розкладом.
- Інтегрувати систему в платформу Home Assistant: налаштувати MQTT-комунікацію, Dashboard для візуалізації стану ділянки, сценарії автоматизації та мобільні push-сповіщення.
- Провести практичне тестування розробленої системи і оцінити її ефективність за показниками точності підтримання вологості ґрунту, часу реакції на тригерні умови та надійності дистанційного керування.

Об'єкт дослідження – процеси управління зрошенням присадибної ділянки з різними овочевими культурами та садом, що характеризуються нерівномірністю потреб рослин у волозі залежно від виду культури, фази вегетації, стану ґрунту та метеорологічних умов.

Предмет дослідження – методи, алгоритми та програмно-апаратні засоби автоматизованого дистанційного керування поливом рослин на основі даних сенсорів ґрунту і мікроклімату, інтегровані в архітектуру системи «розумного будинку» з підтримкою мобільного інтерфейсу управління.

Практична значущість роботи полягає в тому, що розроблена система може бути безпосередньо впроваджена на будь-якій присадибній ділянці, де наявне водопостачання і домашня Wi-Fi-мережа. Її застосування дозволить господарям суттєво зменшити витрати часу на ручний полив, знизити споживання води за рахунок поливу за потребою, а не за розкладом, запобігти втратам врожаю через пересихання ґрунту в умовах тривалої відсутності, а також вести аналітику водоспоживання в розрізі кожної зони і культури.

					КНУ КРБ.174.26.05.00.ПЗ	Арк.
						9
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

РОЗДІЛ 1

АНАЛІЗ СИСТЕМ КЕРУВАННЯ ПОЛИВОМ РОСЛИН

1.1 Характеристика об'єкту автоматизації

Ефективне управління поливом присадибної ділянки з різними культурами – городньою зоною, плодовим садом, ягідними кущами та декоративними насадженнями є нетривіальним агротехнічним завданням. Кожна культура має власні вимоги до режиму зволоження ґрунту, залежні від фази вегетації, температури повітря, інтенсивності сонячного випромінювання та типу ґрунту. Традиційний ручний полив не забезпечує ані необхідної регулярності, ані оптимального дозування вологи, а тривала відсутність господаря, навіть кілька днів спекотного літа, може призвести до критичного стресу рослин і втрати врожаю.

Автоматизовані системи керування поливом вирішують цю проблему, поєднуючи технології вимірювання параметрів ґрунту і мікроклімату, алгоритми прийняття рішень та виконавчі механізми керування подачею води. Інтеграція таких систем у платформи «розумного будинку» та забезпечення дистанційного управління через мобільний застосунок перетворює автоматичний полив на повноцінний модуль точного землеробства, доступний широкому колу користувачів.

У цьому розділі проведено комплексний аналіз існуючих технічних рішень у п'яти ключових аспектах: огляд готових комерційних систем автоматичного поливу, аналіз сенсорної бази, порівняння мікроконтролерних платформ для реалізації власного рішення, оцінювання протоколів бездротового зв'язку та аналіз виконавчих пристроїв – клапанів і насосів. На основі результатів аналізу сформовано вимоги до системи, що проектується.

					КНУ КРБ.174.26.05.00.ПЗ						
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата							
Розроб.		Морозов І.С.			РОЗДІЛ 1			Літ.	Арк.	Аркушів	
Перевір.		Бурнасов П.В.								10	14
Н. Контр.		Маринич І.А.									
Затверд.		Маринич І.А.									
								КНУ АКІТР-23ск			

1.1.1 Огляд існуючих комерційних систем автоматичного поливу

Ринок автоматизованих систем поливу для приватних домогосподарств є достатньо зрілим і налічує десятки виробників. Умовно їх можна поділити на три категорії: хмарні Wi-Fi-контролери для стаціонарної системи зрошення, бездротові модульні системи з власними датчиками ґрунту та відкриті DIY-рішення на основі мікроконтролерних платформ.

Хмарні Wi-Fi-контролери (Rachio, Hunter HC, Rain Bird, Orbit B-Hyve) [2, 3] є найбільш поширеними на масовому ринку. Їхня ключова функція – заміна класичного таймера поливу на смарт-пристрій, що враховує дані метеостанцій і автоматично пропускає полив перед дощем або після нього. Проте, як правило, вони не мають власних датчиків вологості ґрунту і приймають рішення на основі прогнозу погоди, а не фактичного стану ґрунту. Це критичний недолік для присадибної ділянки з різномірним ґрунтом і культурами.

Системи преміум-класу з датчиками ґрунту (Gardena Smart System) максимально наближаються до концепції точного поливу, але обмежені закритою екосистемою та значними витратами на комплектацію. Відкриті DIY-рішення на базі ESP32 і платформи Home Assistant забезпечують максимальну гнучкість і можливість інтеграції будь-яких датчиків, але вимагають технічних знань у галузі електроніки та програмування. У Таблиця 1.1 представлений порівняльний аналіз.

Таблиця 1.1 – Порівняльний аналіз існуючих комерційних систем поливу

Система / модель	Виробник	Тип об'єкта	Датчики в комплекті	Протокол зв'язку	Smart Home	Орієнт. ціна, \$	Ключові обмеження
Rachio 3	Rachio (США)	Будинок / ділянка	Немає (опційно)	Wi-Fi	HomeKit, Alexa	≈ 230	Немає датч. вологості ґрунту; потрібен інтернет
Hunter HC	Hunter Industries	Котедж / сад	Немає	Wi-Fi	Alexa, Google	≈ 150	Базова аналітика; немає датч. ґрунту
RainBird ST8I-WiFi	Rain Bird	Будинок / сад	Датч. дощу (опц.)	Wi-Fi	Alexa, Google	≈ 130	Відсутність датч. ґрунту; базовий застосунок
Orbit B-Hyve XR	Orbit	Присадибна ділянка	Датч. дощу	Wi-Fi + Bluetooth	Alexa, Google	≈ 100	Обмежена аналітика; лише хмара

Система / модель	Виробник	Тип об'єкта	Датчики в комплекті	Протокол зв'язку	Smart Home	Орієнт. ціна, \$	Ключові обмеження
Gardena Smart System	Gardena / Husqvarna	Сад / город	Датч. ґрунту, дощу	Zigbee (шлюз)	Apple HomeKit	≈ 350+	Висока вартість; замкнута екосистема
Netro Sprite	Netro Inc.	Будинок / ділянка	Датч. ґрунту (опц.)	Wi-Fi	Alexa, Google	≈ 120	Залежність від хмар; базовий ШІ
LinkTap G1S	LinkTap	Город / сад	Датч. витрати	Wi-Fi (шлюз)	Частково HA	≈ 80	Шлюз обов'язковий; лише крапельний
DIY: ESP32 + HA	Open Source	Будь-який	Будь-які (гнучко)	Wi-Fi / MQTT	Home Assistant	≈ 30–80	Потребує технічних знань; час налаштування

Аналіз таблиці 1.1 свідчить, що жодна з розглянутих готових систем не є оптимальною для присадибної ділянки із зонованим поливом різних культур. Комерційні хмарні рішення не забезпечують вимірювання вологості ґрунту в реальному часі в кожній зоні, тоді як системи з датчиками є надмірно дорогими або закритими. Це обґрунтовує доцільність розробки власного рішення на базі відкритих апаратних і програмних платформ.

1.1.2 Аналіз сенсорної бази для системи керування поливом

Точність і ефективність автоматизованої системи поливу безпосередньо визначається якістю вхідних даних. Для присадибної ділянки з різними культурами необхідно вимірювати щонайменше чотири групи параметрів: вологість і температуру ґрунту у кожній зоні вирощування, параметри мікроклімату над ділянкою (температура і вологість повітря), наявність атмосферних опадів та фактичний об'єм поданої води в кожен зону.

1.1.2.1 Класифікація датчиків вимірювання вологості ґрунту

Вологість ґрунту є ключовим параметром для прийняття рішення про полив. Існуючі принципи її вимірювання поділяються на три основні групи.

Ємнісні датчики вимірюють діелектричну проникність ґрунту, яка змінюється залежно від вмісту вологи. Вони є найбільш точними і довговічними серед побутових рішень, оскільки не мають металевих електродів, що безпосередньо контактують із ґрунтом і піддаються корозії. Сучасні ємнісні датчики (DFRobot SEN0193 [4], Capacitive Soil Moisture Sensor

					КНУ КРБ.174.26.05.00.ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		12

v1.2 [5]) забезпечують відтворювану точність $\pm 2-3\%$ і можуть експлуатуватися в ґрунті протягом усього вегетаційного сезону без заміни.

Резистивні датчики вимірюють електричний опір між двома провідними електродами, занурені безпосередньо в ґрунт. Вони є простими і дешевими (YL-69, FC-28 [6]), але мають суттєвий недолік – піддаються електрохімічній корозії при постійному контакті з вологим ґрунтом, що скорочує термін їх служби до одного-двох сезонів і знижує точність у процесі експлуатації. Для постійно встановлених датчиків у кожній зоні ділянки вони є малопридатними.

Тензіометри вимірюють матричний потенціал ґрунту – фізичну силу, з якою ґрунт утримує воду, що є найбільш агрономічно значущою характеристикою. Проте побутові електронні тензіометри є дорогими і вимагають регулярного обслуговування.

1.2.2.2 Параметри мікроклімату та додаткові датчики

Окрім вологості ґрунту, для інтелектуального керування поливом необхідно враховувати додаткові фактори. Температура і відносна вологість повітря (датчики SHT31, DHT22, BME280) дозволяють розраховувати евапотранспірацію – сумарні витрати вологи ґрунтом через випаровування і рослинами через транспірацію. Цей параметр є основою агрометеорологічних моделей рекомендованих норм поливу.

Датчик дощу є обов'язковим елементом будь-якої системи автоматичного поливу на відкритому повітрі. При виявленні атмосферних опадів система повинна негайно зупинити або заблокувати запуск запланованого поливу. Можуть використовуватися тактові датчики (YL-83), що реєструють контакт краплин з провідною поверхнею, або більш надійні ємнісні варіанти (Hydreon RG-11), що аналізують пропускання інфрачервоного випромінювання крізь воду.

Датчики витрати води (YF-S201 та аналоги) на основі ротаційного імпелера забезпечують підрахунок реально поданого об'єму води в кожну зону. Це дозволяє вести журнал водоспоживання, виявляти несправності виконавчих

					КНУ КРБ.174.26.05.00.ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		13

пристроїв (відсутність потоку при відкритому клапані – ознака засмічення або розриву трубопроводу) та перевіряти дотримання норм поливу. У Таблиця 1.2 наведено порівняльний аналіз датчиків.

Таблиця 1.2 – Порівняльний аналіз датчиків для системи керування поливом

Тип датчика	Параметр вимірювання	Точність / діапазон	Інтерфейс	Приклади моделей	Придатність для городу / саду
Ємнісний датч. вологості ґрунту	Об'ємна вологість ґрунту (%)	$\pm 2-5\%$, 0–100%	Аналог., I ² C	Capacitive v1.2, DFRobot SEN0193	Висока. Прямий вимір вологи біля коренів
Резистивний датч. вологості ґрунту	Опір між електродами	Відносний (%), 0–100%	Аналоговий	YL-69, FC-28	Середня. Корозія електродів; потребує заміни
Датчик температури ґрунту	Температура (°C)	$\pm 0,5^{\circ}\text{C}$, -55–+125°C	1-Wire	DS18B20 водозахищений	Висока. Критично для теплолюбних культур
Датч. температури і вологості повітря	Темп. і відн. вологість повітря	$\pm 0,3^{\circ}\text{C}$ / $\pm 2\%$ RH	I ² C / UART	SHT31, DHT22, BME280	Висока. Враховує мікроклімат над грядками
Датч. атмосферного тиску	Тиск (гПа), непряме передбач. погоди	± 1 гПа, 300–1100 гПа	I ² C / SPI	BMP280, BME280	Середня. Допоміжна метеоінформація
Датч. рівня освітленості	Освітленість (Лк) / УФ-індекс	1–65535 Лк	I ² C	BH1750, VEML6070	Середня. Коригування поливу залежно від сонця
Датч. витрати (ротаційний)	Об'єм витраченої води (л/хв)	1–30 л/хв, $\pm 3\%$	Імпульсний	YF-S201, Seeed G1/2"	Висока. Облік фактичного поливу кожної зони
Датч. дощу (тактовий)	Факт опадів (так/ні)	Якісний	Цифровий (GPIO)	YL-83, Hydreon RG-11	Висока. Блокування поливу під час дощу

За результатами аналізу таблиці 1.2 для цільової системи рекомендується застосування ємнісних датчиків вологості ґрунту в кожній зоні вирощування, комбінованого датчика температури і вологості повітря BME280, тактового або ємнісного датчика дощу та ротаційного датчика витрати на кожній зрошувальній лінії. Температурний датчик DS18B20 (захищений від вологи) доцільно встановлювати в зонах теплолюбних культур – томатів, перцю, баклажанів – для коригування режиму поливу залежно від температури ґрунту.

1.2 Порівняльний аналіз мікроконтролерних платформ

Вибір мікроконтролерної платформи є базовим архітектурним рішенням, що визначає обчислювальні ресурси системи, наявні інтерфейси для

					КНУ КРБ.174.26.05.00.ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		14

підключення датчиків і виконавчих пристроїв, підтримувані протоколи бездротового зв'язку та можливість програмування в рамках стеку технологій, прийнятного для даної спеціальності.

Для розглянутого цільового об'єкта – присадибної ділянки з 4 – 8 зонами поливу – система потребує: не менше 8 – 12 цифрових виходів для керування клапанами через реле, не менше 4 – 8 аналогових входів для зчитування ємнісних датчиків вологості, підтримки шин I²C і 1-Wire для температурних датчиків, вбудованого Wi-Fi-модуля для підключення до домашньої мережі та MQTT-брокера.

Таблиця 1.3 – Порівняльний аналіз мікроконтролерних платформ для системи поливу

Платформа	MK / SoC	Wi-Fi / BT	GPIO / ADC	RAM / Flash	Живлення (В)	Орієнт. ціна (USD)	Оцінка для задачі поливу
ESP32 DevKit	ESP32 dual-core 240 МГц	Wi-Fi + BT / BLE	34 / 18 (12-bit)	520 КБ / 4 МБ	3,3 (USB 5)	≈ 4–8	Відмінна. Потужний, підтримує MQTT, має ADC для датчиків
ESP8266 NodeMCU	ESP8266 80/160 МГц	Wi-Fi / ні	11 / 1 (10-bit)	80 КБ / 4 МБ	3,3 (USB 5)	≈ 2–4	Добра. Дешевший, але менше ADC і GPIO; без BT
Arduino Mega + ESP8266	ATmega2560 + ESP8266	Wi-Fi (через AT)	54 / 16 (10-bit)	8 КБ / 256 КБ	5 (USB 5)	≈ 10–15	Задовільна. Великий GPIO, але 2 МК, складна інтеграція
Raspberry Pi Zero 2W	RP3A0, quad 1 ГГц	Wi-Fi + BT	26 GPIO / ні	512 МБ RAM	5 (USB micro)	≈ 15–20	Добра. Linux; надлишковий для простого поливу, потребує SD-карти
Raspberry Pi Pico W	RP2040 dual 133 МГц	Wi-Fi (CYW43439)	26 / 3 ADC (12-bit)	264 КБ / 2 МБ	3,3 (USB 5)	≈ 6–10	Добра. MicroPython, але обмежений RAM для складної логіки
STM32 + W5500 Ethernet	STM32F4xx 168 МГц	Ethernet (провідний)	80–140 / 16 ADC	192 КБ / 1 МБ	3,3	≈ 10–20	Задовільна. Висока надійність, але складніше програмування

Аналіз таблиці 1.3 демонструє, що платформа ESP32 є оптимальним вибором для розроблюваної системи. Подвійне ядро дозволяє паралельно виконувати критичні задачі керування поливом і мережеве з'єднання, не допускаючи взаємного блокування. Вбудований Wi-Fi і Bluetooth, 18 каналів 12-бітного АЦП для підключення ємнісних датчиків вологості та підтримка I²C,

SPI, UART, 1-Wire забезпечують весь необхідний набір інтерфейсів. Широка підтримка платформою ESPHome – популярним проєктом для інтеграції ESP32 у Home Assistant суттєво спрощує розробку прошивки та налаштування автоматизацій.

1.3 Аналіз протоколів бездротового зв'язку

Вибір протоколу зв'язку між вузлами системи поливу і центральним контролером або платформою «розумного будинку» обумовлений специфічними умовами присадибної ділянки: відстані від будинку до крайніх зон поливу можуть сягати 50–100 метрів, між пристроями та маршрутизатором розташовані будівельні конструкції і зелені насадження, що послаблюють радіосигнал. Також критично важливим є надійність з'єднання – розрив зв'язку не повинен призводити до скасування запланованого поливу або до його неможливості зупинити. У Таблиця 1.4 наведено протоколи бездротового зв'язку.

Таблиця 1.4 – Порівняльний аналіз протоколів бездротового зв'язку

Протокол	Частота (ГГц)	Дальність (м)	Споживання	Топологія	Пропускна здатність	Smart Home платформи	Придатність для вул.
Wi-Fi (802.11n)	2,4 / 5	до 50 (відкрито)	Середнє–високе	Зірка	до 150 Мбіт/с	Home Assistant, HomeKit, Google, Alexa	Висока
Zigbee (802.15.4)	2,4	10–30 (до 100 mesh)	Дуже низьке	Mesh	250 Кбіт/с	Home Assistant, HomeKit (Matter)	Висока (mesh)
Z-Wave	0,868 / 0,908	30–100 (mesh)	Дуже низьке	Mesh	100 Кбіт/с	Home Assistant, SmartThings	Висока (mesh)
Bluetooth LE	2,4	до 30	Низьке	Зірка / mesh	1–2 Мбіт/с	HomeKit, Google, Alexa	Середня
LoRa / LoRaWAN	0,433 / 0,868	до 2 000+ відкрито	Дуже низьке	Зірка (шлюз)	до 50 Кбіт/с	Home Assistant (шлюз)	Дуже висока
433 МГц RF	0,433	до 100	Низьке	Точка–точка	до 20 Кбіт/с	Обмежено (RF міст)	Висока
RS-485 / Modbus RTU	Провідний	до 1 200	Низьке	Шина	до 10 Мбіт/с	Home Assistant (Modbus)	Дуже висока

Для цільової системи найбільш придатним є протокол Wi-Fi (2,4 ГГц) у поєднанні з протоколом MQTT для обміну повідомленнями. Wi-Fi забезпечує достатню дальність на відкритій місцевості присадибної ділянки, підтримується ESP32 без додаткового обладнання та є нативним протоколом для Home Assistant. Використання MQTT-брокера (Mosquitto) гарантує доставку повідомлень навіть при короткочасних перебоях з'єднання завдяки механізму якості обслуговування (QoS). Для дуже великих ділянок, де сигнал Wi-Fi недостатній, перспективною є архітектура на основі Zigbee mesh або LoRa з MQTT-шлюзом.

Окремої уваги заслуговує реалізація режиму автономної роботи: вузли системи повинні зберігати розклад поливу в енергонезалежній пам'яті та виконувати його незалежно від стану мережевого з'єднання. Це унеможливило ситуацію, коли відсутність інтернету спричиняє зупинку поливу на час відсутності господаря.

1.4 Аналіз виконавчих пристроїв

Виконавчі пристрої системи автоматичного поливу поділяються на запірну арматуру з електроприводом – клапани і крани, та насосне обладнання. Правильний вибір виконавчих пристроїв визначає надійність системи, споживання електроенергії та сумісність з наявною гідравлічною інфраструктурою ділянки.

1.4.1 Зонна запірна арматура

Нормально закритий електромагнітний клапан (NC) є стандартним рішенням для зонного керування поливом. Принцип нормально закритого стану забезпечує важливу властивість безпеки: при втраті живлення або обриві керуючого сигналу клапан автоматично закривається, запобігаючи ненормованій подачі води. Клапани на 12 або 24 В постійного струму є найбільш зручними для застосування з мікроконтролерними платформами через доступність відповідних джерел живлення та простоту комутації через польовий транзистор або модуль реле.

					КНУ КРБ.174.26.05.00.ПЗ	Арк.
						17
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Для вирішення задачі поливу присадибної ділянки з 4 – 8 зонами рекомендується застосування клапанів DN15 або DN20 (діаметр ½" або ¾") з номінальним тиском 0,5 – 8 бар, що відповідає тиску в більшості систем централізованого водопостачання. При живленні від автономної бочки або ємності з незначним гідростатичним тиском доцільно застосовувати клапани з низьким мінімальним тиском відкриття (low-pressure версії, від 0,05 бар).

1.4.2 Насосне обладнання

Вибір насоса визначається джерелом водопостачання. При підключенні до центрального водопроводу насос, як правило, не потрібен – достатній тиск забезпечується самою мережею. При живленні з накопичувальної ємності (бочки або резервуара для дощової води об'ємом 500 – 1000 л) необхідний поверхневий насос або занурений дренажний насос з розрахунковою продуктивністю не менше 30 – 60 л/хв для одночасного поливу кількох зон.

Для організації фертигації – автоматичного внесення рідких добрив разом із поливом можливе застосування малогабаритного перистальтичного насоса, що дозує концентрований розчин добрива у загальний трубопровід. Потужність перистальтичного насоса і швидкість його роботи керуються мікроконтролером залежно від витрати основної подачі (зчитується датчиком витрати), що забезпечує стабільну концентрацію розчину незалежно від тиску в мережі.

1.5 Аналіз програмних платформ та інструментів розробки

Програмна частина системи керування поливом охоплює три рівні: прошивка (firmware) мікроконтролера, серверна платформа «розумного будинку» та мобільний / веб-інтерфейс користувача.

1.5.1 Платформи для розробки прошивки ESP32

Для програмування ESP32 доступно кілька підходів. Arduino IDE з підтримкою ESP32 є найбільш доступним варіантом для прототипування завдяки великій бібліотеці готових компонентів. ESPHome – декларативна платформа конфігурації прошивки для ESP32/ESP8266, яка дозволяє описати

					КНУ КРБ.174.26.05.00.ПЗ	Арк.
						18
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

логіку пристрою у форматі YAML без написання C++-коду та забезпечує нативну інтеграцію з Home Assistant через протокол API. ESP-IDF (Espressif IoT Development Framework) є нативним SDK із максимальним контролем над апаратними ресурсами мікроконтролера, але вимагає більших зусиль для розробки.

Для задачі дистанційного керування поливом у контексті «розумного будинку» платформа ESPHome є оптимальним вибором: вона підтримує всі необхідні компоненти (ADC для датчиків вологості, 1-Wire для DS18B20, I²C для BME280, лічильник імпульсів для датчика витрати, GPIO для керування реле клапанів), забезпечує автоматичне оновлення прошивки по Wi-Fi (OTA) та глибоку двосторонню інтеграцію з Home Assistant.

1.5.2 Серверна платформа та автоматизація

Home Assistant є провідною відкритою платформою для «розумного будинку» із найширшою підтримкою сторонніх пристроїв і протоколів. Для системи поливу вона виконує функції: централізованого збору і зберігання показань датчиків (через InfluxDB або вбудовану базу даних), планувальника поливу з урахуванням розкладу і тригерних умов (вологість ґрунту нижче порогу, відсутність дощу, зупинка між 11:00 і 16:00 у спеку), інтеграції з прогнозом погоди (OpenWeatherMap, Met.no) для превентивного скасування поливу та відображення стану системи на Dashboard з картою ділянки.

Node-RED – інструмент візуального програмування потоків даних це зручний додатковий інструмент для реалізації складної логіки агрономічних розрахунків: обчислення евапотранспірації, порівняння показань кількох датчиків ґрунту однієї зони, нормування норми поливу залежно від фази вегетації культури.

1.6 Аналіз архітектурних рішень побудови системи

На основі проведеного аналізу технічних засобів розглянемо три можливі архітектурні підходи до побудови системи дистанційного керування поливом присадибної ділянки.

					КНУ КРБ.174.26.05.00.ПЗ	Арк.
						19
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Централізована архітектура передбачає наявність одного центрального контролера (ESP32), що підключений дротовими лініями до всіх датчиків і виконавчих пристроїв на ділянці. Перевагою є простота програмної логіки і відсутність потреби у бездротовій координації між вузлами. Недолік – значна довжина кабельних трас між будинком і крайніми зонами ділянки (до 50 – 100 м), складність монтажу і вразливість до пошкодження кабелів.

Розподілена архітектура передбачає розміщення локальних вузлів – невеликих контролерів ESP32 безпосередньо поряд із кожною зоною поливу. Кожен вузол управляє клапаном і зчитує датчики своєї зони, а обмін даними і командами відбувається бездротово через Wi-Fi / MQTT. Така архітектура усуває необхідність прокладання довгих кабелів, забезпечує автономну роботу кожного вузла і спрощує масштабування системи. Це підхід, що найкраще відповідає концепції IoT і стандартній практиці побудови систем «розумного будинку».

Гібридна архітектура поєднує централізований контролер у будинку з віддаленими розширювачами портів, підключеними по дротовій шині RS-485 або провідному Ethernet. Це забезпечує надійне з'єднання там, де Wi-Fi-сигнал нестабільний, при цьому зберігаючи єдину точку управління. Доцільна для великих ділянок або при вимогах до гарантованої надійності зв'язку.

Для цільового об'єкта – присадибної ділянки площею до 10 – 15 соток оптимальною є розподілена архітектура на основі ESP32 + ESPHome + Home Assistant + MQTT, що поєднує технічну гнучкість, простоту розширення і повну інтеграцію в екосистему «розумного будинку».

1.7 Формування вимог до системи, що проєктується

На підставі проведеного аналізу технічних рішень сформульовано такі вимоги до розроблюваної автоматизованої системи дистанційного керування поливом присадибної ділянки:

Функціональні вимоги:

					<i>КНУ КРБ.174.26.05.00.ПЗ</i>	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		20

1. Підтримка не менше 6 незалежних зон поливу з можливістю розширення до 12 зон без зміни апаратної архітектури.
2. Вимірювання вологості ґрунту в кожній зоні за допомогою ємнісного датчика з передачею показань у реальному часі.
3. Вимірювання температури ґрунту в зонах теплолюбних культур (томати, перець, огірки) датчиком DS18B20.
4. Вимірювання температури, відносної вологості повітря та атмосферного тиску датчиком BME280 (або аналогами).
5. Автоматичне блокування поливу при виявленні атмосферних опадів датчиком дощу.
6. Облік об'єму поданої води в кожен зону датчиком витрати з формуванням журналу водоспоживання.
7. Підтримка двох режимів запуску поливу: за розкладом (час і тривалість) і за умовою (вологість ґрунту нижче порогового значення).
8. Дистанційне керування кожним клапаном зі смартфона через мобільний застосунок Home Assistant.
9. Автономна робота за збереженим розкладом при відсутності зв'язку з сервером не менше 72 годин.
10. Надсилання push-сповіщень про початок і завершення поливу, виявлення дощу, аномальні показники датчиків.

Технічні вимоги:

11. Мікроконтролерна платформа: ESP32 з прошивкою на базі ESPHome.
12. Протокол зв'язку: Wi-Fi 2,4 ГГц + MQTT (QoS 1) з MQTT-брокером Mosquitto.
13. Серверна платформа: Home Assistant з підтримкою автоматизацій і Dashboard.
14. Живлення вузлів: стабілізоване 5 В від мережевого адаптера або резервного акумулятора.
15. Захист від вологи: корпуси вузлів не нижче IP54 для зовнішнього розміщення.

					КНУ КРБ.174.26.05.00.ПЗ	Арк.
						21
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

16. Виконавчі пристрої: нормально закриті електромагнітні клапани 12 В DC, керовані через модулі реле.

1.8 Висновки до розділу 1

Проведений аналіз технічних рішень автоматизації систем дистанційного керування поливом дозволяє сформулювати такі висновки:

- Жодна з доступних комерційних систем автоматичного поливу не задовольняє повній сукупності вимог для присадибної ділянки з різнорідними культурами: хмарні контролери не мають датчиків ґрунту, а системи преміум-класу є надмірно дорогими та закритими. Це обґрунтовує актуальність розробки власного рішення на базі відкритих платформ.
- Оптимальним апаратним рішенням для вимірювального вузла є мікроконтролерна платформа ESP32, яка поєднує достатню обчислювальну потужність, необхідну кількість інтерфейсів і вбудований Wi-Fi за мінімальної вартості та широкої підтримки спільнотою.
- Ємнісні датчики вологості ґрунту є єдиним практичним вибором для постійно встановлених вузлів вимірювання в зонах вирощування завдяки відсутності корозії електродів і достатній точності для задач агрономічного моніторингу.
- Розподілена архітектура на основі декількох ESP32-вузлів, підключених через Wi-Fi і MQTT до платформи Home Assistant, забезпечує оптимальний баланс між гнучкістю, надійністю, масштабованістю і складністю реалізації для цільового об'єкта.
- Платформа ESPHome в сукупності з Home Assistant і MQTT формує повний технологічний стек, що покриває всі рівні системи від прошивки мікроконтролера до мобільного інтерфейсу користувача і забезпечує нативну інтеграцію з екосистемою «розумного будинку».
- Для підвищення агрономічної ефективності системи доцільно реалізувати алгоритм розрахунку потреби у поливі на основі даних про вологість ґрунту, температуру повітря і поточний прогноз погоди, що дозволить перейти від

					КНУ КРБ.174.26.05.00.ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		22

таймерного поливу до науково обґрунтованого зрошення за потребою рослин.

Зазначений комплексний підхід покладено в основу подальших проектних та конструкторських рішень даної кваліфікаційної роботи.

					<i>КНУ КРБ.174.26.05.00.ПЗ</i>	Арк.
						23
<i>Змн.</i>	<i>Арк.</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Підпис</i>	<i>Дата</i>		

РОЗДІЛ 2

РОЗРОБКА СИСТЕМИ АВТОМАТИЧНОГО ПОЛИВУ

2.1 Архітектура системи керування поливом

Розроблювана система є повністю автоматизованим комплексом дистанційного керування зрошенням присадибної ділянки, що об'єднує мережу мікроконтролерних вузлів на базі ESP32, систему збору та аналізу даних із ґрунтових і метеорологічних датчиків, а також централізовану платформу «розумного будинку» Home Assistant, розгорнуту на одноплатному комп'ютері Raspberry Pi 4.

Система забезпечує безперервний моніторинг стану ґрунту та мікроклімату в шести незалежних зонах вирощування, адаптивне керування клапанами поливу на підставі вимірянних даних і агрономічних норм, а також повноцінний дистанційний контроль через мобільний застосунок Home Assistant з будь-якої точки світу за наявності інтернету (Рисунок 2.1).

Ключові характеристики системи:

- Кількість зон поливу: 6 (з можливістю розширення до 12)
- Мікроконтролерна платформа: 2 вузли ESP32 DevKit по 3 зони кожен
- Серверна платформа: Raspberry Pi 4 Model B (2 ГБ RAM) + Home Assistant OS
- Протокол зв'язку: Wi-Fi 2,4 ГГц + MQTT (QoS 1), брокер Mosquitto
- Прошивка вузлів: ESPHome (декларативний YAML, ОТА-оновлення)
- Автономна робота без сервера: не менше 72 годин за збереженим розкладом
- Захист корпусів: IP54 для зовнішнього розміщення
- Живлення вузлів: 5 В DC від мережевого адаптера + резервний акумулятор

					<i>КНУ КРБ.174.26.05.00.ПЗ</i>		
<i>Змн.</i>	<i>Арк.</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Підпис</i>	<i>Дата</i>			
<i>Розроб.</i>		<i>Морозов І.С.</i>					
<i>Перевір.</i>		<i>Бурнасов П.В.</i>					
<i>Н. Контр.</i>		<i>Маринич І.А.</i>					
<i>Затверд.</i>		<i>Маринич І.А.</i>					
					<i>Лім.</i>	<i>Арк.</i>	<i>Архивів</i>
						24	34
					<i>КНУ АКІТР-23ск</i>		

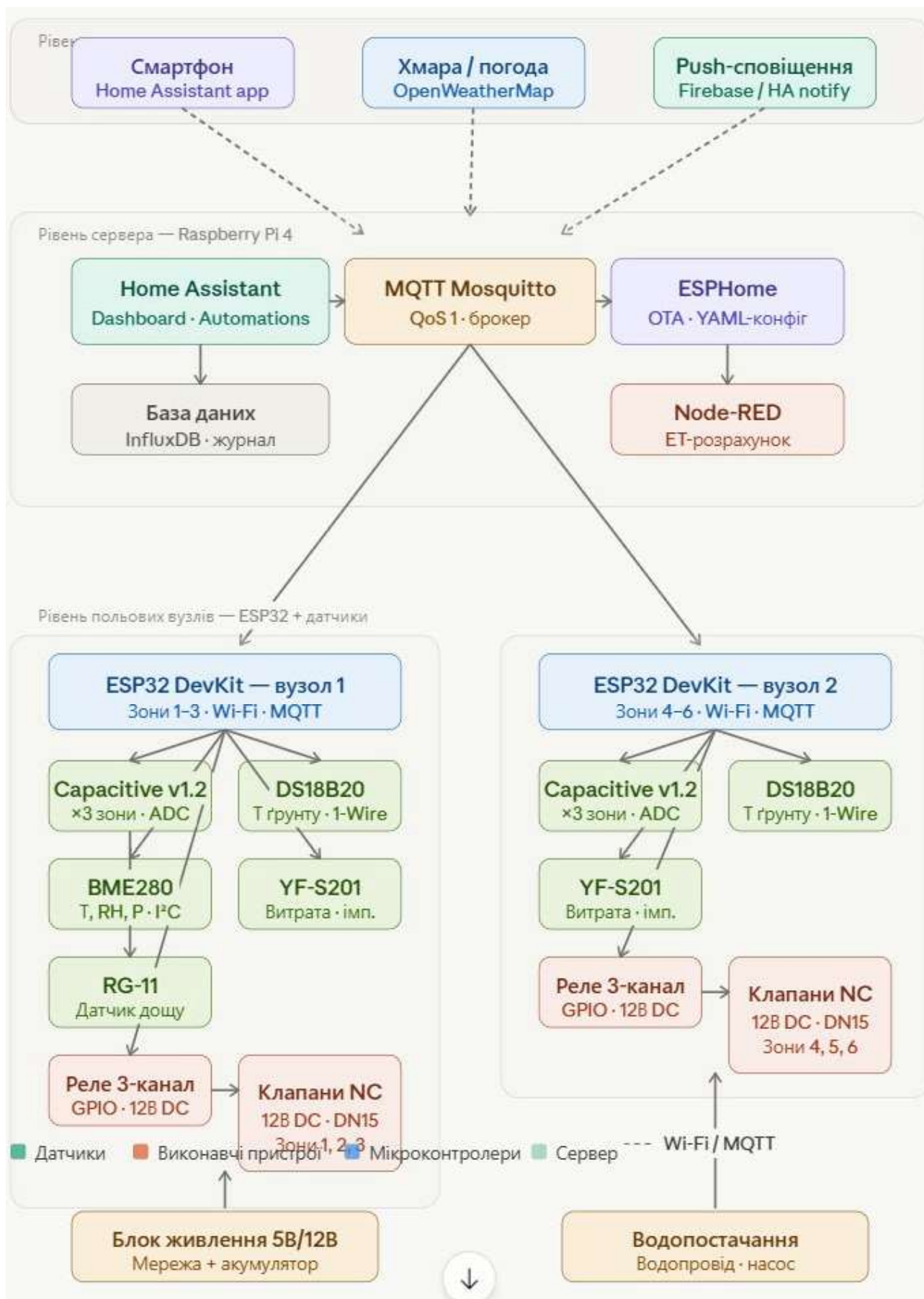


Рисунок 2.1 – Структурна схема системи керування поливом

Система реалізована за розподіленою трирівневою архітектурою, що є оптимальним підходом для присадибної ділянки площею до 15 соток з урахуванням вимог до надійності, масштабованості та простоти обслуговування.

2.1.1 Рівень польових вузлів (Edge Layer)

Перший рівень складається з двох автономних мікроконтролерних вузлів ESP32, розміщених безпосередньо на ділянці поряд із зонами поливу. Кожен вузол є самодостатнім пристроєм: він зчитує покази датчиків, ухвалює рішення про полив за збереженням локально розкладом та/або тригерними умовами, керує електромагнітними клапанами через модуль реле і передає дані на сервер по Wi-Fi/MQTT.

Розподілена архітектура усуває потребу прокладання довгих кабельних трас від будинку до периферійних зон (відстань може сягати 50 – 100 м), а також забезпечує безперервну роботу кожного вузла незалежно від інших і від доступності центрального сервера.

2.1.2 Рівень сервера (Platform Layer)

Другий рівень – Raspberry Pi 4 з Home Assistant OS виконує функції центрального вузла збору даних, планувальника автоматизацій, MQTT-брокера та веб-сервера для Dashboard. На цьому рівні зосереджена вся складна логіка: порівняння показань датчиків із агрономічними нормами, інтеграція з метеосервісом, розрахунок евапотранспірації, формування журналу водоспоживання.

2.1.3 Рівень користувача (User Layer)

Третій рівень забезпечує взаємодію господаря з системою через мобільний застосунок Home Assistant (Android/iOS) або веб-браузер.

					<i>КНУ КРБ.174.26.05.00.ПЗ</i>	Арк.
						26
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Користувач отримує Dashboard із картою ділянки, поточними показами датчиків, статусом клапанів, графіками вологості та водоспоживання. Через той самий інтерфейс здійснюється ручний запуск/зупинка поливу, редагування розкладів і порогових значень.

2.2 Вибір технічних засобів реалізації системи

2.2.1 Мікроконтролерні вузли ESP32

Серцем кожного польового вузла є мікроконтролер ESP32 (Espressif Systems) – двоядерний Xtensa LX6. ESP32 – це сімейство енергоефективних мікроконтролерів компанії Espressif Systems, створене для побудови бездротових вбудованих систем, вузлів Інтернету речей, сенсорних платформ і пристроїв керування реального часу з тактовою частотою 240 МГц, 520 КБ оперативної пам'яті, 4 МБ флеш-пам'яті, вбудованими модулями Wi-Fi 802.11 b/g/n та Bluetooth LE [7]

Мікроконтролер ESP32 – це мікросхема у SoC корпусі і раціональніше її використовувати у складі модулю DevKit (Рисунок 2.2).



Рисунок 2.2 – Wi-Fi модуль DevKit V1 з ESP-32

ESP32 DevKit V1 являє собою відладкову плату, до складу якої входить модуль ESP32-WROOM-32, перетворювач USB-UART, стабілізатор живлення, кнопки скидання та запуску, а також виведені на гребінки сигнали GPIO. Виріб орієнтований на розробку прикладних рішень у сфері

					<i>КНУ КРБ.174.26.05.00.ПЗ</i>	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		27

автоматизації, телеметрії, дистанційного моніторингу та бездротового керування. Основною перевагою плати є поєднання низької вартості, високої продуктивності та широкої програмної підтримки.

Модуль ESP32 належить до класу system-on-chip-рішень, у яких центральні процесори, пам'ять, радіомодуль та допоміжні блоки інтегровані на одному кристалі. Така архітектура зменшує апаратну складність системи та спрощує створення готових пристроїв. Для розробника це означає скорочення часу проєктування та підвищення надійності кінцевого виробу.

Плата ESP32 DevKit V1 зазвичай оснащується USB-UART мостом CP2102, який забезпечує завантаження прошивки й обмін даними з комп'ютером через USB. Саме цей вузол робить плату зручною для налаштування, налагодження та серійного моніторингу. У практичній експлуатації слід враховувати, що для коректної роботи в середовищі Windows або інших ОС можуть бути потрібні драйвери CP2102.

Функціональність ESP32 DevKit V1 значною мірою визначається набором периферійних інтерфейсів. Плата підтримує UART, SPI, I²C, I²S, ADC, DAC, ШІМ та інші засоби взаємодії з зовнішніми пристроями. Завдяки цьому до неї можна підключати датчики температури, вологості, тиску, виконавчі реле, серводвигуни, дисплеї та модулі зв'язку.

Особливу увагу слід приділяти розпінуванню. Частина виводів ESP32-WROOM-32 зарезервована під внутрішню flash-пам'ять, тому не рекомендується використовувати GPIO 6 – 11 для зовнішніх підключень. Це є типовою особливістю модуля, яка має бути врахована під час проєктування апаратної частини. Крім того, усі входи й виходи працюють у логіці 3,3 В, а отже підключення 5-вольтових пристроїв потребує узгодження рівнів.

У прикладних рішеннях плата використовується для збору телеметрії, передавання даних у хмарні сервіси, побудови веб-інтерфейсів керування та створення автономних пристроїв з живленням від акумулятора.

Завдяки режимам зниженого енергоспоживання ESP32 може застосовуватися в автономних сенсорних вузлах, де час активної роботи є

					<i>КНУ КРБ.174.26.05.00.ПЗ</i>	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		28

коротким, а більшу частину циклу пристрій перебуває в режимі сну. Саме ця властивість робить платформу конкурентною порівняно з багатьма іншими мікроконтролерними рішеннями.

Для задачі поливу ESP32 забезпечує: 18 каналів 12-бітного АЦП для зчитування аналогових сигналів ємнісних датчиків вологості; шини I²C (датчик BME280), 1-Wire (DS18B20), лічильник імпульсів (YF-S201); 30+ цифрових GPIO для керування модулями реле. Подвійне ядро дозволяє одночасно виконувати критичні задачі керування клапанами та мережеву комунікацію без взаємного блокування.

Технічні характеристики модуля [7]:

- Максимальна частота: до 240 МГц
- Оперативна пам'ять: 520 КБ SRAM
- ПЗП: 448 КБ ROM
- Flash-пам'ять: 4 МБ
- Wi-Fi 802.11 b/g/n, 2,4 ГГц
- Bluetooth: BLE 4.2, BR/EDR
- Логічний рівень: 3,3 В
- Живлення: через USB 5 В, через V_{in} 5 – 14 В
- Стабілізатор: 3,3 В
- GPIO: до 25 доступних GPIO на модулі
- ADC: 15 каналів, 12 біт
- DAC: 2 канали, 8 біт
- PWM: до 16 каналів
- UART: 3 апаратні інтерфейси
- SPI: 3 апаратні інтерфейси
- I²C: 2 апаратні інтерфейси
- I²S: 2 апаратні інтерфейси
- Режим енергозбереження: Light Sleep, Deep Sleep

					<i>КНУ КРБ.174.26.05.00.ПЗ</i>	Арк.
						29
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

2.2.2 Сенсорна база системи

Сенсорна підсистема реалізована за принципом «мінімально достатнього набору» з акцентом на точність і довговічність компонентів, що постійно знаходяться в ґрунті або на відкритому повітрі.

2.2.2.1 Датчики вологості ґрунту – Capacitive Soil Moisture Sensor v1.2

Тип: ємнісний. Принцип вимірювання: зміна діелектричної проникності ґрунту залежно від вмісту води. Вихідний сигнал: аналоговий 0–3,3 В, підключення до АЦП ESP32. Точність: $\pm 2\text{--}3\%$ об'ємної вологості. Живлення: 3,3–5 В DC [5] (Рисунок 2.3).

Головна перевага перед резистивними аналогами — відсутність металевих електродів, що безпосередньо контактують із ґрунтом. Це унеможливорює електрохімічну корозію і забезпечує стабільну роботу протягом усього вегетаційного сезону без заміни. Встановлюється по одному датчику в кореневій зоні кожної з 6 зон вирощування (глибина 10–15 см).



Рисунок 2.3 – Датчик вологості ґрунту

2.2.2.2 Датчик температури ґрунту — DS18B20

Тип: цифровий термодатчик Dallas 1-Wire. Точність: $\pm 0,5^\circ\text{C}$ в діапазоні $-55\text{...}+125^\circ\text{C}$. Корпус: TO-92 у водозахисному металевому зонді IP67 для безпосереднього занурення в ґрунт. Підключення по шині 1-Wire — можливо

					КНУ КРБ.174.26.05.00.ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		30

з'єднати кілька датчиків паралельно на одному GPIO з адресацією за унікальним 64-бітним ROM-кодом [8] (Рисунок 2.4).

Встановлюється в зонах теплолюбних культур: томати, перець, огірки, баклажани. Температура ґрунту є критичним чинником для формування кореневої системи – при температурі нижче $+15^{\circ}\text{C}$ засвоєння поживних речовин погіршується, система блокує полив у вечірні та нічні години.



Рисунок 2.4 – Датчик температури DS18B20 (зонд)

2.2.2.3 Датчик температури, вологості та тиску повітря – BME280

Тип: MEMS-сенсор Bosch на шині I²C (або SPI). Параметри вимірювання: температура повітря $\pm 0,5^{\circ}\text{C}$, відносна вологість $\pm 3\% \text{ RH}$, атмосферний тиск $\pm 1 \text{ гПа}$ (300–1100 гПа). Живлення: 1,8–3,6 В, надзвичайно низьке споживання [9] (Рисунок 2.5).

Показання BME280 використовуються для розрахунку евапотранспірації (ET_0) за спрощеною формулою Харгрейвса–Самані в Node-RED, що дозволяє коригувати норму поливу залежно від інтенсивності сонячного випромінювання, температури і вологості повітря. Один датчик встановлюється в затіненому місці над ділянкою для вимірювання мікроклімату.



Рисунок 2.5 – Датчик вологості, тиску і температури повітря

2.2.2.4 Датчик витрати води – YF-S201

Тип: ротаційний імпелерний лічильник. Діапазон витрати: 1 – 30 л/хв, точність $\pm 3\%$. Принцип роботи: ефект Холла – магніт на крильчатці генерує імпульс на кожен оберт, кількість імпульсів пропорційна об'єму пройденної рідини. Підключення: один GPIO ESP32 як лічильник переривань [10] (Рисунок 2.6).



Рисунок 2.6 – Датчик витрати води YF-S201

Встановлюється на кожній із 6 зрошувальних ліній після клапана. Функції: облік реально поданого об'єму води (журнал водоспоживання), виявлення несправностей (відсутність потоку при відкритому клапані – ознака

засмічення або розриву трубопроводу), контроль дотримання агрономічних норм поливу.

2.2.2.5 Датчик дощу – Hydreon RG-11

Тип: оптичний ємнісний. Принцип роботи: аналіз пропускання інфрачервоного випромінювання через куполоподібну лінзу – краплі води на поверхні зменшують пропускання. Вихід: цифровий (нормально замкнений або розімкнений), налаштовується під конкретний режим [11] (Рисунок 2.7).

RG-11 обраний замість простішого тактового датчика YL-83 через значно вищу надійність та довговічність: відсутність рухомих частин, герметичний корпус, висока завадостійкість. При виявленні опадів ESP32 негайно формує MQTT-повідомлення, Home Assistant блокує всі заплановані поливи та відправляє push-сповіщення.



Рисунок 2.7 – Датчик дощу

2.2.3 Виконавчі пристрої

2.2.3.1 Електромагнітні клапани

Тип: нормально закритий (NC) електромагнітний клапан 12 В DC. Умовний прохід: DN15 ($\frac{1}{2}$ ") або DN20 ($\frac{3}{4}$ ") – обирається залежно від пропускної здатності зрошувальної лінії. Робочий тиск: 0,02 – 0,8 МПа

					<i>КНУ КРБ.174.26.05.00.ПЗ</i>	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		33

(0,2 – 8 бар), що відповідає параметрам централізованого водопостачання та систем із накопичувальною ємністю [12] (Рисунок 2.8).



Рисунок 2.8 – Електромагнітний клапан

Принцип «нормально закрито» є критично важливою властивістю безпеки: при втраті живлення або обриві керуючого сигналу клапан автоматично закривається, унеможливаючи неконтрольоване затоплення ділянки. Клапани монтуються в захищені IP65-корпуси безпосередньо на зрошувальних лініях поряд із вузлами ESP32.

2.2.3.2 Модулі реле

Для комутації клапанів 12 В DC від мікроконтролера 3,3 В використовуються оптронні 3-канальні модулі реле з гальванічною розв'язкою. Оптрон захищає GPIO ESP32 від зворотних ЕРС при комутації індуктивного навантаження клапана. Котушка реле живиться від окремого джерела 5 В, контактна група комутує лінію 12 В до клапана. Додатково до контактів реле встановлюється захисний діод (fly-back diode).

2.2.4 Центральний сервер – Raspberry Pi 4

Raspberry Pi 4 Model B (далі — Raspberry Pi 4) являє собою одноплатний комп'ютер, призначений для широкого спектру застосувань, від навчальних проектів та вбудованих систем до повноцінних домашніх серверів. Завдяки високій обчислювальній продуктивності, низькому енергоспоживанню та

					КНУ КРБ.174.26.05.00.ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		34

підтримці сучасних мережевих інтерфейсів, дана платформа отримала широке поширення як «ядро» інтелектуального домашнього середовища, зокрема у ролі сервера системи автоматизації «розумного дому» Home Assistant (Рисунок 2.9).

Raspberry Pi 4 базується на системі-на-кристалі (SoC) Broadcom BCM2711, що містить чотири ядра 64-бітного процесора Cortex-A72 (архітектура ARMv8), які працюють на частоті 1,8 ГГц. Це дозволяє виконувати одночасну обробку кількох фонових процесів, що критично важливо при використанні плати як сервера з кількома інтеграціями та додатковими сервісами. Пам'ять реалізована у форматі LPDDR4-3200 SDRAM з об'ємом 1, 2, 3, 4 або 8 ГБ в залежності від модифікації, що забезпечує достатню швидкість доступу до даних для роботи операційної системи та вбудованих служб [13].

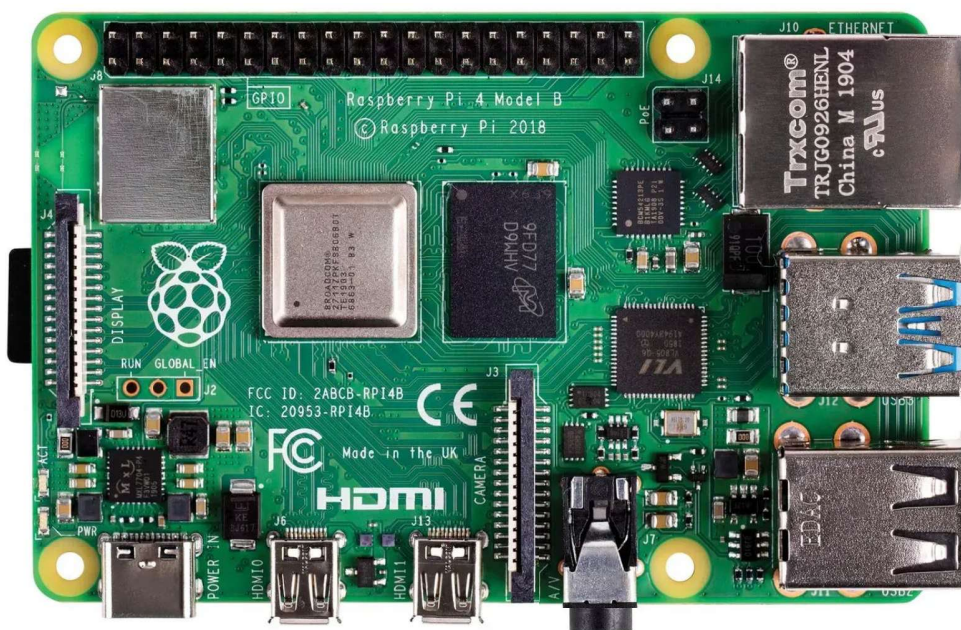


Рисунок 2.9 – Одноплатний комп'ютер Raspberry Pi 4

Платформа підтримує дві смуги бездротового зв'язку IEEE 802.11ac (2,4 ГГц та 5,0 ГГц), а також Bluetooth 5.0 і BLE, що дозволяє інтегрувати бездротові сенсори, контролери та інші пристрої інтернет-речей (IoT) без додаткових адаптерів. Для стабільного провідного з'єднання передбачений гігабітний Ethernet-порт 10/100/1000BASE-T, а також два порти USB 3.0 та два

порти USB 2.0, що дає можливість підключити зовнішні накопичувачі, Z-Wave/Zigbee-адаптери, Wi-Fi-подовжувачі тощо.

Для візуального інтерфейсу використовуються два порти micro-HDMI, які підтримують вивід до 4K@60 fps, що робить плату придатною також і для виконання ролі медіаплеєра або потокового сервера. Також на платі передбачений 40-контактний GPIO-з'єднувач, який зберігає повну зворотню сумісність із попередніми моделями Raspberry Pi, що дозволяє використовувати широкий спектр сенсорного та виконавчого обладнання.

Для ефективного використання Raspberry Pi 4 як сервера Home Assistant рекомендується:

- Використовувати модель з 4 ГБ RAM або більше, якщо очікується значна кількість інтеграцій (мережеві пристрої, камери, MQTT, Zigbee, Z-Wave тощо).
- Під'єднувати плату через Ethernet, а не Wi-Fi, щоб забезпечити стабільне з'єднання та зменшити латентність в автоматизаціях.
- Регулярно виконувати бекапи стану Home Assistant (конфігурація, скрипти, сцени, автоматизації) на зовнішнє сховище або хмарний сервіс.
- При необхідності віддаленого доступу використовувати безпечно під'єднання типу Nabu Casa Cloud або засоби VPN/SSH-тунелювання, щоб не відкривати інтерфейс Home Assistant прямо в Інтернет.

Таким чином, Raspberry Pi 4 демонструє високу ефективність як енергозберігаюча, компактна та достатньо потужна платформа для виконання ролі сервера Home Assistant у більшості типових домашніх сценаріїв, але вимагає уважного підходу до вибору компонентів, резервного копіювання та масштабування при зростанні навантаження.

Raspberry Pi розміщується у приміщенні (будинок, гараж), підключається до домашнього маршрутизатора через Ethernet (рекомендовано) або Wi-Fi, отримує живлення від адаптера USB-C 5,1 В / 3 А. Для надійності та швидкодії операційна система записується на SSD-накопичувач через USB 3.0, а не на SD-карту.

					<i>КНУ КРБ.174.26.05.00.ПЗ</i>	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		36

2.3 Програмна частина системи

2.3.1 Підключення і програмування периферії ESP32

ESPHome – відкрита декларативна платформа конфігурації прошивки для ESP32/ESP8266, що дозволяє описати повну логіку пристрою у форматі YAML без написання коду на C++. Конфігураційний файл компілюється сервером ESPHome (що запускається як Add-on в Home Assistant) у бінарний образ і передається на вузол по Wi-Fi (OTA – Over-The-Air).

ESPHome-конфігурація кожного вузла включає наступні компоненти:

- wifi: підключення до домашньої мережі, резервний AP-режим при втраті зв'язку
- mqtt: адреса брокера, QoS, будуть-повідомлення (last will) для сигналізації відключення
- sensor (adc): зчитування аналогового сигналу з ємнісних датчиків вологості, усереднення за 10 вимірами, калібрування у відсотки
- sensor (dallas): опитування DS18B20 по шині 1-Wire кожні 30 секунд
- sensor (bme280): зчитування температури, вологості, тиску по I²C
- sensor (pulse_counter): підрахунок імпульсів YF-S201, перетворення на літри
- binary_sensor (gpio): стан датчика дощу RG-11
- switch (gpio): керування відповідним реле (а отже, клапаном) поливу
- time (sntp): синхронізація часу через NTP для виконання розкладу
- script: автономний розклад поливу, що виконується незалежно від MQTT

Архітектура GPIO вузла

ESP32 DevKit має 38 пінів, але не всі рівноцінні для нашої задачі. Розберемо по кожному типу підключення. Карта розподілу пінів ESP32 для одного вузла (3 зони поля) представлена на Рисунок 2.10.

2.3.1.1 АЦП для датчиків вологості

ESP32 має два АЦП: ADC1 (GPIO32–39) і ADC2 (GPIO0, 2, 4, 12–15, 25–27). Критичний момент: ADC2 повністю заблокований, залишається активний

					<i>КНУ КРБ.174.26.05.00.ПЗ</i>	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		37

модуль Wi-Fi. Для датчиків вологості необхідно використовувати ADC1 — пінів GPIO34, GPIO35, GPIO32, GPIO33, GPIO36, GPIO39. Для нашої системи з трьох датчиків вологості використовуємо GPIO34, GPIO35, GPIO32. У конфігурації ESPHome виглядає так:

sensor:

- platform: adc

pin: GPIO34

name: "Вологість зона 1"

attenuation: 11db # розширює діапазон до 0–3,3 В

update_interval: 30s

filters:

- calibrate_linear:

- 2.8 -> 0 # сухий ґрунт

- 1.2 -> 100 # насичений ґрунт

- clamp:

min_value: 0

max_value: 100

unit_of_measurement: "%"

Атенюація 11 db обов'язкова – без неї АЦП вимірює лише до ~1,1 В, датчик видає сигнал в діапазоні 1,2 – 2,8 В.

2.3.1.2 GPIO для реле клапанів

GPIO27, GPIO14, GPIO12 піни ADC2, які при Wi-Fi як вихід (OUTPUT) не створюють проблему. Важливо: GPIO12 під час завантаження ESP32 не повинен мати підтягнення до V_{CC} – це вводить чіп в режим завантаження з флеш. Модуль реле вирішує це сам, після того як вхід реле активується LOW-сигналом, і при старті пін перебуває у стані HIGH-impedance. У ESPHome потрібно явно вказати стан при перезапуску:

switch:

- platform: gpio

					<i>КНУ КРБ.174.26.05.00.ПЗ</i>	Арк.
						38
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

pin:

number: GPIO27

inverted: true # реле активується LOW

name: "Клапан зона 1"

restore_mode: ALWAYS_OFF # клапан закритий при перезавантаженні

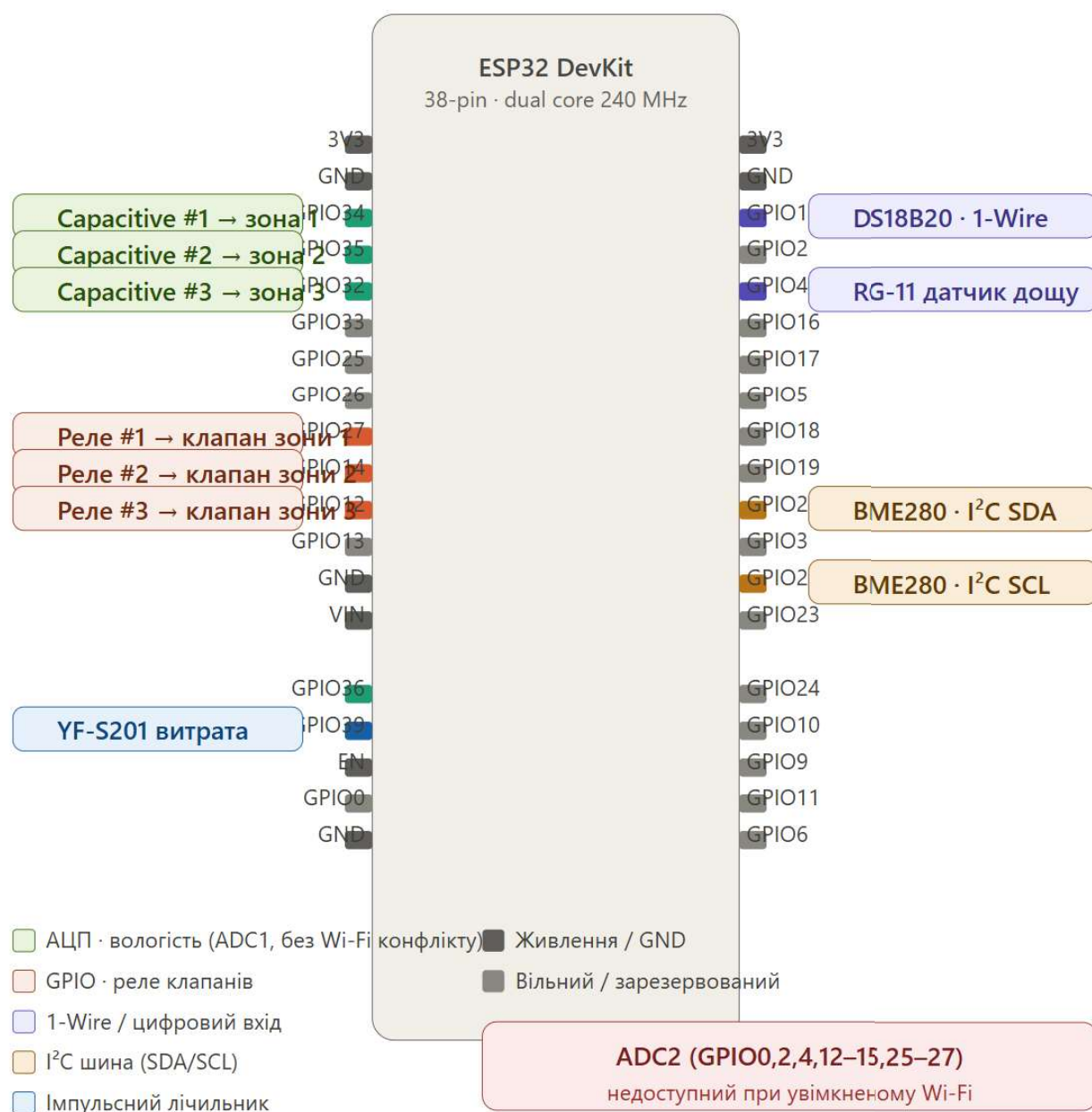


Рисунок 2.10 – Розподіл пінів ESP32

2.3.1.3 Інтерфейс 1-Wire для DS18B20

GPIO15 обраний тому, що це вхідний контакт ADC2, але як цифровий вхід для 1-Wire він працює ідеально. Потрібен зовнішній підтягуючий

резистор 4,7 кОм між DATA і 3,3 В. ESPHome автоматично розмістить усі датчики на шині за ROM-кодами:

dallas:

- pin: GPIO15
- update_interval: 60s

sensor:

- platform: dallas
- address: 0xAA00000000000000 # ROM-код конкретного датчика
- name: "Температура ґрунту зона 1"

2.3.1.4 I²C для BME280

GPIO21 (SDA) та GPIO22 (SCL). Підтягуючі резистори 4,7 кОм на кожну лінію до 3,3 В обов'язкові (хоча BME280-модулі зазвичай мають їх вбудованими). Довжина проводів до датчика не більше 30 – 50 см.

i2c:

- sda: GPIO21
- scl: GPIO22
- scan: true

sensor:

- platform: bme280_i2c
- address: 0x76
- temperature:
 - name: "Температура повітря"
- humidity:
 - name: "Вологість повітря"
- pressure:
 - name: "Тиск"

					КНУ КРБ.174.26.05.00.ПЗ	Арк.
						40
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

2.3.1.5 Імпульсний лічильник YF-S201

GPIO39 – input-only pin, підтягнення до V_{CC} не потрібне (датчик має відкритий колектор із вбудованим підтягненням). ESPHome рахує імпульси через переривання, що не завантажує процесор:

sensor:

sensor:

- platform: pulse_counter

pin: GPIO39

name: "Витрата зона 1"

unit_of_measurement: "L/min"

filters:

- multiply: 0.00833 # 1 імпульс = 1/120 літра

2.4 Алгоритми прийняття рішень

2.4.1 Базовий алгоритм запуску поливу

Рішення про запуск поливу кожної зони ухвалюється за результатом перевірки ієрархічного ланцюга умов. Умови перевіряються послідовно – від критичних блокуючих до основних тригерних.

1. Перевірка блокуючих умов: якщо датчик дощу RG-11 фіксує опади – полив повністю блокується для всіх зон. Скасування блокування – через 60 хвилин після припинення дощу або вручну.
2. Перевірка часового вікна: полив у денні години (11:00 – 16:00 у спекотний день при температурі $>30^{\circ}\text{C}$) блокується для запобігання опікам листя та надмірному випаровуванню.
3. Перевірка тригера: вологість ґрунту зони опускається нижче встановленого порогового значення (налаштовується індивідуально для кожної культури, типові значення: томати – 50%, огірки – 60%, плодові дерева – 35%).

					<i>КНУ КРБ.174.26.05.00.ПЗ</i>	Арк.
						41
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

4. Перевірка прогнозу погоди: якщо OpenWeatherMap прогнозує опади протягом наступних 6 годин – полив скасовується.
5. Запуск поливу: відкривається клапан відповідної зони, YF-S201 починає підрахунок поданого об'єму.
6. Завершення поливу: клапан закривається при досягненні нормативного об'єму (розраховується з урахуванням ET₀) або після максимального часу поливу (захист від несправності датчика витрати).

2.4.2 Автономний режим роботи

При втраті з'єднання з MQTT-брокером (відсутність Raspberry Pi або розрив Wi-Fi) кожен вузол ESP32 переходить в автономний режим: зчитування датчиків продовжується, логіка прийняття рішень виконується локально, розклад поливу виконується за збереженим у flash-пам'яті календарем. Після відновлення з'єднання вузол автоматично синхронізується з сервером, публікує накопичені показання датчиків та отримує оновлення розкладу.

2.4.3 Захисні механізми

- Watchdog-таймер ESP32: автоматичне перезавантаження при зависанні прошивки
- MQTT Last Will: при відключенні вузла Home Assistant отримує сповіщення і відображає статус «недоступний»
- Максимальний час поливу: примусове закриття клапана через 30 хвилин незалежно від стану датчика витрати
- Детектор витіку: якщо YF-S201 фіксує потік при закритому клапані – відправляється аварійне сповіщення
- Захист від одночасного поливу: система дозволяє відкривати не більше 2 клапанів одночасно (обмеження по тиску водопостачання)

					<i>КНУ КРБ.174.26.05.00.ПЗ</i>	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		42

2.4.4 Розрахунок евапотранспірації в Node-RED

Евапотранспірація [14] – це сумарні втрати вологи обґрунтовано через випаровування і рослинами через листя. Формула Харгрейвса – Самані є спрощеним варіантом повної методики FAO-56 і вимагає лише трьох параметрів: максимальну та мінімальну температуру (з BME280) та позасонячну радіацію R_a (розраховується за даною та географічною широтою) [15]. Це робить її ідеальною для автономного вузла без піранометра. Евапотранспірація ET_o [мм/день] розраховується за наступною формулою:

$$ET_o = 0.0023 \cdot R_a \cdot (T_{mean} + 17.8) \cdot (T_{max} - T_{min})^{0.5}$$

Практичний ефект: у спекотний день ($T_{max} = 38^\circ\text{C}$, $T_{min} = 22^\circ\text{C}$) ET_o сягає 8 – 10 мм/день (Рисунок 2.11) – рослини втрачають майже вдвічі більше вологи, ніж у прохолодний день ($T_{max} = 22^\circ\text{C}$, $T_{min} = 12^\circ\text{C}$, $ET_o \approx 3$ мм). Без урахування ET_o система поливає за фіксованим розкладом і в спеку не добирає норму (Рисунок 2.12).



Рисунок 2.11 – Екран Node-RED з встановленими значеннями спеки

$$ET_0 = 0.0023 \times Ra \times (T_{mean} + 17.8) \times (T_{max} - T_{min})^{0.5} \text{ [мм/день]}$$

Макс. температура T_{max}

Мін. температура T_{min}

Позасонячна радіація Ra

ET₀ сьогодні

5.3 мм/день

Коефіцієнт норми (К)

1.33×

Об'єм на 1 м² зони

5.3 л/м²

Рекомендована норма

53 л/зону (10 м²)

Рівень евапотранспірації (0 → 12 мм/день)

Помірна ET₀ — стандартний літній день. Базова норма поливу без коригувань.

Рисунок 2.12 – Екран Node-RED з встановленими значеннями прохолоди

Змінюємо повзунки – калькулятор відразу показує, скільки води потрібно зоні за умовами конкретного дня.

2.4.4.1 Структура Node-RED потоку

Потік складається з чотирьох послідовних блоків.

- Перший блок – injectз cron-тригером о 06:00 щоранку, який запускає розрахунок.
- Другий – ha-get-historyабо call-serviceдля отримання показань BME280 з Home Assistant через HA API-вузол (попередньо встановити node-red-contrib-home-assistant-websocket).
- Третій – function-вузол із власним розрахунком ET₀ та корекцією норми.
- Четвертий – call-serviceдля оновлення input_numberхелперів у ГА з новими нормами поливу для кожної зони.

2.4.4.2 Код функції-вузла

// Вхідні дані з BME280 через HA entity

const tmax = msg.payload.tmax; // °C, максимум за добу


```
const tmin = msg.payload.tmin; // °C, мінімум за доби
const doy = msg.payload.doy; // день року (1–365)
const lat = 48.0; // широта ділянки (Кривий Ріг  $\approx 47.9^\circ\text{N}$ )
```

```
// Позасонячна радіація Ra (МДж/м²/день)
```

```
// Спрощений розрахунок за широтою і днем року
```

```
const phi = lat * Math.PI / 180;
```

```
const dr = 1 + 0.033 * Math.cos(2 * Math.PI * doy / 365);
```

```
const delta = 0.409 * Math.sin(2 * Math.PI * doy / 365 - 1.39);
```

```
const ws = Math.acos(-Math.tan(phi) * Math.tan(delta));
```

```
const Ra = (24 * 60 / Math.PI) * 0.0820 * dr *
  (ws * Math.sin(phi) * Math.sin(delta) +
  Math.cos(phi) * Math.cos(delta) * Math.sin(ws));
```

```
// ET0 за Харгрейвсом–Самані (мм/день)
```

```
const tmean = (tmax + tmin) / 2;
```

```
const td = tmax - tmin;
```

```
const et0 = td > 0
```

```
  ? 0.0023 * Ra * (tmean + 17.8) * Math.sqrt(td)
  : 2.0; // запасне значення при відсутності даних
```

```
// Агрономічні коефіцієнти культур (Kc)
```

```
const kc = {
```

```
  tomatoes: 1.15, // томати — висока потреба
```

```
  cucumbers: 1.10, // огірки
```

```
  peppers: 0.95, // перець
```

```
  berries: 0.85, // ягідні кущі
```

```
  fruit_trees: 0.75, // плодові дерева
```

```
  lawn: 0.80 // газон
```

```
};
```

					КНУ КРБ.174.26.05.00.ПЗ	Арк.
						45
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

```
// Базова площа кожної зони (м²)
const area = { tomatoes: 12, cucumbers: 8, peppers: 6,
               berries: 10, fruit_trees: 20, lawn: 15 };

// Норма поливу для кожної зони (літри)
const irrigation = {};
for (const crop of Object.keys(kc)) {
    const etc = et0 * kc[crop];      //  $ET_c = ET_0 \times K_c$ 
    const liters = etc * area[crop]; //  $1 \text{ мм/м}^2 = 1 \text{ л/м}^2$ 
    irrigation[crop] = Math.round(liters * 10) / 10;
}

msg.payload = { et0: Math.round(et0 * 10) / 10, irrigation };
return msg;
```

2.4.4.3 Передача результату в Home Assistant

Після function-вузла додається change-вузол, який розкладає `msg.payload.irrigation` по окремих топіках, і серія `call-service`-вузлів, що оновлюють `input_number` хелпери:

```
home_assistant.call_service
  domain: input_number
  service: set_value
  entity_id: input_number.irrigation_norm_tomatoes
  value: {{ msg.payload.irrigation.tomatoes }}
```

Home Assistant автоматизація поливу потім читає `input_number.irrigation_norm_tomatoes` замість фіксованого значення і полив адаптується до погодних умов щодня без ручного втручання.

2.4.4.4 Розрахунок $T_{\max}$ і $T_{\min}$ за добу

Node-RED має вбудований ha-get-history-вузол. Конфігурація: юридична особа – sensor.bme280_temperature, період – 24 роки. У function-вузлі перед розрахунком ETo :

```
const temps = msg.payload.map(s => parseFloat(s.state));
msg.payload = {
  tmax: Math.max(...temps),
  tmin: Math.min(...temps),
  doy: Math.ceil((new Date() - new Date(new Date().getFullYear(), 0, 1)) /
86400000)
};
return msg;
```

2.5 Монтаж та підключення

2.5.1 Розміщення вузлів ESP32

Кожен вузол ESP32 з модулем реле і блоком живлення розміщується в герметичному корпусі IP54 (або IP65) на висоті 20 – 30 см від поверхні ґрунту, у безпосередній близькості від зрошувальних ліній своїх зон (радіус 2 – 3 м). Таке розміщення мінімізує довжину дротів до клапанів і датчиків і, як правило, не перевищує 5 м.

Якщо корпус металевий, то антена ESP32 повинна бути розгорнута назовні корпусу або виведена через спеціальний вивід – металевий корпус екранує Wi-Fi-сигнал. Рекомендована перевірка рівня сигналу (RSSI) до встановлення: значення не нижче – 75 дБм.

2.5.2 Прокладання кабелів

Кабелі від вузла ESP32 до датчиків прокладаються у гофрованих трубах або кабель-каналах на глибині 10 – 15 см для захисту від механічних

					<i>КНУ КРБ.174.26.05.00.ПЗ</i>	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		47

пошкоджень. Всі з'єднання у вологому середовищі виконуються за допомогою герметичних роз'ємів або герметичних кабельних сальників на корпусах. Датчики вологості та DS18B20 встановлюються в кореневій зоні культури на глибину 10 – 15 см під кутом 45°.

2.6 Налаштування Home Assistant

Home Assistant (HA) – провідна відкрита платформа для «розумного будинку» з підтримкою понад 3000 інтеграцій. У контексті системи поливу HA виконує такі функції:

- Dashboard: інтерактивна карта ділянки зі статусами зон, поточними показаннями датчиків, графіками вологості та витрат, кнопками ручного запуску поливу
- Інтеграція MQTT: автоматичне виявлення (MQTT Discovery) сутностей ESPHome-вузлів
- Інтеграція з погодою: OpenWeatherMap або Met.no – превентивне скасування поливу при прогнозованих опадах
- Automations: визначення сценаріїв автоматизації (тригери, умови, дії) – наприклад, «запустити полив зони 3, якщо вологість нижче 40% і немає дощу, і температура вище +20°C»
- Schedules: вбудований планувальник поливу за часом доби та днями тижня
- Notifications: push-сповіщення на смартфон при початку/завершенні поливу, виявленні дощу, аномальних показниках датчиків, відключенні вузла
- History & Statistics: збереження часових рядів показань датчиків, побудова графіків водоспоживання
- Energy Dashboard: облік витраченої води в розрізі зон і культур за тиждень/місяць/сезон

2.6.1 Інтеграція ESPHome з Home Assistant

Для керування ESP32 дуже зручно і функціонально використовувати аддон ESPHome. Інтеграція і налаштування ESPHome відбувається за 7 кроків:

2.6.1.1 Крок 1 – встановлення ESPHome Add-on

ESPHome — офіційний Add-on для Home Assistant. Встановлюється з магазину, окремого сервера не потрібно.

Порядок встановлення

1. НА → Settings → Add-ons → Add-on Store
2. Знайти ESPHome Device Compiler
3. Натиснути Install → Start
4. Увімкнути Start on boot та Show in sidebar
5. Відкрити ESPHome у бічній панелі

Після встановлення ESPHome доступний за адресою `homeassistant.local:6052`

2.6.1.2 Крок 2 – базова конфігурація вузла

Вся логіка вузла описується в одному YAML-файлі. ESPHome компілює його у прошивку та прошиває ESP32 по Wi-Fi (OTA).

```
# irrigation_node1.yaml
```

```
esphome:
```

```
  name: irrigation-node1
```

```
  friendly_name: "Вузол поливу 1"
```

```
esp32:
```

```
  board: esp32dev
```

```
wifi:
```

```
  ssid: !secret wifi_ssid
```

```
  password: !secret wifi_password
```

					<i>КНУ КРБ.174.26.05.00.ПЗ</i>	Арк.
						49
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

```
ap:      # резервна точка доступу
ssid: "Irrigation Fallback"
```

```
api:      # нативний API для HA
encryption:
key: !secret api_key
```

```
ota:      # оновлення прошивки по Wi-Fi
platform: esphome
password: !secret ota_password
```

logger:

Паролі зберігаються у secrets.yaml і ніколи не потрапляють у конфіг вузла.

2.6.1.3 Крок 3 – датчики та перемикачі

Кожен компонент у YAML автоматично стає сутністю (entity) в Home Assistant. Назви та іконки беруться з конфігурації.

sensor:

```
- platform: adc
  pin: GPIO34
  name: "Вологість зона 1"
  attenuation: 11db
  update_interval: 30s
  filters:
    - calibrate_linear:
      - 2.8 -> 0
      - 1.2 -> 100
  unit_of_measurement: "%"
  icon: mdi:water-percent
```

					<i>КНУ КРБ.174.26.05.00.ПЗ</i>	Арк.
						50
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

switch:

- platform: gpio

pin:

number: GPIO27

inverted: true

name: "Клапан зона 1"

restore_mode: ALWAYS_OFF

icon: mdi:pipe-valve

binary_sensor:

- platform: gpio

pin: GPIO4

name: "Датчик дощу"

2.6.1.4 Крок 4 – прошивка ESP32

Перша прошивка виконується через USB. Усі наступні оновлення – по Wi-Fi (OTA) прямо з інтерфейсу HA.

Перша прошивка (USB)

1. Підключити ESP32 через USB
2. ESPHome → вузол → Install
3. Обрати Plug into this computer
4. Прошити через Web Serial у Chrome

Наступні оновлення (OTA)

1. Змінити YAML у редакторі
2. ESPHome → вузол → Install
3. Обрати Wirelessly
4. ESPHome компілює і прошиває по Wi-Fi (~60 сек)

2.6.1.5 Крок 5 – автовиявлення у Home Assistant

					<i>КНУ КРБ.174.26.05.00.ПЗ</i>	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		51

Після прошивки ESP32 та підключення до Wi-Fi, Home Assistant автоматично знаходить новий пристрій – жодного ручного налаштування не потрібно. Що відбувається автоматично

- HA отримує mDNS-анонс від ESPHome і пропонує додати пристрій
- Усі компоненти YAML стають сутностями: sensor, switch, binary_sensor
- Сутності одразу доступні для Dashboard, Automations та Notifications
- Зв'язок через нативний API ESPHome – зашифрований, без MQTT-брокера

HA → Settings → Devices & Services → новий пристрій ESPHome зі значком повідомлення.

2.6.1.6 Крок 6 – автоматизація поливу

Сутності ESPHome одразу доступні як тригери та дії. Приклад: запуск поливу при низькій вологості.

alias: "Полив зони 1 — за вологістю"

trigger:

- platform: numeric_state
- entity_id: sensor.vuzel_polyvu_1_volohist_zona_1
- below: 40 # поріг вологості %

condition:

- condition: state # немає дощу
- entity_id: binary_sensor.vuzel_polyvu_1_datchyk_doshchu
- state: "off"
- condition: time # ранковий полив
- after: "06:00:00"
- before: "10:30:00"

action:

- service: switch.turn_on
- target:

					КНУ КРБ.174.26.05.00.ПЗ	Арк.
						52
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		


```

entity_id: switch.vuzel_polyvu_1_klapan_zona_1
- delay: "00:15:00" # 15 хвилин поливу
- service: switch.turn_off
target:
entity_id: switch.vuzel_polyvu_1_klapan_zona_1

```

2.6.1.7 Крок 7 – Dashboard і мобільний застосунок

Усі сутності одразу доступні в Lovelace Dashboard і мобільному застосунку Home Assistant (Android / iOS).

Lovelace Dashboard: Карта ділянки, графіки вологості, кнопки ручного поливу, статус клапанів у реальному часі

Мобільний застосунок HA: Той самий Dashboard на смартфоні, керування клапанами з будь-якої точки через Nabu Casa або WireGuard VPN

Push-сповіщення: Початок/завершення поливу, виявлення дощу, вологість нижче порогу, вузол відключився

2.7 MQTT-брокер Mosquitto, Node-RED, InfluxDB

Eclipse Mosquitto – легковісний відкритий MQTT-брокер, що запускається як Add-on у Home Assistant на Raspberry Pi. Брокер є центральним вузлом повідомлень між польовими вузлами ESP32 і Home Assistant.

Кожен вузол публікує показання датчиків у відповідні топіки (наприклад, irrigation/zone1/soil_moisture) і підписується на топіки команд (irrigation/zone1/valve/set). Home Assistant у свою чергу підписується на топіки датчиків і публікує команди керування. Рівень якості обслуговування QoS 1 гарантує доставку кожного повідомлення принаймні один раз що критично для команд відкриття/закриття клапанів.

Node-RED – інструмент візуального програмування потоків даних, що запускається як Add-on у Home Assistant. Використовується для реалізації

					<i>КНУ КРБ.174.26.05.00.ПЗ</i>	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		53

складної агрономічної логіки, яку незручно описувати в YAML-автоматизаціях НА:

- Розрахунок референтної евапотранспірації ETo за формулою Харгрейвса–Самані на основі даних BME280
- Динамічне коригування норми поливу залежно від фази вегетації культури (задається вручну або за календарем)
- Агрегація показань кількох датчиків вологості однієї зони (при встановленні 2 датчиків на різних глибинах)
- Формування звітів водоспоживання та відправлення щоденного дайджесту в Telegram

InfluxDB – тимчасова база даних, призначена для зберігання великих обсягів показань датчиків із високою частотою опитування. Запускається як Add-on у Home Assistant. Зберігає всю телеметрію системи: вологість і температура ґрунту, температура та вологість повітря, об'єми поданої води, стани клапанів. Дані зберігаються необмежено, що дозволяє аналізувати динаміку вологості ґрунту в розрізі сезонів і коригувати агрономічні норми.

2.8 Очікувані результати впровадження

Відповідно до даних, наведених у аналітичній частині роботи, а також досвіду аналогічних IoT-систем для приватних ділянок, впровадження розробленої системи дозволить досягти таких показників (Таблиця 2.1):

Таблиця 2.1 – Порівняльні дані впровадження

Показник	До впровадження	Після впровадження
Витрата води на полив	100% (базова)	50–70% (–30...50%)
Час ручного поливу	8–12 год/тиждень	0 (автомат)
Реакція на зниження вологості	Зі затримкою (людський чинник)	< 5 хвилин (автомат)
Полив під час дощу	Можливий	Виключено (RG-11)
Контроль при відсутності господаря	Відсутній	72+ год. авт. режим
Аналітика водоспоживання	Відсутня	Повна (зона/культура)

2.9 Висновки до розділу 2

На основі проведеного проектування та вибору технічних і програмних засобів для автоматизованої системи керування поливом можна зробити наступні висновки:

Розроблена система побудована за розподіленою трирівневою архітектурою, яка є оптимальною для присадибних ділянок площею до 15 соток, враховуючи вимоги до надійності та простоти обслуговування.

Перший рівень (Edge Layer) представлений польовими мікроконтролерними вузлами, які розміщуються безпосередньо біля зон поливу, що усуває необхідність прокладання довгих кабельних трас від будинку.

Кожен польовий вузол є автономним: він самостійно зчитує дані з датчиків та здатен ухвалювати рішення про полив навіть за відсутності зв'язку з сервером.

Центральний рівень сервера (Platform Layer) базується на одноплатному комп'ютері Raspberry Pi 4 з Home Assistant OS, де зосереджена складна логіка розрахунків, планування та зберігання журналів.

Рівень користувача (User Layer) забезпечує повноцінний дистанційний контроль через мобільний застосунок або веб-інтерфейс із доступом до карти ділянки та поточних показників.

Основою польових вузлів обрано модулі ESP32 DevKit V1 завдяки їхній високій продуктивності (двоядерний процесор 240 МГц), низькій вартості, вбудованому Wi-Fi та наявності великої кількості периферійних інтерфейсів (ADC, 1-Wire, I2C).

Система використовує ємнісні датчики вологості ґрунту (Capacitive Soil Moisture Sensor v1.2), які не мають металевих електродів, що контактують з ґрунтом, що унеможливорює електрохімічну корозію і забезпечує їхню довговічність.

Для контролю температури ґрунту застосовано цифрові датчики DS18B20 у водозахисному виконанні, що працюють по шині 1-Wire.

					<i>КНУ КРБ.174.26.05.00.ПЗ</i>	Арк.
						55
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Мікроклімат вимірюється високоточним датчиком BME280 (температура, вологість, тиск повітря), показання якого необхідні для розрахунку рівня евапотранспірації.

Облік поданої води здійснюється ротаційними лічильниками витрати YF-S201, що дозволяє контролювати точний об'єм рідини та виявляти несправності або витіки.

Замість стандартних механічних сенсорів застосовано оптичний ємнісний датчик дощу Hydreon RG-11, який вирізняється значно вищою надійністю завдяки відсутності рухомих частин та герметичному корпусу.

У ролі виконавчих пристроїв застосовуються нормально закриті (NC) електромагнітні клапани на 12 В DC, що є критично важливим для безпеки: у разі знеструмлення клапан автоматично перекриває воду.

Прошивка мікроконтролерів створена за допомогою платформи ESPHome, що дозволило описати всю апаратну логіку у декларативному форматі YAML та забезпечило можливість бездротового оновлення (OTA).

Призначення пінів ESP32 було виконано з урахуванням апаратних обмежень мікроконтролера, зокрема, для ємнісних датчиків використано виключно піни модуля ADC1, оскільки модуль ADC2 блокується при увімкненому Wi-Fi.

Зв'язок між пристроями здійснюється через протокол MQTT за допомогою брокера Mosquitto з рівнем QoS 1, що гарантує доставку керуючих команд принаймні один раз.

Складна аналітична обробка, зокрема розрахунок евапотранспірації за формулою Харгрейвса-Самані, реалізована у середовищі візуального програмування Node-RED.

Для надійного збереження всієї телеметрії без обмежень у часі використовується спеціалізована база даних InfluxDB.

Процес ухвалення рішень про полив базується на строгій ієрархії: спочатку перевіряються критичні блокуючі умови (показання датчика дощу),

					<i>КНУ КРБ.174.26.05.00.ПЗ</i>	Арк.
						56
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

потім часові вікна (заборона поливу в спеку), далі аналізується поточна вологість ґрунту та прогноз погоди від сервісу OpenWeatherMap.

Реалізовано багаторівневий захист: Watchdog-таймери для автоматичного перезавантаження у разі зависання, MQTT Last Will для сигналізації про втрату зв'язку, обмеження максимального часу відкритого клапана (до 30 хвилин) та апаратний захист від одночасного увімкнення більше ніж двох клапанів для збереження тиску в системі.

У разі втрати зв'язку із сервером вузли здатні працювати автономно за збереженим розкладом не менше 72 годин.

Впровадження розробленого комплексу дозволить скоротити витрати води на 30 – 50% порівняно з базовими показниками завдяки точному дозуванню та врахуванню погодних умов.

Система повністю позбавляє користувача необхідності витрачати 8 – 12 годин на тиждень на ручний полив. Автоматика гарантує миттєву реакцію (менше 5 хвилин) на зниження рівня вологості нижче критичного порогу, водночас повністю виключаючи можливість непотрібного поливу під час дощу.

					<i>КНУ КРБ.174.26.05.00.ПЗ</i>	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		57

ВИСНОВКИ

У результаті виконання кваліфікаційної роботи було успішно вирішено актуальне науково-практичне завдання щодо розробки автоматизованої системи дистанційного керування поливом рослин. Проведене дослідження, а також етапи апаратного та програмного проектування дозволяють зробити наступні узагальнюючі висновки:

1. Обґрунтування доцільності та архітектурного підходу

Актуальність проблеми: Сільськогосподарське зрошення споживає від 60 до 70 відсотків загального обсягу прісної води у світі. Традиційний ручний полив є неефективним через нераціональні режими та відсутність засобів контролю вологості ґрунту.

Обмеження існуючих рішень: Проведений аналіз ринку показав, що комерційні хмарні системи переважно не мають датчиків вологості ґрунту (спираються лише на прогноз погоди), а преміум-системи є закритими та надмірно дорогими для зонального керування на присадибній ділянці.

Вибір архітектури: Оптимальним рішенням для ділянки площею до 15 соток стала розподілена трирівнева архітектура. Вона усуває необхідність прокладання довгих кабельних трас (до 50 – 100 метрів) від будинку до крайніх зон поливу.

2. Апаратна реалізація та сенсорна база

Мікроконтролерна платформа: Основою польових вузлів (Edge Layer) обрано платформу ESP32 (модуль DevKit V1). Подвійне ядро дозволяє паралельно виконувати завдання керування поливом та підтримувати мережеве з'єднання без взаємного блокування.

Вимірювання вологості та температури: Для моніторингу ґрунту застосовано ємнісні датчики (Capacitive Soil Moisture Sensor v1.2), які не мають

					КНУ КРБ.174.26.05.00.ПЗ								
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата									
Розроб.		Морозов І.С.			ВИСНОВКИі				Літ.	Арк.	Аркушів		
Перевір.		Бурнасов П.В.									58	3	
									КНУ АКІТР-23ск				
Н. Контр.		Маринич І.А.											
Затверд.		Маринич І.А.											

металевих електродів і не піддаються електрохімічній корозії, забезпечуючи довговічність. Контроль температури ґрунту для теплолюбних культур реалізовано за допомогою цифрових водозахищених термодатчиків DS18B20 по шині 1-Wire.

Метеорологічний контроль: Збір даних про мікроклімат (температура, вологість, тиск повітря) виконується високоточним датчиком BME280. Для фіксації опадів застосовано надійний оптичний ємнісний датчик Hydreon RG-11, що не має рухомих частин.

Виконавчі пристрої: Керування подачею води здійснюється нормально закритими (NC) електромагнітними клапанами 12 В DC, що гарантує перекриття води у разі знеструмлення або обриву сигналу, запобігаючи неконтрольованому затопленню. Облік витраченої води ведеться ротаційними лічильниками YF-S201.

3. Програмна інфраструктура та інтеграція

Серверний рівень (Platform Layer): Центральним ядром системи виступає одноплатний комп'ютер Raspberry Pi 4 із розгорнутою платформою Home Assistant OS.

Прошивка вузлів: Програмування мікроконтролерів реалізовано за допомогою платформи ESPHome, що дозволило описати логіку у форматі YAML та забезпечило нативну інтеграцію з Home Assistant та можливість оновлення "повітрям" (OTA).

Протоколи зв'язку: Обмін даними відбувається по мережі Wi-Fi 2,4 ГГц із застосуванням протоколу MQTT (брокер Mosquitto). Рівень якості обслуговування QoS 1 гарантує безперебійну доставку керівних команд.

Зберігання даних: Для надійного збереження всієї телеметрії (динаміки вологості, об'ємів води) застосовано часорядову базу даних InfluxDB.

4. Агрономічна логіка та алгоритми ухвалення рішень

Багаторівневий алгоритм: Система ухвалює рішення на основі строгої ієрархії: спочатку перевіряються блокуючі умови (наявність дощу за даними RG-11), далі – часові вікна (заборона поливу в денну спеку з 11:00 до 16:00),

					КНУ КРБ.174.26.05.00.ПЗ	Арк.
						59
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

після чого аналізується поточна вологість ґрунту та метеопрогноз від OpenWeatherMap.

Концепція точного землеробства: У середовищі Node-RED реалізовано алгоритм розрахунку евапотранспірації (ET_0) за формулою Харгрейвса-Самані на основі даних із датчика BME280. Це дозволяє динамічно коригувати добову норму поливу залежно від інтенсивності сонячного випромінювання та фази вегетації конкретної культури (томати, огірки, газон тощо).

5. Надійність, безпека та ефективність системи

Автономна робота: У разі втрати зв'язку із центральним сервером (MQTT-брокером), польові вузли ESP32 здатні автоматично переходити в автономний режим, продовжуючи зчитувати датчики та виконувати полив за збереженим у пам'яті локальним розкладом протягом не менше 72 годин.

Захисні механізми: Впроваджено апаратні та програмні засоби безпеки, серед яких Watchdog-таймери, MQTT Last Will для контролю статусу вузлів, обмеження максимального часу відкритого клапана (не більше 30 хвилин) та захист від падіння тиску (не більше двох одночасно відкритих клапанів).

Економічний та експлуатаційний ефект: Теоретичні розрахунки та дані проєктування підтверджують, що впровадження розробленої системи дозволить скоротити витрати води на 30 – 50% завдяки адаптивному поливу за потребою. Час, який користувач витрачає на ручний полив (8 – 12 годин на тиждень), зводиться до нуля, а реакція системи на критичне зниження вологості ґрунту становить менше 5 хвилин.

Таким чином, розроблений апаратно-програмний комплекс є завершеним, масштабованим та надійним рішенням, що повністю відповідає концепції "розумного будинку" та принципам точного землеробства. Система готова до практичного впровадження на присадибних ділянках та забезпечує високий рівень автоматизації агротехнічних процесів.

					КНУ КРБ.174.26.05.00.ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		60

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. Dongyu Q. Water is life, food is water: sustaining water and ensuring food for the future. *Food and Agriculture Organization (FAO)*. URL: <https://www.fao.org/director-general/articles/details/water-is-life--food-is-water--sustaining-water-and-ensuring-food-for-the-future/en> (дата звернення: 18.03.2026).
2. Каталоги обладнання для поливу Rain Bird. *Rain Bird*. URL: <https://rain-bird.com.ua/uk/spravka-ua/katalogi/katalogi-obladnannya-rain-bird.html> (дата звернення: 07.04.2026).
3. Rachio 3 Smart Sprinkler Controller. *Rachio*. URL: <https://rachio.com/products/rachio-3> (дата звернення: 24.03.2026).
4. Gravity: analog capacitive corrosion resistant soil moisture sensor for arduino / raspberry pi. *DFROBOT*. URL: <https://wiki.dfrobot.com/sen0193/> (дата звернення: 17.03.2026).
5. Capacitive soil moisture sensor V1.2. *DIY Shop*. URL: <https://diyshop.com.ua/en/emkostnyj-datchik-vlazhnosti-pochvy> (дата звернення: 17.03.2026).
6. Датчик вологості ґрунту (гігрометр) FC-28. *RoboStore*. URL: https://robostore.com.ua/moduli-i-datchiki/sensory-datchiki-i-moduli/datchik-vlazhnosti-pochvy-fc-28-gigrometr/?srsltid=AfmBOoo5VWt5A0rEKZtwZMmB_y0qn3DuNQOBL4dEbTCaZjhPN95INAz (дата звернення: 17.03.2026).
7. Початок роботи з ESP32. *wiring.blog*. URL: <https://wiring.blog/esp32/pochatok-roboty-z-esp32> (дата звернення: 15.04.2026).

					<i>КНУ КРБ.174.26.05.00.ПЗ</i>		
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата	<i>СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ</i>		
Розроб.		Морозов І.С.					
Перевір.		Бурнасов П.В.					
Н. Контр.		Маринич І.А.					
Затвердив		Маринич І.А.			<i>КНУ АКІТР-23ск</i>		
						Літ.	Арк.
							Аркушів
							61
							3

8. Датчик температури DS18B20, вологозахищений. *RadioVolt*. URL: https://radiovolt.in.ua/ua/p1168909701-datchik-temperature-ds18b20.html?source=merchant_center&gad_source=1&gad_campaignid=18454827497&gclid=Cj0KCQjwILDQBhDjARIsAPLiefEjBhZc93UpFLtcpphhokQstNwgtEQ2M4ZI2mEd5_GzlfAx_1eVJUaAtD2EALw_wcB (дата звернення: 17.04.2026).
9. Барометр BME280 3.3V I2C (датчик температури, вологості, тиску). *Arduino.ua*. URL: <https://arduino.ua/prod3930-barometr-bme280-3-3v-i2cspi-datchik-temperatyri-vlajnosti-davleniya> (дата звернення: 20.04.2026).
10. Датчик витрат води G1/2". *Arduino.ua*. URL: <https://arduino.ua/prod670-datchik-vitrat-vodi-g12> (дата звернення: 23.04.2026).
11. Optical rain sensor RG-11 review. *EDN*. URL: <https://www.edn.com/optical-rain-sensor-rg-11-review/> (date of access: 23.04.2026).
12. Електромагнітний клапан для води/повітря NC нормально закритий 12V DC 1/2. *AngeMart*. URL: <https://angemart.com.ua/kontrol-ta-upravlinnya/elektromekhanika/elektromagnitnij-klapan-dlya-vodipovitrya-nc-normalno-zakritij-12v-dc> (дата звернення: 23.04.2026).
13. Raspberry pi 4 model B 4GB. *Mini-Tech*. URL: <https://www.mini-tech.com.ua/ua/raspberry-pi-4> (дата звернення: 14.04.2026).
14. Евапотранспірація. *Вікіпедія*. URL: <https://uk.wikipedia.org/wiki/Евапотранспірація> (дата звернення: 04.05.2026).
15. Коваленко І., Журавльов О. Визначення фактичної евапотранспірації томатів розрахунковими методами. *Вісник аграрної науки*. 2023. Т. 101, № 8. URL: <https://doi.org/10.31073/agrovisnyk202308-07> (дата звернення: 04.05.2026).
16. Моркун Н. В., Маринич І. А. Методичні вказівки до виконання

					КНУ КРБ.174.26.05.00.ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		62

кваліфікаційної роботи бакалавру для студентів спеціальності 151 “Автоматизація та комп’ютерно-інтегровані технології”. Кривий Ріг : Видавничий центр КНУ, 2019. 50 с.

17. ДСТУ 3008:2015. Інформація та документація. Звіти у сфері науки і техніки. Структура і правила оформлення. Київ, ДП «УкрННЦ», 2015. 26с. (Інформація та документація).
18. ДСТУ 8302:2015. Бібліографічне посилання. Загальні вимоги та правила складання Київ, ДП «УкрННЦ», 2016. 16 с. (Інформація та документація).
19. ДСТУ 3582:2013. Бібліографічний опис. Скорочення слів і словосполучень в українській мові. Загальні вимоги та правила. Київ, ДП «УкрННЦ», 2013. 23 с. (Інформація та документація)
20. ДСТУ 3651.0-97 Метрологія. Одиниці фізичних величин. Основні одиниці фізичних величин Міжнародної системи одиниць. Основні положення, назви та позначення Київ, Держстандарт України, 1998. 27 с. (Інформація та документація)