

**МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ**  
**ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ «ЖИТОМИРСЬКА ПОЛІТЕХНІКА»**  
**Факультет комп'ютерно-інтегрованих технологій, мехатроніки і робототехніки**  
**Кафедра інформаційно-вимірювальних технологій**

**ПОЯСНЮВАЛЬНА ЗАПИСКА**

до кваліфікаційної роботи

бакалавра

на тему: **Комп'ютеризована інформаційно-вимірювальна система для контролю за процесом вирощування хлорели**

Виконав: 4 курсу, групи МТ-4  
студент \_\_\_\_\_

Спеціальності: 152 «Метрологія та  
інформаційно-вимірювальна техніка»

Дрозд М.В.

\_\_\_\_\_  
(прізвище та ініціали)

Керівник: доцент кафедри ІВТ

\_\_\_\_\_  
кандидат технічних наук, доцент

Чепюк Л.О.

\_\_\_\_\_  
(науковий ступінь, вчене звання, посада, прізвище та ініціали)

Рецензент: \_\_\_\_\_

\_\_\_\_\_  
(науковий ступінь, вчене звання, посада, прізвище та ініціали)

Житомир – 2025

**МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ**  
**ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ «ЖИТОМИРСЬКА ПОЛІТЕХНІКА»**  
**Факультет комп'ютерно-інтегрованих технологій, мехатроніки і робототехніки**  
**Кафедра інформаційно-вимірювальних технологій**  
**Спеціальність 152 «Метрологія та інформаційно-вимірювальна техніка»**

ЗАТВЕРДЖУЮ  
Завідувач кафедри інформаційно-  
вимірювальних технологій  
д.т.н., професор Подчашинський Ю.О.

« \_\_\_\_\_ » \_\_\_\_\_ 2025 р.

**ЗАВДАННЯ**  
на кваліфікаційну роботу бакалавра

Студент \_\_\_\_\_ Дрозд Марія Вадимівна

1. Тема роботи: Комп'ютеризована інформаційно-вимірювальна система для контролю за процесом вирощування хлорели

Керівник роботи: доцент кафедри ІВТ кандидат технічних наук, доцент  
Чепюк Л.О.

затверджена наказом по університету від « 04 » квітня 2025 р. № 131/с

2. Термін здачі закінченої роботи на кафедру « 10 » червня 2025р.

3. Вихідні дані до роботи об'єкт дослідження – комп'ютеризована фітотронна установка для контролю вирощування хлорели, параметр вимірювання – температура повітря, відносна вологість, рівень освітлення, концентрація CO<sub>2</sub>; діапазони вимірювання: температура від 10 до 40 °С; вологість від 30% до 90%; освітленість від 0 до 50 000 лк; концентрація CO<sub>2</sub> від 300 до 1500 ppm; похибка точності системи не більше ±1%.

4. Зміст пояснювальної записки (перелік питань, які підлягають розробці) огляд та аналіз методів вимірювання параметрів середовища, розробка структурної схеми, розробка принципової схеми, розробка алгоритму та програми роботи системи, розрахунок метрологічних характеристик, оцінка показників надійності роботи системи, безпека життєдіяльності та охорона праці

5. Перелік графічного матеріалу (з точним визначенням обов'язкових креслень) структурна схема, електрична принципова схема, перелік елементів, топологія друкованої плати, блок-схема алгоритму роботи системи

6. Консультанти з кваліфікаційної роботи бакалавра із зазначенням розділів роботи, що їх стосуються

| Розділ | Консультант | Підпис, дата   |                  |
|--------|-------------|----------------|------------------|
|        |             | Завдання видав | Завдання прийняв |
|        |             |                |                  |
|        |             |                |                  |
|        |             |                |                  |

7. Дата видачі завдання \_\_\_\_\_

### Календарний план

| № з/п | Назва етапів кваліфікаційної роботи                           | Термін виконання етапів роботи | Примітка |
|-------|---------------------------------------------------------------|--------------------------------|----------|
| 1     | Узгодження технічного завдання                                | 25.02.25 – 15.03.25            | Виконано |
| 2     | Огляд та аналіз методів вирощування хлорели                   | 25.02.25 – 15.03.25            | Виконано |
| 3     | Розробка структурної схеми                                    | 16.03.25 – 15.04.25            | Виконано |
| 4     | Розробка електричної принципової схеми                        | 16.04.25 – 24.04.25            | Виконано |
| 5     | Розробка топології друкованої плати                           | 25.04.25 – 09.05.25            | Виконано |
| 6     | Розробка алгоритму та програми системи                        | 10.05.25 – 24.05.25            | Виконано |
| 7     | Розрахунок метрологічних характеристик                        | 25.05.25 – 03.06.25            | Виконано |
| 8.    | Розрахунок надійності                                         | 04.06.25 – 15.06.25            | Виконано |
| 9     | Оформлення пояснювальної записки та презентаційного матеріалу | 03.06.25 – 17.06.25            | Виконано |

Студент

Дрозд М.В.

\_\_\_\_\_  
(підпис)

\_\_\_\_\_  
(прізвище та ініціали)

Керівник роботи

Чепюк Л. О.

\_\_\_\_\_  
(підпис)

\_\_\_\_\_  
(прізвище та ініціали)

## **АНОТАЦІЯ**

В даній кваліфікаційній роботі розроблено комп'ютеризовану інформаційно-вимірювальну систему для контролю параметрів установки, призначеної для вирощування хлорели. Система забезпечує моніторинг таких важливих параметрів, як температура, вологість, освітленість та рівень рН середовища. Для реалізації системи використано сучасні сенсори, мікроконтролер та програмне забезпечення для збору, обробки та візуалізації даних. Такий підхід дозволяє створити оптимальні умови для культивування мікроводоростей з метою підвищення продуктивності та якості біомаси. Розроблена система може бути застосована в лабораторних, навчальних та промислових умовах. Особливу увагу приділено точності вимірювань, стабільності роботи системи та зручності інтерфейсу користувача.

Ключові слова: хлорела, комп'ютеризована система, інформаційно-вимірювальна система, параметри середовища, мікроводорості.

## **ABSTRACT**

In this qualification thesis, a computerized information and measurement system was developed for monitoring the parameters of a unit designed for growing chlorella. The system provides monitoring of key parameters such as temperature, humidity, light intensity, and the pH level of the environment. Modern sensors, a microcontroller, and software for data collection, processing, and visualization were used to implement the system. This approach enables the creation of optimal conditions for cultivating microalgae in order to improve biomass productivity and quality. The developed system can be used in laboratory, educational, and industrial settings. Special attention is paid to measurement accuracy, system stability, and user interface convenience.

Keywords: chlorella, computerized system, information and measurement system, environmental parameters, microalgae.

## РЕФЕРАТ

Кваліфікаційна робота представлена пояснювальною запискою в обсязі 69 сторінок формату А4, записка містить вступ, основну частину, що складає вісім розділів, висновки, список використаних джерел та додатків. Темою роботи є розробка комп'ютеризованої інформаційно-вимірювальної системи для контролю за процесом вирощування хлорели.

Перший розділ містить опис призначення системи, вимоги до технічних характеристик, умов експлуатації, надійності, конструктивного оформлення та вихідних даних для проектування.

Другий розділ містить аналіз існуючих рішень для вирощування мікроводоростей, розглянуто типи установок, принципи їх роботи, класифікацію та обґрунтовано вибір форми резервуара.

Третій розділ містить функціональну структуру системи на основі мікроконтролера з описом основних компонентів: датчиків, дисплея, блоку живлення та інтерфейсів.

Четвертий розділ містить електричну принципову схему системи та обґрунтовано вибір елементної бази: сенсорів температури, рН, CO<sub>2</sub>, освітленості, дисплея та інших компонентів.

П'ятий розділ містить алгоритм функціонування системи та програмне забезпечення для збору, обробки, виводу та передачі даних на ПК.

Шостий розділ містить розрахунок похибок вимірювальних каналів і визначено точність системи згідно з вимогами (не більше  $\pm 1\%$ ).

Сьомий розділ містить аналіз і розрахунок показників надійності: наробіток на відмову, графік безвідмовної роботи та оцінка стабільності системи.

Останній розділ містить питання виробничої, екологічної безпеки та дій у надзвичайних ситуаціях при експлуатації фітотронної установки.

## ЗМІСТ

|                                                               | стор |
|---------------------------------------------------------------|------|
| ВСТУП.....                                                    | 8    |
| 1. ТЕХНІЧНЕ ЗАВДАННЯ.....                                     | 9    |
| 2. ОГЛЯД ТА АНАЛІЗ ФІТОТРОННИХ УСТАНОВОК ТА БІОРЕАКТОРІВ..... | 11   |
| 2.1. Фітотрон.....                                            | 11   |
| 2.2. Фітотронна установка.....                                | 16   |
| 3. РОЗРОБКА СТРУКТУРНОЇ СХЕМИ.....                            | 26   |
| 4. РОЗРОБКА ПРИНЦИПОВОЇ СХЕМИ.....                            | 29   |
| 4.1. Вибір датчика температури.....                           | 29   |
| 4.2. Вибір датчика вимірювання кислотності середовища .....   | 30   |
| 4.3. Вибір датчика рівня освітленості.....                    | 34   |
| 4.4. Вибір датчика вуглекислого газу.....                     | 36   |
| 4.5. Вибір мікроконтролера.....                               | 38   |
| 4.6. Вибір дисплею.....                                       | 41   |
| 4.7. Вибір блока живлення.....                                | 42   |
| 4.8. Розробка друкованої плати.....                           | 43   |
| 5. РОЗРОБКА АЛГОРИТМУ ТА ПРОГРАМИ РОБОТИ СИСТЕМИ              | 47   |
| 5.1. Розробка алгоритму.....                                  | 47   |
| 5.2. Розробка програми.....                                   | 49   |
| 6. РОЗРАХУНОК ПОХИБОК ВИМІРЮВАННЯ.....                        | 52   |
| 7. ОЦІНКА ПОКАЗНИКІВ НАДІЙНОСТІ РОБОТИ СИСТЕМИ.....           | 56   |
| 8. БЕЗПЕКА ЖИТТЄДІЯЛЬНОСТІ ТА ОХОРОНИ ПРАЦІ.....              | 60   |

|           |      |                 |        |      |                                                                                                                         |  |  |                                                                 |      |        |
|-----------|------|-----------------|--------|------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--|--|-----------------------------------------------------------------|------|--------|
|           |      |                 |        |      | МІМТ.480.003.003 – ПЗ                                                                                                   |  |  |                                                                 |      |        |
|           |      |                 |        |      |                                                                                                                         |  |  |                                                                 |      |        |
| Вим       | Лист | № докум.        | Підпис | Дата | Комп'ютеризована інформаційно-вимірювальна система для контролю за процесом вирощування хлорели<br>Пояснювальна записка |  |  | Лім.                                                            | Лист | Листів |
| Розроб.   |      | Дрозд М.В.      |        |      |                                                                                                                         |  |  |                                                                 |      |        |
| Перевір.  |      | Чепюк Л.О.      |        |      |                                                                                                                         |  |  |                                                                 | 6    | 69     |
| Реценз.   |      |                 |        |      |                                                                                                                         |  |  | Державний університет<br>«Житомирська політехніка»,<br>гр. МТ-4 |      |        |
| Н. Контр. |      | Чепюк Л.О.      |        |      |                                                                                                                         |  |  |                                                                 |      |        |
| Затверд.  |      | Подчашинський Ю |        |      |                                                                                                                         |  |  |                                                                 |      |        |

|                                           |      |
|-------------------------------------------|------|
|                                           | стор |
| 8.1.Виробнича безпека.....                | 60   |
| 8.2.Екологічна безпека.....               | 61   |
| 8.3.Безпека в надзвичайних ситуаціях..... | 62   |
| ВИСНОВКИ.....                             | 65   |
| СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ .....          | 66   |
| ДОДАТКИ.....                              | 68   |

## ВСТУП

Мікроклімат- це штучно створені кліматичні умови в закритих приміщеннях. Динамічна поведінка парникового мікроклімату являє собою комбінацію фізичних процесів, що включають передачу енергії та баланс маси. Мікроклімат можна регулювати за допомогою заходів контролю, таких як освітлення, вентиляція, збагачення повітря, щоб забезпечити, відповідні умови для росту і розвитку потрібного нам виду рослин. Процес зміни мікроклімату є складним, багатопараметричним і залежить від багатьох зовнішніх та внутрішніх чинників. Щоб автоматизувати процес підтримки сприятливого для рослин мікроклімату, необхідно здійснювати контроль і регулювання таких параметрів:

- Температура;
- Освітлення;
- Концентрація, тощо.

Стандартна система автоматичного забезпечення мікроклімату будується блочним принципом, коли контроль і регулювання зазначених параметрів здійснюється незалежними електронними приладами, кожен з яких відповідає за свої параметри.

Фітотрон- закрыта дослідницька оранжерея, яка використовується для вивчення взаємодії рослин із навколишнім середовищем. Це продукт дисциплін фізіології рослин і ботаніки. Метою випускної кваліфікаційної роботи є створення автоматизованої фітотронної установки для вирощування хлорели, необхідно постійно контролювати освітлення, температуру, концентрацію водоростей,

|      |      |          |        |      |                       |      |
|------|------|----------|--------|------|-----------------------|------|
|      |      |          |        |      | МІМТ.480.003.003 – ПЗ | Арк. |
| Змн. | Арк. | № докум. | Підпис | Дата |                       | 8    |

## 1. ТЕХНІЧНЕ ЗАВДАННЯ

### 1.1 Підстава для, розробки, призначення та галузь застосування

Підставою для розробки є завдання на дипломне проектування.

Система призначена для автоматизованого контролю параметрів середовища в установці для вирощування хлорели .

Потрібно розробити структурну схему системи та вибрати елементну базу, розробити електричну принципову схему системи вимірювання кутової швидкості рухомих об'єктів. Розробити програмно-алгоритмічне забезпечення та оцінити точність системи вимірювання.

Початок розробки – лютий 2025 р. Кінець розробки – червень 2025 року.

### 1.2 Умови експлуатації

1.2.1. Температура зовнішнього середовища від 0 до +45 °С

1.2.2. Відносна вологість не більше 80%

1.2.3. Атмосферний тиск 600-800 мм. рт. ст.

1.2.4. Хімічно активних речовин немає

1.2.5. Характер роботи неперервний

### 1.3 Вимоги до технічних характеристик

1.3.1. Об'єкт управління – установка для вирощування хлорели

1.3.2 Контрольні параметри:

– температура живильного середовища, °С: 15...35

– рівень освітлення, лк: 1000...10000

– рН середовища: 6.0...8.5

– концентрація розчиненого кисню, мг/л: 4...12

1.3.3. Похибка вимірювання параметрів, не більше  $\pm 1\%$

1.3.4. Дані мають відображатися на індикаторі та зберігатися в пам'яті мікроконтролера з можливістю передачі на ПК

1.3.5. Джерело живлення +5В постійного струму

|      |      |          |        |      |                       |      |
|------|------|----------|--------|------|-----------------------|------|
|      |      |          |        |      | MIMT.480.003.003 – ПЗ | Арк. |
|      |      |          |        |      |                       | 9    |
| Змн. | Арк. | № докум. | Підпис | Дата |                       |      |

#### **1.4 Вимоги до надійності**

Система є що відновлюється, не резервується, ремонтпридатною.

Наробіток на відмову складає не менше 11940,6 годин

#### **1.5 Вимоги до конструктивного оформлення**

Пристрій виконати на стандартній платі і в стандартному корпусі

|      |      |          |        |      |                              |      |
|------|------|----------|--------|------|------------------------------|------|
|      |      |          |        |      | <i>МІМТ.480.003.003 – ПЗ</i> | Арк. |
|      |      |          |        |      |                              | 10   |
| Змн. | Арк. | № докум. | Підпис | Дата |                              |      |

## 2. ОГЛЯД ТА АНАЛІЗ ФІТОТРОННИХ УСТАНОВОК ТА БІОРЕАКТОРІВ

### 2.1 Фітотрон

#### 2.1.1 Історія створення

Фітотрони об'єднали й розширили раніше окремі зусилля, щоб претендувати на повний контроль над усім навколишнім середовищем. Фітотрони створювали й відтворювали цілі складні кліматичні умови з багатьма змінними як у великих приміщеннях для пересування, так і в невеликих шафах. У перших фітотронах кожна окрема кімната підтримувалася при постійній унікальній температурі. Наприклад, австралійський фітотрон мав приміщення, в яких підтримувалась температура 9, 12, 16, 20, 23, 26, 30, 34 і 34 °C.

Оскільки деякі з найперших експериментів із контрольованим середовищем показали, що рослини по-різному реагують на денні та нічні температури, перші дослідження ефектів зміни денної та нічної температури демонстрували, що експериментатори переміщували свої рослини з вищої температури на нижчу впродовж дня або в рамках іншої змінної чи сталої програми. Це зробило змінну «температура» такою, якою можна експериментально керувати.

Навіть метод грубої сили, при якому послідовно перевіряли кожен змінну середовища та кожен різновид рослин, допомагав визначити конкретні умови навколишнього середовища, що забезпечують максимальний ріст.

Очікуючи, що більше знань неодмінно прийде завдяки досконалішим технологіям, наступне покоління фітотронів розширилось з точки зору технологічного охоплення, діапазону контрольованих змінних, а також рівня керування кожною змінною.

Фітотрон у Стокгольмі мав приміщення з контрольованою вологістю, спеціально виготовлений комп'ютер, а також приміщення з низькою

|      |      |          |        |      |                       |      |
|------|------|----------|--------|------|-----------------------|------|
|      |      |          |        |      | MIMT.480.003.003 – ПЗ | Арк. |
| Змн. | Арк. | № докум. | Підпис | Дата |                       | 11   |

температурою, що розширювало температурний діапазон до  $-25^{\circ}\text{C}$  для дослідження північних лісів.

Згодом технології фітотронів дозволили створювати компактні шафи, які могли бути налаштовані на будь-яку бажану комбінацію умов навколишнього середовища. Такі шафи все ще використовуються сьогодні [1].

Перший фітотрон був побудований під керівництвом Фріца Вурмолта Вента в Каліфорнійському технологічному інституті у 1949 році. Він фінансувався Фондом Гаррі Б. Ерхарта і офіційно називався Лабораторією досліджень рослин Ерхарта. Більш характерну назву він отримав, очевидно, з жартівливої розмови між біологами Каліфорнійського технологічного інституту Джеймсом Боннером і Семом Вайлдманом.

Згадуючи про походження цієї назви в 1980-х роках, Боннер зазначив: «Лабораторію рослин Ерхарта називали теплицею з контрольованим середовищем, але ми з моїм першим аспірантом Семом Вайлдманом, сидячи приблизно в 1950 році за чашкою кави, вирішили, що вона заслуговує на кращу або принаймні більш милозвучну назву. Ми вирішили назвати її фітотроном — “фіто” від грецького слова “рослина”, а “трон” — як у циклотроні, тобто “великій складній машині”».

Спочатку Вент був надзвичайно роздратований цією назвою. Але доктор Міллікен сприйняв це так: «Цю будівлю профінансував містер Ерхарт, і вона має зробити для біології рослин те саме, що циклотрон зробив для фізики», — і назвав її фітотроном.

Фітотрони поширилися по всьому світу з 1945 року до сьогодні — в Австралію, Францію, Угорщину, Україну, Англію та Сполучені Штати. Крім того, вони стали поштовхом до створення таких варіантів, як ClimaTron у Ботанічному саду штату Міссурі, Biotron в Університеті Вісконсин–Медісон, Ecotron в Імперському коледжі Лондона та Brisatron в Екологічній лабораторії річки Саванна [2].

|      |      |          |        |      |                       |      |
|------|------|----------|--------|------|-----------------------|------|
|      |      |          |        |      | MIMT.480.003.003 – ПЗ | Арк. |
| Змн. | Арк. | № докум. | Підпис | Дата |                       | 12   |

### 2.1.2 Класифікація. Види. Сфера застосування

За допомогою фітотронів вирішуються основні проблеми фітотронології, які більш відомі під терміном «фітотроніка». До них належать:

- відтворення кліматичних умов, що відповідають будь-якій місцевості та будь-якій порі року, для дослідження рослин, призначених для вирощування в нових сільськогосподарських районах;
- виявлення впливу окремих кліматичних чинників — експозиції, спектрального складу випромінювання, температури повітря та ґрунту, відносної вологості та швидкості руху повітря, вмісту в ньому газів (передусім вуглекислого газу та кисню) і їхніх комбінацій — на ріст, формування та продуктивність рослин;
- розробка методів прискорення селекційних досліджень і отримання кількох поколінь рослин протягом одного року в контрольованих умовах довкілля, а також швидке виявлення стійкості рослин до несприятливих зовнішніх факторів;
- виявлення та моделювання фізіологічних, біофізичних і біохімічних процесів у динаміці та в процесі онтогенезу;
- генетичні дослідження для вивчення механізмів спадковості;
- фітопатологічні та ентомологічні дослідження і розробка заходів боротьби з хворобами та шкідниками сільськогосподарських культур.

Таким чином, фітотрони, а також рослинні шафи та кліматичні камери є дуже складними технічними структурами.

Першим фітотроном дослідницького типу була лабораторія Ерхарта, створена понад 20 років тому відомим фізіологом рослин Ф. В. Вентом у Каліфорнійському технологічному інституті (США). Ефективність цієї установки у вирішенні як теоретичних, так і агротехнічних завдань сприяла швидкому зростанню кількості фітотронів у різних країнах світу (від Швеції до Австралії).

|      |      |          |        |      |                       |      |
|------|------|----------|--------|------|-----------------------|------|
|      |      |          |        |      | MIMT.480.003.003 – ПЗ | Арк. |
| Змн. | Арк. | № докум. | Підпис | Дата |                       | 13   |

Найбільш досконалий фітотрон був побудований неподалік від Парижа (Alvie-sur-Yvette). Він складається з 12 штучно освітлюваних камер (LL, LN і KS) та 8 теплиць. Ретельно продумана система коридорів, невеликих передпокоїв та робочого простору над камерами дозволяє вирощувати рослини й проводити дослідження з мінімальним втручанням людини. Забезпечена стерилізація повітря. Широко використовуються скло, оргскло, алюміній та інші сучасні матеріали. Його кліматичні параметри дуже обширні: температура від мінус 20 до 50 °C; відносна вологість від 0 до 95%; освітленість більше 30 кЛк.

Основними джерелами випромінювання в камерах, де вирощуються рослини, є люмінесцентні лампи класу люкс з відбивачами з поліруваного алюмінію. На кожній рамі (1,5<sup>2</sup>) встановлено 16 ламп по 120 Вт кожна і 16 ламп розжарювання потужністю 15 Вт. Таким чином, загальна встановлена потужність становить 1730 Вт/м<sup>2</sup>. Співвідношення потужностей короткохвильового (LL) і довгохвильового (LN) джерел випромінювання становить приблизно 3:1. Освітленість рослин становить 30 кЛк на відстані 50 см і 15 кЛк на відстані 100 см від джерела випромінювання. В окремих теплицях є ксенонові лампи з водяним охолодженням, які на відстані 2,5 м забезпечують додаткове освітлення природним світлом близько 12 кЛк.

Теми досліджень є дуже різноманітними: фотоперіодизм, ростові речовини, мінеральне живлення, генетичні та екологічні дослідження тощо.

Як і у французькому фітотроні, комбіновані випромінювачі (LL + LN = 3:1) використовуються у фітотроні Університету Дьюка (США), Університету Канберри (Австралія) та експериментальній сільськогосподарській станції Міністерства сільського та лісового господарства Японії на острові Хоккайдо, а також в інших установах. У нідерландських фітотронах (Інститут польових і лугових культур, Центр фізіологічних досліджень, Технологічний інститут садівництва тощо) лампи типу DRLF (HLRG-400) частіше використовуються разом із малими лампами розжарювання. Щоб уникнути перегріву рослин,

|      |      |          |        |      |                       |      |
|------|------|----------|--------|------|-----------------------|------|
|      |      |          |        |      | MIMT.480.003.003 – ПЗ | Арк. |
| Змн. | Арк. | № докум. | Підпис | Дата |                       | 14   |

джерела випромінювання відділені від робочого об'єму камер скляними стелями.

Оригінальний фітотрон був збудований у Каліфорнійському університеті (США). Його встановлено на спеціальну платформу, яка за допомогою потужного електроприводу обертається по вертикальній осі, слідуючи за рухом сонця. Звідси й назва — «роторний фітотрон» або солатрон. Фотоелемент, розташований на зовнішній стіні, контролює його рух. Сонячні промені, що падають на фотоелемент, активують механізм повороту. Із настанням темряви, за допомогою іншого фотоелемента, солатрон повертається у вихідне положення. Таким чином, передня стінка фітотрону завжди звернена до сонця. Оскільки цей університет розташований південніше 40°С. ш., а річна освітленість всередині фітотрону досягає 98% освітленості під відкритим небом, рослини ростуть практично без використання штучних джерел випромінювання.

Окрім описаних фітотронів, останніми роками з'явилися структури, подібні до них, наприклад, кліматрон, створений під керівництвом Ф. Вента в Сент-Луїсі (США). Це монументальна куполоподібна споруда висотою близько 30 м і діаметром понад 50 м, виконана зі сталі та плексигласу. У певних зонах і шарах кліматрону, який не має внутрішніх перегородок, були створені різні кліматичні умови земної кулі, де ростуть відповідні рослини. Температура та вологість повітря регулюються за допомогою прихованих труб, що подають кондиціоноване повітря.

Для вивчення росту коренів у низці країн були створені так звані ризотрони. Вони мають підземні тунелі зі спеціальними вікнами, які дозволяють систематично контролювати кореневу систему. Ризотрон регулює температуру, вологість повітря, вміст газів. Також передбачено зміну ґрунту залежно від умов експерименту.

Структури з штучним кліматом (включно з штучним випромінюванням) на сьогодні використовуються і в інших галузях природничих наук. У Японії,

|      |      |          |        |      |                       |      |
|------|------|----------|--------|------|-----------------------|------|
|      |      |          |        |      | МІМТ.480.003.003 – ПЗ | Арк. |
| Змн. | Арк. | № докум. | Підпис | Дата |                       | 15   |

наприклад, є акватрон, зоотрон і гомотрон. У США професор Сенн створив біотрон, у якому імітуються різноманітні екологічні комплекси за участю рослин, тварин і людей.

Через складність конструкцій великих фітотронів останнім часом іноді використовуються так звані мікрофітотрони. Мікрофітотрон — це пристрій, що складається з невеликої (від 1 до 5 м<sup>2</sup>) робочої камери для вирощування рослин і техніки, яка створює бажаний клімат. Мікрофітотрони займають відносно невелику площу й об'єм і можуть розміщуватись у будь-якому приміщенні, де є вода, каналізація та електрика. Їх часто називають вегетаційними кабінетами або камерами.

У нашій країні ведеться багато проєктних робіт, що дозволяє сподіватися, що найближчим часом науково-дослідні організації отримають достатню кількість шаф і камер різного типу.

Так, в інститутах Міністерства сільського господарства та Академії сільськогосподарських наук підготовлено до роботи кліматичний кабінет для прискореного вирощування рослин (до отримання насіння) з відтворюваними та контрольованими факторами довкілля. Це особливо важливо для робіт зі селекції злакових культур (селекційні центри). Шафа працюватиме у закритому приміщенні з такими параметрами: діапазон температур від 15 до 35 °С, відносна вологість не більше 85%, запиленість не повинна перевищувати санітарні норми. Тут відсутні різкі коливання тиску, температури, вологості, вібрації, сильні магнітні, радіаційні та електричні поля. Для її роботи потрібні такі системи: електропостачання (з напругою 220/380 В і частотою 50 Гц), системи водопостачання й каналізації, а також система примусової вентиляції [3].

|      |      |          |        |      |                       |      |
|------|------|----------|--------|------|-----------------------|------|
|      |      |          |        |      | МІМТ.480.003.003 – ПЗ | Арк. |
| Змн. | Арк. | № докум. | Підпис | Дата |                       | 16   |

## 2.2 Фітотронна установка

### 2.2.1 Хлорела

Хлорела є представником зелених водоростей — мікроскопічних водяних рослин. Хлорела є унікальним природним біологічним продуктом. Жодна інша водна чи наземна рослина не має такого комплексу корисних властивостей, як хлорела. Для виготовлення біодобавок використовується планктонний штам *Chlorella Vulgaris*, який вирізняється високим рівнем засвоєння світлової енергії (ефективність фотосинтетично активної радіації — 3,6%) і хімічним складом клітини залежно від вмісту: білків, незамінних амінокислот, вітамінів, мікроелементів і біологічно активних речовин, з якими не можуть конкурувати не лише водні, а й наземні рослини.

Завдяки корисним властивостям хлорела широко використовується в різних сферах людської діяльності:

- у сільському господарстві — для годування птахів, тварин, у бджільництві та рибництві;
- у харчовій промисловості;
- у медицині, косметології та парфумерії;
- для очищення стічних вод і реабілітації водойм;
- для виробництва кисню;
- для виробництва біопалива.

Хлорела є активним продуцентом білків, вуглеводів, ліпідів і вітамінів. Серед позаклітинних продуктів метаболізму хлорели — вітаміни: В1 (тіамін), В2 (рибофлавін), В3 (пантотенова кислота), В5 (нікотинова кислота), В6 (піридоксин), В12 (ціанокобаламін), Вс (фолієва кислота та її похідні), параамінобензойна кислота, Н (біотин), інозит.

Виробництво суспензії хлорели базується на фотосинтезі мікроводоростей, який відбувається в спеціальних акваріумах із використанням штучного освітлення та розчину вуглекислого газу.

|      |      |          |        |      |                       |      |
|------|------|----------|--------|------|-----------------------|------|
|      |      |          |        |      | MIMT.480.003.003 – ПЗ | Арк. |
| Змн. | Арк. | № докум. | Підпис | Дата |                       | 17   |

Для створення сприятливих умов для вирощування хлорели ідеально підходить фітотронна установка. Це обладнання, залежно від конструкції, може працювати в автоматичному або напівавтоматичному (за участі оператора) режимі; воно дозволяє вирощувати значні обсяги цих водоростей у промислових масштабах.

### **2.2.2 Загальні відомості про установку. Різновиди установок**

Виробництво суспензії хлорели ґрунтується на фотосинтезі мікроводоростей, який здійснюється в ємності з використанням штучного освітлення та розчину вуглекислого газу. Виробничий процес є безперервним. Розмноження хлорели відбувається в поживному розчині. Хлорелу вирощують протягом усього року, і її продуктивність не залежить від пори року. Таким чином, фітотрон або фотобіореактор забезпечує значно вищі темпи росту та рівні чистоти, ніж у природі або у середовищах, наближених до природних.

У наш час над розробкою найзручніших та найефективніших фітотронів або фотобіореакторів працюють вчені по всьому світу. Наразі існує кілька найбільш поширених типів установок, які виробляють суспензію з водоростей у промислових масштабах. Розглянемо деякі з них.

#### **2.2.2.1 Перероблені лабораторні ферменти**

Найпростішим підходом є модернізація відомих скляних ферментерів, які є сучасними на багатьох біотехнологічних дослідницьких і виробничих об'єктах по всьому світу. Наприклад, реактор для моху являє собою стандартну скляну посудину, в яку світло подається ззовні. Існуючі насадки використовуються для встановлення датчиків та газообміну. Цей тип досить поширений у лабораторному масштабі, але ніколи не використовувався у ширшому масштабі через обмежений розмір посудини.

|      |      |          |        |      |                              |      |
|------|------|----------|--------|------|------------------------------|------|
|      |      |          |        |      | <i>MIMT.480.003.003 – ПЗ</i> | Арк. |
|      |      |          |        |      |                              | 18   |
| Змн. | Арк. | № докум. | Підпис | Дата |                              |      |

### 2.2.2.2 Трубчаті фотобіореактори

Виготовлений зі скляних або пластикових труб, цей тип фотобіореактора успішно застосовується у промислових масштабах. Трубки орієнтуються горизонтально або вертикально й отримують живлення з центральної комунальної установки з насосом, датчиками, поживними речовинами та CO<sub>2</sub>. Трубчасті фотобіореактори (рис. 2.1) встановлюють по всьому світу — від лабораторного до промислового масштабу, наприклад, для виробництва каротиноїда астаксантину із зелених водоростей *Haematococcus pluvialis* або для виробництва харчової добавки із зелених водоростей *Chlorella vulgaris*. Ці фотобіореактори мають високий рівень чистоти та ефективну продуктивність. Біомасу можна виробляти високої якості, а висока концентрація біомаси наприкінці виробництва дозволяє здійснювати енергоефективну подальшу обробку.

У зв'язку з недавніми цінами на фотобіореактори, економічно доцільні концепції сьогодні застосовуються переважно на ринках з високою доданою вартістю, наприклад, харчові добавки чи косметика.

Переваги трубчастих фотобіореакторів у промисловому масштабі також використовуються в лабораторних умовах. Комбінація вищезгаданої скляної посудини з тонкою трубчастою спіраллю забезпечує належні показники виробництва біомаси в умовах лабораторного дослідження. Під контролем складної системи управління процесом, умови навколишнього середовища можуть бути точно відрегульовані до високого рівня.



Рис. 2.1- Трубчатий фотобіореактор

### 2.2.2.3 Ялинковий фотобіореактор

Альтернативний підхід представлений фотобіореактором, який має конусоподібну геометрію та спірально прикріплену напівпрозору систему з подвійним шлангом (рис. 2.2). У результаті утворюється конструкція, що нагадує ялинку. Трубчаста система складається з модулів і теоретично може бути масштабована на відкритому повітрі до сільськогосподарських масштабів. Розташування установки не має вирішального значення, подібно до інших закритих систем, і, отже, може використовуватись навіть на непридатних для обробітку землях. Вибір матеріалу має запобігати біообростанню та забезпечувати високі кінцеві концентрації біомаси. Поєднання турбулентності та замкнутої концепції повинно забезпечити чистоту процесу та високу експлуатаційну готовність.



Рис. 2.2 – Ялинковий фотобіореактор

### 2.2.2.4 Пластиковий пластинчатий фотобіореактор

Інший підхід до розробки можна побачити у конструкції на основі пластикових або скляних пластин (рис. 2.3). Пластини з різним технічним дизайном монтуються таким чином, щоб утворити тонкий шар суспензії для культивування, що забезпечує оптимізоване освітлення. Крім того, більш проста конструкція у порівнянні з трубчастими реакторами дозволяє

використовувати дешевші пластикові матеріали. Із сукупності різних концепцій, наприклад, були реалізовані конструкції з меандричним потоком або системи газифікації знизу, які показали хороші результати. Деякі невирішені питання — це стабільність матеріалу протягом усього терміну експлуатації або утворення біоплівки. Застосування в промислових масштабах обмежене масштабованістю систем на основі пластин.



Рис. 2.3 – Пластиковий пластинчатий фотобіореактор

#### 2.2.2.5 Горизонтальний фотобіореактор з зигзагоподібною геометрією

Цей тип фотобіореактора (рис. 2.4) має пластинчасту базову геометрію з піками та западинами, розташованими на регулярній відстані. Така геометрія забезпечує розподіл падаючого світла на більшу площу, що відповідає ефекту розсіювання. Це також допомагає вирішити основну проблему при фототрофному культивуванні, адже більшість видів мікробіодоростей чутливо реагують на високу інтенсивність світла. Більшість мікробіодоростей досягають світлового насичення вже при інтенсивностях, які значно нижчі за максимальну денну інтенсивність — приблизно 2000 Вт/м<sup>2</sup>. Одночасно стає можливим використання більшої кількості світла для підвищення ефективності фотоперетворення. Змішування здійснюється за допомогою

роторного насоса, який викликає циліндричне обертання культурального розчину. На відміну від вертикальних конструкцій, горизонтальні реактори містять лише тонкі шари середовища з відповідно низьким гідродинамічним тиском. Це позитивно впливає на необхідне енергоспоживання і водночас знижує матеріальні витрати.

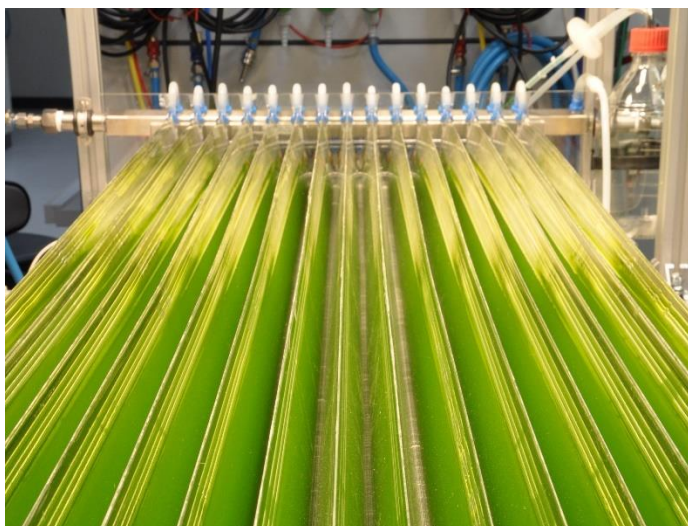


Рис. 2.4 - Горизонтальний фотобіореактор

#### **2.2.2.6 Фольговий фотобіореактор**

Ринковий тиск цін призвів до розробки типів фотобіореакторів на основі фольги. Недорога плівка з ПВХ або ПЕ монтується для формування пакетів або судин, які покривають суспензії водоростей і піддають їх впливу світла. Цінові діапазони типів фотобіореакторів були розширені за допомогою систем фольги. Слід мати на увазі, що ці системи мають обмежену стійкість, оскільки фольга повинна час від часу замінюватися. Для повних залишків необхідно також розрахувати інвестиції у необхідні системи підтримки.

#### **2.2.2.7 Пористий субстратний біореактор**

Біореактор пористих субстратів (PSBR), розроблений у Кельнському університеті, також відомий як двошарова система, використовує новий принцип відокремлення водоростей від поживного розчину за допомогою

|      |      |          |        |      |                       |      |
|------|------|----------|--------|------|-----------------------|------|
|      |      |          |        |      | MIMT.480.003.003 – ПЗ | Арк. |
| Змн. | Арк. | № докум. | Підпис | Дата |                       | 22   |

пористої поверхні реактора, на якій мікрородості затримуються у біоплівках. Ця нова процедура зменшує до 100 разів кількість рідини, необхідної для роботи, порівняно з існуючою технологією, яка вирощує водорості у суспензіях. Таким чином, процедура PSBR значно знижує необхідну енергію, одночасно розширюючи портфоліо водоростей, які можна культивувати.

Ці способи вирощування водоростей добре підходять для промислових масштабів, таких як експорт за кордон тощо. Однак для менш масштабного виробництва, наприклад для постачання продукції в одну конкретну точку, використовують менш масивні споруди, які за ефективністю та якістю виробництва потрібного виду сировини ні в чому не поступаються.

### 2.2.3 Класифікація фотобіореакторів

Всі відомі типи (рис. 2.5) фотобіореакторів можуть бути класифіковані за наступними критеріями: форма контейнера, ступінь ізоляції від зовнішнього середовища та тип освітлення.

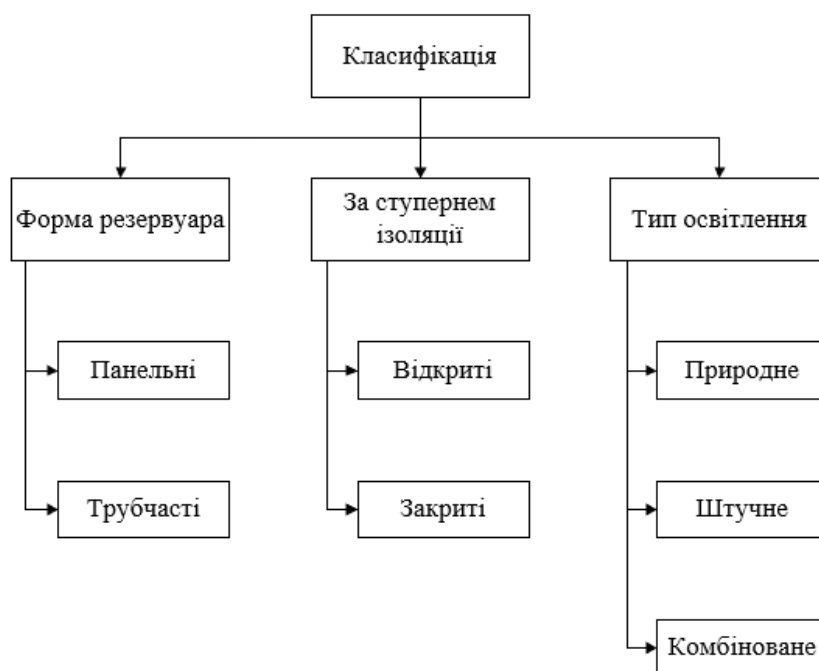


Рис. 2.5- Класифікація типів фотобіореакторів

Для вирощування хлорели використовується декілька видів фітотронних установок :

- установка мікробіореакторного типу BioLector XT – з продуктивністю до 48 паралельних культур у мікролунках об'ємом 1–2 мл. Розміри змінні, залежно від конфігурації лабораторного стенду.
- установки серії панельних фотобіореакторів – FPV-70 із продуктивністю ~70 л суспензії. Розміри:  $1,0 \times 0,2 \times 1,2$  м.
- трубчастий фотобіореактор з параболічними колекторами – середньою продуктивністю 200–300 л/день. Розміри змінні, залежно від довжини трубок (до 30–50 м).
- установка колонного типу для зовнішнього культивування – об'єм 51 л, продуктивність залежить від температури середовища та подачі CO<sub>2</sub>. Розміри: приблизно  $1,5 \times 0,3 \times 1,5$  м.
- плівкові фотобіореактори на основі ПВХ або поліетиленової плівки – об'ємом 20–200 л, змінної продуктивності. Розміри: від  $1 \times 0,5 \times 0,5$  м до  $2 \times 1 \times 1$  м.

#### 2.2.4 Моделювання найбільш ресурсоефективної форми

Культиватор хлорели являє собою ємність для суспензії хлорели з зануреними в неї джерелами світла оригінальної конструкції. Також він оснащений іншими пристроями, які забезпечують оптимальні умови для розмноження хлорели в спеціальному поживному середовищі. До комплекту установки також входить набір реактивів для приготування поживного середовища, суспензія маточної культури хлорели та інше.

Принцип роботи установки базується на використанні світлового фактора як необхідної умови фотосинтезу та росту мікроводоростей. Вирощування хлорели проводиться в спеціальному поживному середовищі при визначеній температурі. Загальний цикл роботи культиватора складається з трьох етапів: – запуск культиватора в роботу;

|      |      |          |        |      |                       |      |
|------|------|----------|--------|------|-----------------------|------|
|      |      |          |        |      | MIMT.480.003.003 – ПЗ | Арк. |
| Змн. | Арк. | № докум. | Підпис | Дата |                       | 24   |

- культивування хлорели;
- злив готової суспензії хлорели і підготовка культиватора до наступного запуску.

Правильне культивування хлорели дозволяє підтримувати необхідну температуру суспензій у контейнерах культиватора в оптимальному діапазоні (в автоматичному режимі), регулярно перемішуючи та спостерігаючи за швидкістю збільшення щільності клітин і загальним станом суспензії хлорели.

В ході роботи були розглянуті всі можливі та найпопулярніші варіанти (рис. 2.6) фітотронних резервуарів для вирощування водорості хлорела. Ємність повинна відповідати необхідним умовам освітлення, температури, повітрообміну та концентрації. У кожного з варіантів є свої плюси і мінуси. Розглянемо детальніше кожен із варіантів і обґрунтуємо свій вибір на користь циліндричної ємності. Розглядатимемо це з урахуванням необхідної дози освітлення.

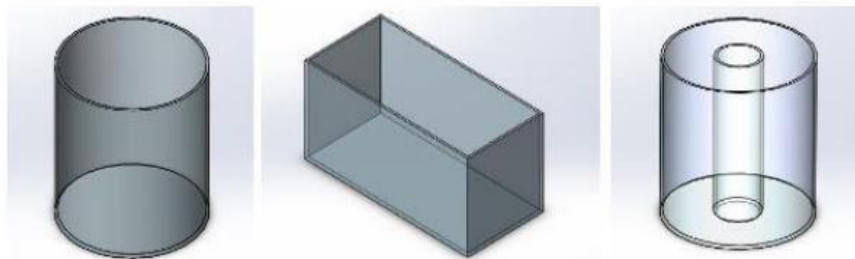


Рис.2.6 – Можливі форми резервуарів

Для кожного з типів резервуарів були підібрані різні освітлювальні установки та проведено низку розрахунків світлотехнічних характеристик параметрів. В якості джерел світла використовувалися світлодіоди.

Розглянувши всі можливі варіанти та виходячи з розрахунків, зображених на рисунку, а також проаналізувавши отримані результати, зроблено висновок, що найбільш рівномірний розподіл випромінювання спостерігається в ємностях циліндричної форми. Світлодіоди розташовані рівномірно по всій

площі всередині самого резервуара, і суспензія отримує достатню кількість світла, на відміну від резервуарів прямокутної форми, де на місцях стиків спостерігаються втрати необхідного випромінювання.

Також резервуар досить простий у виготовленні, а вартість матеріалів не є надто великою, що також відіграє важливу роль.

|      |      |          |        |      |                       |      |
|------|------|----------|--------|------|-----------------------|------|
|      |      |          |        |      | МІМТ.480.003.003 – ПЗ | Арк. |
|      |      |          |        |      |                       | 26   |
| Змн. | Арк. | № докум. | Підпис | Дата |                       |      |

### 3. РОЗРОБКА СТРУКТУРНОЇ СХЕМИ

Фітотронна установка, розроблена для вирощування хлорели, функціонує як замкнене середовище, в якому підтримуються штучно створені мікрокліматичні умови, оптимальні для розвитку мікроводоростей. Основними параметрами, які підлягають контролю, є температура повітря та середовища, рівень освітленості, кислотність поживного розчину (рН) та концентрація вуглекислого газу. Кожен із цих параметрів має чітко визначений діапазон значень, вихід за межі якого може призвести до зниження ефективності росту культури або її загибелі.

Тому на основі цих вимог було створена функціональна схема для інформаційно-вимірювальної системи для контролю за процесом вирощування хлорели (рис.3.1).

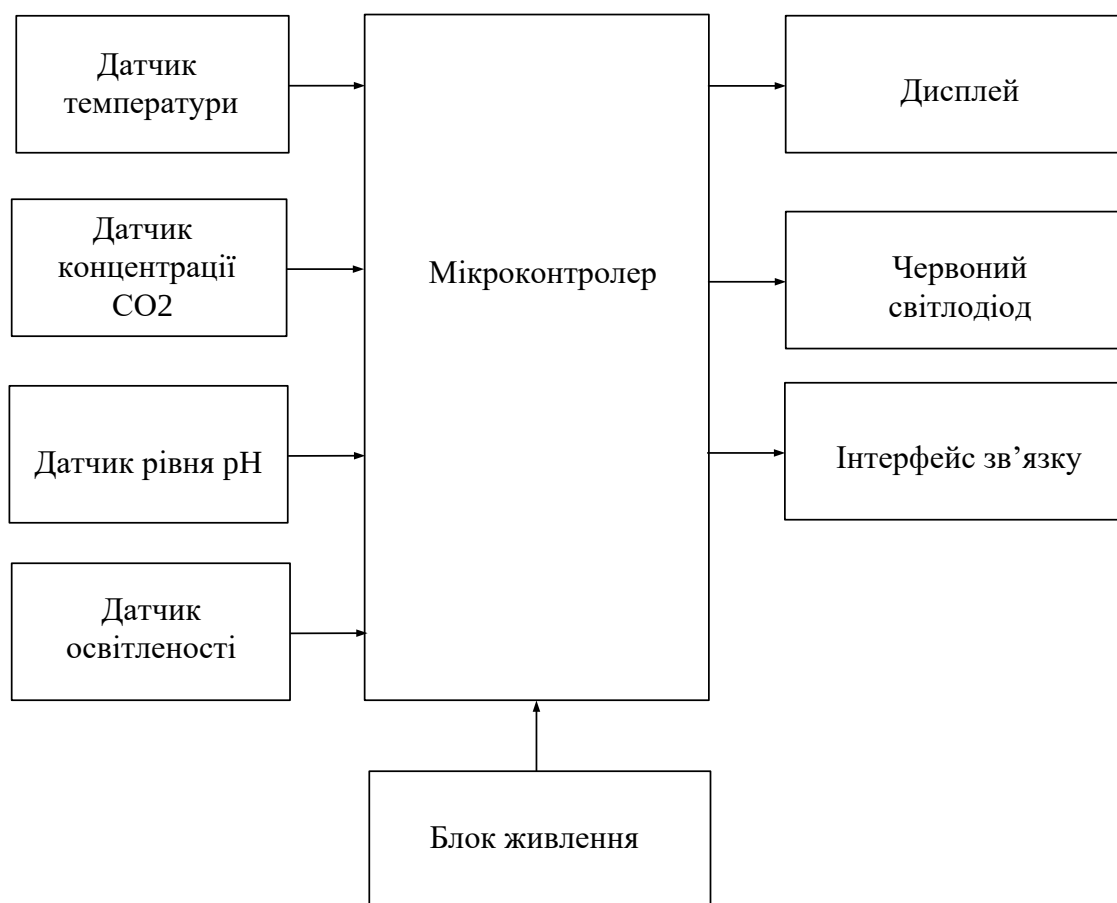


Рис. 3.1 - Структурна схема комп'ютеризованої інформаційно-вимірювальної системи контролю за процесом вирощування хлорели

Структурна схема системи на основі мікроконтролера складається з наступних блоків:

- Блок керування (мікроконтролер);
- Блок живлення
- Елементи відображення інформації:
  - Дисплей;
  - Червоний світлодіод;
- Датчики:
  - Датчик температури;
  - Датчик концентрації CO<sub>2</sub>;
  - Датчик рівня pH;
  - Датчик освітленості;
- Роз'єм для виконавчих приладів:
  - Світлодіод ;
- Інтерфейс з'язку

**Мікроконтролер** отримує інформацію з давачів, обробляє її згідно записаної програми, та надсилає керуючі сигнали на виконавчі пристрої;

**Блок живлення.** Спеціальний пристрій, який перетворює змінну високу напругу загальної мережі 220 В у низьку постійну 5 В, яка необхідна для живлення усієї системи .

**Дисплей та червоний світлодіод.** Уся інформація про стан параметрів в фітотроні, задані установки, а також повідомлення про відхилення від норми відображаються на дисплеї та сигналізуються червоним світлодіодом.

**Датчик температури.** Він вимірює температуру в фітотроні. Це необхідно для підтримання оптимальних умов вирощування хлорели, оскільки температура безпосередньо впливає на інтенсивність фотосинтезу та швидкість росту мікроводорості.

|      |      |          |        |      |                       |      |
|------|------|----------|--------|------|-----------------------|------|
|      |      |          |        |      | MIMT.480.003.003 – ПЗ | Арк. |
| Змн. | Арк. | № докум. | Підпис | Дата |                       | 28   |

**Датчик концентрації CO<sub>2</sub>.** Він призначений для оцінки рівня вуглекислого газу в повітрі фітотрону. Це необхідно для контролю якості повітря, що впливає на ефективність фотосинтезу та розвиток хлорели.

**Датчик рівня рН.** Він вимірює кислотність живильного середовища. Це необхідно для підтримання стабільного хімічного балансу, що забезпечує нормальний розвиток і життєдіяльність хлорели.

**Датчик освітленості.** Він контролює рівень світла в фітотроні. Це необхідно для забезпечення достатнього освітлення, яке є ключовим фактором для фотосинтезу хлорели.

**Інтерфейс зв'язку.** Забезпечує передавання даних з мікроконтролера на комп'ютер через USB-порт. Це необхідно для моніторингу параметрів системи та збереження інформації для подальшого аналізу.

|      |      |          |        |      |                       |      |
|------|------|----------|--------|------|-----------------------|------|
|      |      |          |        |      | МІМТ.480.003.003 – ПЗ | Арк. |
| Змн. | Арк. | № докум. | Підпис | Дата |                       | 29   |

## 4. РОЗРОБКА ПРИНЦИПОВОЇ СХЕМИ

### 4.1 Вибір датчика температури

Для вимірювання температури було обрано цифровий температурний датчик DS18B20 у герметичному корпусі. Він має високу точність ( $\pm 0,5\text{ }^{\circ}\text{C}$ ), зручність підключення по 1-Wire інтерфейсу та придатний для роботи в рідкому середовищі. Це дає змогу проводити вимірювання без додаткових перетворювачів сигналу. (рис. 4.1)



Рис. 4.1- Датчик температури

DS18B20 використовується для точного вимірювання температури у повітряному або рідкому середовищі. Особливістю даного датчика є його цифровий принцип роботи — він не потребує аналогових перетворень, що суттєво спрощує підключення до мікроконтролера, наприклад, Arduino.

Датчик має сталевий корпус що дозволяє безпечно занурювати його у суспензію хлорели. Такий датчик стійкий до вологи та корозії, не реагує з поживним середовищем і забезпечує стабільні та точні показники протягом тривалого часу. Точність вимірювання температури становить близько  $\pm 0,5^{\circ}\text{C}$  чого цілком достатньо для забезпечення оптимальних умов культивування.

|      |      |          |        |      |                       |      |
|------|------|----------|--------|------|-----------------------|------|
|      |      |          |        |      | MIMT.480.003.003 – ПЗ | Арк. |
| Змн. | Арк. | № докум. | Підпис | Дата |                       | 30   |

DS18B20 працює за протоколом 1-Wire, що дозволяє зменшити кількість дротів при підключенні, а також під'єднувати кілька таких датчиків до одного цифрового входу. Це особливо зручно для систем моніторингу, де потрібно контролювати температуру в різних точках установки.

В таблиці 4.1 наведені технічні характеристики для датчика температури DS18B20:

Таблиця 4.1- технічні характеристики

|                                 |                                 |
|---------------------------------|---------------------------------|
| Діапазон вимірювання температур | -55...+125°C                    |
| Точність вимірювання            | ±0,5°C у діапазоні -10...+85 °C |
| Інтерфейс                       | 1-Wire                          |
| Живлення                        | 3-5.5V                          |
| Роздільна здатність             | 9-12 біт                        |
| Корпус                          | герметичний зонд                |

#### 4.2 Вибір датчика вимірювання кислотності середовища

Для вимірювання pH було обрано pH-датчик SEN0161-V2 виробництва DFRobot (рис. 4.2).



Рис. 4.2- pH-датчик SEN0161-V2

Таблиця 4.2- Технічні характеристики

|                      |                  |
|----------------------|------------------|
| Діапазон вимірювання | 0-14 рН          |
| Точність             | ±0,1 рН або 25°C |
| Напруга              | 3,3-5,5 В        |
| Робоча температура   | 5-60°C           |

Модуль аналогового введення SEN0161-V2 призначений для зчитування аналогових сигналів від різних датчиків, зокрема для контролю фізичних величин, таких як температура, вологість, освітленість та інші параметри навколишнього середовища.

Основні функції модуля:

- Перетворення аналогового сигналу від датчика у цифровий для подальшої обробки;
- Передача вимірянних даних на мікроконтролер або інший пристрій збору інформації;
- Підтримка стабільного та точного вимірювання у різних умовах експлуатації.

Модуль використовується в системах автоматичного контролю та моніторингу технологічних процесів, а також у навчальних та дослідницьких проектах.

Пристрій має гальванічно розділені ланцюги для живлення, вхідних сигналів та інтерфейсів, що забезпечує безпеку і надійність роботи у складних електромагнітних умовах.

SEN0161-V2 сумісний з різними мікроконтролерами, що підтримують аналоговий ввід, і легко інтегрується в різноманітні системи автоматизації.

Модуль SEN0161-V2 є високоточним аналоговим рН-метром із цифровим виходом, призначеним для вимірювання рівня кислотності (рН) розчинів у режимі реального часу. Він побудований на основі рН-підсилювача та 16-

бітного АЦП, що дозволяє досягти високої точності вимірювання. Основні особливості модуля наведено нижче:

- Широкий діапазон вимірювання рН: від 0 до 14 рН, що забезпечує можливість роботи як у кислих, так і в лужних середовищах;
- Висока точність: забезпечується завдяки вбудованому 16-бітному аналого-цифровому перетворювачу (АЦП), що дозволяє отримувати стабільні та достовірні значення навіть при незначних змінах у середовищі;
- Підтримка калібрування: модуль підтримує дво- або триточкове калібрування, що значно покращує точність при зміні умов використання (температури, типу середовища тощо);
- Вбудований температурний датчик: дозволяє автоматично компенсувати похибки, пов'язані зі зміною температури, що особливо важливо при довготривалих спостереженнях;
- Сумісність з популярними платформами: модуль легко підключається до Arduino, Raspberry Pi, STM32 та інших мікроконтролерів, що спрощує його інтеграцію в різноманітні системи автоматизації;
- Підключення через UART (послідовний порт): забезпечує надійний обмін даними між модулем і основною обчислювальною системою;
- Гальванічна розв'язка: зменшує ризики впливу перешкод і потенційної шкоди від електричних завад, що особливо актуально для промислових систем;
- Світлодіодна індикація стану: дозволяє оперативно оцінити стан живлення модуля, процесу калібрування та активності обміну даними;
- Компактні розміри (42 мм × 32 мм): модуль зручний для встановлення в обмеженому просторі лабораторних і польових установок;
- Живлення 3.3–5.0 В: дозволяє використовувати модуль з більшістю популярних мікроконтролерів без необхідності додаткових перетворювачів напруги.

|      |      |          |        |      |                       |      |
|------|------|----------|--------|------|-----------------------|------|
|      |      |          |        |      | MIMT.480.003.003 – ПЗ | Арк. |
| Змн. | Арк. | № докум. | Підпис | Дата |                       | 33   |

Усі ці характеристики роблять SEN0161-V2 ефективним та зручним інструментом для побудови інформаційно-вимірювальних систем, зокрема у сферах моніторингу водних ресурсів, сільського господарства, біотехнологій, гідропоніки, акваріумістики та наукових досліджень.

Модуль SEN0161-V2 призначений для експлуатації в умовах, що відповідають вимогам до лабораторного, дослідницького або освітнього обладнання. Робоче середовище має бути сухим, чистим і захищеним від потрапляння вологи, пилу та агресивних хімічних парів, оскільки сам модуль не має герметичного або пилозахищеного корпусу. Робоча температура навколишнього середовища повинна перебувати в межах від 0 до +60 °C, що забезпечує стабільну роботу електронних компонентів та виключає температурні спотворення результатів вимірювання. Відносна вологість повітря не повинна перевищувати 95 %, при цьому необхідно уникати утворення конденсату на поверхні модуля, оскільки надмірна волога може спричинити коротке замикання або пошкодження плати. Живлення модуля має здійснюватися стабільною напругою в межах 3.3–5.0 В постійного струму. Для уникнення електричних завад і збоїв у роботі рекомендується встановлювати модуль подалі від джерел сильних електромагнітних полів, таких як трансформатори, електродвигуни або потужні передавачі. Оскільки модуль призначений для точних вимірювань, необхідно періодично виконувати його калібрування за допомогою стандартних буферних розчинів рН (наприклад, рН 4.00, рН 7.00, рН 10.00), особливо перед першим використанням або після тривалого зберігання. Зберігання модуля також повинно здійснюватися в умовах, які виключають вплив вологи, високої температури, механічних пошкоджень та електростатичних розрядів. Дотримання зазначених умов експлуатації є обов'язковим для забезпечення точності, надійності та тривалого строку служби приладу у складі комп'ютеризованої вимірювальної системи.

|      |      |          |        |      |                       |      |
|------|------|----------|--------|------|-----------------------|------|
|      |      |          |        |      | MIMT.480.003.003 – ПЗ | Арк. |
|      |      |          |        |      |                       | 34   |
| Змн. | Арк. | № докум. | Підпис | Дата |                       |      |

### 4.3 Вибір датчика рівня освітленості

Вимірювання рівня освітленості є одним із ключових параметрів у фітотронних установках, оскільки світло безпосередньо впливає на процес фотосинтезу у мікрводоростей, таких як хлорела. Правильний вибір датчика освітленості дозволяє забезпечити точний контроль інтенсивності світла та своєчасне регулювання його рівня для створення оптимальних умов росту.

Для контролю освітленості у фітотронній установці було обрано цифровий датчик BH1750. Цей датчик має широкий діапазон вимірювання від 1 до 65535 люкс, що дозволяє покривати як низькі, так і високі рівні освітлення, характерні для фотосинтезу мікрводоростей. BH1750 працює за стандартом I2C, що забезпечує просте підключення до мікроконтролера Arduino Nano.

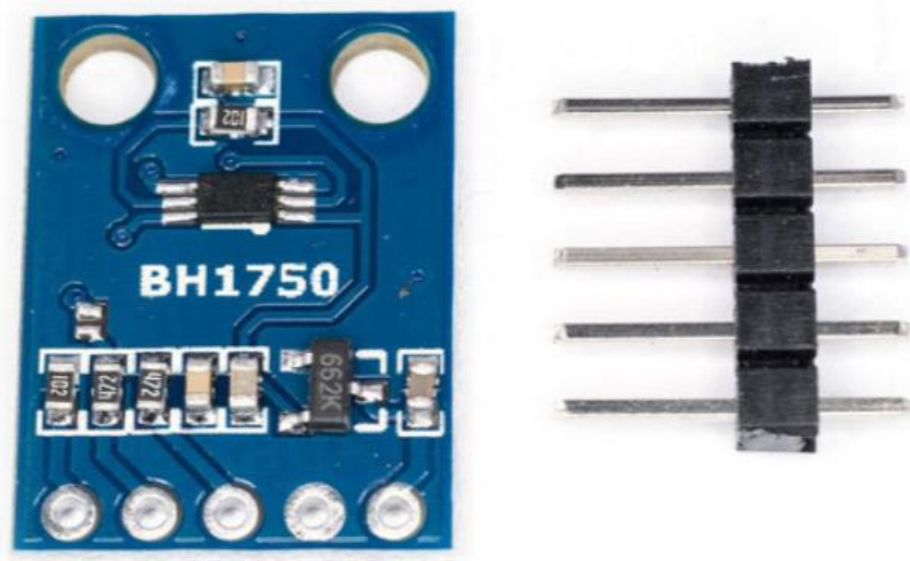


Рис. 4.3- Датчик BH1750

Основні технічні характеристики датчика BH1750 наведені в таблиці 4.3.

|      |      |          |        |      |                       |      |
|------|------|----------|--------|------|-----------------------|------|
|      |      |          |        |      | МІМТ.480.003.003 – ПЗ | Арк. |
| Змн. | Арк. | № докум. | Підпис | Дата |                       | 35   |

Таблиця 4.3- технічні характеристики

|                                   |             |
|-----------------------------------|-------------|
| Діапазон вимірювання освітленості | 1-65635 Lux |
| Точність                          | ±20%        |
| Напруга                           | 3-5 В       |
| Інтерфейс                         | I2C         |
| Час оновлення даних               | ~120 мс     |

Датчик ВН1750 відрізняється простотою інтеграції та стабільністю показників. Завдяки цифровому інтерфейсу I2C відпадає необхідність у складних схемах аналого-цифрового перетворення, що знижує рівень шумів і помилок вимірювань.

Особливості ВН1750:

- Широкий динамічний діапазон дозволяє використовувати датчик як у слабкому, так і у яскравому освітленні.
- Низьке енергоспоживання дає змогу застосовувати його у безперервно працюючих системах без зайвих витрат енергії.
- Висока швидкість оновлення даних забезпечує оперативний контроль і швидку реакцію системи на зміни освітлення.
- Вбудовані калібрувальні параметри забезпечують стабільність і надійність вимірювань протягом тривалого часу.

Датчик освітленості ВН1750 призначений для надійної роботи в широкому спектрі температурних умов, що робить його придатним для використання у лабораторних та виробничих установках. Його робочий температурний діапазон становить від -40 °С до +85 °С, що дозволяє експлуатувати прилад як в умовах низьких температур, так і при підвищених температурних навантаженнях. Це особливо важливо для фітотронних установок, де температурні умови можуть значно варіюватися залежно від режиму вирощування.

Вологість навколишнього середовища також є важливим фактором, що впливає на довговічність і точність роботи датчика. ВН1750 здатний працювати при відносній вологості до 80 % при температурі до 31 °С без негативних наслідків. Проте, слід уникати конденсації вологи, оскільки накопичення крапель води на поверхні сенсора може призвести до помилкових вимірювань або виходу датчика з ладу.

Оскільки датчик не має вбудованого захисту від пилу та вологи, для експлуатації в агресивних середовищах він повинен бути розміщений у захисному корпусі або зоні, яка запобігає проникненню сторонніх часток та вологи. Це забезпечує стабільність вимірювань і продовжує термін служби пристрою.

Для коректного функціонування ВН1750 потребує стабільного живлення в межах 3.3–5 В постійного струму. Перевищення або зниження напруги живлення може негативно вплинути на роботу сенсора, викликати похибки у вимірюваннях або навіть призвести до пошкодження електронних компонентів. Тому джерело живлення системи повинно бути якісним і мати засоби стабілізації напруги.

Важливим аспектом є також розташування датчика в системі. ВН1750 використовує інтерфейс I2C для обміну даними, який є чутливим до електромагнітних завад. Тому слід уникати встановлення датчика в безпосередній близькості до джерел сильних електромагнітних полів, таких як потужні двигуни, індуктивні нагрівачі чи трансформатори. Надмірні завади можуть викликати збої у передачі даних або спотворення сигналу, що призведе до некоректних результатів вимірювань.

Загалом, дотримання рекомендованих умов експлуатації гарантує довготривалу, стабільну і точну роботу датчика ВН1750 у складі фітотронної установки, забезпечуючи ефективний контроль параметрів освітленості для оптимального росту хлорели.

|      |      |          |        |      |                       |      |
|------|------|----------|--------|------|-----------------------|------|
|      |      |          |        |      | MIMT.480.003.003 – ПЗ | Арк. |
| Змн. | Арк. | № докум. | Підпис | Дата |                       | 37   |

#### 4.4 Вибір датчика вуглекислого газу

Для вимірювання концентрації газів у системі було обрано датчик MQ-135. Цей датчик є напівпровідниковим газовим сенсором, що забезпечує високу чутливість до різних шкідливих газів, включно з аміаком, сірководнем, бензолом та вуглекислим газом. Хоча MQ-135 не спеціалізований виключно на CO<sub>2</sub>, він здатний ефективно визначати загальну якість повітря в приміщенні.

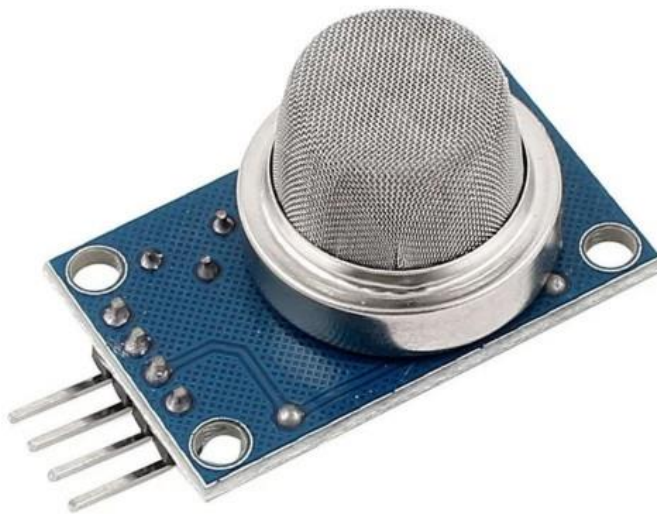


Рис. 4.4- Датчик MQ-135

Основні технічні характеристики датчика MQ-135 наведено в таблиці 4.4:

Таблиця 4.4 технічні характеристики

|                                         |            |
|-----------------------------------------|------------|
| Діапазон вимірювання концентрації газів | 10-1000 рп |
| Напруга живлення                        | 5 В        |
| Споживаний струм                        | 150 мА     |
| Час розігріву                           | 20 с       |

Датчик MQ-135 відомий своєю універсальністю та доступністю. Він має швидку реакцію на наявність різних шкідливих газів і дозволяє отримувати аналоговий сигнал, який легко опрацьовувати за допомогою мікроконтролера.

Основні особливості MQ-135:

- Чутливість до широкого спектру газів, що дозволяє оцінювати загальну якість повітря, а не лише концентрацію окремого газу.
- Відносно низька ціна та простота використання роблять його популярним у різних проектах з контролю довкілля.
- Потрібен період прогріву перед початком точних вимірювань для стабілізації показників.
- Необхідність калібрування для коректного визначення концентрації конкретних газів.
- Аналоговий вихід вимагає наявності аналого-цифрового перетворювача на мікроконтролері.

Датчик MQ-135 призначений для роботи у температурному діапазоні від -10 до +50 °C і рекомендований для застосування у приміщеннях з відносною вологістю до 95 % без конденсації. Через чутливість до температури і вологості, датчик слід встановлювати у захищених від прямих впливів навколишнього середовища зонах.

Для забезпечення стабільної роботи датчика необхідно дотримуватись рекомендованих умов живлення на рівні 5 В та уникати різких коливань напруги. Перед початком роботи датчик потребує попереднього прогріву, що становить близько 20 секунд, для виходу на стабільний режим вимірювань.

Розміщення датчика має виключати вплив сильних електромагнітних завад, які можуть викликати помилки в аналого-цифровому перетворенні та обробці сигналу. Завдяки дотриманню цих умов забезпечується точність і надійність контролю газового середовища у фітотронній установці.

|      |      |          |        |      |                       |      |
|------|------|----------|--------|------|-----------------------|------|
|      |      |          |        |      | MIMT.480.003.003 – ПЗ | Арк. |
| Змн. | Арк. | № докум. | Підпис | Дата |                       | 39   |

#### 4.5 Вибір мікроконтролера

У фітотронній установці для вирощування хлорели використовується низка сенсорів, що забезпечують безперервний контроль основних параметрів середовища: температури, кислотності, рівня рідини та концентрації суспензії. Збір та обробка даних з усіх датчиків реалізується за допомогою мікроконтролера Arduino Nano, який виступає центральним вузлом інформаційно-вимірювальної системи (рис. 4.5).

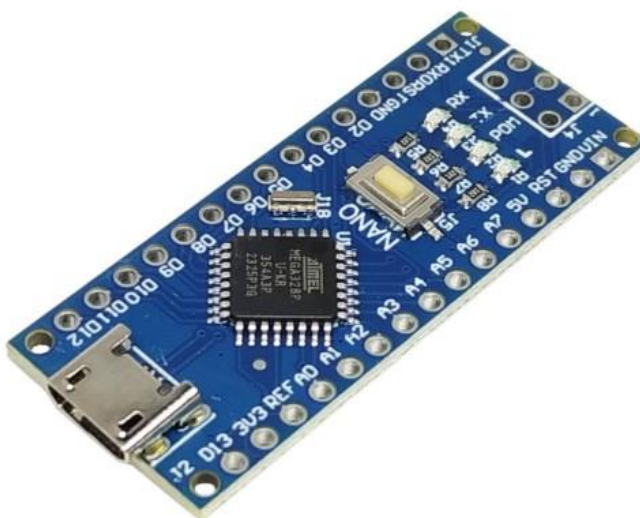


Рис. 4.5- Мікроконтролер Arduino Nano

Зібрані дані обробляються мікроконтролером у режимі реального часу та можуть використовуватись для:

- виведення поточних значень на дисплей;
- запису в пам'ять або передавання через серійний порт (USB, Bluetooth, Wi-Fi);
- керування виконавчими пристроями (нагрів, аерація, освітлення тощо).

Arduino Nano є однією з найпоширеніших та найзручніших платформ для створення невеликих автоматизованих систем збору, обробки та передачі даних. У контексті фітотронної установки він виконує роль центрального

елемента, який об'єднує роботу датчиків, аналізує параметри та керує виконавчими пристроями.

Arduino побудований на базі мікроконтролера ATmega328P і оснащений кварцовим генератором з тактовою частотою 16 МГц, що забезпечує стабільну роботу системи в режимі реального часу. Пристрій підтримує підключення до 14 цифрових входів/виходів, з яких 6 можуть використовуватися для широтно-імпульсної модуляції (PWM), а також має 8 аналогових входів для обробки сигналів від датчиків, таких як рН, каламутність тощо.

Завдяки вбудованим інтерфейсам UART, I2C та SPI, Arduino Nano легко інтегрується з широким спектром периферійних пристроїв — сенсорами, модулями реле, дисплеями та модулями зв'язку (наприклад, Bluetooth або Wi-Fi). Живлення може здійснюватися як через USB-порт, так і через зовнішнє джерело напругою 7–12 В.

Arduino Nano має 32 КБ флеш-пам'яті для зберігання програми, 2 КБ оперативної пам'яті (SRAM) для обробки змінних і буферів, а також 1 КБ EEPROM для зберігання налаштувань, які не стираються при вимкненні живлення.

Перевагою використання Arduino є також Arduino IDE — середовище розробки з відкритим кодом, яке підтримує велику кількість бібліотек для роботи з різними типами датчиків. Це значно спрощує програмування навіть для користувачів без глибоких знань у мікроелектроніці.

Загалом Arduino Nano поєднує в собі доступність, надійність, простоту використання та достатній функціонал, що робить його оптимальним вибором для розробки автоматизованої системи моніторингу параметрів середовища у фітотронній установці.

Arduino Nano має компактну та зручну конструкцію, що дозволяє легко інтегрувати його у різноманітні автоматизовані системи, включно з фітотронною установкою. Основою плати є друкована плата розміром 68,6 × 53,4 мм, на якій розміщені всі основні функціональні компоненти.

|      |      |          |        |      |                       |      |
|------|------|----------|--------|------|-----------------------|------|
|      |      |          |        |      | MIMT.480.003.003 – ПЗ | Арк. |
| Змн. | Арк. | № докум. | Підпис | Дата |                       | 41   |

Центральним елементом плати є мікроконтролер ATmega328P, який відповідає за виконання обчислень, зберігання програми та обробку сигналів від датчиків. Крім того, плата оснащена мікросхемою USB-UART перетворювача (наприклад, CH340 або ATmega16U2), що забезпечує можливість програмування пристрою через стандартний USB-кабель.

Для підключення зовнішніх пристроїв Arduino Nano має дві паралельні групи контактів: 14 цифрових входів/виходів (пін D0–D13), деякі з яких підтримують широтно-імпульсну модуляцію (PWM), зокрема D3, D5, D6, D9, D10 та D11, а також 6 аналогових входів (A0–A5), призначених для зчитування сигналів від сенсорів із змінною напругою.

Плата також оснащена роз'ємом живлення (барель) для підключення зовнішнього джерела напругою 7–12 В, USB-роз'ємом типу B для зв'язку з комп'ютером, роз'ємом ICSP (In-Circuit Serial Programming) для прямого програмування мікроконтролера, LED-індикаторами живлення та активності (пін 13), а також кнопкою скидання (Reset), яка дозволяє перезапустити систему без вимкнення живлення.

#### 4.6 Вибір дисплею

У якості дисплея для виводу інформації у комп'ютеризованій інформаційно-вимірювальній системі було обрано модуль LCD 1602 з інтерфейсом I2C (Рис.4.7). Цей модуль є одним з найпоширеніших та найзручніших у використанні елементів для виводу символьної інформації в мікропроцесорних системах. Дисплей має 2 рядки по 16 символів, чого достатньо для одночасного виводу декількох поточних параметрів середовища, таких як температура, освітленість або рівень pH.

Модуль LCD 1602 заснований на контролері HD44780 від Hitachi, який є стандартом у галузі для символьних рідкокристалічних дисплеїв. Стандартна версія дисплея має 16 контактів, однак у цій роботі використовується модифікація з вбудованим I2C-конвертером (на базі чипа PCF8574), що значно

|      |      |          |        |      |                       |      |
|------|------|----------|--------|------|-----------------------|------|
|      |      |          |        |      | MIMT.480.003.003 – ПЗ | Арк. |
| Змн. | Арк. | № докум. | Підпис | Дата |                       | 42   |

спрощує підключення та зменшує кількість задіяних портів мікроконтролера — лише дві лінії даних (SDA і SCL) замість щонайменше шести у класичному підключенні.

Перевагами використання дисплея LCD 1602 I2C є:

- зменшення кількості з'єднань, що спрощує монтаж та підвищує надійність;
- сумісність із популярними платформами Arduino;
- наявність широкої підтримки бібліотек для реалізації програмного виводу інформації;
- достатній обсяг символів для відображення ключових параметрів.

Цей дисплей ідеально підходить для задач, де необхідно виводити текстову інформацію в компактному вигляді, а також забезпечує зручність у налагодженні та експлуатації системи.

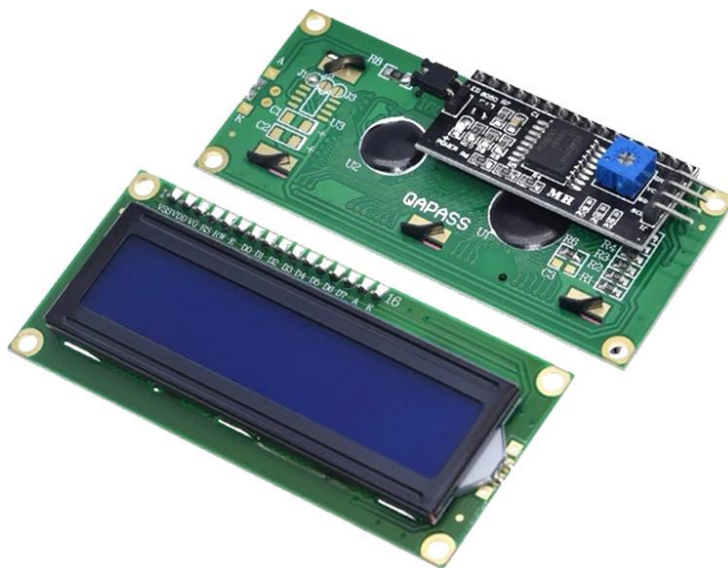


Рис. 4.7- LCD 1602 I2C дисплей

#### 4.7 Вибір блока живлення

Для автономної роботи усієї системи від загальної мережі живлення було використано блок живлення 5 В 2А 4х1.7мм, що дає на вихід стабілізовану напругу 5 В (Рис. 4.8).

Таблиця 4.5- технічні характеристики

| Параметр        | Характеристики     |
|-----------------|--------------------|
| Вихідна напруга | 5 В                |
| Вихідний струм  | 2 А                |
| Вхідна напруга  | 100-240 В 50/60 Гц |
| Конектор        | 4х1.7мм            |
| Довжина         | ~1 м кабеля        |



Рис. 4.8 – Блок живлення

Обравши всі необхідні компоненти було розроблено схему електрично принципову

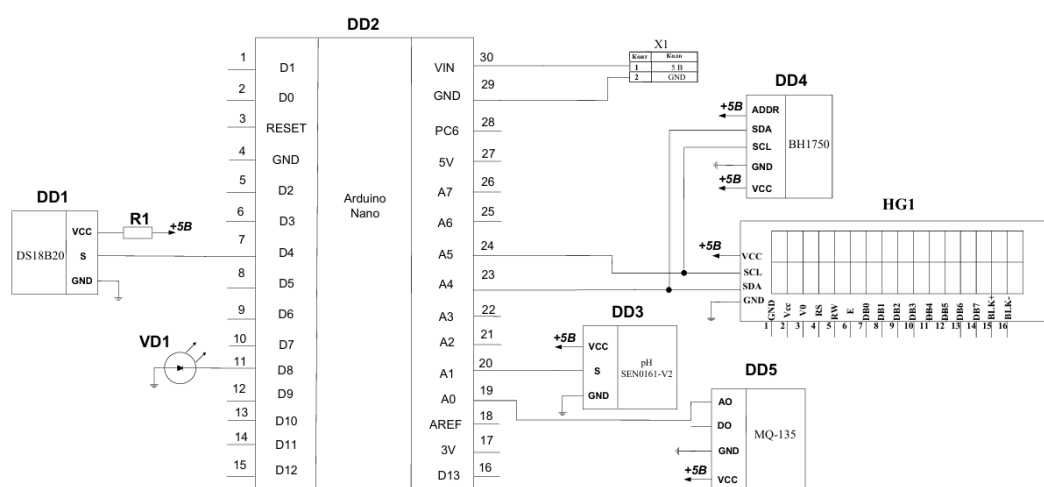


Рис. 4.9- Схема електрична принципова

#### 4.8 Розробка друкованої плати

У якості середовища для розробки друкованої плати було обрано **EasyEDA** — сучасну веборієнтовану платформу для створення електронних схем та проектування друкованих плат. Основними причинами вибору саме цього середовища стали:

- **Інтуїтивно зрозумілий інтерфейс**, що дозволяє швидко формувати схеми навіть початківцям;
- **Онлайн-доступність** – програма працює у веббраузері без потреби встановлення локального ПЗ;
- **Велика база бібліотек** з готовими компонентами (включаючи Arduino, LCD-дисплеї, сенсори тощо);
- **Автоматичне трасування доріжок** (autorouter), що спрощує проектування складних з'єднань;
- **Пряма інтеграція з сервісом виготовлення плат (JLCPCB)**, що полегшує замовлення готової плати;
- Можливість експорту Gerber-файлів для друку плати будь-якою іншою компанією.

Вибір EasyEDA дозволив реалізувати повноцінну схему контролю за вирощуванням хлорели з усіма необхідними компонентами в стислий термін і з високою точністю.

Розроблена друкована плата має розміри 92x 84 міліметри, що забезпечує оптимальний баланс між компактністю та можливістю зручного розміщення всіх необхідних електронних компонентів системи контролю за процесом вирощування хлорели. На платі передбачено посадкові місця для мікроконтролера Arduino Nano, який виконує функцію керуючого елемента, а також для датчиків, що вимірюють критично важливі параметри середовища: температуру, освітленість, рівень вуглекислого газу та кислотність (pH).

Компоненти розміщено таким чином, щоб мінімізувати довжину аналогових та цифрових з'єднань, що зменшує рівень завад і підвищує

|      |      |          |        |      |                       |      |
|------|------|----------|--------|------|-----------------------|------|
|      |      |          |        |      | MIMT.480.003.003 – ПЗ | Арк. |
| Змн. | Арк. | № докум. | Підпис | Дата |                       | 45   |

точність вимірювання. Для відображення інформації передбачено підключення LCD-дисплея із шиною I2C, що дозволяє зекономити виводи мікроконтролера. На платі також розміщено світлодіод індикації аварійного стану, який активується у випадку виходу одного з параметрів за допустимі межі. Всі компоненти живляться від стабілізованого джерела 5 В, підключеного через окремий конектор.

При проєктуванні друкованої плати було обрано товщину провідників не менше 0,4 мм для силових ліній (живлення та заземлення) з метою забезпечення надійного проходження струму без перегріву. Для сигнальних доріжок використовувались провідники товщиною 0,25 мм, що є достатнім для передавання даних між мікроконтролером і сенсорами. Діаметри монтажних отворів для компонентів підібрано відповідно до стандартних розмірів виводів: більшість отворів мають діаметр 0,8–1,0 мм, а для роз'ємів і кріплення передбачено більші отвори діаметром до 1,2–1,5 мм. Такий підхід забезпечує зручність монтажу та механічну міцність з'єднань.

Плата має двошарову структуру: верхній шар використовується для трасування основних сигнальних ліній, а нижній – для ліній живлення та заземлення. Така структура дозволяє ефективно ізолювати аналогові сигнали від джерел шуму та забезпечити стабільну роботу всієї системи. Виводи для підключення зовнішніх елементів та сенсорів розташовані по периметру плати для зручності монтажу та обслуговування. Загалом конструкція плати враховує як електричні, так і ергономічні вимоги до систем управління біологічними процесами.

|      |      |          |        |      |                       |      |
|------|------|----------|--------|------|-----------------------|------|
|      |      |          |        |      | MIMT.480.003.003 – ПЗ | Арк. |
|      |      |          |        |      |                       | 46   |
| Змн. | Арк. | № докум. | Підпис | Дата |                       |      |



## **5. РОЗРОБКА АЛГОРИТМУ ТА ПРОГРАМИ РОБОТИ СИСТЕМИ**

### **5.1. Розробка алгоритму**

Програма починається з блоку початку. Робота системи починається тоді, коли живлення подається. В нашому випадку живлення подається з блоку живлення.

Блок підключення бібліотек виконує підключення бібліотек для дисплея.

Блок ініціалізація підключає та ініцілізує датчики, дисплей, світлодіод, задає змінні та константи.

Блок з повідомленням на дисплеї «Контроль хлорели» вмикається на початку програми.

Блок основний цикл виконує основну програму. Блок цикл повторюється кожні дві секунди.

Блок зчитування сигналу з датчика температури, концентрації CO<sub>2</sub>, рівня pH, освітленості. Цей блок зчитує сигнали з цих датчиків.

Блок обрахунок сигналу з датчиків переводить початковий сигнал (частіше це зміна напруги) в потрібні значення для представлення на дисплей.

Блоки перевірки норми показників. Вважаємо нормальними такі показники для вирощування хлорели: температура 20–30 °C °C, рівень pH 6.5 – 8.5, концентрація вуглекислого газу не більше 200 ppm, освітленість не менше 300 lux. Якщо показники виходять за межі, загоряється червоний світлодіод та виводиться повідомлення, що значення критичні. В іншому випадку програма зациклюється.

Також всі повідомлення та значення крім дисплея дублюються на серіал порт, що дозволяє підключення до комп'ютера.

Після перевірки значень на критичні показники, програма зациклюється та знову починає перевіряти датчики.

Блок кінець настає в випадку, якщо живлення перестає подаватися.

Пояснення ключових формул:

- pH: формула  $pH = 7 + ((2.5 - \text{voltage}) / 0.18)$  заснована на припущенні, що напруга 2.5 В відповідає  $pH \approx 7.0$  (можна відкалібрувати краще).
- MQ-135: дає сире значення забрудненості повітря. Для точного  $CO_2$  потрібна калібрування або кращий датчик типу MH-Z19B.

Алгоритм роботи програми системи представлений на рис.5.1.

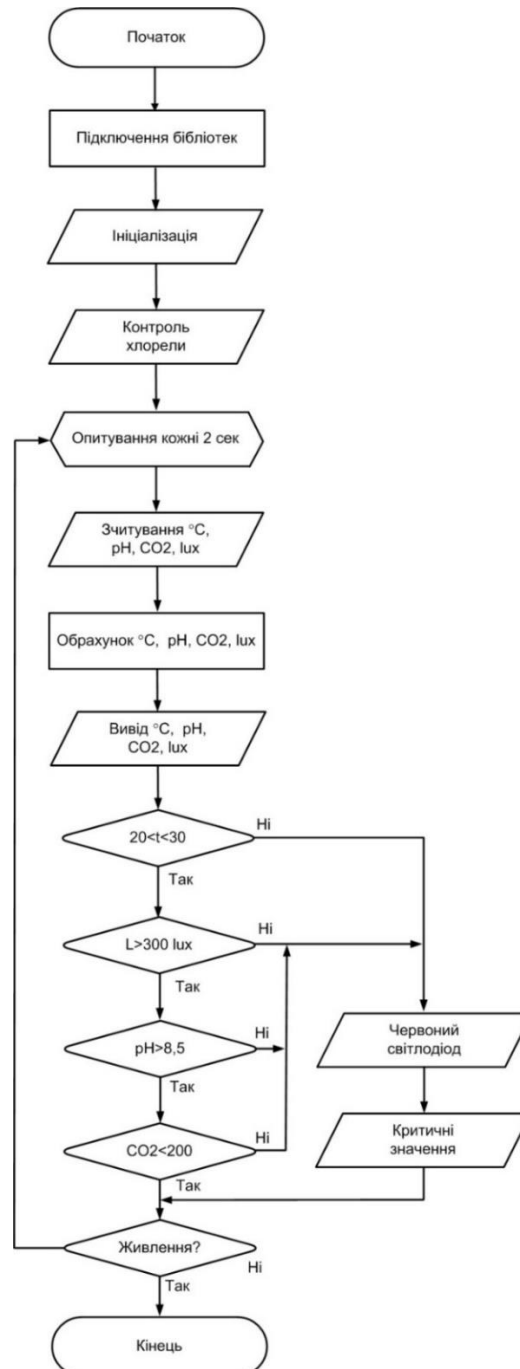


Рис.5.1-Блок-схема алгоритму

## 5.2.Розробка програми

Для програмування мікроконтролера, що використовується в системі контролю за процесом вирощування хлорели, застосовано мову Arduino — спрощену версію C/C++, спеціально розроблену для роботи з мікроконтролерами типу AVR. Зокрема, в основі апаратної частини системи лежить мікроконтролер ATmega328P, що входить до складу плати Arduino Nano.

Мова Arduino забезпечує зручне та швидке створення програм для зчитування показників з датчиків (температури, освітленості, pH, CO<sub>2</sub>), обробки отриманих даних, відображення інформації на дисплеї та передавання її через USB-інтерфейс до комп'ютера. Вона має зрозумілий синтаксис, схожий на мову C++, і включає вбудовані бібліотеки для підключення широкого спектра датчиків і модулів, що значно полегшує процес розробки.

Повний програмний код із докладними коментарями наведено у Додатку А, а нижче подано основні фрагменти з поясненням функціональних блоків системи.

Імпорт бібліотек. Підключення потрібних бібліотек для роботи з датчиками: I2C: LCD2004 та BH1750 (освітлення) OneWire/Dallas: температурний датчик DS18B20.

```
#include <Wire.h>
#include <LiquidCrystal_I2C.h>
#include <OneWire.h>
#include <DallasTemperature.h>
#include <BH1750.h>
```

Оголошення пінів і створення об'єктів. Встановлюємо, до яких пінів підключені датчики та створюємо відповідні об'єкти для зчитування їхніх даних.

```
#define ONE_WIRE_BUS 4
#define PH_PIN A1
#define CO2_PIN A0
#define LED_PIN 8

OneWire oneWire(ONE_WIRE_BUS);
DallasTemperature sensors(&oneWire);
BH1750 lightMeter;
LiquidCrystal_I2C lcd(0x27, 20, 4);
```

Функція `setup()` . **Призначення:** ініціалізація, підключення до серійного порту, запуск роботи всіх датчиків.

```
void setup() {
    Serial.begin(9600);
    sensors.begin();
    lightMeter.begin();
    lcd.init();
    lcd.backlight();
    pinMode(LED_PIN, OUTPUT);
    digitalWrite(LED_PIN, LOW);
    lcd.setCursor(0, 0);
    lcd.print("Контроль хлорели");
    delay(2000);
}
```

У функції `loop()` здійснюється безперервне зчитування даних з датчиків температури, освітленості, рН та рівня CO<sub>2</sub>. Отримані значення виводяться на LCD-дисплей і передаються через серійний порт до комп'ютера. Якщо будь-який із параметрів виходить за допустимі межі для вирощування хлорели, активується попередження: на дисплеї з'являється відповідне повідомлення, а також вмикається червоний світлодіод як сигнал тривоги.

```

void loop() {

    lcd.clear(); // Очистка LCD перед оновленням даних

    // ===== TEMПЕРАТУРА =====
    sensors.requestTemperatures(); // Отримуємо температуру з DS18B20
    float temperature = sensors.getTempCByIndex(0); // Беремо температуру з
першого датчика
    if (temperature < 20 || temperature > 30) { // Перевірка критичних меж
        alert = true;
    }

    // ===== ОСВІТЛЕНІСТЬ =====
    float lux = lightMeter.readLightLevel(); // Зчитування освітленості (в
lux)
    if (lux < 300) { // Мінімальний рівень світла для хлорели
        alert = true;
    }

    // ===== pH =====
    int ph_raw = analogRead(PH_PIN); // Зчитування аналогового значення з pH-
датчика
    float voltage = ph_raw * (5.0 / 1023.0); // Перетворення у напругу (0-5
В)
    float pH = 7 + ((2.5 - voltage) / 0.18); // Спрощене перетворення напруги
в pH (для SEN0161-V2)
    if (pH < 6.5 || pH > 8.5) { // Критичні межі pH для хлорели
        alert = true;
    }

    // ===== CO2 (MQ-135) =====
    int co2_raw = analogRead(CO2_PIN); // Зчитування рівня "загального
забруднення повітря"
    if (co2_raw > 200) { // Грубий поріг – можна калібрувати краще
        alert = true;
    }

    // ===== ВИВІД НА LCD =====
    lcd.setCursor(0, 0);
    lcd.print("T:");

```

```

lcd.print(temperature, 1);    // Температура з 1 знаком після крапки
lcd.print("C L:");
lcd.print((int)lux);          // Освітлення як ціле число

// ===== ПОПЕРЕДЖЕННЯ =====
if (alert) {
    lcd.setCursor(0, 2);
    lcd.print("!! ПОПЕРЕДЖЕННЯ !!"); // Повідомлення на екрані
    digitalWrite(LED_PIN, HIGH);     // Засвітити червоний світлодіод
} else {
    digitalWrite(LED_PIN, LOW);      // Все в нормі – світлодіод вимкнено
}
delay(2000); // Оновлення даних кожні 2 секунди
}

```

Передача даних через Serial-порт. Дані передаються на ПК для збереження або моніторингу (через COM-порт/USB).

```

Serial.print("Темп: ");
Serial.print(temperature);
// інші дані...
Serial.println(alert ? "КРИТИЧНИЙ" : "НОРМА");

```

## **6. РОЗРАХУНОК ПОХИБОК ВИМІРЮВАННЯ**

Інформаційно-вимірвальна система (ІВС), як один із різновидів засобів вимірвальної техніки (ЗВТ), повинна відповідати встановленим метрологічним нормам та вимогам державного регулювання, що забезпечують єдність вимірювань. Попри складність і специфіку задач, які вирішуються за допомогою ІВС, вимірвальні результати повинні бути представлені в загальноприйнятих одиницях фізичних величин, що вимагає наявності простежуваності до державних еталонів. Така простежуваність має забезпечуватися на всіх етапах життєвого циклу ІВС: від проєктування — до експлуатації.

Метрологічна точність вимірювання в ІВС залежить як від апаратного, так і від обчислювального компонентів системи. Апаратна частина є джерелом переважно апаратних похибок, тоді як програмно-математичне забезпечення (ПМЗ) вносить методичні похибки. Всі ІВС, що використовують однакове ПМЗ, мають однакові методичні похибки, незалежно від апаратної реалізації. Тому як апаратна частина, так і ПМЗ є об'єктами обов'язкового метрологічного аналізу.

Метрологічне забезпечення апаратної частини ІВС, за своїм принципом, не відрізняється від метрологічного забезпечення інших видів ЗВТ. Проте у випадку автоматизованих засобів, які здійснюють значну обробку первинної інформації, обов'язковою є метрологічна атестація програмних алгоритмів. У рамках випробувань з метою затвердження типу, така атестація є невід'ємною частиною перевірки ІВС. Вона також проводиться при оновленні ПМЗ, заміні обчислювального обладнання чи зміні операційної системи. На відміну від класичних ЗВТ, ПМЗ не підлягає процедурі повірки або калібрування для кожного окремого пристрою.

ІВС зазвичай складаються з компонентів, вироблених різними підприємствами. Деякі з них можуть не мати метрологічних характеристик у заводській документації, оскільки не завжди ідентифікуються виробником як

ЗВТ. Це створює складнощі при проведенні випробувань. Незважаючи на це, вимірювальні канали, що входять до складу ІВС, навіть після її модифікації або розширення, зберігають цілісність системи та її метрологічні характеристики. Саме метрологічні властивості каналів є основою для оцінки точності вимірювань в ІВС загалом.

### 6.1 Розрахунок похибок визначення температури

За допомогою цифрового температурного датчика DS18B20, діапазон вимірювання якого згідно з технічною документацією становить від  $-55$  до  $+125$  °C, з точністю до  $\pm 0,5$  °C у робочому діапазоні  $-10 \dots +85$  °C проводимо оцінку метрологічних характеристик датчика було проведено десять повторних вимірювань температури. Результати вимірювань подано нижче:

$$T = (20,11; 20,85; 20,97; 20,12; 20,10; 20,14; 20,09; 20,88; 20,94; 20,90) \text{ °C}$$

На основі отриманої вибірки проведено розрахунки:

1) середнє арифметичне  $\bar{T}$  за (6.1):

$$\bar{T} = \frac{1}{10} \sum_{i=1}^{10} T_i \cong 20,621 \quad (6.1)$$

2) похибки повторних вимірювань  $\Delta T_i$  та  $\Delta T_i^2$  (6.2):

$$\Delta T = |\bar{T} - T_i| \text{ та } \Delta T_i^2 = (\bar{T} - T_i)^2 \quad (6.2)$$

де  $i = 1, 2 \dots 10$ ;

Результати вимірювань та обчислень заносимо у табл. 6.1.

Таблиця 6.1 – Результати вимірювань

| №<br>з/п | T, °C | $\Delta T_i$ , °C | $\Delta T_i^2$ , °C <sup>2</sup> |
|----------|-------|-------------------|----------------------------------|
| 1        | 20,11 | 0,511             | 0,261121                         |
| 2        | 20,85 | 0,229             | 0,052441                         |
| 3        | 20,97 | 0,349             | 0,121801                         |

|    |       |       |          |
|----|-------|-------|----------|
| 4  | 20,12 | 0,501 | 0,251001 |
| 5  | 20,1  | 0,521 | 0,271441 |
| 6  | 20,14 | 0,481 | 0,231361 |
| 7  | 20,09 | 0,531 | 0,281961 |
| 8  | 20,88 | 0,259 | 0,067081 |
| 9  | 20,94 | 0,319 | 0,101761 |
| 10 | 20,9  | 0,279 | 0,077841 |

Розрахуємо випадкову похибку вимірювання за (6.1). За даними табл. 6.1 знайдемо коефіцієнт Стюдента для 10 вимірювань і довірчої ймовірності 0,95  $t_{0,95}=2,26$ ; розрахуємо за (6.2) виправлене вибіркове середнє квадратичне відхилення:

$$\sigma_B = \sqrt{\frac{1}{10 \times 9} \sum_{i=1}^{10} (\bar{T} - T_i)^2} \approx 0,138$$

та знайдемо випадкову похибку:

$$\Delta_B T = 2,26 * 0,148 = 0,312 \text{ } ^\circ\text{C}$$

(Результати вимірювань та обчислень заносимо у табл. 6.1.)

1) похибку приладу за (6.3):

$$\Delta_{\text{пр}} T = \frac{1}{300} t_p k T_{\text{гр}}$$

Для надійної ймовірності  $P = 0,95$  з табл. 6.1 знайдемо при умові  $t_{0,95}=2,0$ . Враховуючи, що за умовою  $T_{\text{гр}} = +85 \text{ } ^\circ\text{C}$ , а клас точності  $k = 1$ , отримаємо:

$$\Delta_{\text{пр}} T = \frac{1}{300} 2,0 * 85 * 1 \approx 0,567 \text{ } ^\circ\text{C};$$

2) похибку заокруглення за (4.4):

$$\Delta T_3 = P \frac{h}{2}. \quad (4.4)$$

Для цього знайдемо інтервал заокруглення  $h$  як половину останнього розряду виміряної величини — 0,05. Отже:

$$\Delta T_3 = 0,95 * \frac{0,05}{2} \approx 0,024 \text{ } ^\circ\text{C};$$

3) загальну абсолютну похибку (4.5):

$$\Delta T = \sqrt{(\Delta_B T)^2 + (\Delta_n T)^2 + (\Delta_3 T)^2} = \sqrt{0,312^2 + 0,567^2 + 0,024^2} \approx \quad (4.5) \\ \approx 0,65 \text{ } ^\circ\text{C}$$

У даному розділі проведено аналіз точності функціонування інформаційно-вимірювальної системи з визначенням температурного поля на основі даних, отриманих від цифрового датчика температури DS18B20. Було здійснено серію з десяти вимірювань температури, за результатами яких обчислено середнє значення, випадкову похибку, похибку приладу, похибку заокруглення, а також загальну абсолютну похибку.

Результати свідчать про стабільність вимірювань і прийнятний рівень точності для поставлених завдань. Загальна абсолютна похибка вимірювання температури склала приблизно 0,65 °C, що відповідає метрологічним характеристикам датчика DS18B20 та дозволяє використовувати його в обраній системі контролю параметрів.

## 7. ОЦІНКА ПОКАЗНИКІВ НАДІЙНОСТІ РОБОТИ СИСТЕМИ

Надійність являє собою властивість електронних та механічних систем підтримувати свою функціональність без порушень протягом визначеного часового інтервалу за конкретних експлуатаційних параметрів. Даний показник відіграє вирішальну роль у забезпеченні продуктивної роботи, безпечної експлуатації та тривалого терміну служби технічних засобів.

Під час аналізу надійності технологічних систем або окремих елементів застосовуються такі основні числові індикатори надійності:

Ймовірність безвідмовної роботи ( $P(t)$ ) – імовірність того, що об'єкт працюватиме безвідмовно протягом часу:

$$P(t) = e^{-\lambda t} \quad (7.1)$$

де  $\lambda$  – інтенсивність відмов,

$t$  – час роботи.

Середній час безвідмовної роботи ( $T$ ):

$$T = \int_0^{\infty} P(t) dt = \frac{1}{\lambda} \quad (7.2)$$

Інтенсивність відмов ( $\lambda$ ) — кількість відмов у розрахунку на одиницю часу:

$$\lambda = \frac{1}{T} \quad (7.3)$$

Виріб призначений для роботи в опалюваному приміщенні з контрольованими умовами мікроклімату:

- робочий діапазон температури від +17 до +23 °С, відносна вологість повітря — до 60% при температурі +21 °С;

- конструктивно пристрій призначено для використання всередині приміщень з штучно регульованими кліматичними умовами, вібростійкий,

- не піддається дії хімічно активних речовин.

Склад виробу – комп’ютеризована система на базі Arduino Nano з сенсорами для моніторингу параметрів (температури, рН, освітленості, CO<sub>2</sub>), дисплеєм LCD 1602 I2C та адаптером живлення.

Критерієм відмови системи вважається вихід з ладу будь-якої з її складових, що унеможлиблює її повноцінну роботу.

Розрахунок надійності спроектованого виробу здійснюється на основі його електричної принципової схеми з урахуванням заданої кліматичної категорії та конструктивного виконання.

Розрахунок параметра потоку відмов проводиться за формулою:

$$\lambda = \sum_{i=1}^n N_i \lambda_i, \quad (7.4)$$

де  $n$  – загальне число групи КВ, що входять до складу проектованого виробу;  $N_i \lambda_i$  – кількість і інтенсивність відмовлень КВ  $i$ -ої групи відповідно.

Інтенсивність відмовлень КВ  $i$ -ої групи в робочому режимі визначалася по формулі

$$\lambda_i = \lambda_{oi} a_i \dots a_n. \quad (7.5)$$

де  $\lambda_{oi}$  – інтенсивність відмовлень КВ в номінальному режимі і нормальних умовах;  $a_i \dots a_n$  – поправочні коефіцієнти, що враховують умови роботи (кліматичні і механічні впливи в залежності від призначення й умов майбутньої роботи), електричне навантаження критичних вузлів, температура навколишнього середовища, рівень інтеграції інтегральних мікросхем, а також співвідношення між різними типами відмов.

Формули, за якими визначалась інтенсивність відмов для кожної групи компонентів виробу, наведено в таблиці 7.1. Числові значення були отримані на основі довідкових даних, з урахуванням вихідних параметрів проектованого виробу.

По формулі (7.4) визначаємо потік відмовлень виробу (сума величин в графі 11 таблиці 7.1):

$$\lambda = 83,748 \cdot 10^{-6} \text{ 1/год.}$$

Ймовірність безвідмовної роботи виробу протягом часу  $t$  визначалася по формулі:

$$P(t) = e^{-\lambda t} \approx 1 - \lambda t \quad (7.3)$$

де  $\lambda$  – параметр потоку відмовлень;  $t$  – час роботи виробу (год) .

Таблиця 7.1. Перелік комплектуючих виробів

| № | Компонент                      | Кількість | $\lambda_0 \cdot 10^6$ ,<br>год <sup>-1</sup> | Формула $\lambda_i$                                 | Коефіцієнти                     | $\lambda_i \cdot 10^{-6}$ ,<br>год <sup>-1</sup> |
|---|--------------------------------|-----------|-----------------------------------------------|-----------------------------------------------------|---------------------------------|--------------------------------------------------|
| 1 | Датчик температури DS18B20     | 1         | 1,2                                           | $\lambda_0 \cdot a_1 \cdot a_2 \cdot a_4 \cdot a_6$ | $2,1 \cdot 1 \cdot 1,3 \cdot 1$ | 3,26                                             |
| 2 | Arduino Nano (ATmega328)       | 1         | 1,2                                           | $\lambda_0 \cdot a_1 \cdot a_2 \cdot a_4 \cdot a_6$ | $2,1 \cdot 1 \cdot 1,3 \cdot 1$ | 3,26                                             |
| 3 | Датчик рН SEN0161-V2           | 1         | 1,2                                           | $\lambda_0 \cdot a_1 \cdot a_2 \cdot a_4 \cdot a_6$ | $2,1 \cdot 1 \cdot 1,3 \cdot 1$ | 3,26                                             |
| 4 | Датчик освітленості BH1750     | 1         | 1,2                                           | $\lambda_0 \cdot a_1 \cdot a_2 \cdot a_4 \cdot a_6$ | $2,1 \cdot 1 \cdot 1,3 \cdot 1$ | 3,26                                             |
| 5 | Датчик CO <sub>2</sub> MH-Z19B | 1         | 1,6                                           | $\lambda_0 \cdot a_1 \cdot a_2 \cdot a_4 \cdot a_6$ | $2,1 \cdot 1 \cdot 1,3 \cdot 1$ | 4,368                                            |
| 6 | LCD 1602 I2C дисплей           | 1         | 1,2                                           | $\lambda_0 \cdot a_1 \cdot a_2 \cdot a_4 \cdot a_6$ | $2,1 \cdot 1 \cdot 1,3 \cdot 1$ | 3,26                                             |
| 7 | Блок живлення 5 В              | 1         | 30                                            | $\lambda_0 \cdot a_1 \cdot a_4$                     | 2,1                             | 63,00                                            |
|   | <b>Разом:</b>                  |           |                                               |                                                     |                                 | <b>83,748</b>                                    |

Дані розрахунку  $P(t)$  приведені в таблиці 7.2.

Таблиця 7.2. Ймовірність безвідмовної роботи виробу протягом часу  $t$

| 250    | 500    | 750    | 1000   | 2000   | 5000   | 8000   | 10000  |
|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|
| 0,9812 | 0,9627 | 0,9445 | 0,9267 | 0,8588 | 0,6835 | 0,5439 | 0,4671 |

На графіку, приведеному на рис 7.1 приведена залежність надійності  $P(t)$ .

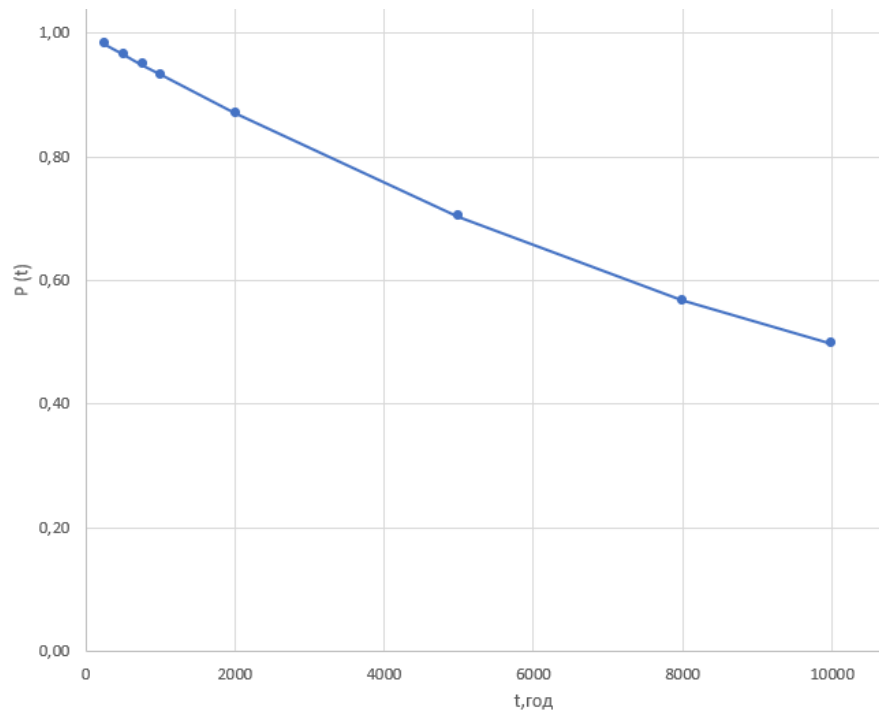


Рис. 7.1-Графік залежності  $P(t)$

Середній наробіток до відмовлення виробу визначався по формулі:

$$T_0 = \lambda^{-1} \quad (7.4)$$

Підставляючи дані в формулу (2.4) одержимо

$$T = (83,748 \cdot 10^{-6})^{-1} = 11940,6 \text{ годин.}$$

## **8. БЕЗПЕКА ЖИТТЄДІЯЛЬНОСТІ ТА ОХОРОНИ ПРАЦІ**

### **8.1 Виробнича безпека**

Під час експлуатації комп'ютеризованої інформаційно-вимірювальної системи для контролю параметрів фітотронної установки, призначеної для вирощування хлорели, особливу увагу слід приділяти забезпеченню виробничої безпеки. Основною метою є захист обслуговуючого персоналу від потенційних небезпек, пов'язаних з електротехнічними складовими системи, умовами мікроклімату в установці, а також роботою з рідинами, що використовуються як поживне середовище для мікроводоростей.

Система працює від джерела постійного струму з напругою +5 В, проте під час проєктування та складання всі її компоненти можуть бути пов'язані із стандартною мережею 220 В, особливо якщо йдеться про блок живлення або джерела освітлення. У зв'язку з цим особливу небезпеку становлять електричні ураження, короткі замикання, перегрів окремих елементів або неправильне заземлення. Усі елементи, що підключаються до мережі, повинні мати відповідні захисні кожухи, бути виконаними відповідно до вимог технічної документації, мати сертифікати відповідності та проходити періодичну перевірку на справність. Обов'язковим є використання автоматичних вимикачів, що миттєво припиняють подачу живлення у випадку перевищення струму або короткого замикання.

Особливо важливо звертати увагу на експлуатацію датчиків, занурених у рідке поживне середовище. Усі з'єднання повинні бути герметичними та стійкими до впливу вологи. Місця занурення датчиків або електродів повинні бути чітко ізольованими, оскільки навіть при низькій напрузі тривалий контакт із вологим середовищем може призвести до корозії, хибних показань або небезпеки ураження струмом, особливо якщо не дотримано вимог до живлення чи ізоляції.

Ще однією складовою безпеки є робота із самою хлорелою та компонентами поживного середовища. Хоча хлорела є безпечною для людини,

розчини для підтримки її росту можуть містити хімічно активні речовини, що потребують обережного поводження. Під час приготування розчинів необхідно користуватись засобами індивідуального захисту (рукавицями, халатами, захисними окулярами), працювати в добре провітрюваних приміщеннях або витяжних шафах, а також мати чітко визначені місця для зберігання реагентів.

У приміщенні, де розміщується фітотронна установка, має бути забезпечене достатнє природне або штучне освітлення, вентиляція, постійний температурний режим, а також наявність вогнегасника та аптечки першої допомоги. Усі співробітники повинні бути проінструктовані про правила поводження з обладнанням та матеріалами, пройти первинний та періодичний інструктаж з охорони праці, мати доступ до експлуатаційної документації та схем підключення.

У разі виникнення аварійної ситуації, наприклад, короткого замикання, виходу з ладу одного з сенсорів, витоку розчину або порушення герметичності конструкції, необхідно негайно знеструмити систему, припинити роботу установки, оцінити масштаби загрози і звернутись до відповідального спеціаліста.

Таким чином, виробнича безпека є невід'ємною частиною процесу експлуатації комп'ютеризованої інформаційно-вимірювальної системи та повинна забезпечуватись на кожному етапі її розробки, монтажу, введення в експлуатацію та подальшої роботи.

## **8.2 Екологічна безпека**

**Охорона навколишнього середовища** — це планова система державних, міжнародних та громадських заходів щодо раціонального використання, охорони та відновлення природних ресурсів, захисту навколишнього середовища від забруднення і руйнування з метою створення

найбільш сприятливих умов існування людського суспільства, задоволення матеріальних і культурних потреб теперішнього та майбутніх поколінь.

Охорона навколишнього середовища — це сукупність заходів, які впливають на такі природні зони, як атмосфера, літосфера та гідросфера.

У цьому проєкті головною екологічною загрозою є утилізація пластику, оскільки під час його спалювання в атмосферу виділяється велика кількість вуглекислого газу, що спричиняє забруднення повітря. Також період розкладання пластику у воді є дуже тривалим — близько 1000 років. За цей час токсичні речовини потрапляють у гідросферу. Також токсичні речовини можуть проникати в літосферу, завдаючи шкоди ґрунтам.

Тверді промислові та побутові відходи є основними видами забруднення літосфери.

Матеріали, що використовуються в проєкті, легко утилізуються та переробляються. Перевага цих матеріалів полягає в тому, що після переробки можливо отримати іншу продукцію без значних витрат на одержання вторинної сировини.

Збір, сортування, утилізація відходів або їхнє організоване захоронення є заходами, спрямованими на захист ґрунтового покриву та надр.

### **8.3 Безпека в надзвичайних ситуаціях**

Забезпечення безпеки в умовах виникнення надзвичайних ситуацій є важливим етапом проєктування та експлуатації комп'ютеризованої інформаційно-вимірювальної системи, призначеної для контролю процесу вирощування хлорели. Хоча установка функціонує в контрольованих умовах і належить до категорії обладнання з низьким рівнем ризику, необхідно передбачити потенційні загрози і розробити відповідні заходи реагування.

Можливі надзвичайні ситуації можуть бути пов'язані з електротехнічними несправностями, витоком рідин, коротким замиканням, перегрівом окремих компонентів, несправністю програмного забезпечення

або збоєм у роботі датчиків. Також не можна виключати виникнення пожежі через перевантаження мережі живлення або контакту електричних елементів з вологою. Усі ці ситуації становлять потенційну загрозу для користувача, обладнання і довкілля.

Для попередження надзвичайних ситуацій передбачено низку технічних та організаційних заходів. Усі елементи системи повинні мати відповідні технічні характеристики з урахуванням температурних, вологісних та механічних навантажень. Живлення системи здійснюється через захищений блок із вбудованими запобіжниками або автоматичними вимикачами, які спрацьовують у разі перенапруги або короткого замикання. Особливу увагу слід приділяти правильному підключенню блоків живлення, заземленню корпусів та ізоляції проводів. Усі електричні з'єднання повинні бути закритими та вологозахищеними.

У приміщенні, де експлуатується установка, має бути забезпечений вільний доступ до основних комунікацій — електричних щитків, вентиляції, джерел води. Обов'язковим є наявність первинних засобів пожежогасіння, таких як вогнегасники порошкового або вуглекислотного типу, придатні для гасіння електроустановок. У разі виникнення задимлення або пожежі персонал має негайно припинити подачу живлення, вивести людей з приміщення та повідомити служби ДСНС. Протипожежна інструкція повинна бути розміщена у доступному місці, а обслуговуючий персонал має пройти відповідний інструктаж.

Також слід враховувати можливість аварійної ситуації, пов'язаної з витоком поживного середовища або пошкодженням ємності з хлорелою. У разі розливу рідини на поверхні, особливо поблизу електронного обладнання, необхідно негайно припинити роботу системи, знеструмити її та провести очищення за допомогою спеціальних матеріалів, які поглинають вологу. Робоче місце має бути оснащено водонепроникними піддонами або бар'єрами, які мінімізують поширення рідини у разі витоку.

У випадку відмови одного або кількох сенсорів або мікроконтролера можливе неправильне функціонування системи, що може призвести до погіршення умов у фітотроні. Тому важливо передбачити резервне ручне керування основними параметрами або аварійне завершення процесу із збереженням даних та повідомленням користувача про несправність.

Всі працівники, що мають доступ до установки, повинні бути ознайомлені з планом дій у разі надзвичайної ситуації, знати розташування рубильників, вогнегасників, аптечки, аварійних виходів та мати доступ до інструкцій з експлуатації обладнання. Рекомендується періодично проводити навчання з реагування на надзвичайні ситуації, включаючи імітацію збоїв та відпрацювання алгоритмів евакуації чи локалізації аварії.

## ВИСНОВКИ

У результаті виконання бакалаврської кваліфікаційної роботи була розроблена комп'ютеризована інформаційно-вимірювальна система для контролю параметрів у фітотронній установці, призначеній для вирощування хлорели. Під час проєктування було проаналізовано особливості мікрокліматичних умов, необхідних для ефективного росту мікрководоростей, зокрема температури, освітлення, вологості, рівня рН і концентрації CO<sub>2</sub>. Сформульовані вимоги до точності вимірювання та надійності роботи лягли в основу вибору сенсорної та мікропроцесорної бази.

Створена структурна та принципова схема системи, підібрані датчики з урахуванням їхніх метрологічних характеристик і експлуатаційних властивостей, серед яких цифровий температурний датчик DS18B20, датчик освітлення BH1750 та модуль вимірювання кислотності SEN0161-V2. Реалізовано програмне забезпечення, яке забезпечує збір, обробку, відображення та збереження даних, а також передачу їх на персональний комп'ютер для подальшого аналізу.

Визначено основні показники надійності системи, що дозволяє забезпечити її стабільну роботу протягом тривалого часу без збоїв. Окрему увагу приділено питанням ергономіки, безпеки користування та екологічної безпеки під час експлуатації системи.

Отримані результати підтверджують працездатність і ефективність розробленої системи. Вона може бути застосована в навчальних, науково-дослідних та промислових умовах для створення стабільного середовища культивування хлорели. Розробка вирізняється простотою, доступністю, модульністю та високою точністю, що робить її перспективною для подальшого вдосконалення та масштабування.

## СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

- 1) Environment and the Experimental Control of Plant Growth. Авторы: R.J. Downs;
- 2) Proceedings of the Symposium on Climate & Rice. Авторы: International Rice Research Institute;
- 3) New phytotron for studying the effect of climate change on plant pathogens [Електронний ресурс] // URL: (PDF) New phytotron for studying the effect of climate change on plant pathogens
- 4) Cultivation of *Chlorella sorokiniana* IPPAS C-1 in Flat-Panel Photobioreactors: From a Laboratory to a Pilot Scale [Електронний ресурс] // URL: <https://www.mdpi.com/2075-1729/12/9/1309>
- 5) Outdoor Cultivation of the Microalga *Chlorella vulgaris* in a New Photobioreactor Configuration: The Effect of Ultraviolet and Visible Radiation [Електронний ресурс] // URL: <https://www.mdpi.com/1996-1073/13/8/1962>
- 6) Phototrophic cultivation of *Chlorella vulgaris* in the BioLector XT microbioreactor[Електроннийресурс]//URL:[https://www.beckman.ua/resources/reading-material/application-notes/phototrophic-cultivation-of-chlorella-vulgaris-biolector-xt-microbioreactor?utm\\_source=chatgpt.com](https://www.beckman.ua/resources/reading-material/application-notes/phototrophic-cultivation-of-chlorella-vulgaris-biolector-xt-microbioreactor?utm_source=chatgpt.com)
- 7) Tubular Photobioreactors [Електронний ресурс] // URL: <https://a4f.pt/en/tecnologic-plataforms/tec-1>
- 8) Design and Performance Parameters of Photobioreactors[Електронний ресурс]//URL: <https://www.tatup.de/index.php/tatup/article/view/718/1303>
- 9) Photobioreactor [Електронний ресурс] // URL: <https://en.wikipedia.org/wiki/Photobioreactor>
- 10) Аналоговий датчик ph SEN0161-V2 [Електронний ресурс] // URL: [https://wiki.dfrobot.com/Gravity\\_\\_Analog\\_pH\\_Sensor\\_Meter\\_Kit\\_V2\\_SKU\\_SEN0161-V2](https://wiki.dfrobot.com/Gravity__Analog_pH_Sensor_Meter_Kit_V2_SKU_SEN0161-V2)

11) Датчик температури [https \[Електронний ресурс\] // URL: ://gps-life.com/shop/gps-datchiki/ds18b20/](https://gps-life.com/shop/gps-datchiki/ds18b20/)

12) Датчик освітлення Arduino (BH1750) [Електронний ресурс] // URL: [https://vseplus.com/ua/product/datchik-osvitlenna-arduino-bh1750-182060?utm\\_source=google&utm\\_medium=cpc&utm\\_campaign=21393827196&utm\\_term=&gad\\_source=1&gad\\_campaignid=21393827196&gbraid=0aaaaadexgrirxwon7gve3aa6ihp1tokx&gclid=Cj0KCQjwsNnCBhDRARIsAEzia4CdxW-uMs7HPW4QXT1h04I5NZQmWVB3lftE\\_wT2VvlvkfpT6Lxf9aUaAip4EALw\\_wcB](https://vseplus.com/ua/product/datchik-osvitlenna-arduino-bh1750-182060?utm_source=google&utm_medium=cpc&utm_campaign=21393827196&utm_term=&gad_source=1&gad_campaignid=21393827196&gbraid=0aaaaadexgrirxwon7gve3aa6ihp1tokx&gclid=Cj0KCQjwsNnCBhDRARIsAEzia4CdxW-uMs7HPW4QXT1h04I5NZQmWVB3lftE_wT2VvlvkfpT6Lxf9aUaAip4EALw_wcB)

13) Блок живлення [Електронний ресурс] // URL: [https://uamper.com/index.php?route=product/product&path=426&product\\_id=389&gad\\_source=1&gad\\_campaignid=20839106384&gbraid=0AAAAADk5dvq7tu-WkUR\\_hOJjFagPwJh22&gclid=Cj0KCQjwjdTcBhCLARIsAEu8bpJh1CY0Kp0GcMIKKmWBccO-tOhnkFg4vWNPxdomLsJxbL-tvkPSX2MaAtvbEALw\\_wcB](https://uamper.com/index.php?route=product/product&path=426&product_id=389&gad_source=1&gad_campaignid=20839106384&gbraid=0AAAAADk5dvq7tu-WkUR_hOJjFagPwJh22&gclid=Cj0KCQjwjdTcBhCLARIsAEu8bpJh1CY0Kp0GcMIKKmWBccO-tOhnkFg4vWNPxdomLsJxbL-tvkPSX2MaAtvbEALw_wcB)

14) Дисплей LCD 1602 [Електронний ресурс] // URL: <https://arduino kit.com.ua/ua/p1433688907-displej-lcd-1602.html?srsId=AfmBOornp24CsPSRpDeS9hkwtdaubrwmjMSjhRSnga6Hq7nhRMJqE0Kn>

15) Модуль датчика якості повітря MQ-135 [Електронний ресурс] // URL: [https://arduino.ua/prod1201-modyl-datchika-kachestva-vozdyha-mq135?srsId=AfmBOor-KdG-bfSSeZhZA9LlojyqGMmtyFJkYj\\_4LsUpHBg0-UpPdnnes](https://arduino.ua/prod1201-modyl-datchika-kachestva-vozdyha-mq135?srsId=AfmBOor-KdG-bfSSeZhZA9LlojyqGMmtyFJkYj_4LsUpHBg0-UpPdnnes)

16) Arduino [Електронний ресурс] // URL: <https://www.arduino.cc/>

17) Дрозд М.В., Подчашинський Ю.О., Чепюк Л.О. Комп'ютеризована інформаційно-вимірювальна система контролю параметрів установки для вирощування хлорели. Тези Всеукраїнської науково-практичної онлайн-конференції аспірантів, молодих учених та студентів, присвяченої Дню науки, 12–17 травня 2025 р. Житомир : Житомирська політехніка, 2025. С. 30. URL: <https://conf.ztu.edu.ua/wp-content/uploads/2025/06/2.pdf>