

## ЗМІСТ

ПЕРЕЛІК СКОРОЧЕНЬ.....	7
ВСТУП.....	8
1. АНАЛІЗ ІСНУЮЧИХ ІНФОРМАЦІЙНО-ТЕЛЕКОМУНІКАЦІЙНИХ СИСТЕМ УПРАВЛІННЯ МІНІТЕПЛИЦЕЮ .....	9
Висновки до розділу .....	11
2. МЕТОДИ СИНТЕЗУ ІНФОРМАЦІЙНО-ТЕЛЕКОМУНІКАЦІЙНИХ СИСТЕМ УПРАВЛІННЯ МІНІТЕПЛИЦЕЮ .....	11
Висновки до розділу .....	13
3. МАТЕМАТИЧНІ МОДЕЛІ ФУНКЦІОНУВАННЯ ПІДСИСТЕМ МІНІТЕПЛИЦЕЮ З ВИКОРИСТАННЯМ СЕРВІСНОГО РОБОТА.....	14
3.1 Математична модель інформаційного обміну в системі управління мінітеплицею .....	14
3.1.1 ВМЕ280 .....	15
3.1.2 Датчик вуглекислого газу МНЗ-19. ....	20
3.1.3 Датчик вологості землі .....	22
3.1.4 Датчик світла ультрафіолетового спектру ML8511.....	23
3.1.5 Основний контролер пристрою – STM32 .....	25
3.1.6 Модуль Wi-Fi ESP8266 .....	28
3.2 Математична модель обробки сигналів датчиків (фільтрація помилок) .....	30
3.2.1 I2C шина та ВМЕ280.....	30
3.2.2 UART у датчику газу МН-Z19 .....	35
3.2.3 АЦП .....	37
3.3 Математична модель функціонування сервісного робота .....	39
3.4 Математична модель оптимізації інформаційно-телекомунікаційної системи управління мінітеплицею з використанням сервісного робота за економічними показниками .....	42
Висновки до розділу .....	54
4. НАТУРНЕ І НАПІВНАТУРНЕ МОДЕЛЮВАННЯ РОБОТИ ІНФОРМАЦІЙНО-ТЕЛЕКОМУНІКАЦІЙНОЇ СИСТЕМИ.....	54
Висновки до розділу .....	59

ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ .....	60
------------------------	----

НТУУ 1321-с 32.ТЗ-61.2020.ПЗ

Змн.	Лист	№ док.ум.	Підпис	Дата				
Розроб.		Нідченко І. А.			Інформаційно-телекомунікаційна система управління мінітеплицею з використанням сервісного робота	Літ.	Арк.	Акрушів
Перевір.		Лисенко О. І.					6	79
Реценз.		Мошинська А. В.						
Н. Контр.		Петрова В. М.						
Затверд.		Явіся В. С.						

## ПЕРЕЛІК СКОРОЧЕНЬ

### *Англійські скорочення*

MEMS	(Micro-Electro-Mechanical Systems) – мікроелектромеханічні системи
NDIR	(NonDispersive InfraRed) – недисперсний інфрачервоний датчик
MCU	(MicroController Unit) – мікроконтролер
UART	(Universal Asynchronous Receiver/Transmitter) – універсальний асинхронний приймач/передавач
RX	(Recieve) – приймач
TX	(Trancieve) – передавач
SPI	(Serial Peripheral Interface) – послідовний периферійний інтерфейс
DMA	(Direct Memory Access) – прямий доступ до пам'яті
CRC	(Cyclic Redundancy Check) – Циклічний надлишковий код
GPIO	(General-Purpose Input/Output) – Інтерфейс введення/виведення загального призначення
ADC	(Analog-to-Digital Converter) – Аналого-цифровий перетворювач
PWM	(Pulse-Width Modulation) – Широтно-імпульсна модуляція
I2C	(Inter-Integrated Circuit) – Міжінтегральна схема послідовної асиметричної шини
SDA	(Serial DAta line) – послідовна лінія даних
SCL	(Serial CLock line) – послідовна лінія тактування
ACK	(Acknowledge bit) – біт підтвердження
NA	(Not Acknowledge) – біт не підтвердження
MSB	(Most Significant Bit) – Найзначніший біт
MQTT	(Message Queue Telemetry Transport) – Телеметричний транспорт
QoS	(Quality of Service) – якість обслуговування
HSE	(High Speed Clock) – зовнішній RC генератор
HAL	(Hardware Abstraction Layer) - рівень апаратної абстракції

### *Українські скорочення*

## ВСТУП

Останнім часом здоровий спосіб життя стає все більш популярним. Одним із головних критеріїв здорового способу життя є правильне харчування. Основою правильного харчування є якісні свіжі продукти, отримані без застосування надмірної кількості добрив. Тому вирощування рослин вдома набуває все більшого розповсюдження та надає можливість отримати якісні продукти для себе та своєї сім'ї.

Вирощування рослин в домашніх умовах в мінітеплицях буде більш зручним та більш ефективним, якщо автоматизувати деякі операції.

Автоматизований контроль під час вирощування рослин в домашніх умовах таких операцій як вимірювання вологості ґрунту, вологості та температури повітря .... дозволить користувачу ефективно використовувати не тільки ресурси, але й власний час, і отримати якісний результат.

Таким чином, застосування сервісного робота дозволить значно поліпшити процес вирощування рослин в домашніх мінітеплицях.

Ринок пристроїв для вирощування рослин в домашніх умовах динамічно розвивається, але на даний час більшість цих пристроїв або потребують постійного контролю людини за усіма процесами, що не сприяє спрощенню їх застосування та ефективності, або мають високу вартість, яка нівелює отриману від них користь та знижує доступність таких пристроїв для широкого кола споживачів.

Мета роботи: проаналізувати методи побудови та функціонування системи мінітеплиці з використанням сервісного робота. Розробка математичної моделі функціонування загального пристрою, що складається з окремих підсистем.

Наукові задачі досліджень:

- 1) Проаналізувати існуючі подібні інформаційно-телекомунікаційні системи управління мінітеплиці

- 2) Проаналізувати наявні методи синтезу інформаційно-телекомунікаційних систем управління мінітеплиці з використанням сервісного роботу
- 3) Дослідити математичній моделі функціонування підсистем мінітеплиці з сервісним роботом

Об'єкт досліджень – процес функціонування системи управління мінітеплицею з використанням сервісного роботу.

Предмет досліджень – методи оцінки показників функціонування моделей інформаційного обміну підсистем мінітеплиці.

## **1. АНАЛІЗ ІСНУЮЧИХ ІНФОРМАЦІЙНО-ТЕЛЕКОМУНІКАЦІЙНИХ СИСТЕМ УПРАВЛІННЯ МІНІТЕПЛИЦЕЮ**

В даний момент є велика кількість проектів, розрахованих на управління промисловими теплицями, що мають великий об'єм рослинності. Натомість, пропозицій у сфері мінітеплиць дуже мало, та більшість з них лише на стадії стартапу. В нещодавній ситуації, що склалася у світі актуальність подібних систем має нагальну потребу. Перевагами цієї системи є дешевізна та простота у використанні. До складу системи можуть входити контролер поливу, вивітрювач, фітосвітло, датчик температури/вологи/тощо.

Провідні компанії у сфері автоматизації теплиць:

- Grofit <https://www.grofit-ag.com/>
- Ignis Nova <https://ignisnova.com/>
- Deepgreen <https://www.deepgreen.ai/>
- Cultivate <https://www.cultivate.com/>
- Irrrometer <https://www.irrometer.com/>

Grofit має місцеві сенсорні станції, які вимірюють умови навколишнього середовища та ґрунту, програму для смартфона для підтримки прийняття рішення. За допомогою використання цієї системи виробник гарантує

збільшення врожаю, скорочення в добриві та воді та збільшення прибутку на 20%.

Ignis Nova націлена на телекомунікаційні системи з використанням штучного інтелекту. За допомогою цієї технології проводиться спектральний аналіз культур з дронів та прогнозування якості врожаю у режимі реального часу.

Deergreen використовують технології комп'ютерного бачення сільського господарства та інтерфейс для роботи з користувачем. Дозволяє відстежувати фенотипічні критерії через дистанційний доступ. Системи комп'ютерного зору є дуже сучасними засобами спостереження та моніторингу, але потребують великих бюджетних витрат на етапі розгортання системи.

Cultivate використовує комбінацію датчиків ґрунту, витратомірів та клапанів у поєднанні із супутниковими даними для точного поливу. Також система обчислює точну кількість води, необхідної для сільськогосподарських культур на основі статичних та динамічних точок даних. Статичні параметри, такі як тип врожаю та тип ґрунту, збираються на початку сезону. Динамічні параметри, такі як вік врожаю, кількість води під час попередніх сеансів, швидкість вітру, інтенсивність сонця та кілька інших, збираються щодня автоматично, для точного розрахунку потреб у воді конкретного врожаю. У складі автоматизованої системи зрошення складний алгоритм аналізує зібрані дані, визначає напругу живлення для регулювання потоку води та забезпечує, щоб посіви живились точною кількістю води, підтримуючи баланс між кількістю води, доступністю та критичністю потреб у рослинах у воді.

Усі ці проекти мають можливість працювати у середовищі мінітеплиць, але загалом розраховані на більш великі масштаби виробництва. Вони потребують професійного втручання для встановлення та налагодження системи, що безсумнівно призводить до подорожчання кінцевого продукту. Габарити пристроїв також потребують багато місця, що є критичним показником у домашніх умовах.

Велику частку ринку займає розрізнені товари, тобто пристрої, які виконують тільки одну функцію і не працюють комплексно. Плюсом цих пристроїв є простота у використанні та відсутність непотрібних функцій для користувача. Але якщо розглядати повний догляд за мінітеплицею – комплекс розрізнених пристроїв не зможе працювати автоматизовано та матиме набагато більшу вартість.

Мій проект націлений на створення інформаційно-телекомунікаційної системи управління мінітеплицею, яка дозволить оптимізувати процес вирощування рослин в мінітеплицях в домашніх умовах, забезпечити його максимальну ефективність, мінімізувати витрачений час під час догляду за рахунок компактності та створення дружнього інтерфейсу для користувача. При цьому максимально знизити собівартість кінцевого продукту.

### **Висновки до розділу**

Розглянуто наявні технології автоматизованого вирощування рослин у різноманітних масштабах виробництва. Наведено приклади відмінностей кожної системи та перелічено переваги та недоліки існуючих систем відносно створюваної.

## **2. МЕТОДИ СИНТЕЗУ ІНФОРМАЦІЙНО-ТЕЛЕКОМУНІКАЦІЙНИХ СИСТЕМ УПРАВЛІННЯ МІНІТЕПЛИЦЕЮ**

Методи синтезу подібних телекомунікаційних систем мають багатогранний характер, тому їх розділяють на 3 основні методи:

- Структурний
- Функціональний
- Інформаційний

**Структурний метод синтезу** – розробка (створення, проектування, вдосконалення) системи, яка повинна володіти бажаними властивостями.

Структурний метод проводиться з метою обґрунтування безлічі елементів структури, зв'язків між ними, характеристик елементів та зв'язків, що забезпечують у сукупності максимальний рівень відповідності заданим вимогам.

Об'єктами дослідження структурного синтезу є різні варіанти структур інформаційно-телекомунікаційних систем.

До основних узагальнених показників досліджуваних структур відносяться:

- число керованих об'єктів;
- час і достовірність доведення інформації до керованих об'єктів;
- ймовірність реалізації повного циклу управління з використанням синтезуючої структури;
- життєздатність структури;
- сумарна вартість структури та ін.

У процесі структурного синтезу визначаються ряд елементів структури, відносини і зв'язки між ними, характеристики елементів і зв'язків, що забезпечують оптимальні або раціональні значення узагальнених показників відповідно до обраних критеріїв ефективності.

Критерій ефективності вибирається з урахуванням вимог, представлених до інформаційно-телекомунікаційних систем. На вибір критерію впливають вимоги, що пред'являються до точності визначення показників, ступінь визначеності вихідних даних, наявність методичного апарату.

**Функціональний метод синтезу.** Функціональний синтез здійснюється одночасно з дослідженням структури інформаційно-телекомунікаційних систем. Сутністю функціонального синтезу є обґрунтування динамічних характеристик інформаційно-телекомунікаційних систем, які повинні володіти бажаними властивостями.

Мета функціонального синтезу - обґрунтування оптимальних або раціональних характеристик процесів функціонування інформаційно-телекомунікаційних систем, тобто процесів зміни її станів з плином часу відповідно до поставленої мети.

При постановці загальної задачі функціонального синтезу необхідно враховувати критерії ефективності управління.

Для отримання рішень, близьких до оптимальних, необхідно дослідити процеси функціонування в рамках всіх формованих варіантів структур і формувати варіанти структур, забезпечивши ефективну реалізацію обраних алгоритмів.

**Інформаційний метод синтезу.** Сутністю інформаційного синтезу є обґрунтування необхідного обсягу і форм подання інформації, методів і засобів її передачі, обробки, зберігання, введення і виведення для розроблюваної структури і алгоритму функціонування інформаційно-телекомунікаційних систем.

Інформаційний синтез доповнює завдання функціонального синтезу і здійснюється з метою визначення необхідних якісних і кількісних характеристик інформації, використовуваної в процесі функціонування інформаційно-телекомунікаційних систем.

В ході інформаційного синтезу проводиться обґрунтування необхідного обсягу і форм подання інформації, методів і засобів її передачі, обробки, зберігання, введення і виведення. Визначення оптимальних або раціональних характеристик інформації проводиться, як правило, з використанням показників і критеріїв ефективності, які враховують структурні і функціональні особливості системи. При цьому однією з основних проблем інформаційного синтезу є кількісна оцінка впливу даних характеристик на результати функціонування інформаційно-телекомунікаційних систем.

Таким чином для синтезу інформаційно-телекомунікаційної системи управління мінітеплицею буде застосовано комплексний метод синтезу на основі вищеописаних методів.

### **Висновки до розділу**

Розглянуто наявні методи синтезу інформаційно-телекомунікаційних систем. Усі три методи добре описують свої аспекти синтезу, але для опису методу синтезу цілої системи доцільно використовувати комплексний метод



синтезу, який дозволить синтезувати інформаційно-телекомунікаційну систему управління мінітеплиці у повноцінному стані.

### 3. МАТЕМАТИЧНІ МОДЕЛІ ФУНКЦІОНУВАННЯ ПІДСИСТЕМ МІНІТЕПЛИЦЕЮ З ВИКОРИСТАННЯМ СЕРВІСНОГО РОБОТА

#### 3.1 Математична модель інформаційного обміну в системі управління мінітеплицею

Функціональна схема інформаційно-телекомунікаційної системи управління мінітеплицею.

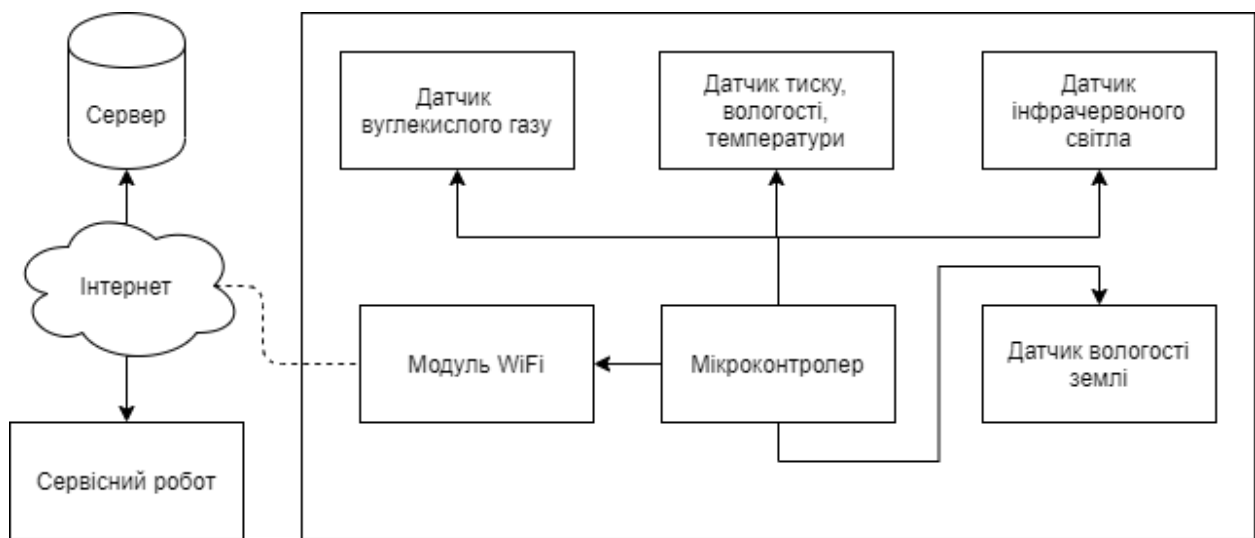


Рис. 3.1. Функціональна блок-схема системи управління мінітеплиці з використанням сервісного робота

Для ефективного вирощування рослин в мінітеплиці, необхідно постійно підтримувати певні параметри, а саме:

1. Температура повітря повинна підтримуватися в діапазоні 20-25 градусів вдень та 16-18 градусів уночі.
2. Вологість повітря 50-60 %
3. Вологість ґрунту (землі) 70-80 %
4. Кількість вуглекислого газу 1000-1500ppm
5. Кількість світла 20000-35000 Лк

Інформаційно-телекомунікаційна система управління мінітеплицею дозволить проводити вимірювання та моніторинг перелічених параметрів, здійснювати аналіз отриманих даних з метою вчасного поливу, провітрювання, вмикання або вимкнення освітлення.

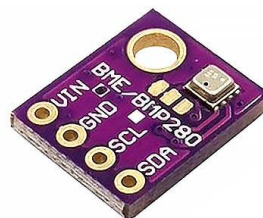
Мікроконтролер збирає показники датчиків через відповідні протоколи, аналізує та реагує на зміни клімату за зазначеним користувачем сценарієм та відправляє до Wi-Fi модулю, який генерує запит до баз даних сервера щоб додати нові дані.

Пристрій складається з:

1. Мікроконтролеру
2. Модулю WiFi
3. Датчику вологості повітря
4. Датчику вологості землі
5. Датчик тиску
6. Датчику температури
7. Датчику вуглекислого газу
8. Датчику світла ультрафіолетового спектру

Розберемо модулі та датчики як окремі компоненти.

### 3.1.1 BME280



Модуль BME280 від компанії BOSCH у малому форм-факторі (2 x 2.5 мм) має комплекс вимірювальних сенсорів із датчику температури, датчику вологості та датчику тиску.

Датчик вологості повітря вимірює вологість повітря від 0 до 100 відсотків з похибкою  $\pm 3\%$  за умови, що температура навколишнього середовища від 0 до 60 градусів Цельсія.

Датчик тиску здатен вимірювати показники у діапазоні від 300 до 1100 гПа, що дорівнює від +9000 до -500 метрів над рівнем моря. Похибка абсолютного вимірювання дорівнює 1 гПа, а відносного 0.12 гПа, що приблизно дорівнює 1 метру.

Датчик температури вимірює температуру повітря у діапазоні від -40 до 85 градусів Цельсія з похибкою від 0.5 до 1 градуса. Не має доброї вологостійкості, тому потребує доповненого захисту.

Модуль підтримує живлення від 1.71 до 3.6 вольти та I2C інтерфейс. У модулі також наявний SPI інтерфейс, за допомогою якого можна досягти більшої швидкості передачі інформації, але він потребує додаткових ліній передачі. Для даного проекту швидкість I2C дуже достатня та з'являється заощадження на кількості проводів відносно SPI інтерфейсу.

На роздільну здатність отриманих даних також впливає середньоквадратичний шум, вплив якого можна зменшити за допомогою Oversampling (надмірне вимірювання), виставивши який можливо збільшити час вимірювання показників.

Для запобігання різких змін тиску та температури, що можуть виникнути при закритті дверей\вікна компанія пропонує апаратний налаштований фільтр, який підвищить роздільну здатність до 20 біт.

Щоб виправити подібні перепади у вихідних даних, не викликаючи додаткового інтерфейсного трафіку та робочого навантаження процесора, VME280 має внутрішній фільтр IIR (infinite impulse response filter) - Рекурсивний фільтр. Це ефективно зменшує пропускну здатність вихідних сигналів температури і тиску і збільшує роздільну здатність вихідних даних про тиск і

температуру до 20 біт. Вихідні дані наступного вимірювання фільтруються за допомогою наступної формули:

$$data\_filtered = \frac{data\_filtered\_old \times (filter\_coefficient - 1) + data\_ADC}{filter\_coefficient}$$

Data\_filtered\_old – дані з попереднього виміру пам'яті фільтру

Data\_adc – поточні дані з наявного АЦП вимірювання

Data\_filtered – нове значення пам'яті фільтра, яке буде відправлено у вихідний регістр

Налаштування фільтра:

Таблиця 3.1.1

Ефективність коефіцієнтів ІІР фільтру

Коефіцієнт фільтру	Кількість вимірів для досягнення $\geq 75\%$ ступінчастості реакції
Вимкнено	1
2	2
4	5
8	11
16	22

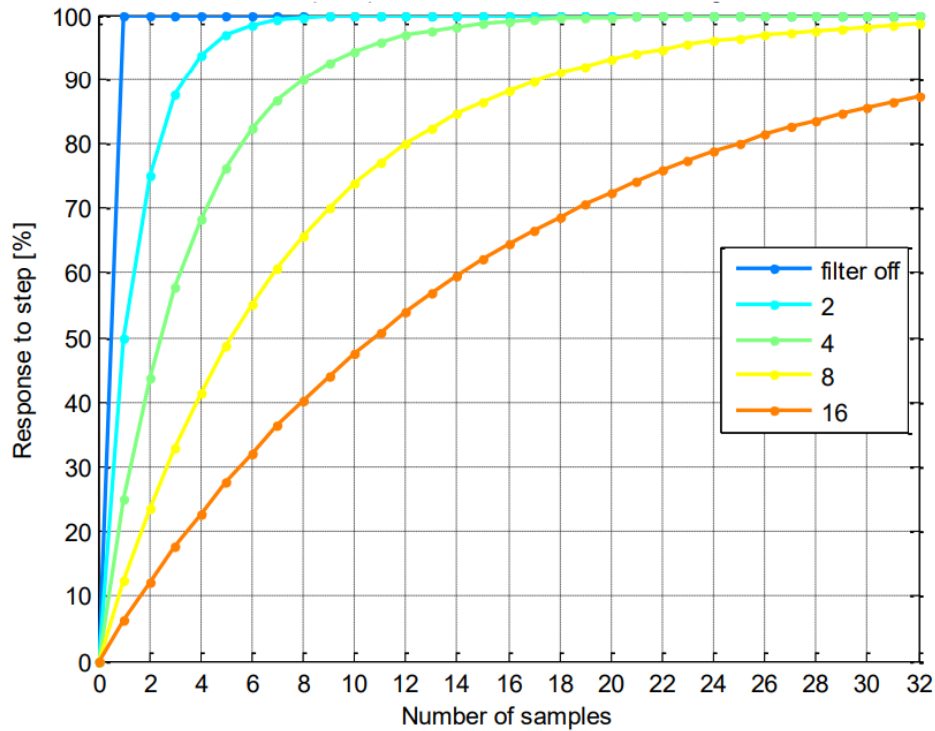


Рис. 3.1.1. Крок відповіді при різних налаштуваннях фільтра

Сенсор має два режими зчитування даних – forced (вимушений) та normal (звичайний) режим роботи. У вимушеному режимі модуль просипається по запиту від Майстра, відправляє поточні показники та повертається у режим сну. Цей режим заощаджує енергію але потребує більше часу для обробки команди. У звичайному режимі показники відправляються постійно та без зупинки, що потребує більшої кількості енергії, але дані приходять швидше.

Офіційна специфікація модулю пропонує чотири готові режими роботи сенсорів у різних випадках їх використання:

#### 1) Моніторинг.

Вимушений режим роботи, дуже низька швидкість передачі, мінімальне споживання електроенергії, вимкнений фільтр від різких перепадів, x1 надмірного вимірювання для усіх показників. У такому режимі дані отримуються один раз у хвилину.

- 2) Вимірювання вологи.  
Вимушений режим роботи, низька швидкість передачі, мінімальне споживання електроенергії, вимірюється лише температура та вологість з стандартним режимом надмірного вимірювання. Є можливість використовувати звичайний режим роботи, запит даних проводиться один раз на секунду.
- 3) Навігація.  
Звичайний режим роботи, потребується мінімальний можливий шум у вимірюванні та велика кількість запитів у короткий термін, тому вмикається x16 режим надмірного вимірювання для тиску, x2 для температури та найшвидший режим фільтру від різких перепадів.
- 4) Ігровий.  
Звичайний режим роботи, низький шум у вимірюванні та частота запитів у 2 Гц, тому вмикається x16 режим надмірного вимірювання для тиску, x1 для температури, вимірювання вологості вмикається та найшвидший режим фільтру від різких перепадів.
- Для вимірювання кліматичних умов мінітеплиці найбільш відповідним режимом обрано «Моніторинг» .

### 3.1.2 Датчик вуглекислого газу MHZ-19.



Інфрачервоний сенсор вуглекислого газу використовує NDIR (nondispersive infrared) недисперсний інфрачервоний датчик, що детектує вміст CO<sub>2</sub> у повітрі, а вбудований датчик температури дозволяє робити теплову компенсацію.

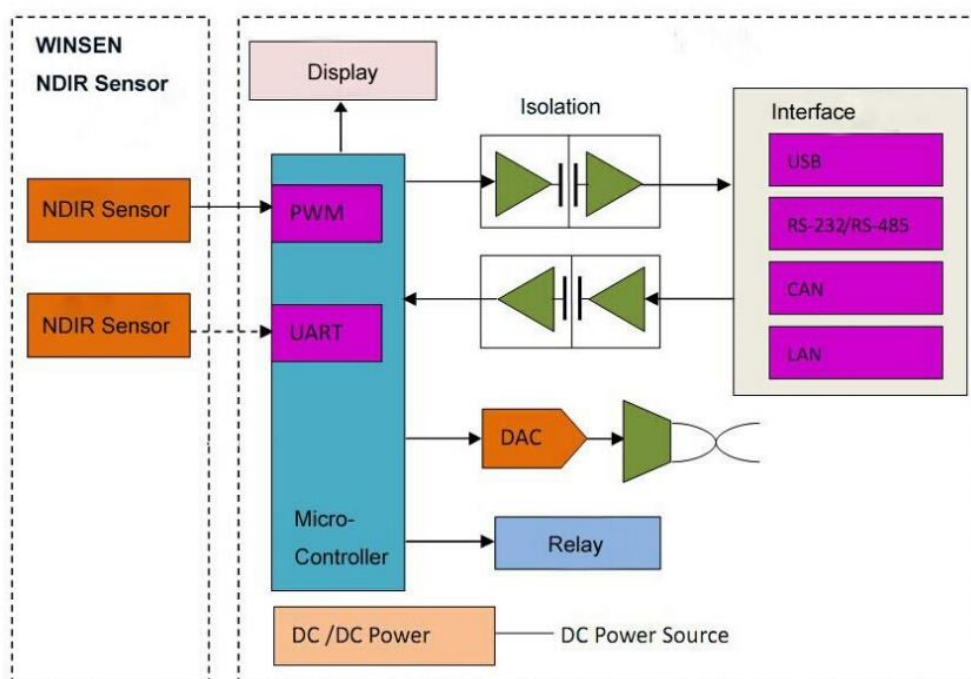


Figure 3 Application Circuit

Рисунок 3.1.2. Функціональна блок-схема датчику вуглекислого газу

Роздільна здатність дозволяє вимірювати вміст CO<sub>2</sub> у діапазоні від 0% до 0,5%, але сенсор потребує близько трьох хвилин для виходу на робочий режим. Для підключення модуль має UART інтерфейсу або ШІМ (широко-імпульсна модуляція) вихід.

Для розрахунку місткості вуглекислого газу через ШІМ розробник надає формулу для обчислення:

$$C_{ppm} = 2000 \times (T_H - 2\text{мс}) / (T_H + T_L - 4\text{мс})$$

$C_{ppm}$  – концентрація CO<sub>2</sub> у ppm

$T_H$  – час висого рівня сигналу у проміжку циклу

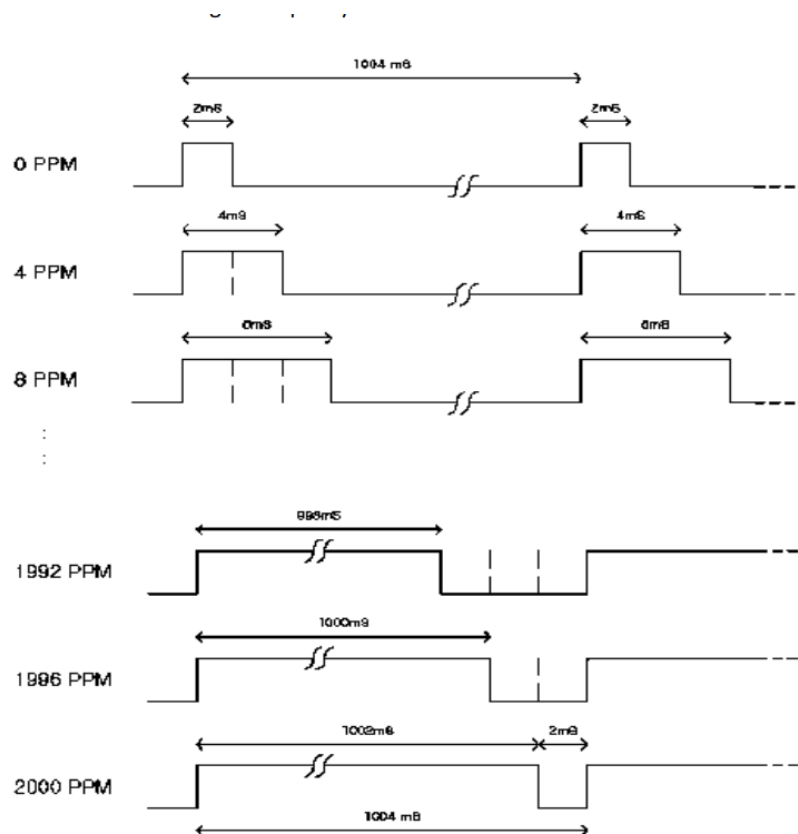


Figure 4 PWM Output

Вихід ШІМ сигналу має значну похибку відносно послідовного інтерфейсу із-за залежності від напруги живлення та її стрибків, тому використання UART дасть більш точні дані, хоча й потребує більшої кількості проводників.



### 3.1.3 Датчик вологості землі



Датчик вологості землі являє собою ємнісний сенсор вологості, перевагою якого є корозійна стійкість. Найчастіше подібні сенсори мають оголені металеві контакти, за допомогою яких вимірюють опір один між одним, подаючи напруги. При подачі напруги та за умови вологого середовища відтворюється

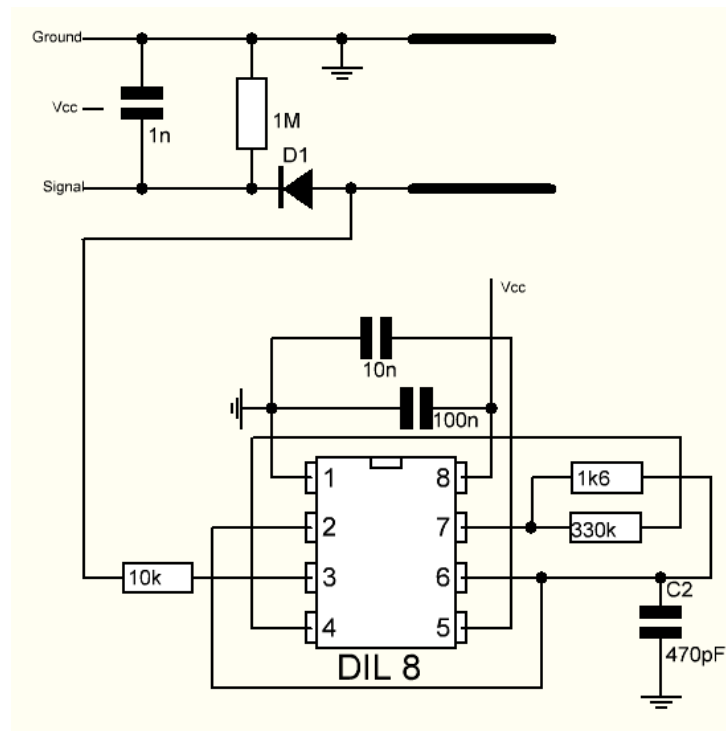


Рис. 3.1.3. Принципова схема ємнісного датчику вологості ґрунту

У складі сенсора існує генератор з фіксованою частотою, який побудований на мікросхемі 555 серії. За допомогою генератора утворюється квадратна хвиля, яка подається на датчик, що по фізичним властивостям є конденсатором. Сигнал квадратної хвилі являє собою змінний струм, тому

проходячи через цей конденсатор з'являється певний реактивний опір (опір змінному струму, обумовлений передачею енергії електричним полем в конденсаторах), який формує дільник напруги разом з резистором (10кОм на штирі №3). Чим більше вологість ґрунту, тим вища ємність датчика. Отже, спостерігається менша реакційна здатність до квадратної хвилі, тим самим знижується напруга на сигнальній лінії. Напругу на аналоговому контактному штирі можна виміряти за допомогою АЦП мікроконтролера, значення якої буде залежати від вологості ґрунту.

$$X_c = \frac{1}{2\pi fC}$$

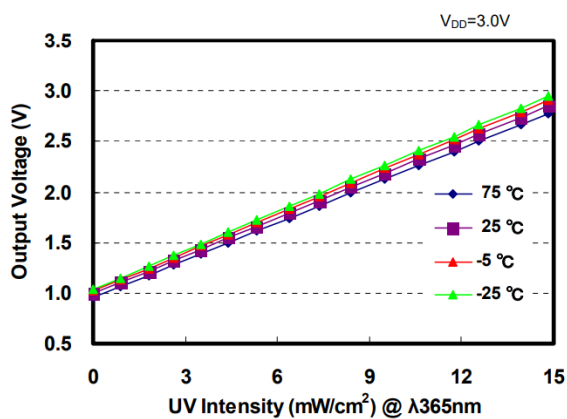
Модуль має аналоговий вихід з діапазоном від 0 до 3 вольт. Для вимірювання вихідного сигналу використовується АЦП мікроконтролера.

### 3.1.4 Датчик світла ультрафіолетового спектру ML8511



Датчик світла ультрафіолетового спектру має чутливість до спектру в діапазоні UV-A та UV-B (від 290 до 390нм). Має живлення 3.3 вольти та аналоговий вихід від 1 до 3 вольт, що прямопропорційно дорівнює від 0 до 102450 Лк.

## OUTPUT VOLTAGE– UV INTENSITY CHARACTERISTICS



## SPECTRAL RESPONSIVITY CHARACTERISTICS

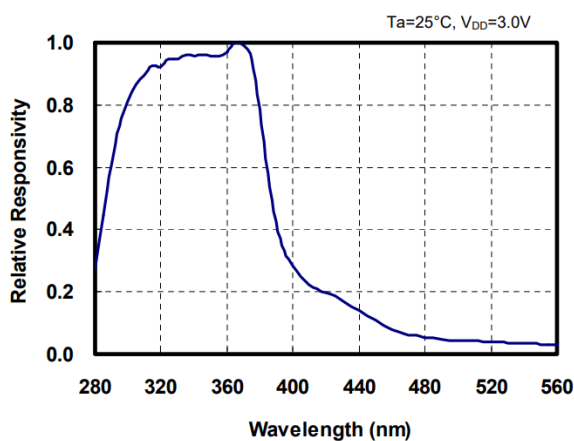
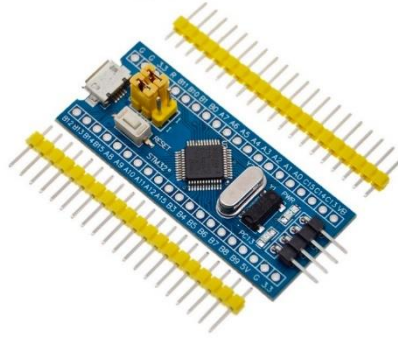


Рис. 3.1.4. Графіки залежності вихідної напруги від інтенсивності ультрафіолетового світла та залежності відносної чуйності від довжини хвилі

Для двох вищезазначених датчиків використовується 12 бітний аналогово-цифровий перетворювач, вмонтований у мікроконтролері.

### 3.1.5 Основний контролер пристрою – STM32



Мікроконтролер - поєднання центрального процесора, ОЗУ, ПЗУ і периферійних пристроїв на одному кристалі. Мікроконтролер є «мозком» будь якої системи, тому його вибір має безсумнівно велику роль у подальшій роботі усієї системи. Враховуючи рівень знань розробника відповідним контролером для системи управління мінітеплицею може бути мікроконтролер STM32 або

Atmega. Для вибору потрібного контролеру порівнюємо популярні моделі кожного виробника – STM32F103 та ATMEGA328.

Функції	STM32F103	ATMEGA328
Частота ядра	72 МГц	16 МГц
I2C шини	2	1
SPI шини	2	1
CAN шини	Наявне	Немає
Аналогові канали	10	8
ШИМ канали	15	6
UART шини	3	1
GPIO	32	24
Вбудований RTC	Наявне	Немає
Архітектура	ARM Cortex M3 32 bit	AVR RISC 8 bit
Розрядність АЦП	12 біт	10 біт
Рівень квантування	4096	1024
Флеш-пам'ять	64 КБ	32 КБ
SRAM	20 КБ	2 КБ
Дебаг	Serial, JTAG	Serial
Розрядність ШИМ	16 біт	10 біт
Ціна	\$2.12	\$1.05

Зважаючи на більшу продуктивність мікроконтролера STM32 майже у 5 разів, наявністю вбудованого таймеру реального часу, великою кількістю пам'яті та ціною лише у 2 рази вищою відносно контролеру ATMEGA328 вибір пав на STM32. Також вагомим фактором є новизна архітектури ARM Cortex M3 та досі

оновлюваною підтримкою на відміну від AVR, який був розроблений ще у 2000 роках.

STM32 - сімейство мікроконтролерів на 32-бітному ядрі Cortex-M компанії STMicroelectronics

Мікроконтролер STM32 на базі Cortex-M4 має необхідні для сенсорів інтерфейси – I2C, UART, SPI. Для розробників ці мікроконтролери привабливі сучасною системою дебагу заданої програми, до того ж можливістю відслідковування сценарію у режимі реального часу.

Даний контролер має великий запас пам'яті, різноманітний перелік інтерфейсів та таймерів:

- Підтримка напруги живлення від 2 до 3.6 вольт
- До 256 КБ флеш-пам'яті
- Служба підрахунку контрольної суми CRC
- Режим роботи з пониженим енергоспоживанням: сон, очікування та вимкнення.
- Окремий таймер реального часу з календарем та будильником
- Підтримка зовнішнього кварцевого резонатору від 4 до 32 МГц
- Наявність вмонтованого джерела тактування (RC ланцюг)
- Можливість переносу контактів інтерфейсу на інші контакти
- Толерантність контактів до 5 вольт.
- 12-канальний DMA контролер
- 4 доступних АЦП з можливістю вибору розрядності від 12 до 6 біт.
- 2 наявних ЦАП з підтримкою живлення від 2.4 до 3.6 вольт
- До 2 I2C, до 5 UARS/USART, до 3 SPI, USB 2.0, інфрачервоний передатчик та CAN інтерфейс
- JTAG та послідовний інтерфейс для дебагу
- 96-бітний унікальний номер пристрою

### 3.1.6 Модуль Wi-Fi ESP8266

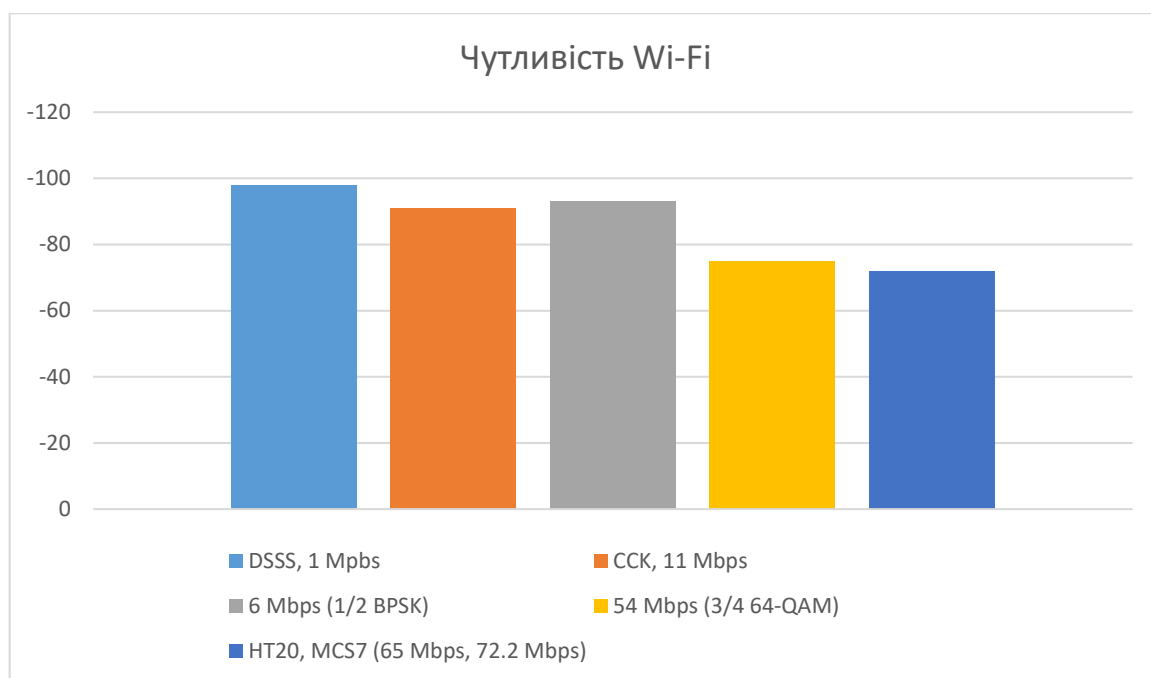


ESP8266 - мікроконтролер на базі закритого ядра Tensilica Xtensa L106 компанії Espressif Systems, що відрізняється наявністю WiFi периферії.

Безпроводна периферія має сертифікацію Wi-Fi Alliance з підтримкою стандарту 802.11 b/g/n. Наявна підтримка декількох режимів роботи Wi-Fi модулю: режим станції, режим точки доступу та комплексний режим, який дозволяє одночасно створити точку доступу та підключитися до існуючої точки доступу у якості клієнта.

У корпусі контролера формату QFN32-pin знаходиться:

- Процесор Tensilica L106 32-bit processor
- Периферійні інтерфейси: UART, SDIO, SPI, I2C, I2S, IR Remote Control, GPIO, ADC, PWM
- Перетворювач напруги з підтримка напруги від 2.5 до 3.6 вольт



Параметри	Мінімальні	Звичайні	Максимальні	Од. виміру
Вхідна частота	2412	-	2484	МГц
Вихідний опір	-	39+j6	-	Ом
Вихідна потужність підсилювача при 72.2 Мбіт/с	15.5	16.5	17.5	dBm
Вихідна потужність підсилювача у режимі 11b	19.5	20.5	21.5	dBm

Система мінітеплиці живиться від 5 вольт, тому для універсальності живлення використовується стандартний порт USB. Частина датчиків потребує іншого вольтажу живлення, тому всередині пристрою використовується лінійний регулятор напруги для виділення 3.3В, до 1А.



Для передачі даних на сервер використовується MQTT-протокол. Сервер-брокер водночас грає роль клієнта-підписника та очікує нові дані. Дані від мінітеплиці передаються в окремі топіки типу «[client-id]/humidity», тобто для кожного показника є окремий топік:

[client-id]/temperature – температура навколишнього середовища

[client-id]/humidity – вологість повітря

[client-id]/soilmoisture – вологість ґрунту

[client-id]/pressure – тиск навколишнього середовища

[client-id]/uvlight – інтенсивність інфрачервоного світла

[client-id]/co2 – вміст вуглекислого газу

Після отримання сервером усіх 6 показників генерується timestamp – мітка часу, за допомогою якої можна слідкувати час вимірянних значень та виконується ін'єкція у базу даних у формат «час, унікальний номер клієнта, температура навколишнього середовища, вологість повітря, вологість ґрунту, тиск навколишнього середовища, інтенсивність інфрачервоного світла, вміст вуглекислого газу»

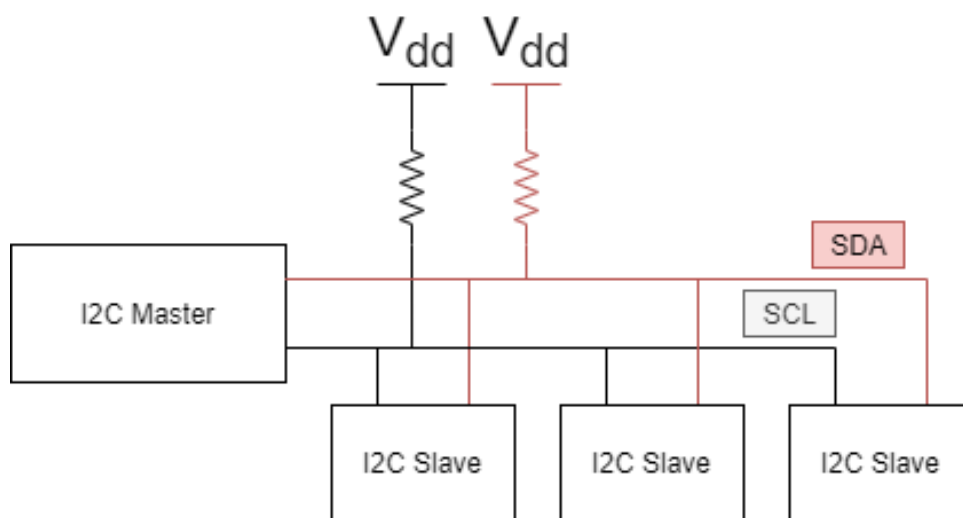
## **3.2 Математична модель обробки сигналів датчиків (фільтрація помилок)**

### **3.2.1 I2C шина та VME280**

Inter-Integrated Circuit (I<sup>2</sup>C) - протокол, розроблений підрозділом Semiconductors Philips (зараз NXP Semiconductors<sup>3</sup>) в далекому 1982 році. Більшість сенсорів мають підтримку I<sup>2</sup>C, цей протокол дозволяє використовувати до 100 датчиків на одній шині до 10 метрів довжиною. Це послідовна шина, яка використовує тільки два дроти для з'єднання заданої кількості ведених пристроїв з ведучим. З жовтня 2006 року скасовані ліцензійні

відрахування за використання пристроїв на базі протоколу I<sup>2</sup>C, але все ще є відрахування за виділення ексклюзивної адреси для пристрою.

Шина I<sup>2</sup>C має дві лінії для зв'язку - Serial Data Line (SDA) та Serial Clock Line (SCL). Вони працюють у режимі відкритого колектору та потребують підтяжки через резистор 1,5-10 кОм до плюсу живлення. У таких умовах пристрої можуть лише опускати лінію на землю. Так як усі пристрої на цій шині запаралелені (схема підключення – монтажне I) специфікація була розрахована таким чином, щоб не утворилось коротке замикання.



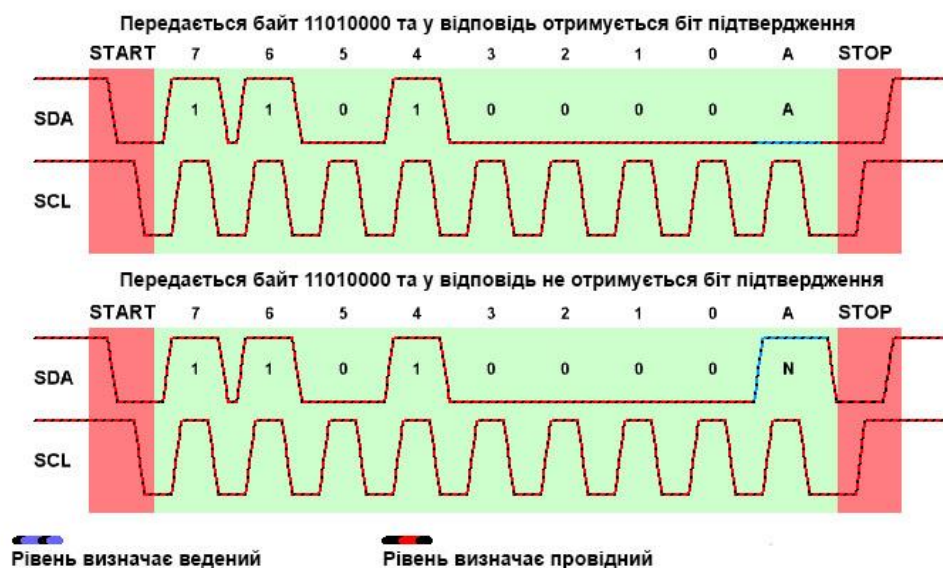
I<sup>2</sup>C має стандартний, швидкий та над швидкий режим передачі (Standart, Fast, FMP) – 100 кГц, 400 кГц та 1 МГц відповідно. Усі використані сенсори підтримують швидкий режим передачі, але для більшої завадостійкості буде використовуватися стандартний режим.

Специфікація протоколу не передбачає апаратної адресації пристроїв, тому для відправки команди відповідному датчику на паралельній шині використовуються програмні засоби – відправлення адреси сенсора у першому фреймі відправника. Адреса отримувача має розмірність 7 біт, тобто це 127 варіантів адрес, але частина адрес зарезервовано, тому у доступі є лише 116. Звісно, пристроїв з цим протоколом набагато більше наявних адрес. Сенсор отримує свою адресу на виробництві та не має можливості її змінити, у багатьох випадках наявні додаткові контакти для змінення адреси на 2-3 молодших біта.

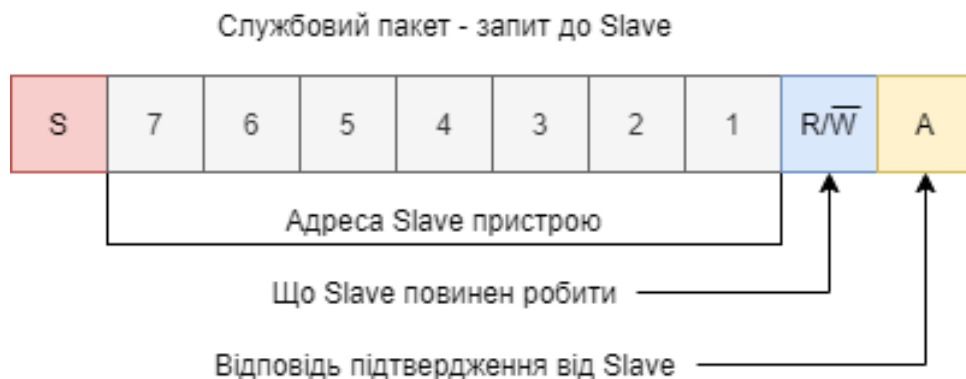
Якщо модуль не має можливості зміни адреси та виникає конфлікт з іншим модулем – використовують розширювач шини (модуль, що має свою I<sup>2</sup>C адресу та генерує нову I<sup>2</sup>C шину зі своєю адресацією). У мікроконтролерів сімейства STM32 зазвичай наявно декілька інтерфейсів I<sup>2</sup>C, тому для вирішення адресного конфлікту достатньо використовувати датчики на різних шинах I<sup>2</sup>C.

### Як передаються дані

- 1) Тактування завжди задає основний пристрій (Майстер).
- 2) У кожного фрейма є «старт» та «стоп» біт, вони детектуються, як підняті(або опущені) обидві лінії шини.



- 3) Якщо у першому пакеті (службовому) датчик не побачив своєї адреси він не зчитує лінію доки не з'явиться «стоп» послідовність передачі даних.

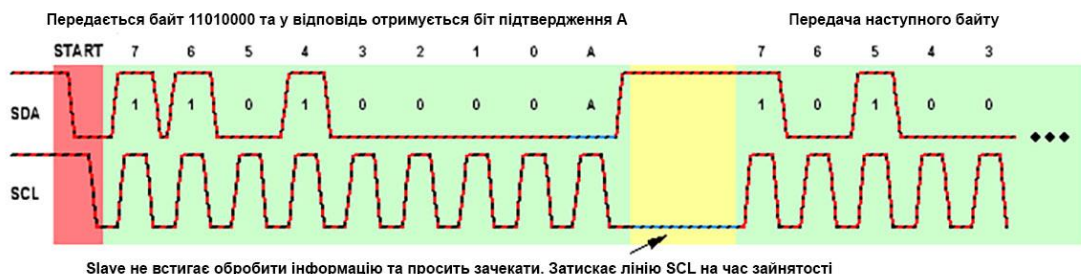


- 4) Дані передаються фреймами по 8 біт та 1 біт підтвердження прийому(Acknowledge bit).

- 5) Змінювати стан лінії даних можливо, доки лінія тактування у стані «0»
- 6) Як тільки на лінії тактування з'являється передній фронт «1» дані зчитуються (зміна лінії заборонена).
- 7) Для підтвердження прийому Раб (або Майстер) опускає біт підтвердження до «0»
- 8) При завершенні зчитування даних Майстер відправляє NA (Not Acknowledge) біт, тобто не підтверджує отримання фрейму, тим самим завершуючи передачу даних.



- 9) Якщо модуль не встигає виконати задану команду він може насильно покласти лінію тактування у «0», не давши Майстру генерувати тактування. Тому Майстер повинен слідкувати за станом цієї лінії.



Для отримання показників з модулю ВМЕ280 на початку спілкування з сенсором необхідно відправити необхідні показники налаштування – такі як оверсемплінг вимірюваних значень та коефіцієнт фільтрування від різких перепадів. Для початку передачі налаштувань відправляється запит на перевірку стану живлення пристрою, тому що змінювати налаштування сенсору можливо

лише у режимі сну. Щоб перевірити стан пристрою зчитується регістр «0xF4», який може містити «0x00» у випадку сну, «0x01» у випадку вимушеного режиму та «0x03» у випадку нормально режиму роботи. Якщо сенсор опинився не у режим сну проводиться програмний перезапуск системи зі збереженням поточних налаштувань. Після введення пристрою у режим сну відправляються нові налаштування оверсемплінгу та коефіцієнту фільтрування.

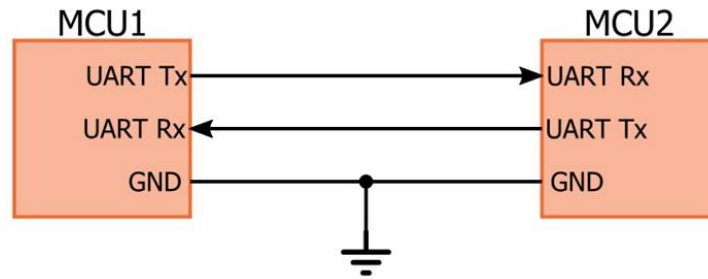
Перед початком зчитування даних також виставляється вимушений режим роботи сенсора «0x01». При налаштуванні режиму роботи поточний стан живлення датчику так само, як і при попередніх налаштуваннях повинен знаходитись у режимі сну.

Register Name	Address	bit7	bit6	bit5	bit4	bit3	bit2	bit1	bit0	Reset state
hum_lsb	0xFE	hum_lsb<7:0>								0x00
hum_msb	0xFD	hum_msb<7:0>								0x80
temp_xlsb	0xFC	temp_xlsb<7:4>				0	0	0	0	0x00
temp_lsb	0xFB	temp_lsb<7:0>								0x00
temp_msb	0xFA	temp_msb<7:0>								0x80
press_xlsb	0xF9	press_xlsb<7:4>				0	0	0	0	0x00
press_lsb	0xF8	press_lsb<7:0>								0x00
press_msb	0xF7	press_msb<7:0>								0x80
config	0xF5	t_sb[2:0]			filter[2:0]			spi3w_en[0]		0x00
ctrl_meas	0xF4	osrs_t[2:0]			osrs_p[2:0]			mode[1:0]		0x00
status	0xF3					measuring[0]		im_update[0]		0x00
ctrl_hum	0xF2					osrs_h[2:0]				0x00
calib26...calib41	0xE1...0xF0	calibration data								individual
reset	0xE0	reset[7:0]								0x00
id	0xD0	chip_id[7:0]								0x60
calib00...calib25	0x88...0xA1	calibration data								individual

Для зчитування поточних даних відправляється запит на зчитування показників, що починаються у адресі «0xF7» та продовжуються на наступні 8 байт. Так як система передає дані у системі MSB (Most Significant Bit) - старший значущий біт, тобто дані зчитуються від молодшого до старшого.

При усіх запитах перевіряється, що дані були відправлені та отримані значення входять у діапазон дійсно можливих.

### 3.2.2 UART у датчику газу MH-Z19



UART має дві лінії для комутації пристроїв – RX та TX. Може скластися відчуття, що це повнодуплексний інтерфейс, але майже в усіх пристроях він напівдуплексний. Це асинхронний інтерфейс, тому він не має лінію тактування та потребує програмного вказання швидкості. Подібна технологія була започаткована ще у часи використання телеграфа, тому лінія передачі у режимі очікування завжди піднята, це сприяє детектуванню обриву лінії. Фрейм протоколу починається с старт-біту «0», після чого приймач починає слухати. На початку прийому мікроконтролер чекає 1,5 біти для того, щоб зчитувати наступні біти у середині. Сучасні процесори також зчитують кожен біт по декілька разів для зменшення шансу помилки.

Як було зазначено вище, розробник повинен власноруч програмно вказати швидкість передачі даних. За допомогою гнучкої системи налаштування у мікроконтролерах сімейства STM32 допустима швидкість передачі може бути встановлена від 10 біт/с до 11.25 Мбіт/с, але висока швидкість потребує дуже дорогих та професійних провідників, що призводить до того, що використання високих швидкостей раціональне лише на доріжках друкованої плати. Для коректної передачі фрейму дозволено 2 % девіації частоти, що приблизно дорівнює 0,5 біта. Для роздрібних модулів та датчиків існують стандартні швидкості, найпопулярнішими з яких є 9600 біт/с та 115200 біт/с. Розглянуті сенсори використовують першу швидкість та змінити її не можна.

Після старт-біту передаються самі дані, які можуть сягати розміру від 6 до 9 біт. У багатьох модулях використовують 8 бітів. У кінці передачі також може знаходитись біт парності, він виставляється у «1» або «0» щоб загальна кількість

одиниць (або нулів) була парним (або непарним) числом. За допомогою цього біту детектується наявність однієї помилки у фреймі. При появі більшої кількості помилок цей метод вже не буде працювати коректно. Розробник сам має вирішувати чи встановлювати біт парності та парність яких логічних рівнів рахувати.

Для підключення датчику газу потрібно встановити швидкість у 9600 біт/с, стоп-біт «1» та вимкнути перевірку на парність. Після чого потрібно відправити наступні 9 байт:

- 0xFF - початок будь-якої команди
- 0x01 - перший сенсор (він всього один)
- 0x86 - команда
- 0x00, 0x00, 0x00, 0x00, 0x00 - дані
- 0x79 - контрольна сума.

Відповідь на подібний запит буде у такому вигляді:

- 0xFF - початок будь-якої відповіді
- 0x86 - команда
- 0x01, 0xC1 - старше і молодше значення ( $256 * 0x01 + 0xC1 = 449$ )
- 0x3C, 0x04, 0x3C, 0xC1 - мета-дані
- 0x7B - контрольна сума.

Контрольна сума рахується таким чином: зчитуються 7 байт відповіді (все крім першого і останнього), складаються, інвертується, збільшуються на 1:  $0x86 + 0x01 \dots + 0xC1 = 0x85$ ,  $0x85 \text{ xor } 0xFF = 0x7A$ ,  $0x7A + 1 = 0x7B$ .

Згідно з документацією сенсору потрібно близько трьох хвилин, щоб вийти на робочий режим. Перші хвилини після включення він буде видавати або 5000ppm, або 400ppm.

Сенсор реагує на зміну концентрації CO<sub>2</sub> з затримкою близько хвилини. При перевищенні концентрації в 5000ppm (наприклад, при штучному додаванні

вуглекислого газу), він деякий час буде видавати помилкові дані, занижуючи рівень CO<sub>2</sub> – таким чином може бути отримано навіть 90ppm.

Документація не має інформації щодо частоти зчитування даних, але не варто запитувати дані по UART частіше одного разу на 10 секунд, інакше сенсор починає видавати неправильні дані.

### 3.2.3 АЦП

Значна кількість сенсорів не мають протоколів зв'язку, тому на виході генерують лише напругу, яка прямопропорційна поточному значенню. У більшості випадків на виході може з'явитись діапазон напруг від 0 вольт до напруги живлення. Плюсом такого методу є дешева реалізація та потребує лише одного піну, але зчитувальний пристрій повинен мати аналогово-цифровий перетворювач, за допомогою якого він зможе виміряти показники аналогових сенсорів, тобто порівняти вхідну напругу з опорною. Вирішальними факторами для якісного вимірювання аналогового сигналу є розрядність та дискретизація АЦП мікроконтролера. Розрядність сучасних контролерів загального призначення найчастіше дорівнює 12 бітам, що являє собою значення від 0 до 4095. Дискретизація вхідного сигналу залежно від специфіки контролерів STM32 може сягати до половини частоти тактування процесору. Наприклад, найпопулярніший мікроконтролер STM32F303 має частоту процесору 72 МГц, тому дискретизація сигналу може сягати 36 МГц, але за умови, що контролер буде зайнятий лише цією задачею.

Периферія АЦП у своєму складі має велику кількість регістрів, тобто налаштувань, за допомогою яких цей блок має велику кількість каналів перетворення та обширу функціональності.

Усі регістри можуть бути відсортовані за функціональним призначенням. У результаті такої фільтрації отримаємо такі категорії:

- регістр стану ADC\_SR – біти цього регістру містять інформацію про стан АЦП;



- реєстри управління ADC\_CR1 і ADC\_CR2 - визначають режим роботи АЦП;
- реєстри ADC\_SMPR1 і ADC\_SMPR2 - задають час перетворення АЦП;
- реєстри ADC\_JOFR1 ... ADC\_JOFR4 - визначають зміщення даних у інжектовані групі каналів;
- реєстри ADC\_HTR і ADC\_LTR - задають верхню і нижню межі для віконного компаратора;
- реєстри ADC\_SQR1 ... ADC\_SQR3 - задають послідовність каналів регулярної групи;
- реєстр ADC\_JSQR - задає послідовність каналів інжектованої групи;
- реєстри даних ADC\_JDR1 ... ADC\_JDR4 - містять результат перетворення для реєстрів інжектовані групи каналів;
- реєстр даних DR - містить результат перетворення для регулярної групи каналів.

АЦП має можливість використовувати різноманітні режими роботи. **Одиночне перетворення** - у цьому режимі АЦП виконує всього одне перетворення. Воно запускається після установки розряду ADON в реєстрі ADC\_CR2 для регулярних каналів, або від зовнішнього сигналу для регулярного і інжектованого каналів. При цьому розряд CONT реєстра ADC\_CR2 має дорівнювати нулю. Після закінчення перетворення в обраному регулярному каналі результат перетворення зберігається в реєстрі ADC\_DR і встановлюється прапор EOC. Якщо встановлений розряд EOCIE, генерується переривання. Для інжектованого каналу результат перетворення зберігається в реєстрі ADC\_DRJ1 і встановлюється прапор JEOC. Якщо встановлений розряд JEOCIE, генерується переривання. Після цього робота АЦП зупиняється.

**Режим безперервного перетворення** АЦП ніколи не зупиняється, тобто починає наступне вимірювання одразу ж після закінчення попереднього. Цей режим запускається від зовнішнього джерела або шляхом установки розряду ADON реєстра ADC\_CR2. При цьому розряд CONT реєстра ADC\_CR2 має

дорівнювати одиниці. Після кожного перетворення виконується результат перетворення і зберігається аналогічно режиму одиночного перетворення.

**При режимі сканування** АЦП вимірює показники декількох каналів один за одним. Цей режим вибирається установкою розряду SCAN регістра ADC\_CR1. Якщо цей розряд встановлений, АЦП сканує всі канали, обрані в регістрах ADC\_SQRx для регулярних каналів або в регістрі ADC\_JSQR для інжектіваних каналів. Якщо біт CONT встановлений, то перетворення не зупиняється на останньому каналі, а знову запускається з першого каналу.

Для спрощеного алгоритму розробки зчитування показників з декількох аналогових сенсорів використовується одиночне перетворення, тобто працюють два окремих перетворювача з зафіксованими для кожного каналами. У подібному режимі також можна використовувати АЦП у режимі сканування, тобто одним перетворювачем по черзі вимірювати два канали, але цей варіант виявився менш раціональним із-за більшої складності системи, що підвищить вартість кінцевого продукту, але не додасть більшої ефективності.

### **3.3 Математична модель функціонування сервісного робота**

Система мінітеплиці має можливість працювати самостійно по заданому сценарію, але для більшої ефективності вирощування потребує моніторингу та контролю користувачем. Для вирішення цієї задачі використовується сервісний робот – веб-додаток та чат-бот у додатку Telegram – програма, яка може з'ясувати потреби користувача або повідомити необхідну інформацію за допомогою спілкування у текстовому чаті, за допомогою якого користувач матиме можливість відслідковувати поточні та минулі значення для аналізу росту рослин та прийняти необхідні заходи для покращення навколишнього середовища. Якщо користувач не матиме можливості використовувати додаток

Telegram він зможе виконати ті самі операції за допомогою веб-додатку, для доступу до якого потрібен лише доступ до мережі Інтернет

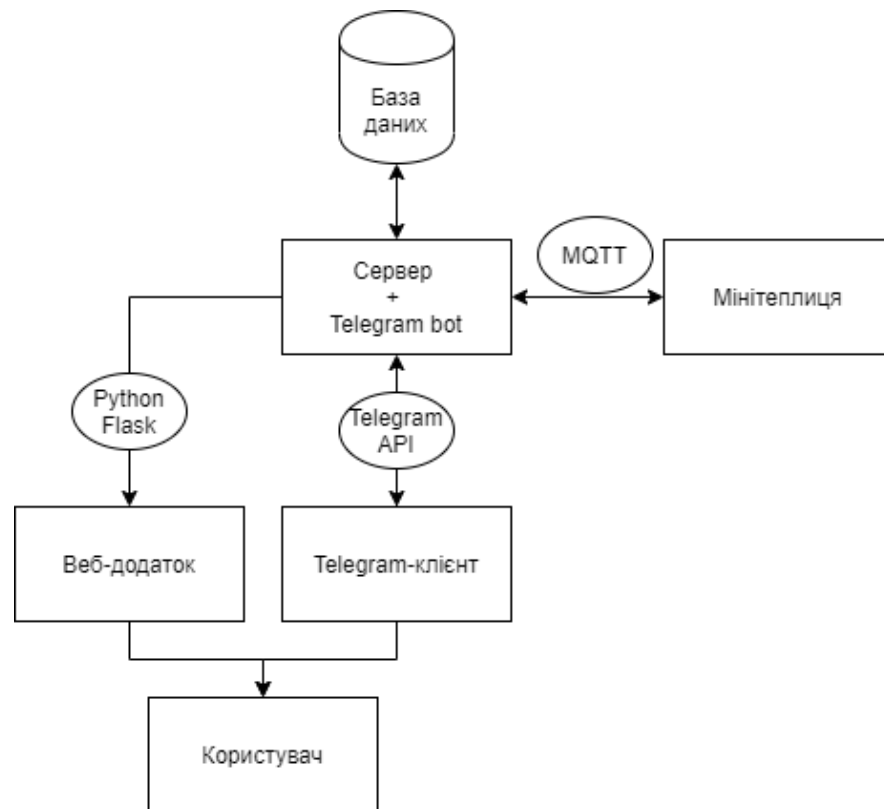


Рис. 3.3. Функціональна блок-схема інтернет-частини пристрою

Контролер мінітеплиці відправляє поточні показники кожні 5 хвилин та постійно слухає команди від клієнта.

MQTT (Message Queue Telemetry Transport) - спрощений мережевий протокол, який працює поверх TCP / IP. Використовується для обміну повідомленнями між приладами за принципом видавець-підписник (pub-sub).

Клієнти підключаються до сервера і відразу після підключення кожен з них здійснює підписку на зацікавлені йому топіки. Все спілкування між клієнтами проходить транзитом через сервер, який перенаправляє дані іншим клієнтам з урахуванням їх підписок.

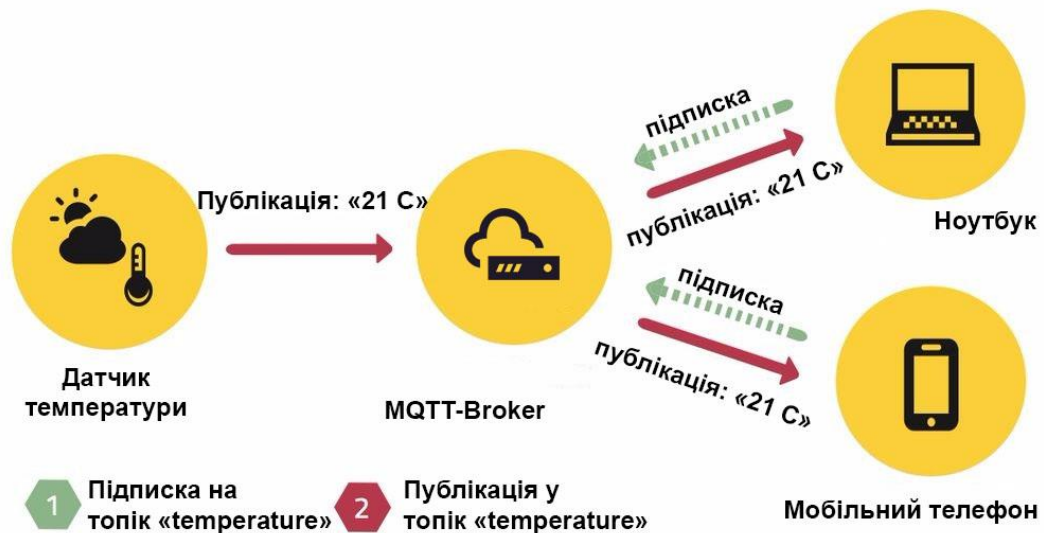


Рис. 3.4. Принцип роботи MQTT протоколу

Для роботи усієї Mosquitto системи потрібен брокер – сервер, який буде обробляти запити від клієнтів (мінитеплиць). Водночас цей сервер також буде виступати клієнтом, який зчитує показники пристроїв та відправляє команди від чат-боту.

Сервер у свою чергу обробляє прийняті показники через MQTT, водночас виступаючи брокером-підписником та складає інформацію у свою базу даних. При появі нового запиту від клієнта сервер генерує відповідь через інтерфейс доступу до Telegram боту (або через веб-додаток) та з унікальними даними для поточного клієнта, тобто з інформацією системи, закріпленою за цим клієнтом.

#### 1) Сервісний робот у якості Telegram боту

Боти - спеціальні акаунти в Telegram, створені для того, щоб автоматично обробляти і відправляти повідомлення. Користувачі можуть взаємодіяти з ботами за допомогою повідомлень, що відправляються через звичайні або групові чати. Логіка бота контролюється за допомогою HTTPS запитів до API для ботів.

За допомогою інтерфейсу розробника для чат-боту налаштовуються шаблони команд для розпізнавання за допомогою яких користувач по запиту може

отримати поточні показники. Користувач відправляє запит – додаток Telegram розпізнає це як команду та передає на сервер, який генерує відповідь з доступних даних у базі даних та за допомогою API відправляє потрібну клієнту інформацію у форматі чат-боту.

Якщо сервер отримає нові показники від мінітеплиці, які виходять за рамки можливо дозволених – він відправляє повідомлення через чат-бота про необхідність негайного втручання користувача у систему теплиці.

2) Сервісний робот у якості веб-додатку.

Веб-додаток – додаток типу сервер-клієнт, у якому клієнт має можливість взаємодіяти з сервером через браузер. Усі дані при цьому зберігаються на стороні сервера.

При цьому сценарії користувачу не потрібно зайвих додатків на його стороні, він здатний отримати доступ до керування та моніторингу через будь-який веб-браузер. При підключенні нового клієнта сервер генерує графічний інтерфейс з графіками для моніторингу поточних на минулих значень, беручи дані з бази даних.

### **3.4 Математична модель оптимізації інформаційно-телекомунікаційної системи управління мінітеплицею з використанням сервісного робота за економічними показниками**

З метою створення оптимальної за економічними показниками моделі буде використано три напрямки оптимізації економічних показників:

- 1) Оптимальне зменшення собівартості розробки пристрою
- 2) Зменшення використаних ресурсів при вирощуванні рослин
- 3) Збільшення потенційної вартості вихідного продукту вирощування

З урахуванням вищевикладеного, загальний економічний ефект від використання проектованої системи управління формуватимуть такі складові (рис. 3.5).

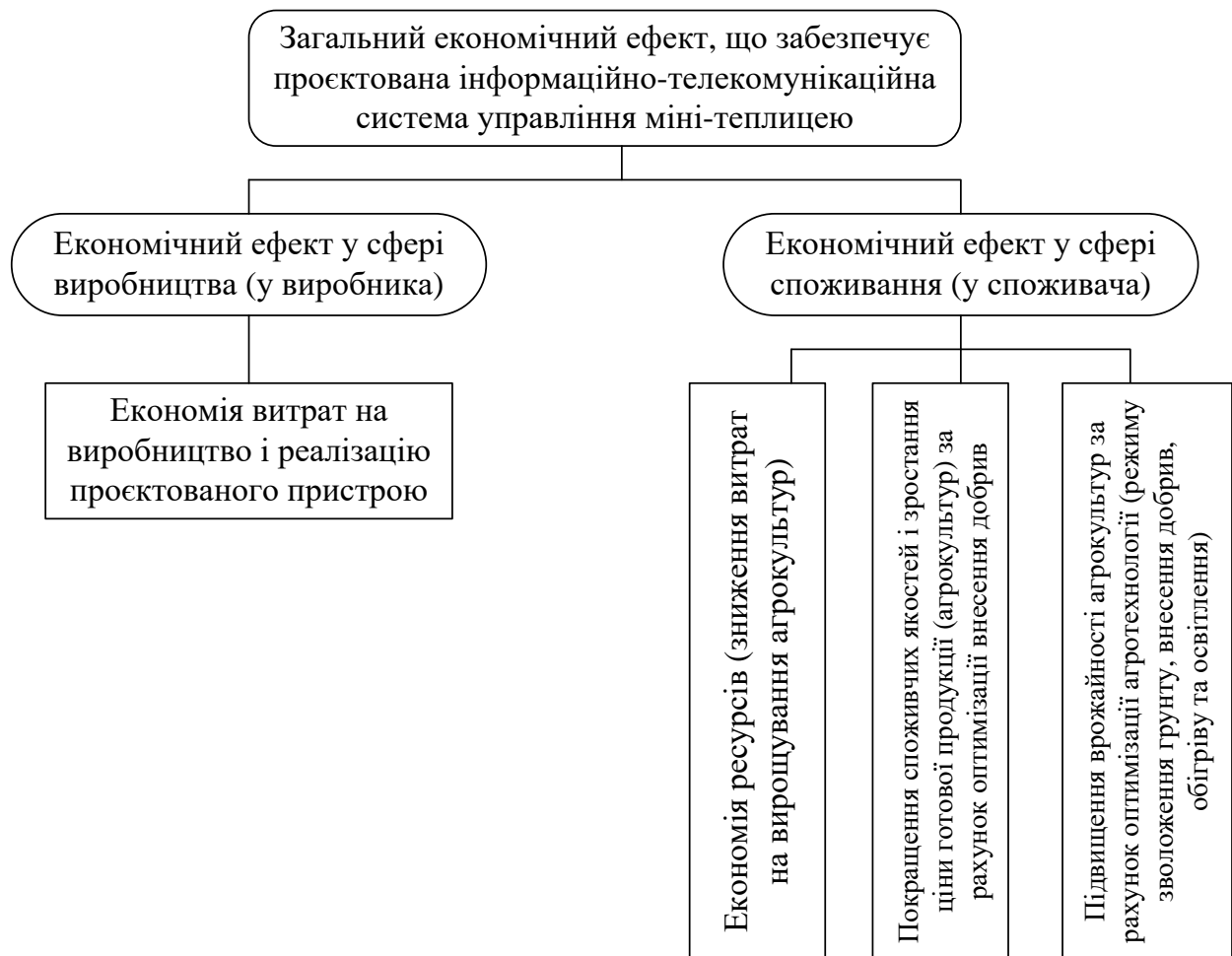


Рис. 3.5. Схема формування загального економічного ефекту, що забезпечує проектована інформаційно-телекомунікаційна системи управління мінітеплицею з використанням сервісного робота

Розрахунок економічного ефекту в сфері виробництва та споживання базується на тому, що вартість продукції залежить від багатьох аспектів, які умовно ділять на дві категорії:

1. Внутрішньовиробничі – це ті чинники, які можливо виправити у процесі управління, тобто модернізація виробничого процесу, поліпшення організації праці, мотивації співробітників і т. д.

2. Позавиробничі – ті аспекти, які не піддаються прямому впливу, тобто ціни на матеріали, тарифи на воду та електрику, податки, природні умови і т. д.

Розрахунок економічного ефекту у сфері виробництва пристрою базується на такій моделі його собівартості:

Повна собівартість = Витрати на компоненти + Витрати на енергоносії.

Розрахуємо повну собівартість на першу партію у 1000 одиниць.

Для закупки основних модулів системи оформляється заказ через компанію Mouser Electronics та LCSC ELECTRONICS, що займається офіційним дилерством.

Таблиця 3.1

Кошторис на електричні компоненти системи

Найменування	За 1 од.	За 1000 од.
Мікроконтролер STM32F303CCT6	\$3.34	\$3340
Модуль ВМЕ280	\$2.52	\$2520
Модуль датчику газу МН-Z19	\$24.27	\$24278
Модуль ультрафіолетового світла ML8511	\$2.97	\$2973
Мікроконтролер з Wi-Fi ESP8266EX	\$1.60	\$1600
Датчик вологості ґрунту	\$1.05	\$1050

Основа плати складає друкована плата, виготовлення якої найвигідніше зробити через спеціалізованого виробника друкованих плат. Порівняємо декількох виробників.

Таблиця 3.2

Порівняльна характеристика виробників друкованих плат

Виробник	Вартість виготовлення 1000 од. (\$)	Вартість доставки (\$)	Загальна вартість (\$)	Собівартість 1 од. плати (\$)
JLPCB	441	31.33 (DHL)	472.33	0.47
PCBWAY	337	85 (FedEx)	422	0.42
OSHPARK	5627	100 (FedEx)	5727	5.72
SeedStudio	998	0	998	0.98

Велика вартість виготовлення плат від компанії OSHPARK обумовлена більшою точністю сверління, фрезерування плати та наявністю безелектронного нікелового імерсійного золота - це тип поверхневого покриття, що складається з нікельованого покриття, покритого тонким шаром імерсійного золота, яке захищає нікель від окислення. Клас використання пристрою мінітепліці не потребує високої якості виготовлення друкованої плати. Порівнявши виробників, що залишилися – найкращим варіантом виявляється PCBWAY.

Для збірки усіх компонентів на друкованій платі потребується сировина у вигляді припою – сплаву металів, що застосовується для з'єднання металевих деталей та флюсу – речовина, що додається для запобігання окислення поверхні металів. Припій вибраний від компанії Suncel, як особисто перевірений протягом довгого часу використання. Він містить 60% олова та 40% свинцю, а його ціна складає 500 грн за 500 грам. Припустимо, що 1.5 граму припою буде достатньо для пайки однієї плати, тобто для виготовлення усієї партії потребується 1500 грам припою, що становить \$55. У процесі пайки також потребується флюс, що допоможе на певний час видалити оксидний шар для кращого з'єднання компонентів. Витрата його дуже незначна у порівнянні з припоєм, тому однієї упаковки каніфольного флюсу у об'ємі 40 грам за \$3 буде достатньо для усієї партії.



Витрати на компоненти = 3340 + 2520 + 24278 + 2973 + 1600 + 1050 + 422 + 55 + 3 = \$36241=973741.3 грн (станом на 01.06.2020 за курсом НБУ)

Для розробки кінцевого пристрою потребується використання інструментів та машин ЧПК, що споживають електроенергію. Розрахуємо їх споживання для включення вартості затраченої електроенергії у собівартість системи.

Таблиця 3.3

Найменування	Потужність, Вт
Паяльник	60
Паяльний фен	30
3d принтер	200

Для зпайки одного пристрою у середньому потребується 12 хвилин з використанням паяльника та 8 хвилин з використанням паяльного фену. Зважаючи на те, що фен та паяльник працюють безперервно – час їх роботи буде дорівнювати 20 хвилин кожний.

Тобто, витрата електроенергії на виготовлення однієї друкованої плати буде становити:

$$60 \text{ Вт} * \left(\frac{1}{3}\right) + 30 \text{ Вт} * \left(\frac{1}{3}\right) = 30 \text{ Вт} * \text{год}$$

Споживана електроенергія на виготовлення партії у 1000 одиниць:

$$30 * 1000 = 30 \text{ кВт} * \text{год}$$

Для створення корпусу пристрою використовується сучасна технологія 3d друку. На виготовлення одного корпусу пристрою потребується 59 грам пластику типу PLA та 5 годин 13 хвилин (313 хвилин). Зважаючи на енергоспоживання принтеру у 200 Вт за 313 хвилин кількість споживаної електроенергії становить:

$$200 \text{ Вт} \times 5.21 \text{ год} = 1.042 \text{ кВт} * \text{год}$$

Споживана електроенергія на виготовлення 1000 корпусів:

$$1.042(\text{кВт} * \text{год}) \times 1000 = 1042 \text{ кВт} * \text{год}$$

Тариф за електроенергію для непобутових споживачів в місті Київ за умови 2 класу напруги становить 1.79 грн за 1 кВт\*год (з ПДВ), розрахуємо затрати на електроспоживання:

$$(30 + 1042) (\text{кВт} * \text{год}) \times 1.79 (\text{грн}) = 1918.88 \text{ грн}$$

Повна собівартість усієї партії становить

$$973741.3 \text{ грн} + 1918.88 \text{ грн} = 975660 \text{ грн}$$

Собівартість проєктованої системи управління складає:

$$\frac{975660 \text{ грн.}}{1000 \text{ шт.}} = 975,66 \text{ грн./шт.}$$

З урахуванням середньогалузевого рівня рентабельності, що для підприємств науково-технічної сфери у 2019 р. склав 15,3% [Рентабельність економічної діяльності підприємств за видами економічної діяльності. URL : [http://www.ukrstat.gov.ua/operativ/operativ2019/fin/rodp/rodp\\_ed/rodp\\_ed\\_u/rodp\\_ed\\_319\\_u.htm](http://www.ukrstat.gov.ua/operativ/operativ2019/fin/rodp/rodp_ed/rodp_ed_u/rodp_ed_319_u.htm) (Дата звернення 25.05.2020 р.)], ціна проєктованої системи з урахуванням ПДВ 20% складе:

$$975,66 \cdot 1,153 \cdot 1,20 = 1349,92 \text{ грн. або } \$50,14 \text{ за одиницю}$$

(за курсом НБУ станом на 01.06.2020 р.)

Для висвітлення дійсної економії витрат на виробництво проєктованої інформаційно-телекомунікаційної системи управління мінітеплицею з використанням сервісного робота (за зниженням ціни) порівнюємо економічні та експлуатаційні параметри за даним пристроєм та існуючими аналогами,

наближеними до нього за функціоналом (табл. 3.4). Ураховуючи відсутність базового зразка та абсолютних аналогів за функціоналом, порівняння за експлуатаційними параметрами доцільно здійснити на підставі двоїчної системи: наявність певної функції позначається як 1, відсутність – як 0.

Таблиця 3.4

Порівняння економічних та експлуатаційних параметрів проекрованої системи управління мінітеплицею та пристроїв-аналогів

Параметр	Проектована система управління	Пристрої-аналоги		
		Click&Grow 3	Droppity Indoor	EasyGreen Light
Економічні параметри				
Ціна				
грн./од.	1349,92	3399	5054	8450
долл. США/од. (за курсом НБУ станом на 01.06.2020 р.)	50,14	127,12	189	316,03
Експлуатаційні параметри (функціонал)				
Наявність віддаленого доступу до моніторингу управління процесами	1	0	1	0
Наявність модулю датчику газу	1	0	0	0

Наявність модулю ультрафіолетового світла	1	1	0	0
Наявність датчику вологості ґрунту	1	1	1	1
Наявність датчику вологості повітря	1	0	1	0
Наявність генератору вологи	0	0	0	1
Разом	5	2	3	2
Цінність пристрою у розрахунку на 1 бал експлуатаційних параметрів, долл. США/балл	10,03	63,56	63	158,01

Отже, проектована система управління забезпечує мінімальну умовну питому ціну, тобто ціну у розрахунку на один експлуатаційний параметр, що забезпечується оптимальним вибором постачальників компонентів та застосуванням сучасних технологій виробництва.

При цьому проектований пристрій вирізняється найбільш широким функціоналом із розглянутих зразків. Ураховуючи це, умовна собівартість проектованої системи управління, розрахована як добуток сумарної оцінки її функціоналу та мінімальної умовної питомої собівартості за розглянутими пристроями-аналогами, складе:

$$5 \cdot \$63,56 = \$317,80.$$

Відповідно, умовна економія витрат на виробництво однієї системи управління складе:

$\$317,80 - \$50,14 = \$267,66$  або 7157,45 грн. (за курсом НБУ станом на 01.06.2020 р.).

Економічний ефект від застосування проектного пристрою у сфері споживання характеризується більш економічним витрачанням ресурсів (зокрема, витратами на оплату використаних ресурсів) на вирощування агрокультур порівняно із базовими умовами (без регулювання витрачання ресурсів), а також зростанням врожайності культур. [Ромащенко М.І., Доценко В.І., Онопрієнко Д.М., Шевелєв О.І Системи краплинного зрошення: навчальний посібник / За ред. академіка УААН М.І. Ромащенко. Дніпропетровськ: Оксамит-текст, 2007. 175 с.; Як точно землеробство дозволяє знизити витрати агровиробникам. URL : <https://aggeek.net/ru-blog/yak-tochne-zemlerobstvo-dopomagae-zniziti-vitrati-agrovirobnikam> (Дата звернення 25.05.2020 р.)]

Слід додати, що економія добрив є можливою через оптимізацію температурного режиму та вологості (немає потреби вносити певний об'єм добрив для стимулювання росту агрокультур). Як зазначено у статті І.А. Нідченко та О.І. Лисенко «Інформаційно-телекомунікаційна система управління мінітеплицею з використанням сервісного робота», це позитивно вплине на якість харчових продуктів, тож застосування проектного пристрою матиме ще й соціальний ефект.

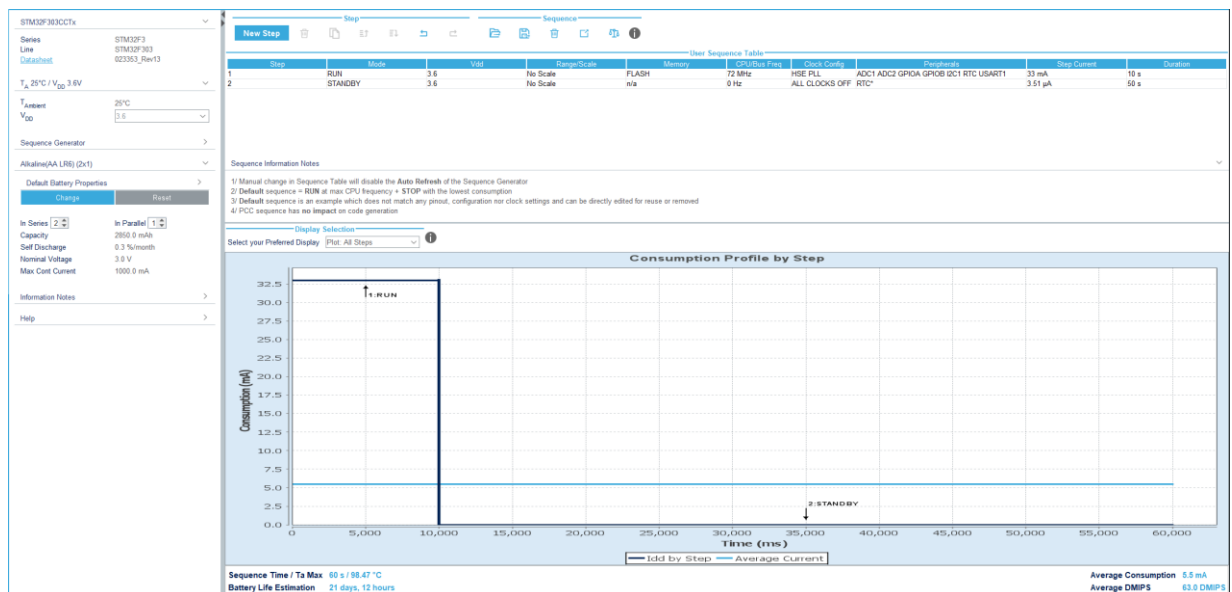
Крім того, застосування таких пристроїв в галузі товарного агровиробництва дозволить агровиробникам отримувати додатковий прибуток, адже ціна на органічні продукти більш, ніж на третину вища за ціну на продукти, виробництво яких інтенсифікується виключно за рахунок внесення добрив.

Таким чином, економічний ефект від виробництва та реалізації проектною інформаційно-телекомунікаційною системи, що проявляється в можливому зниженні ціни даної системи, яке дозволить виробнику

функціонувати на ринку без втрати конкурентоспроможності та економічної ефективності виробництва, складає 7,15 тис. грн. У сфері споживання буде забезпечено зниження ресурсів на вирощування культур, а відтак, й собівартість агровиробництва. Соціальний ефект від застосування проектованого пристрою проявлятиметься у підвищення якості продуктів рослинництва, що позитивно вплине на якість життя населення.

## Енергоспоживання

Для розрахунку енергоспоживання контролера компанія ST Electronics має фірмову утиліту у середовищі розробки Eclipse для розрахунку споживання у різноманітних режимах роботи.



Датчик вологості ґрунту у режимі роботи потребує 5 мА, а у режимі очікування для максимального зменшення споживання вимикається живлення сенсора, завдяки якому енергоспоживання модулю у режимі очікування зводиться до нуля.

Модуль VME280 при очікуванні запиту знаходиться у режимі сну, який споживає 0.1 мкА, а для відпрацювання запиту

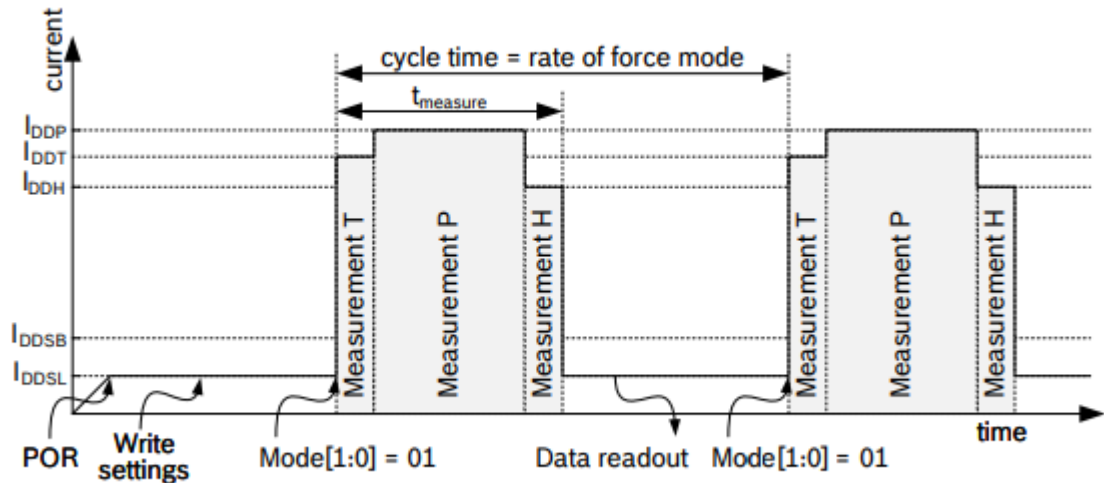


Figure 4: Forced mode timing diagram

$$t_{\text{вимір}} = 1 + (2 \times T_{\text{oversampling}}) + (2 \times P_{\text{oversampling}} + 0.5) + (2 \times H_{\text{oversampling}} + 0.5)$$

Як було зазначено раніше у встановлених умовах використовується режим «Моніторинг», для якого встановлюється одинарне вимірювання кожного значення, тобто

$$T_{\text{oversampling}} = P_{\text{oversampling}} = H_{\text{oversampling}} = 1$$

Для таких значень час виміру буде становити

$$t_{\text{вимір}} = 1 + (2 \times 1) + (2 \times 1 + 0.5) + (2 \times 1 + 0.5) = 8 \text{ мілісекунд}$$

За отриманими даними прорахуємо частоту вимірювання

$$ODR = \frac{1000}{t_{\text{вимір}}} = \frac{1000}{8} = 125 \text{ Гц}$$

Енергоспоживання датчика залежить від налаштувань надмірного вимірювання та не залежить від налаштувань фільтру:

$$I_{DD} = I_{DDSL} \times (1 - t_{\text{вимір}} \times ODR) + \frac{ODR}{1000} \times (205 + I_{DDT} \times (2 \times T_{\text{oversampling}})) \\ + I_{DDP} \times (2 \times P_{\text{oversampling}} + 0.5) \\ + I_{DDH} \times (2 \times H_{\text{oversampling}} + 0.5)$$

$I_{DDSL} = 0.1 \mu\text{A}$  – струм у режимі сну

$I_{DDT} = 350 \mu\text{A}$  – струм у момент вимірювання температури

$I_{DDP} = 714 \mu\text{A}$  – струм у момент вимірювання тиску

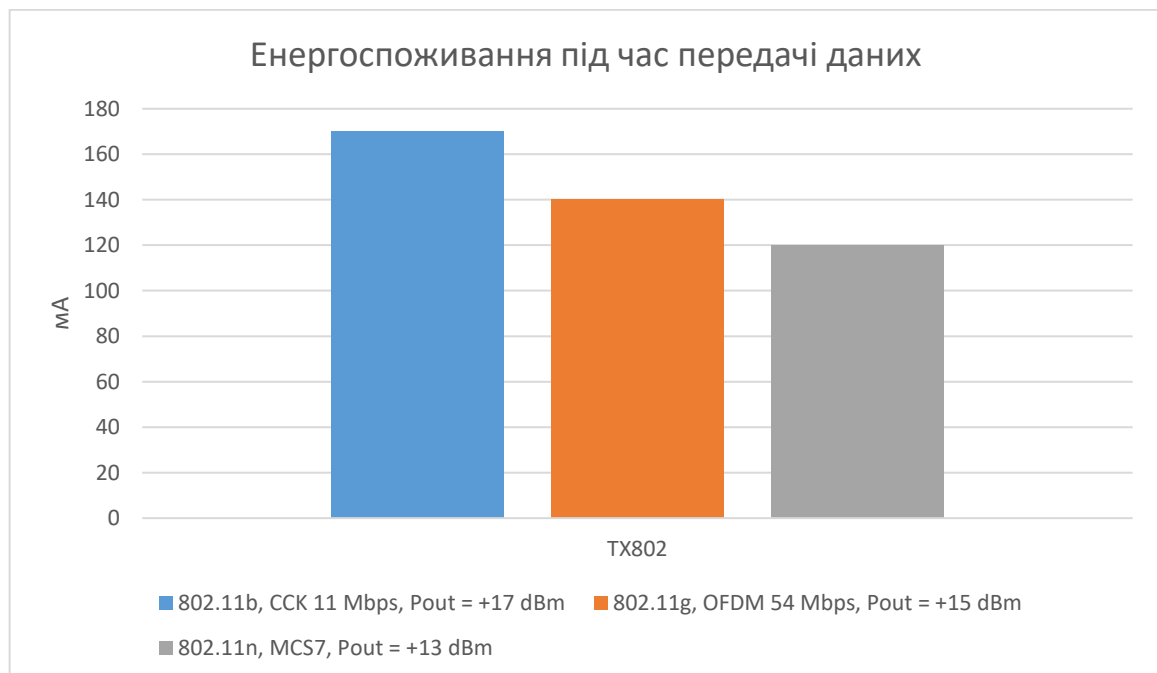
$I_{DDH} = 340 \mu\text{A}$  – струм у момент вимірювання вологості

Отже, встановивши значення споживання струму у кожному режимі отримаємо загальний струм споживання

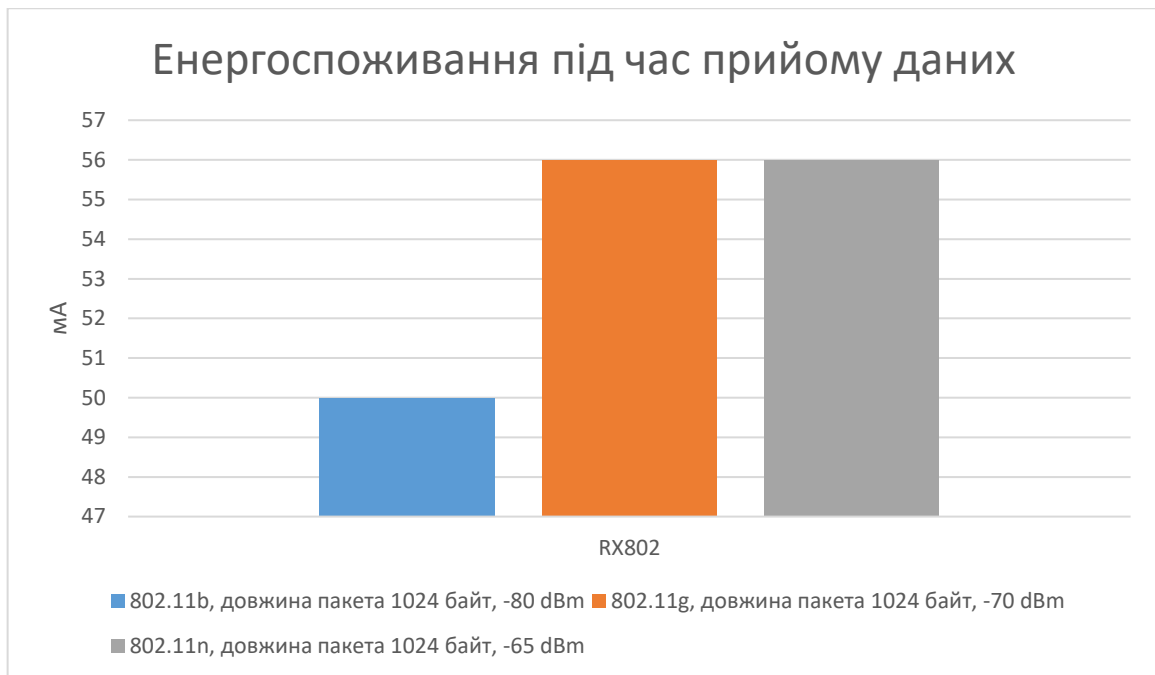
$$I_{DD} = 0.1 \times (1 - 0.008 \times 125) + \frac{125}{1000} \times (205 + 350 \times (2 \times 1)) \\ + 714 \times (2 \times 1 + 0.5) + 340 \times (2 \times 1 + 0.5) = 442.5 \mu\text{A}$$

За даними технічної документації датчик ультрафіолетового освітлення ML8511 у режимі роботи потребує 300 мкА.

ESP8266







### Висновки до розділу

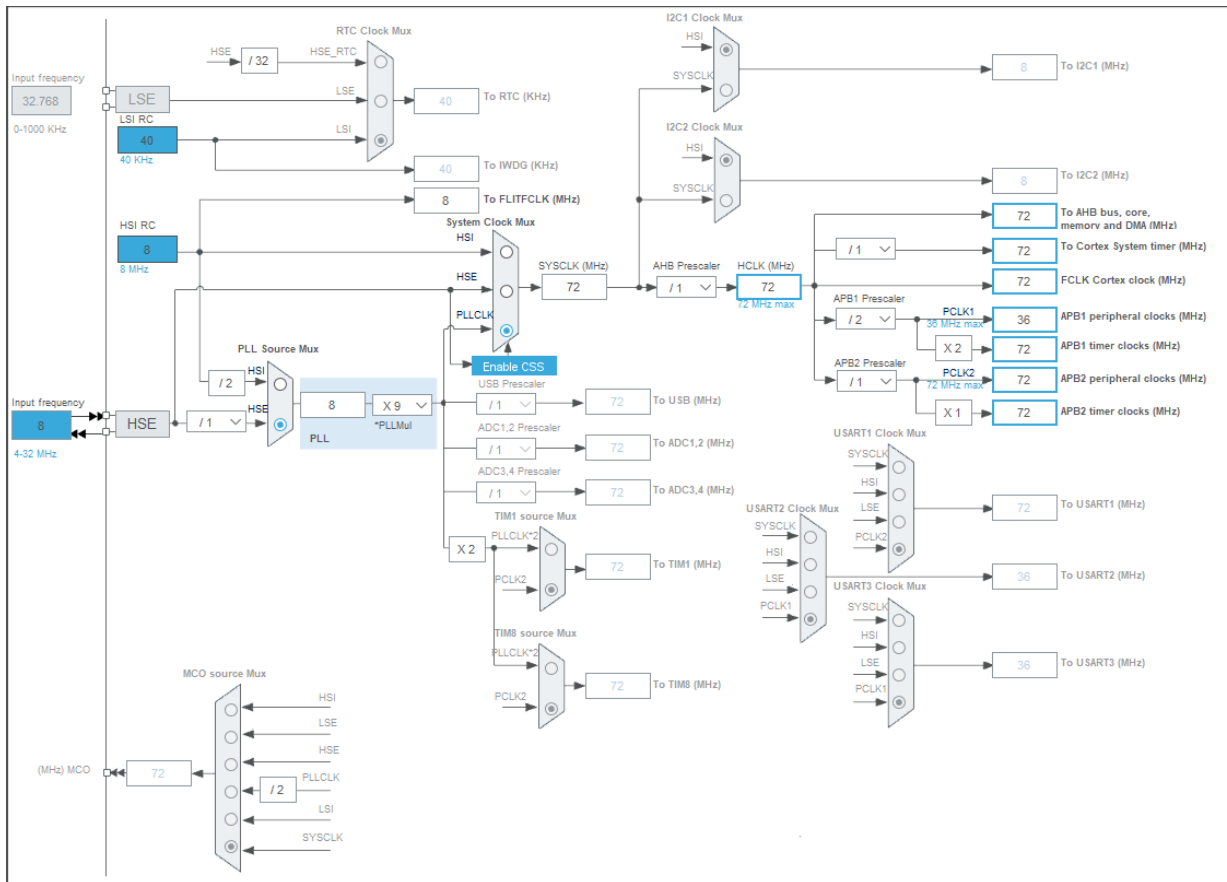
Створено математичні моделі усіх підсистем роботи інформаційно-телекомунікаційної системи управління мінітеплиці. Проведено аналіз виправлення можливих помилок при передачі даних через різноманітні протоколи зв'язку. Оцінено модель системи оптимізації за економічними показниками – як для користувача, так і для виробника.

Складність пристрою полягає у складанні підсистем, які мають не малу кількість особистих параметрів та вимог для належної працездатності усієї системи.

## 4. НАТУРНЕ І НАПВНАТУРНЕ МОДЕЛЮВАННЯ РОБОТИ ІНФОРМАЦІЙНО-ТЕЛЕКОМУНІКАЦІЙНОЇ СИСТЕМИ

Для проведення випробувань системи та підтвердження параметрів роботи в реальних умовах було створено натурну модель на основі мікроконтролеру STM32F303. Для генерації налаштувань периферії контролеру використаємо STM32CubeIDE з вмонтованою утилітою CubeMX, що дозволяє налаштувати початкові параметри роботи системи для кожної використаної периферії.

Виставимо тактування мікроконтролера – вмикаємо тактування HSE з зовнішнього кварцу та вибираємо HSE як джерело тактування системної частоти.



Input frequency – частота зовнішнього кварцевого резонатору – 8 МГц

Тобто, зовнішній RC генератор, тактований через кварцевий резонатор проходить через PLL (Phase Lock Loop - Фазове автопідлаштування частоти) для помноження частоти у 9 разів, що на виході буде дорівнювати 72 МГц, це і буде частота системного таймеру.

Пристрій знаходиться у стані розробки та потребує частого перепрограмування, тому увімкнемо дебаг у режимі послідовного з'єднання для можливості підключення до мікроконтролера у будь який момент. При вимкненому дебагу увійти до режиму налагодження можливо лише при старті контролера, що уповільнює час розробки.

Налагодимо I2C інтерфейс – перейдемо у вкладку периферії. У конфігурації використовуваного мікроконтролера існує дві шини I2C.

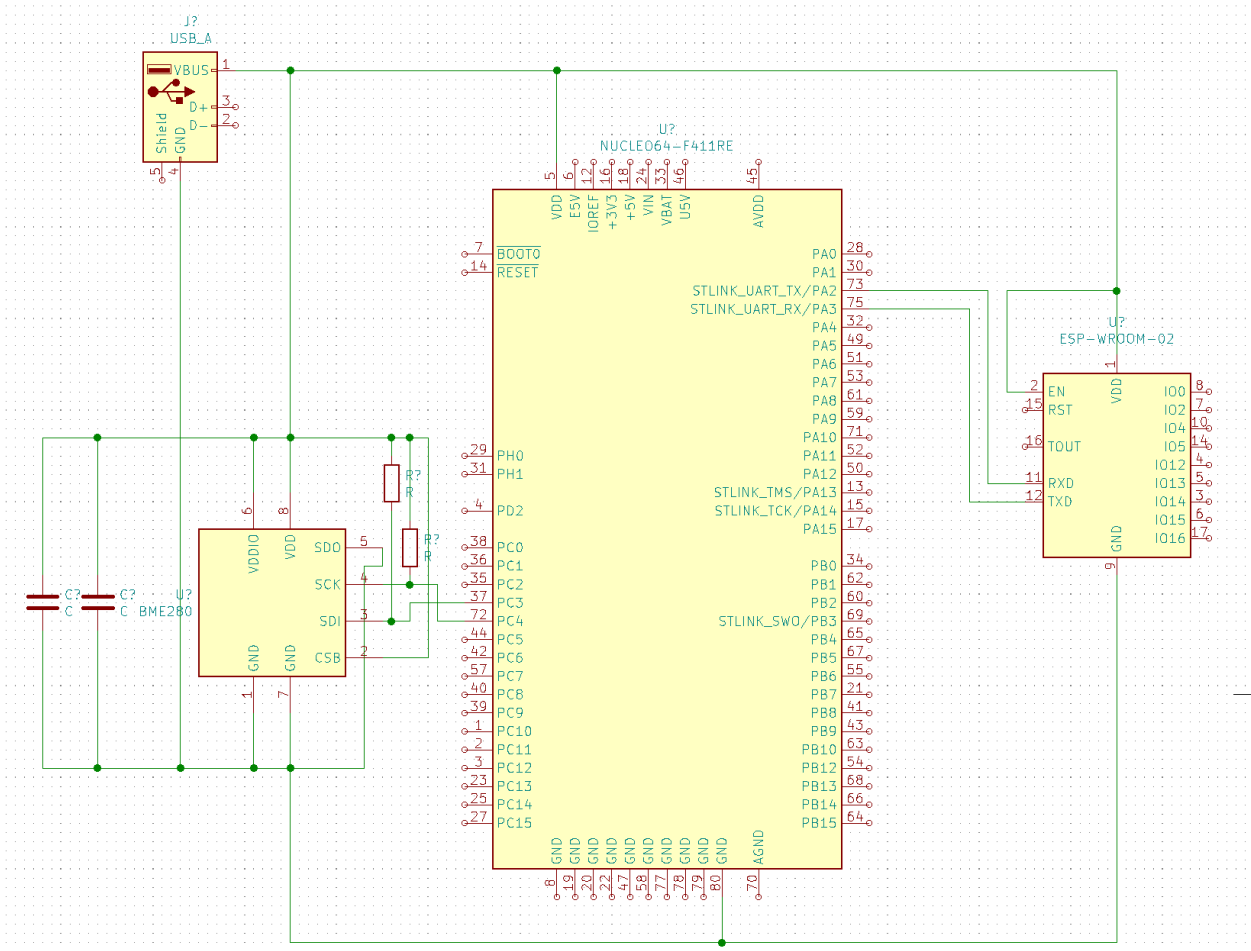
Вибираємо першу шину під назвою I2C1 та налаштуємо її параметри, встановивши швидкість роботи у режим «Standard mode» - 100 кГц. На цьому етапі налаштування шини виконано.

Налагодимо UART інтерфейс, який використовується для комунікації з датчиком вуглекислого газу MH-Z19 та другим мікроконтролером ESP8266. Налаштуємо «USART1» для роботи з датчиком вуглекислого газу, виберімо асинхронний режим роботи інтерфейсу, задаємо швидкість у 9600 Біт/с (як вимагає виробник) та довжину даних пакету у 8 біти рахуючи з бітом парності, але вимкнемо біт парності та встановимо довжину стоп-біту у 1. Також для зменшення помилок при зчитуванні встановимо «Over Sampling: 16» із-за якого контролер буде зчитувати кожен біт 16 разів для зменшення шансу помилкового зчитування.

Для відправки даних до Wi-Fi контролеру налаштуємо «USART2», я якому зазначимо ті самі налаштування, як і у першому UART інтерфейсі. На цьому налаштування UART інтерфейсу виконано.

Налагодимо АЦП канали для вимірювання показників датчику ультрафіолетового світла та датчику вологості ґрунту. Система не потребує швидкого виміру усіх показників, тому достатньо використовувати один аналогово-цифровий перетворювач, у якому увімкнемо перші два канали у одиночному незалежному режимі. Інші параметри АЦП залишимо незмінними – розрядну здатність у 12 біт. На цьому налаштування АЦП мікроконтролеру завершено.

Підключимо наявні датчики до контролеру за схемою, яку задалегіть створили у програмі KiCad.



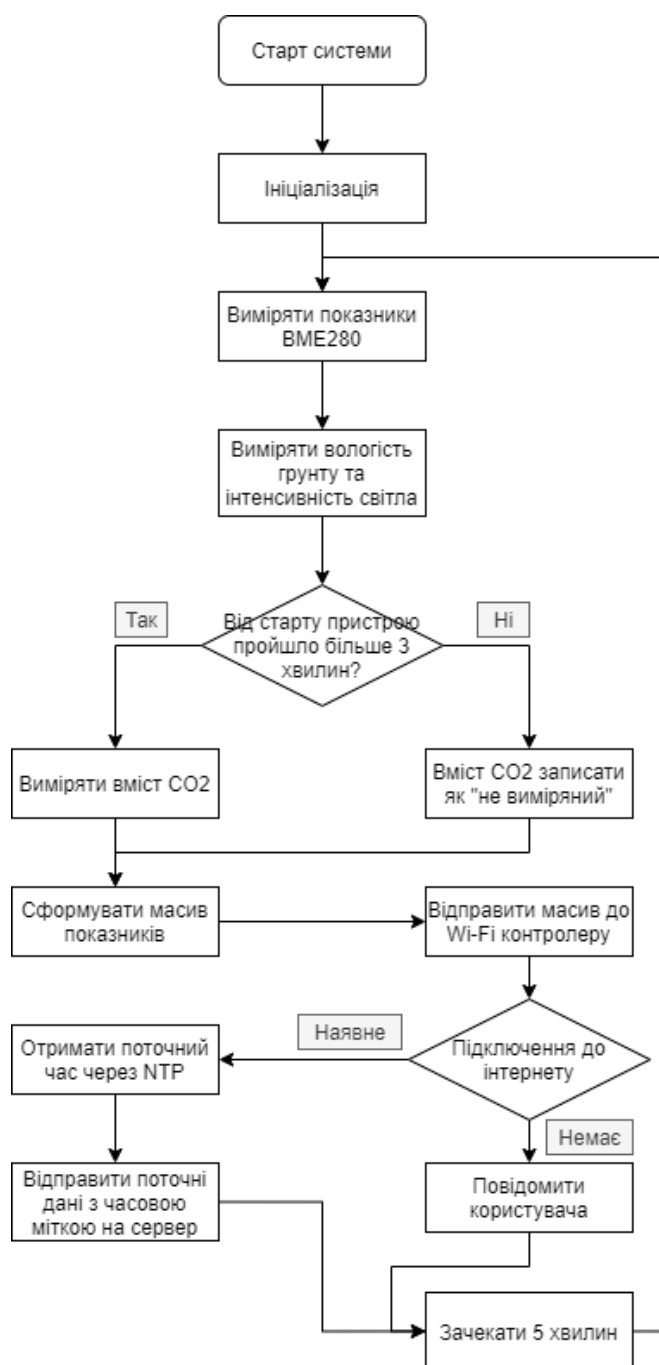


Рис. 5.1. Алгоритм роботи системи.

Напишемо прошивку для мікроконтролера за складеним алгоритмом на мові C з використанням HAL – бібліотекою, яка фізичний рівень системи, тому написаний код не матиме прихильності до обраного контролера та зможе бути перенесений на іншу систему управління мінітеплицею.

Після завантаження прошивок та встановлення пристрою у робочу середу усі складові системи працювали 48 годин. За цей час отримано 576 вимірів кожного датчику.





### Висновки до розділу

В розділі розглянуто натурну модель інформаційно-телекомунікаційної системи з використанням сервісного роботу. За результатом проведення натурального моделювання було підтверджено коректну працездатність пристрою в умовах, приближених до реальних експлуатаційних.

## ВИСНОВКИ

### ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ

1. STMicroelectronics. Технічна специфікація мікроконтролеру STM32F303xB STM32F303xC.
2. Zhengzhou Winsen Electronics Technology Co., Ltd, Intelligent Infrared CO2 Module (Model: MH-Z19), User's Manual (Version: 1.0) Valid from: 2015.03.03
3. Espressif Systems. Технічна специфікація мікроконтролеру ESP8266EX. Версія 6.4
4. Carmine Noviello. Mastering STM32, Vol. 3, No. 19, August 2018
5. Ромащенко М.І., Доценко В.І., Онопрієнко Д.М., Шевелєв О.І Системи краплинного зрошення: навчальний посібник / За ред. академіка УААН

М.І. Ромащенко. Дніпропетровськ: Оксамит-текст, 2007. 175 с.; Як  
точне землеробство дозволяє знизити витрати агровиробникам.