

УДК 004.415.2.031.43

АВТОМАТИЗОВАНА ІОТ-СИСТЕМА МОНІТОРИНГУ ВИРОЩУВАННЯ МІКРОБІОЛОГІЧНИХ КУЛЬТУР

Зайцев Даниїл Вадимович

daniil.zaytsev.ne@gmail.com

Азархов Олександр Юрійович

azarhov_a_y@pstu.edu

Сілі Іван Іванович

sili_i_i@pstu.edu

Єфременко Богдан Васильович

efremenko_b_v@pstu.edu

Балалаєва Олена Юрїївна

balalaeva_e_u@pstu.edu

Кафедра біомедичної інженерії

Державний вищий навчальний заклад

«Приазовський державний технічний університет»

м. Дніпро, Україна

Анотація – У статті розглянуто створення прототипу інтелектуальної системи моніторингу та оптимізації параметрів вирощування мікроорганізмів у лабораторних умовах. Згідно останніх даних, на 2018 рік у світі налічувалося 27 мільярдів пристроїв з IoT, всього за 7 років ця кількість зросла до 75 мільярдів. Дана технологія вже почала відігравати важливу роль у автоматизації всіх галузей виробництва завдяки розширеним можливостям з'єднання приладів за допомогою мережі інтернет. Враховуючи це, а також успішні приклади інтеграції інтернету речей у сфері охорони здоров'я постає питання подальшого впровадження даної технології у сферу мікробіології. Запропонована у даній роботі система базується на технології IoT та здатна проводити моніторинг та аналіз температури, вологості, кислотності, концентрації вуглекислого газу та кисню, освітленості. Завдяки системним та програмним можливостям мікроконтролерної плати ESP32 система також надає можливості відстеження часу інкубації до необхідної фази росту мікроорганізмів у рамках дослідження або технологічного процесу. Апаратна реалізація концепту прототипу була здійснена завдяки безкоштовному сервісу системи автоматизованого проектування TinkerCAD; програмне забезпечення створено в інтегрованих середовищах розробки Arduino IDE та Visual Studio Code; корпус розроблено у програмному забезпеченні Fusion360. Основними компонентами системи є мікроконтролерна плата ESP32, високоточний цифровий датчик температури АНТ10 від ASAIR, аналоговий рН-метр від DFRobot, модуль датчика якості повітря MQ-135, електрохімічний сенсор кисню МІХ8410 та фоторезистор. Завдяки здійсненню моніторингу параметрів вирощування мікроорганізмів у реальному часі та передачі даних через підключення до Wi-Fi система полегшує розширений контроль і подальшу оптимізацію культивування. Запропонована у даній статті система моніторингу підкреслює практичне застосування IoT приладах культивування, пропонує високу точність і повторюваність результатів для підвищення ефективності процесу культивування мікробіологічних культур.

Ключові слова: параметри, культивування, IoT, ESP32, Wi-Fi, датчики, web-інтерфейс

І. ВСТУП

У процесі культивування мікроорганізмів важливе значення має спеціалізоване інкубаційне обладнання, яке створює оптимальні умови для росту і розвитку мікроорганізмів. При періодичному або стаціонарному культивуванні вирощування відбувається у закритій системі без оновлення поживного

середовища [1]. Це дозволяє мікроорганізмам проходити усі фази росту, починаючи з лаг-фази (під час якої клітини пристосовуються до нового середовища) та закінчуючи фазою відмирання, коли умови середовища стають несприятливими для подальшого існування мікроорганізмів і кількість клітин починає зменшуватись. При періодичному культивуванні на твердих або

рідких середовищах використовується таке обладнання, як термостати, біореактори, анаеростати та фотобіореактори.

Демографічне зростання, забруднення довкілля, зміни клімату та поширення інфекційних хвороб висувають необхідність активного впровадження новітніх технологій у мікробіологічні дослідження. У цьому контексті штучний інтелект, інформаційно-комунікаційні технології та інтернет речей (далі IoT) відіграють вирішальну роль у вдосконаленні діагностики, моніторингу захворювань і створенні інноваційних підходів до їх лікування [2]. Під час дистанційного безперервного моніторингу культивування мікроорганізмів важливо створити єдиний інформаційного простір між фізичним рівнем (датчики) та віддаленим доступом. У цьому контексті корисним виявляється IoT, так як має три основних рівня: зондування, передача та обробка у реальному часі. Згідно останніх даних [1], на 2018 рік у світі налічувалося 27 мільярдів пристроїв з IoT, всього за 7 років ця кількість зросла до 75 мільярдів. Дана технологія вже суттєво впливає на автоматизацію всіх галузей виробництва завдяки розширеним можливостям з'єднання приладів за допомогою мережі інтернет [3]. Враховуючи це, а також успішні приклади інтеграції IoT у сфері охорони здоров'я [4] постає питання подальшого впровадження даної технології у сферу мікробіології.

II. МЕТА ДОСЛІДЖЕННЯ

Метою даної роботи є розробка прототипу інтелектуальної системи моніторингу культивування для підвищення ефективності вирощування мікроорганізмів шляхом точного комплексного контролю параметрів середовища в оптимальному діапазоні із застосуванням IoT на базі мікроконтролерної плати ESP32. Апаратні та програмні можливості системи мають

забезпечувати швидку передачу даних, надійність, повторюваність результатів та простоту конструкції.

III. МАТЕРІАЛИ ТА МЕТОДИ

Аналіз літературних джерел продемонстрував значний інтерес науковців до проблеми моніторингу та оптимізації параметрів культивування мікроорганізмів шляхом інтеграції новітніх технологій, зокрема IoT [3, 5–11].

Успішним виявився підхід до інтеграції IoT у фотобіореактори для мікроводоростей [5]. Створена на основі WEMOS D1 та Raspberry Pi для збору і передачі даних, система контролює температуру, освітленість і колір середовища, використовуючи датчики Dallas DS18B20, TSL2561 та TCS3200 відповідно. Автоматизоване регулювання температури та освітлення сприяло стабільному росту мікроводоростей протягом 17 днів. Дані передавалися у MySQL для подальшого аналізу.

Крім того, IoT знаходить застосування у біореакторах тканинної інженерії [6] та культивування стовбурових клітин [7]. У роботі [6] дослідники інтегрували IoT-архітектуру для стабільного підтримання температури (37°C) за допомогою PID-контролера, що включає PTC-нагрівач, датчик DHT22 і культурну камеру з полістиролу. Випробувано шість конфігурацій PID-контролера на основі NodeMCU та Arduino Nano, а передача даних здійснювалася через MQTT-протокол. Реалізована система дозволила користувачам дистанційно отримувати й аналізувати дані через веб-платформу на основі ReactJS і Django. Також значного успіху вдалося досягти авторам роботи [7]: автоматизований контроль мінімізував ризик контамінації та підвищив ефективність культивування у результаті

чого покращується щільність та продуктивність росту стовбурових клітин.

Автоматизація біотехнологічних процесів розширюється завдяки системам контролю pH для оптимізації виробництва вакцинних антигенів [8]. Використання pH Control Kit, що базується на pH-електроді, мікроконтролера Arduino ATmega 328P і перистальтичних насосів дозволяє регулювати рівень кислотності у режимі реального часу. Програмне забезпечення на основі Arduino та Java забезпечує точне підтримання параметрів без необхідності ручного втручання.

Поширенню у якості керуючого елемента набула мікроконтролерна плата ESP32 [9 – 13]. На її основі вдалося реалізувати систему моніторингу для біореактора, запропоновану групою вчених з Університету Галац [9]. Вона оснащена датчиками температури та каламутності, що дозволяє проводити моніторинг у реальному часі та передавати дані на хмарні платформи. Це спрощує контроль і оптимізацію технологічних процесів вирощування мікроорганізмів. Експерименти на дріжджовій культурі *Saccharomyces cerevisiae* підтвердили ефективність точного контролю температури (29 – 31 °C) для покращення росту біомаси, а моніторинг каламутності дозволив точно оцінювати концентрацію мікроорганізмів у середовищі. Ще один перспективний напрямок – створення доступного 3D-друкованого біореактора з IoT-функціоналом [10]. Використання мікроконтролера ESP32 та електронних компонентів для регулювання перемішування, а також мобільного застосунку для дистанційного керування, дозволило значно прискорити ріст бактерій *Escherichia coli*, що підтвердили вимірювання. Вартість пристрою склала близько 50 євро. Дослідження [11] пропонує недорогу IoT-систему для моніторингу

анаеробного біореактора. Завдяки використанню мікроконтролера ESP32 та набору сенсорів для вимірювання pH, температури, потенціалу REDOX, концентрації амонію та складу біогазу, система забезпечує безперервний контроль процесу зброджування. Дані передаються онлайн у MySQL-базу для подальшого аналізу, а отримані результати підтвердили високу точність вимірювань.

Автори наголошують на перспективності створених систем і можливості подальших вдосконалень, які включають розширення функціоналу шляхом використання додаткових сенсорів для більш комплексного контролю параметрів та інтеграцію штучного інтелекту (III).

IV. РОЗРОБКА СИСТЕМИ

Проведений літературний аналіз статей за темою дослідження вказує на доцільність використання ESP32 як керуючого елемента. Технічні характеристики та функціональні можливості (такі як вбудований Wi-Fi модуль) відповідають вимогам, що висуваються до даної системи, а саме: низька ціна (важливий аспект, що визначає доступність приладів у рамках обмеженого бюджету установ), надійність, точність, інформативність та простота конструкції. Універсальність системи буде забезпечена широким спектром параметрів моніторингу, обраних на основі літературного аналізу [5 – 15]. До них належать температура, вологість, показник кислотності середовища (pH), концентрація CO₂ та O₂, освітленість (таблиця 1). Окрім цього необхідно відстежувати час культивування, так як це необхідно для аналізу динаміки росту [1], отримування інформації про реакцію мікроорганізмів на зміну умов у часі, визначення фази росту (лаг-фаза, логарифмічна (експоненціальна)

фаза, стаціонарна фаза і фаза відмирання), тощо.

Таблиця 1 Значення параметрів

Параметр	Загальні значення по всім групам
Температура	0 – 75 °C
Вологість	65 – 99 %
Значення pH	4 – 11
Значення CO ₂	0,04 – 15 %
Значення O ₂	1 – 21 %
Інтенсивність світла	70 – 210 $\mu\text{mol}/\text{m}^2\text{s}$

Умови вирощування та час залежать від культури мікроорганізмів. Для менінгококу *Neisseria meningitides* (диплокок з роду *Neisseria*) температурний показник має складати 35 – 37 °C у присутності 5 – 10 % CO₂. Інкубування *Neisseria meningitides* проводять протягом 18 – 24 годин при оптимальному pH середовища, що складає 7,2 – 7,4. Вирощування *Staphylococcus aureus* відбувається при інших параметрах: температурний оптимум 30 – 37 °C, pH від 7,0 до 7,5 (також можливий ріст при pH у межах від 4,2 до 9,3) [16]. Діапазони роботи обраних для даної системи та описаних нижче датчиків відповідають наведеним у таблиці значенням, окрім цього вони мають високу точність, надійність та доступність. Також при виборі датчиків враховувався попередній досвід використання у окремих прототипах систем [8].

На структурній схемі моніторингу параметрів для вирощування мікроорганізмів (рис. 1) детально представлено взаємозв'язок компонентів та архітектуру приладу згідно концепту.

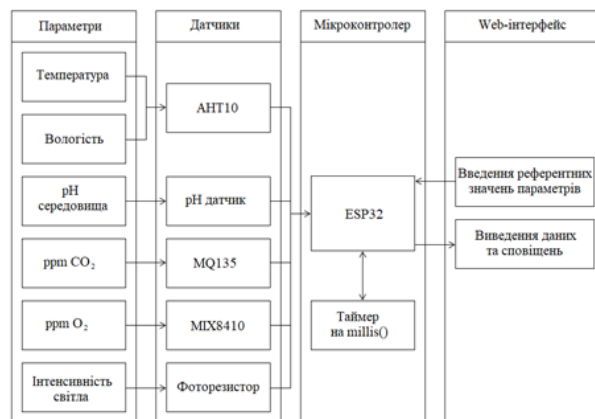


Рисунок 1 – Структурна схема моніторингу показників для вирощування мікроорганізмів

Датчик AHT10 є сучасним високоточним сенсором для вимірювання температури та вологості від ASAIR. Даний сенсор відзначається стабільною роботою та вищою точністю (похибка вологості складає $\pm 2\%$, температури – ± 0.3 °C) серед аналогів (DTH11, BME680).

У якості pH датчика обрано Gravity Analog pH Sensor Meter Kit V2. Цей датчик підходить для вимірювання pH в діапазоні від 0 до 14, дозволяючи застосовувати його в різних розчинах, таких як живильні середовища для мікроорганізмів. Датчик зручний для лабораторних досліджень завдяки високій стабільності, швидкому відгуку, надійному електродному покриттю та простій інтеграції [9]. Основними перевагами цього датчика є високий рівень захисту від завад та можливість легкого калібрування, що підвищує точність вимірювань.

Використання MQ135 дозволить здійснювати моніторинг CO₂ у реальному часі, що сприяє точному регулюванню умов культивування. MQ135 працює за принципом змінення електричного опору його сенсорного елемента під дією присутніх газів, що дозволяє вимірювати концентрацію CO₂. Його можливості не обмежуються тільки вуглекислим газом. Сенсор також здатний визначати інші

летючі органічні речовини, такі як аміак, бензол, спирт і метан, що надає йому додаткової універсальності в застосуванні для моніторингу якості повітря. Це є корисною особливістю для складних систем контролю, де може бути необхідним не лише відстеження CO₂, але й аналіз присутності інших газів, що можуть впливати на процес вирощування мікроорганізмів.

Сенсор M1X8410 представляє собою високочутливий електрохімічний датчик концентрації кисню (O₂) у діапазоні 0 – 25%. M1X8410 є вдосконаленою версією, що замінює попередній варіант (ME2-O2-Ф20), з рядом технологічних поліпшень, які підвищують надійність і продовжують термін експлуатації пристрою. Оновлення включають вдосконалену систему захисту від витoku електроліту, що значно знижує ризик витoku та усуває цю проблему, характерну для попередньої моделі. Вибір сенсора M1X8410 також обумовлений його низьким енергоспоживанням і сумісністю з мікроконтролерами, зокрема ESP32. Додатково, цей сенсор має тривалий термін служби та не потребує частого калібрування, що робить його надійним компонентом для довготривалих досліджень.

Фоторезистор – це пасивний напівпровідниковий компонент, опір якого залежить від інтенсивності світлового випромінювання, що потрапляє на його поверхню. Основний принцип його роботи полягає в зміні електричного опору в залежності від кількості падаючих фотонів: підвищення освітленості викликає зниження опору, тоді як за умови зменшення інтенсивності світла опір фоторезистора зростає. Це дозволяє використовувати фоторезистор для визначення рівня освітленості, що може бути легко реалізовано в електричному колі з

резистором для перетворення змін струму на значення інтенсивності світла.

4.1 Підключення компонентів

У середовищі TinkerCad [17] були створені схеми підключення компонентів для інтелектуальної системи моніторингу та оптимізації параметрів вирощування мікроорганізмів у лабораторних умовах з використанням ESP32, включаючи функціональну схему (рис. 2) та принципову електричну схему (рис. 3).

Платформа TinkerCad була обрана середовищем розробки підключення компонентів, так як вона є потужним інструментом для віртуального моделювання та прототипування електронних пристроїв. Її перевагами є віртуальне моделювання роботи схем, простота з'єднання, тестування, інформативна візуалізація, можливості аналізу та велика бібліотека готових модулів.

Для правильної роботи системи інтелектуального моніторингу необхідно правильно, з урахуванням специфіки підключити їх до мікроконтролерної плати. Нижче наведено опис принципової схеми підключення компонентів.

Датчик АНТ10 був інтегрований у систему шляхом підключення контакту Vcc до контакту 3.3 В мікроконтролера ESP32, а контакту GND – до контакту заземлення (GND). Відповідно до специфікацій інтерфейсу I2C, контакти SDA і SCL під'єднано до контактів 21 та 22 відповідно. I2C дозволяє обмінюватися даними з високою частотою, при цьому забезпечується стабільний зв'язок, що є надзвичайно важливим для вимірювань з високою точністю в реальному часі.

pH сенсор, підключений через аналоговий підсилювач, що значно підвищує якість сигналу та забезпечує його стабільність. Вихідний контакт підсилювача, що позначається як A (analog

signal output), під'єднується до контакту 39 мікроконтролера ESP32, а контакт живлення (Vcc) сенсора – до контакту 3.3 В. Контакт заземлення (GND) сенсора під'єднано до GND ESP32. Завдяки такій схемі підключення забезпечується безперебійне живлення сенсора та надійний сигнал, що сприяє точному вимірюванню рівня рН.

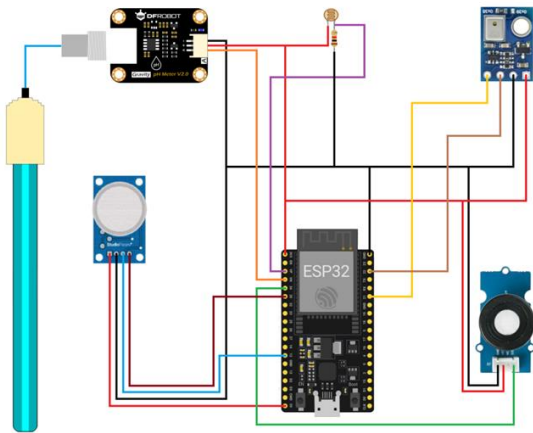


Рисунок 2 – Функціональна схема системи

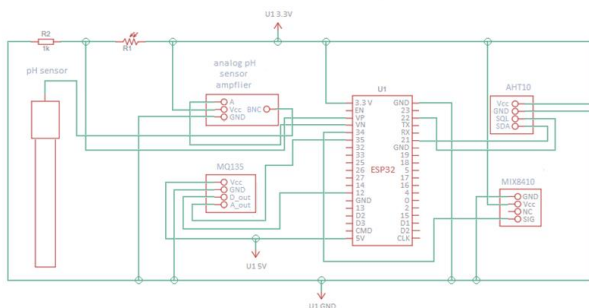


Рисунок 3 – Принципова електрична схема системи

Сенсор MQ135 під'єднано наступним чином: контакт Vcc з'єднано з виходом 5В ESP32, контакт GND підключено до заземлення (GND), Digital_out – до 12 контакту, а Analog_out – до 35 контакту.

Електрохімічний датчик MIX8410 має 4 контакти: GND, Vcc, SIG та NC. Контакт GND сенсора було підключено до GND на ESP32, Vcc – до контакту 3,3 В, а вихідний контакт сигналу SIG – до 34 контакту.

Контакт NC не під'єднувався, оскільки він є нормально замкненим і не вимагає додаткового з'єднання.

Фоторезистор підключається до мікроконтролерної плати через 36 контакт для передачі сигналу, через резистор номіналом 1 кОм до GND, та живлення 3.3 В.

4.2 Керуюча програма

Основною метою керуючої програми є автоматизація процесів збору, аналізу та обробки даних з подальшим інформуванням користувача про будь-які відхилення від заданих параметрів. На рисунку 4 надається детальна блок-схема розробленого алгоритму роботи програми.

Алгоритми програми реалізують кілька послідовних функцій, кожна з яких має важливе значення для ефективного функціонування системи.

На початковому етапі роботи системи керуюча програма забезпечує можливість встановлення користувачем допустимих значень для таких параметрів, як температура, вологість, рівень CO₂, концентрація O₂, рівень рН, інтенсивність освітлення та час культивування. Задання цих межових значень є важливим, оскільки вони слугують еталонними значеннями для подальшого аналізу та визначають оптимальні умови для процесу культивування. На основі встановлених параметрів програма здійснює моніторинг середовища, орієнтуючись на їх відповідність або відхилення від норми.

Після встановлення параметрів програма ініціює процес збору даних, використовуючи підключені сенсори.

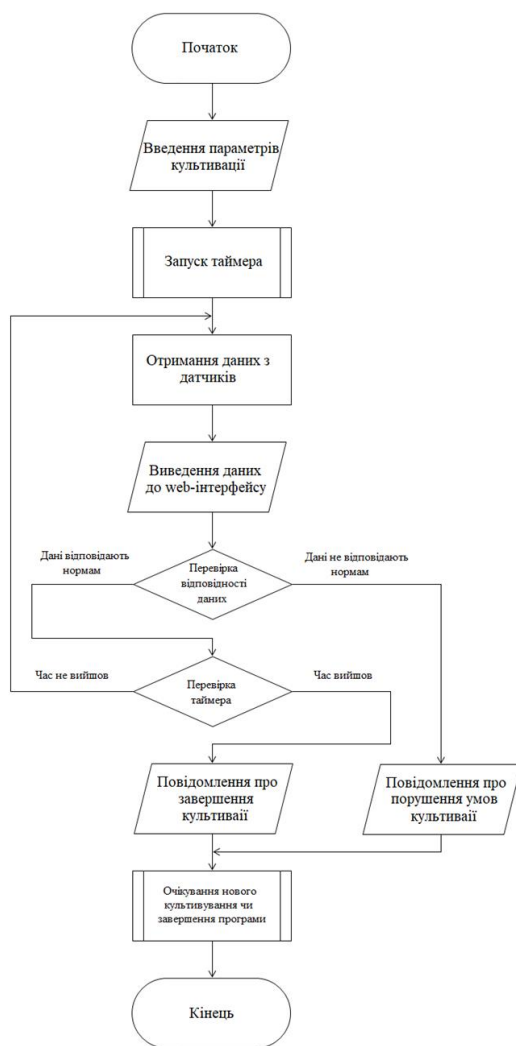


Рисунок 4 – Блок-схема алгоритму роботи

Програмне забезпечення періодично зчитує дані з сенсорів та зберігає їх для подальшої обробки, що дозволяє здійснювати безперервний моніторинг змін параметрів у середовищі культивування.

Далі здійснюється порівняння параметрів у реальному часі, що дозволяє оперативно реагувати на зміни у середовищі. Якщо значення будь-якого з параметрів виходить за межі заданих значень, програма фіксує ці відхилення для подальшого аналізу. Такий підхід забезпечує більш детальний контроль за

процесом та дозволяє оцінити вплив кожного окремого параметра на загальний стан середовища.

При виявленні відхилень від встановлених меж програмне забезпечення автоматично генерує інформативне повідомлення для користувача. Це дозволяє користувачеві вчасно реагувати на можливі відхилення та вживати необхідних заходів для коригування параметрів середовища.

Завершальним етапом роботи програми є формування повідомлення про закінчення процесу культивування.

4.3 Web-інтерфейс

Архітектура web-сторінки для моніторингу параметрів культивування мікроорганізмів, створеного на основі HTML і CSS у Visual Studio Code [18], є прикладом інтерактивного інтерфейсу (рис. 5), що дозволяє користувачеві візуалізувати й контролювати ключові параметри середовища. Цей інтерфейс спеціально адаптований для роботи з платформою ESP32, що виконує роль центрального контролера системи.

Web-інтерфейс організований так, щоб забезпечити зручний доступ до всіх контрольованих параметрів, кожен з представлений у вигляді окремого блоку з відповідними елементами інтерфейсу, такими як LED-індикатори, поля введення для встановлення мінімальних і максимальних значень, а також виводу поточних даних. Цей підхід сприяє швидкому розумінню стану середовища.

Стильова частина реалізована через CSS і дозволяє створити візуально привабливий та інтуїтивний інтерфейс. Використання шрифту «Courier New» надає додатку технічного вигляду, що відповідає його функціональному призначенню. Зелений фон та кольорові елементи, кнопка і LED-індикатори, не лише створюють естетичну гармонію, а й допомагають виділити основні функціональні частини інтерфейсу.



Рисунок 5 – Вигляд Web-інтерфейсу

Особливість архітектури цього інтерфейсу полягає у його модульності: кожен параметр середовища має власний блок з чітко визначеною структурою: заголовок, LED-індикатор стану, поля введення для меж значень і поле виводу поточних даних. Це дозволяє легко додавати нові параметри або модифікувати існуючі без значних змін у загальній структурі додатка. Інтерактивність додатка забезпечується за рахунок використання HTML-елементів, таких як кнопки, input-поля та блоки для виводу даних. Наприклад, кнопка «СТАРТ» виконує роль тригера для запуску системи культивування, а таймер дозволяє відслідковувати тривалість

процесу. Блок «Стан культивації» служить для виводу текстових повідомлень про загальний стан середовища, що допомагає користувачеві швидко оцінити ефективність поточних умов.

Дизайн також враховує важливість зручності користувача. Елементи розташовані в логічному порядку, а використання позиціонування через CSS гарантує, що інтерфейс залишається зрозумілим. Параметри середовища згруповані у два стовпці, що дозволяє легко співвідносити їх між собою.

Архітектура інтерфейсу є гнучкою та розширюваною, що робить його придатним для інтеграції в різні системи моніторингу. Завдяки продуманому дизайну та модульності, додаток може слугувати надійним інструментом для дослідників і технологів у лабораторних умовах.

4.4 Створення 3D моделі корпусу

Процес розробки корпусу (рис. 6) для системи інтелектуального моніторингу параметрів вирощування мікроорганізмів мав на меті створення компактної, функціональної та надійної конструкції, яка б забезпечувала захист електронних компонентів системи. Для цього було використано програмне забезпечення Fusion 360 [19], яке дозволило виконати тривимірне моделювання з високим ступенем деталізації, забезпечуючи відповідність дизайну вимогам проекту. На рис. 7 продемонстровано розміщення компонентів приладу у корпусі.

Корпус складається з двох основних відділів, кожен з яких виконує певну функціональну роль. Основний відділ призначений для розміщення мікроконтролера ESP32 і датчиків. У цьому відсіку передбачено верхню кришку-панель, яка виконує як захисну функцію, так і слугує місцем для фіксації датчиків. Для кожного датчика було розроблено посадкові кріплення, що забезпечують їх стабільне

розташування та запобігають пошкодженням під час експлуатації. Другий відділ корпусу призначений для елементів живлення. Він обладнаний окремою кришкою, що забезпечує зручний доступ до батареї для її заміни або обслуговування.

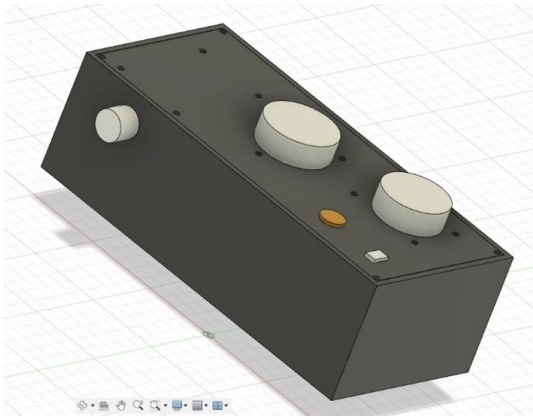


Рисунок 6 – Загальний вигляд конструкції приладу

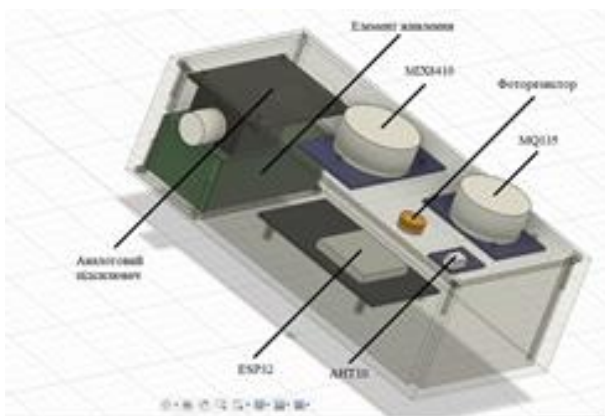


Рисунок 7 – Дизайн та компоновка корпусу приладу з ввімкненою прозорістю у середовищі розробки

Особливу увагу було приділено кріпленню плати ESP32. Для цього змодельовано чотири стійки, які не лише забезпечують надійну фіксацію плати, а й створюють відстань між платою та нижньою стінкою корпусу. Це рішення сприяє захисту мікроконтролера від механічних впливів, а також забезпечує ефективне розсіювання тепла.

Виготовлення корпусу здійснено з використанням технології FDM-друку, яка дозволяє створювати об'ємні об'єкти

шляхом пошарового нанесення матеріалу. Матеріалом для друку було обрано ABS-пластик, який вирізняється високою міцністю, стійкістю до ударів та термостабільністю. ABS-пластик також забезпечує гарний рівень захисту від зовнішніх впливів, таких як пил і волога, що важливо для роботи в лабораторних умовах.

Однією з головних переваг корпусу є його модульна конструкція, яка дозволяє легко отримати доступ до кожного з компонентів системи. Це особливо важливо в контексті технічного обслуговування, що передбачає заміну датчиків, елементів живлення чи інших компонентів без необхідності розбирання всієї системи. Завдяки модульному підходу корпус забезпечує високу ергономічність і зручність у використанні. Таким чином, розроблений корпус поєднує функціональність, ергономічність та захисні властивості, забезпечуючи стабільну та тривалу роботу системи інтелектуального моніторингу параметрів вирощування мікроорганізмів. Використання ABS-пластику та технології FDM-друку значно підвищує надійність конструкції та її адаптивність до лабораторних умов експлуатації.

IV. ПЕРСПЕКТИВИ РОЗВИТКУ

Інтелектуальна система моніторингу та оптимізації параметрів культивування мікроорганізмів у лабораторних умовах має значний потенціал для подальшого розвитку та вдосконалення. Зокрема, існує кілька перспективних напрямків, які можуть сприяти покращенню функціональності, точності та зручності використання системи.

Одним із напрямків удосконалення є запис даних. Додавання функції запису даних у вигляд графіка або бази даних дозволить не тільки здійснювати поточний моніторинг параметрів, але й зберігати

інформацію для ретроспективного аналізу. Це дозволить користувачам відстежувати зміни параметрів протягом усього процесу культивування, виявляти довготривалі тенденції та вносити корективи на основі накопичених даних. Така функція може бути реалізована як локально, так і з можливістю віддаленого доступу, що підвищить гнучкість у використанні системи.

Ще одним перспективним напрямком є розширення функціоналу системи. Зокрема, додавання нових сенсорів для моніторингу інших параметрів середовища, які можуть впливати на життєдіяльність мікроорганізмів, наприклад, рівень вмісту азоту або фосфатів.

Використання більш сучасних і якісних компонентів також є важливим напрямком для покращення точності та стабільності системи. Заміна деяких сенсорів на більш високоточні або швидкодіючі моделі підвищить надійність даних, що збираються, а також може знизити потребу в частотному калібруванні. Крім того, використання компонентів з розширеними можливостями передачі даних дозволить ефективніше інтегрувати систему з іншими пристроями або платформами.

Інтеграція штучного інтелекту є ще одним перспективним напрямком розвитку. Використання алгоритмів машинного навчання дозволить системі аналізувати дані у реальному часі з урахуванням складних закономірностей і здійснювати точніші прогнози змін параметрів.

Доповнена сигналізація для оповіщення про відхилення або завершення культивування є наступним напрямком для покращення взаємодії користувача з системою. Розширення сигналізації може включати, окрім стандартних візуальних або звукових сигналів, відправку повідомлень на мобільні пристрої, push-сповіщення або навіть сповіщення через інтегровані

додатки, що дозволить отримувати інформацію незалежно від місця перебування користувача. Це особливо важливо для віддаленого моніторингу, коли користувачі можуть бути зайняті іншими завданнями.

VI. ВИСНОВКИ

Вдосконалення систем культивування є важливим етапом для покращення процесу вирощування мікроорганізмів та клітин. Аналіз існуючих рішень з даної теми показав, що точний контроль параметрів культивування забезпечує оптимальний ріст та якість отриманої культури. У даний час основні дослідження у галузі вирощування клітин включають такі напрямки як виробництво вакцинних агентів, біогазу та біопалива, тканинну інженерію. Завдяки впровадженню IoT у біореактори (у тому числі анаеробний реактор) та фотобіореактори вдалося реалізувати дистанційний моніторинг, стабільність умов та оперативне реагування на зміни.

Мікроконтролерна плата ESP32 є високопродуктивним обчислювальним інструментом, що активно використовується в приладобудуванні завдяки сумісності з різноманітними датчиками. Окрім цього, завдяки інтегрованому Wi-Fi модулю системи на базі ESP32 можливо без додаткових модулів під'єднувати до IoT. Враховуючи це, а також інші характеристики, надійності та низьку ціну, апаратну платформу доцільно використовувати як центральний компонент інтелектуальної системи моніторингу та оптимізації параметрів вирощування мікроорганізмів у лабораторних умовах.

На основі проведеного аналізу останніх досліджень і публікацій розроблено конструктивні схеми, керуючу програму, 3D-модель та web-інтерфейс. Інтелектуальна система моніторингу складається наступних компонентів:

мікроконтролерна плата ESP32, високоточний цифровий датчик температури АНТ10 від АСАІR, аналоговий рН-метр від DFRobot, модуль датчика якості повітря MQ-135, електрохімічний сенсор кисню МІХ8410 та фоторезистор. Для програмування була використана адаптована для мікроконтролерів C++. Для відстеження необхідної фази росту мікроорганізмів запрограмовано та реалізовано таймер на millis(). Для інформаційного зв'язку з користувачем система має web-інтерфейс, який надає можливість вводити допустимі значення і виводити поточні значення параметрів разом зі станом культивування. Окрім функціональності, значну роль відіграє економічна доцільність, що забезпечується застосуванням недорогих і надійних компонентів. Завдяки цьому пристрій залишається доступним за вартістю навіть для установ із обмеженим бюджетом. Розроблену систему можна вдосконалити завдяки застосуванню підключення хмарної бази даних, розширенню функціоналу, застосуванню більш сучасних компонентів у разі морального старіння запропонованих, інтеграції ШІ.

Фінансування. Дане дослідження не отримувало зовнішнього фінансування.

Конфлікт інтересів. Автори заявляють про відсутність конфлікту інтересів.

ORCID ID та внесок авторів.

ORCID відсутній (А, С) Zaitsev Daniil
0000-0003-2085-4786 (Е) Alexandr
Azarkhov

0000-0002-6603-2174 (А, D) Sili Ivan
0000-0003-0438-6433 (B) Bogdan
Efremenko

0000-0003-1461-4399 (D) Olena
Balalaeva

А- Концепція роботи та дизайн, В-
аналіз даних, С- Написання статті, D-

Критичний огляд, Е- Остаточне схвалення
статті.

ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ

1. Загальна характеристика мікроорганізмів і способи їх культивування. Запорізький національний університет. URL: https://moodle.znu.edu.ua/pluginfile.php?file=/236895/mod_resource/content/1/2.pdf.
2. Babulak E. Future ICT, AI, Computing and IoT in Support of Microbiology and Infectious Diseases Treatment. *Cohesive Journal of Microbiology & Infectious Disease*. 2018. Vol. 1. Iss. 4. DOI: <https://doi.org/10.31031/cjmi.2018.01.000519>.
3. How does the Internet of Things (IoT) help in microalgae biorefinery? / K. Wang et al. *Biotechnology Advances*. 2021. Pp. 107819. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.biotechadv.2021.107819>.
4. A Review of IoT Applications in Healthcare / C. Li et al. *Neurocomputing*. 2023. Pp. 127017. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.neucom.2023.127017>.
5. Design a Photobioreactor for Microalgae Cultivation with the IOTs (Internet of Things) System / A. Rahmat et al. *Omni-Akuatika*. 2020. Vol. 16. Iss. 1. Pp. 53. DOI: <https://doi.org/10.20884/1.0a.2020.16.1.791>.
6. IoT-enabled tissue-engineering bioreactors for real-time remote monitoring: A trial using a thermal module / H. Assyarify et al. The 6th biomedical engineering's recent progress in biomaterials, drugs development, and medical devices. 2022. DOI: <https://doi.org/10.1063/5.0098412>.
7. Large-scale smart bioreactor with fully integrated wireless multivariate sensors and electronics for long-term in situ monitoring of stem cell culture / J. Lee et al. *Science Advances*. 2024. Vol. 10. Iss. 7. DOI: <https://doi.org/10.1126/sciadv.adk6714>.
8. Maminiaina O. F., Andrianirina S. T., Razafindrafara M. S. Development of an Automatic and Real Time pH Monitoring and Adjustment System to Optimize Antigen Production in Bioreactors. *International Journal of Innovative Science and Research Technology*. 2022. Vol. 7. Iss. 11. DOI: <https://doi.org/10.5281/zenodo.7495773>.
9. Embedded IoT Design for Bioreactor Sensor Integration / L. M. Baicu et al. *Sensors*. 2024. Vol. 24. Iss. 20. Pp. 6587. DOI: <https://doi.org/10.3390/s24206587>.
10. Enhanced Growth of Bacterial Cells in a Smart 3D Printed Bioreactor / E. M. Pechlivani et al. *Micromachines*. 2023. Vol. 14. Iss. 10. Pp. 1829. DOI: <https://doi.org/10.3390/mi14101829>.
11. A Low-Cost IoT System Based on the ESP32 Microcontroller for Efficient Monitoring of a Pilot Anaerobic Biogas Reactor / S. D. Kalamaras et al. *Applied Sciences*. 2024. Vol. 15. Iss. 1. Pp. 34. DOI: <https://doi.org/10.3390/app15010034>.
12. Аналіз сучасних мікроконтролерів для вирішення біоінженерних задач та використанням інтернету речей / Сілі І.І., Азархов О.Ю., Єфременко Б.В. - Наука та виробництво: міжвуз. темат. зб. наук. пр. Вип. 26 / ДВНЗ «ПДТУ». – Дніпро, ПДТУ, 2023. – 79 – 87 с. DOI: <https://doi.org/10.31498/2522-9990262023294299/>.
13. IoT фетальний пульсометр на базі ESP32 / О. Ю. Азархов, І. І. Сілі // Комп'ютерні ігри та мультимедіа як

інноваційний підхід до комунікації / Матеріали II Всеукраїнської науково-технічної конференції молодих вчених, аспірантів та студентів. Одеса, 29-30 вересня 2022 р. - Одеса, Видавництво ОНТУ, 2022 р. – 3 с. – Режим доступу: <https://card-file.ontu.edu.ua/handle/123456789/23485>

14. Functional reconstitution of a bacterial CO₂ concentrating mechanism in *Escherichia coli* / A. I. Flamholz et al. *eLife*. 2020. Vol. 9. DOI: <https://doi.org/10.7554/elife.59882>.

15. Budiman, Nugraha S., Bilqis K. The Correlation Study of Temperature, Humidity, Lighting and the Quantity of Ambient Air Microorganisms. *Advanced Science Letters*. 2017. Vol. 23. Iss. 4. Pp. 3531–3533. DOI: <https://doi.org/10.1166/asl.2017.9158>.

16. Медина мікробіологія, вірусологія та імунологія: підручник / Т. В. Адрианова та ін. Вінниця: Нова Книга. 2010. 969 с.

17. Tinkercad: From mind to design in minutes. Tinkercad. URL: <https://www.tinkercad.com/>.

18. Visual Studio Code - Code Editing. Redefined. Visual Studio Code - Code Editing. Redefined. URL: <https://code.visualstudio.com/>.

19. Autodesk Fusion: More than CAD, it's the future of design and manufacturing. URL: <https://www.autodesk.com/products/fusion-360/overview>.

REFERENCES

1. «General characteristics of microorganisms and methods of their cultivation», Zaporizhzhia National University, [Online]. Available: https://moodle.znu.edu.ua/pluginfile.php?file=/236895/mod_resource/content/1/2.pdf. Accessed on: February 2, 2025.
2. E. Babulak, «Future ICT, AI, Computing and IoT in Support of Microbiology and Infectious Diseases Treatment», *Cohesive J. Microbiol. & Infectious Disease*, vol. 1. 2018. doi: <https://doi.org/10.31031/cjmi.2018.01.000519>.
3. K. Wang et al., «How does the Internet of Things (IoT) help in microalgae biorefinery?», *Biotechnol. Advances*, pp. 107819, 2021. doi: <https://doi.org/10.1016/j.biotechadv.2021.107819>.
4. C. Li, J. Wang, S. Wang, and Y. Zhang, «A Review of IoT Applications in Healthcare», *Neurocomputing*, pp. 127017, 2023. doi: <https://doi.org/10.1016/j.neucom.2023.127017>.
5. A. Rahmat, I. Jaya, T. Hestirianto, D. Jusadi, and M. Kawaroe, «Design a Photobioreactor for Microalgae Cultivation with the IOTs (Internet of Things) System», *Omni-Akuatika*, vol. 16, iss. 1. pp. 53, 2020. doi: <https://doi.org/10.20884/1.oa.2020.16.1.791>.
6. H. Assyarify, M. H. Nadhif, W. Gates, and Y. Whulanza, «IoT-enabled tissue-engineering bioreactors for real-time remote monitoring: A trial using a thermal module», in *The 6th biomedical engineering's recent progress in biomaterials, drugs development, and medical devices*, 2022. doi: <https://doi.org/10.1063/5.0098412>.
7. J. Lee et al., «Large-scale smart bioreactor with fully integrated wireless multivariate sensors and electronics for long-term in situ monitoring of stem cell culture», *Science Advances*, vol. 10, iss. 7. 2024. doi: <https://doi.org/10.1126/sciadv.adk6714>.
8. O. F. Maminaiina, S. T. Andrianirina, and M. S. Razafindrafara, «Development of an Automatic and Real Time pH Monitoring and Adjustment System to Optimize Antigen Production in Bioreactors», *International Journal of Innovative Science and Research Technology*, vol. 7, iss. 11. 2022. doi: <https://doi.org/10.5281/zenodo.7495773>.
9. L. M. Baicu, M. Andrei, G. A. Ifrim, and L. T. Dimitrievici, «Embedded IoT Design for Bioreactor Sensor Integration», *Sensors*, vol. 24, iss. 20. pp. 6587, 2024. doi: <https://doi.org/10.3390/s24206587>.
10. E. M. Pechlivani et al., «Enhanced Growth of Bacterial Cells in a Smart 3D Printed Bioreactor», *Micromachines*, vol. 14, iss. 10. pp. 1829, 2023. doi: <https://doi.org/10.3390/mi14101829>.
11. S. D. Kalamaras, M.-A. Tsitsimpikou, C. A. Tzenos, A. A. Lithourgidis, D. S. Pitsikoglou, and T. A. Kotsopoulos, «A Low-Cost IoT System Based on the ESP32 Microcontroller for Efficient Monitoring of a Pilot Anaerobic Biogas Reactor», *Applied Sciences*, vol. 15, iss. 1. pp. 34, 2024. doi: <https://doi.org/10.3390/app15010034>.
12. I. I. Sili, O. Y. Azarkhov, B. V. Yefremenko, «Analysis of Modern Microcontrollers for Solving Bioengineering Problems with the Use of the Internet of Things». *Science and Production: Interuniversity Thematic Collection of Scientific Papers*. Issue 26 / State Higher Educational Institution "PSTU". Dnipro, PDTU, 2023. pp. 79–87. DOI: <https://doi.org/10.31498/2522-9990262023294299/>.
13. O. Y. Azarkhov, I. I. Sili, «IoT Fetal Pulse Monitor Based on ESP32». *Computer Games and Multimedia as an Innovative Approach to Communication. Proceedings of the II All-Ukrainian Scientific and Technical Conference of Young Scientists, Postgraduates, and Students*. Odessa, September 29-30, 2022. Odessa, ONTU Publishing House, 2022. 3 p.
14. A. I. Flamholz et al., «Functional reconstitution of a bacterial CO₂ concentrating mechanism in *Escherichia coli*», *eLife*, vol. 9. 2020. doi: <https://doi.org/10.7554/elife.59882>.
15. Budiman, S. Nugraha, and K. Bilqis, «The Correlation Study of Temperature, Humidity, Lighting and the Quantity of Ambient Air Microorganisms», *Advanced Science Letters*, vol. 23, iss. 4. pp. 3531–3533, 2017. doi: <https://doi.org/10.1166/asl.2017.9158>.
16. T. V. Adrianova, V. V. Bobyr, N. O. Voitsehovsky et al., «Medical microbiology, virology and immunology»: textbook. Vinnytsia: New Book, pp. 969, 2010.
17. «Tinkercad - From mind to design in minutes», Tinkercad, [Online]. Available: <https://www.tinkercad.com/>. Accessed: February 2, 2025.
18. «Visual Studio Code - Code Editing. Redefined», Visual Studio Code - Code Editing. Redefined, [Online]. Available: <https://code.visualstudio.com/>. February 2, 2025.
19. «Autodesk Fusion: More than CAD, it's the future of design and manufacturing», Autodesk, [Online]. Available: <https://www.autodesk.com/products/fusion-360/overview>. Accessed: February 2, 2025.

UDC 004.415.2.031.43

AUTOMATED IOT SYSTEM FOR MONITORING THE CULTIVATION OF MICROBIOLOGICAL CULTURES

Daniil Zaitsev

daniil.zaytsev.ne@gmail.com

Olexandr Azarkhov

azarhov_a_y@pstu.edu

Ivan Sili

sili_i_i@pstu.edu

Bohdan Yefremenko

efremenko_b_v@pstu.edu

Olena Balalaeva

balalaeva_e_u@pstu.edu

Department of Biomedical Engineering
State Higher Educational Institution
Pryazovskyi State Technical University
Dnipro, Ukraine

Abstract – The article describes the creation of a prototype intellectual system for monitoring and optimizing the parameters of microorganisms growing in the laboratory. According to the latest data, as of 2018, there were 27 billion IoT devices in the world, and in just 7 years this number has grown to 75 billion. This technology has already begun to play an important role in the automation of all industries due to the enhanced capabilities of connecting devices via the Internet. Taking this into account, as well as successful examples of IoT integration in the healthcare sector, the question of further implementation of this technology in the field of microbiology arises. The system proposed in this paper is based on IoT technology and is capable of monitoring and analysing temperature, humidity, acidity, carbon dioxide and oxygen concentration, and illumination. In regards to the system and software capabilities of the ESP32 microcontroller board, the system also provides the ability to track incubation time to the required phase of microbial growth as part of a study or process. The hardware implementation of the prototype concept was made in the free service of the TinkerCAD computer-aided design system; the software was created in the integrated development environments Arduino IDE and Visual Studio Code; the case was developed in Fusion360 software. The main components of the system are an ESP32 microcontroller board, an AHT10 high-precision digital temperature sensor from ASAIR, an analog pH meter from DFRobot, an MQ-135 air quality sensor module, a MIX8410 electrochemical oxygen sensor, and a photoresistor. By monitoring microbial cultivation parameters in real time and transmitting data via a Wi-Fi connection to the system, it facilitates advanced control and further optimization of cultivation. The monitoring system proposed in this article emphasizes the practical application of IoT cultivation devices, offering high accuracy and repeatability of results to improve the efficiency of the microbial cultivation process.

Key words – parameters, cultivation, IoT, ESP32, Wi-Fi, sensors, web interface.