

ХАРКІВСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ РАДІОЕЛЕКТРОНІКИ

Факультет Автоматики і комп'ютеризованих технологій
Кафедра Комп'ютерно-інтегрованих технологій, автоматизації та
робототехніки

Рівень вищої освіти перший (бакалаврський)
Спеціальність 151 Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології
Тип програми Освітньо-професійна
Освітня програма Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології
(шифр і назва)

ЗАТВЕРДЖУЮ:
Зав. кафедри КІТАР _____
(підпис)
«___» _____ 2024 р.

**ЗАВДАННЯ
НА КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ**

студентові Завалюєву Артему Олександровичу
(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема роботи Розробка макету автоматизованої установки для пост-обробки
виробів, отриманих методом 3D-друку за отриманих методом 3D-друку за
технологією DLP

Затверджена наказом по університету від 03.06.2024 р. № 544 Ст

2. Термін подання студентом роботи до екзаменаційної комісії 27.06.2024 р.

3. Вихідні дані до роботи Середа розробки Arduino IDE , напруга 12 В ,
довжина хвилі УФ 395нм.

4. Перелік питань, що потрібно опрацювати в роботі 4.1 Вступ; 4.2 Аналіз
літератури за темою; 4.3 Розробка моделі ультрафіолетової камери; 4.4
Розроблення функціональної моделі ; 4.5 Висновки

5. Перелік графічного матеріалу із зазначенням креслеників, схем, плакатів, комп'ютерних ілюстрацій

Демонстраційний матеріал у вигляді презентації Power Point (*.ppt) ;

6. Консультанти розділів роботи

| Найменування розділу | Консультант (посада, прізвище, ім'я, по батькові) | Позначка консультанта про виконання розділу | |
|----------------------|---|--|------|
| | | підпис | дата |
| | | | |
| | | | |

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

| № | Назва етапів роботи | Термін виконання етапів роботи | Примітка |
|---|---|--------------------------------|----------|
| 1 | Аналіз літератури за темою | 04.04 – 08.04.24 | Виконано |
| 2 | Розробка моделі ультрафіолетової камери | 10.04 – 30.04.24 | Виконано |
| 3 | Розроблення функціональної моделі | 01.05 – 25.05.24 | Виконано |
| 4 | Оформлення пояснювальної записки | 11.06 – 14.06.24 | Виконано |
| 5 | Подання роботи на рецензію | 15.06 – 19.06.24 | Виконано |
| 6 | Подання роботи на підпис зав. кафедри | 27.06.24 | |

Дата видачі завдання 04.04.2024 р.

Студент _____ Завалюєв А.О.

(підпис)

Керівник роботи _____ ст. вик. Гурін Д.В.

(підпис)

(посада, прізвище, ініціали)

Я, як студент ХНУРЕ, розумію і підтримую політику закладу із академічної доброчесності. Я не надавав і не одержував недозволену допомогу під час підготовки кваліфікаційної роботи. Використання ідей, результатів і текстів інших авторів мають посилання на відповідне джерело.

27 червня 2024 р.



Завалюєв А.О.

РЕФЕРАТ

Пояснювальна записка: 85с., 42 рис., 2 дод., 32 джерела.

ПОСТОБРОБЛЮВАЛЬНА КАМЕРА, 3D-DLP ДРУК.

Мета роботи – підвищення ефективності постобробки моделей отриманих за допомогою 3D друку за технологією DLP.

Об'єкт розробки – процес постобробки деталей отриманих за допомогою 3D друку за технологією DLP.

Предмет розробки – макет ультрафіолетової камери для постобробки моделей отриманих за допомогою 3D друку за технологією DLP.

У даній кваліфікаційній роботі було детально розглянуто існуючі види ультрафіолетових камер для полімеризації, їх застосування та галузі, в яких вони поширені. Зокрема, було проаналізовано різновиди камер та їх конструкції, визначено їх переваги та недоліки, а також досліджено їхнє застосування в різних галузях промисловості та медицини.

В процесі роботи було розроблено структурну схему системи ультрафіолетової полімеризації, яка стала основою для вибору необхідних компонентів для створення реального макету ультрафіолетової камери. На основі цієї структурної схеми було також створено схему підключень, що визначає, як саме компоненти повинні бути з'єднані між собою для забезпечення коректної роботи системи.

Крім того, було розроблено алгоритм роботи системи, що дає чітке розуміння принципів функціонування та взаємозв'язків елементів системи. Цей алгоритм описує, як саме система працює, як відбувається перемикання її станів, та забезпечує інтуїтивне розуміння процесів, що відбуваються всередині. Розроблений алгоритм став основою для створення онлайн-макету.

ABSTRACT

Explanatory note: 85 p., 42 figures, 2 appendices, 32 sources.

POST-PROCESSING CAMERA, 3D-DLP PRINTING.

The purpose of the work is to increase the efficiency of post-processing of models obtained using 3D printing using DLP technology.

The object of development is the process of post-processing of parts obtained with the help of 3D printing using DLP technology.

The subject of development is the layout of an ultraviolet camera for post-processing of models obtained by 3D printing using DLP technology.

In this qualification work, the existing types of ultraviolet cameras for polymerization, their application and the industries in which they are common were considered in detail. In particular, the types of cameras and their designs were analyzed, their advantages and disadvantages were determined, and their use in various industries and medicine was investigated.

In the process of work, a structural diagram of the ultraviolet polymerization system was developed, which became the basis for choosing the necessary components for creating a real model of an ultraviolet camera. Based on this structural diagram, a connection diagram was also created, which determines exactly how the components should be connected to each other to ensure the correct operation of the system.

In addition, an algorithm of the system's operation was developed, which gives a clear understanding of the principles of operation and the interrelationships of the system's elements. This algorithm describes exactly how the system works, how its states are switched, and provides an intuitive understanding of the processes taking place inside. The developed algorithm became the basis for creating an online layout, which is used to demonstrate the functioning of the developed scheme in real time.

ЗМІСТ

| | |
|--|----|
| Перелік умовних скорочень | 8 |
| Вступ..... | 9 |
| 1 Аналіз літератури за темою | 11 |
| 1.1 Що таке 3D DLP друк..... | 11 |
| 1.2 Для чого використовують DLP друк..... | 12 |
| 1.3 Аналіз видів 3D друку..... | 16 |
| 1.4 Аналіз існуючих видів пост-оброблювальних систем..... | 19 |
| 2 Розробка моделі ультрафіолетової камери | 24 |
| 2.1 Вибір компонентів для розробки постоброблювальної камери..... | 24 |
| 2.2 Створення 3D моделі ультрафіолетової камери..... | 30 |
| 3 Розроблення функціонального макету..... | 46 |
| 3.1 Вибір середі розробки..... | 46 |
| 3.2 Написання алгоритму роботи..... | 50 |
| 3.3 Створення схеми в TinkerCad..... | 52 |
| 3.4 Реалізація роботи схеми..... | 57 |
| 3.5 Перевірка стійкості системи..... | 60 |
| Висновки..... | 67 |
| Перелік джерел посилань..... | 68 |
| Додаток А Лістинг програми для керування УФ камерою для полімеризації..... | 73 |
| Додаток Б Демонстраційний матеріал у вигляді презентацій..... | 79 |

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ СКОРОЧЕНЬ

БЖ – блок живлення;

Вент – вентилятор;

ККД – коефіцієнт корисної дії;

УФ – ультрафіолетовий;

CFM – Cubic Feet per Minute (кубічний фут за хвилину);

DC – Direct Current (постійний струм);

DLP – Direct light processing(цифрова обробка світла);

LCD – liquid-crystal display (рідко-кристалічний екран);

LED – Light-emitting diode(світловипромінюючий діод);

SLA – Stereolithography(стереолітографія);

SLS – Selective Laser Sintering(селективне лазерне спікання).

ВСТУП

Розробка ультрафіолетових камер для постобробки виготовлених на 3D-принтерах моделей має високу актуальність у сучасній індустрії. Ультрафіолетові камери для пост-обробки в 3D-друку є важливою ланкою в процесі виробництва, особливо в контексті постійно зростаючих вимог до якості та довговічності виробів. З розвитком технологій 3D-друку та розширенням її застосування в різних галузях ультрафіолетові камери стають невід'ємною частиною виробничого процесу.

Дослідження різноманітності існуючих видів ультрафіолетових камер, їх переваг та недоліків стає ключовим аспектом для забезпечення ефективної роботи та отримання високоякісних продуктів. Таким чином, розуміння характеристик та особливостей ультрафіолетових камер відіграє важливу роль у підвищенні виробничої ефективності та забезпеченні високого рівня якості готової продукції.

Створення такої камери для персонального використання може зекономити багато грошей звичайній людині якій буде достатньо будь-якої такої камери, тому розробка камери має під собою недорогі але надійні компоненти які можна буде замінити якщо один з них вийде з ладу під час роботи.

Таким чином метою роботи є розробка макету ультрафіолетової камери для постобробки 3D виробів для ускорення, більш якісного затвердіння та їх обробки.

Мета роботи – підвищення ефективності постобробки моделей отриманих за допомогою 3D друку за технологією DLP.

Об'єкт розробки – процес постобробки деталей отриманих за допомогою 3D друку за технологією DLP.

Предмет розробки – макет ультрафіолетової камери для постобробки моделей отриманих за допомогою 3D друку за технологією DLP.

Для досягнення поставленої мети потрібно вирішити наступні задачі:

– аналіз існуючих видів постоброблювальних камер та де вони наразі використовуються;

– аналіз існуючих видів 3D-друку;

– розробка структурної схеми та на її основі здійснений вибір компонентів системи;

– розробка схеми підключень;

– створення 3D-моделі розроблюваної камери;

– розробка алгоритму роботи камери для полімеризації;

– створення макету у TinkerCad та її моделювання;

– перевірка двигуна на стійкість.

Кваліфікаційна робота виконана згідно ДСТУ 3008 – 15 [1], використовуючи навчальний посібник з дипломного проекту [2], та методичні вказівки [3].

1 АНАЛІЗ ЛІТЕРАТУРИ ЗА ТЕМОЮ

1.1 Що таке 3D DLP друк

DLP 3D друк – це одна з основних методик адитивного виробництва, в якій для друку об'єктів використовуються рідкі фотополімерні смоли це є смоли що затвердівають під впливом ультрафіолету.

Спочатку потрібно створити цифрову модель друкованого об'єкта, яку бажаєм створити. Цю модель можна створити за допомогою спеціалізованих програм для комп'ютерного моделювання або взяти готовий файл із вже існуючої бібліотеки 3D-моделей але вони іноді бувають платні.

Потім ця цифрова модель розділяється на тонкі шари, зазвичай від 25 мікрон до 100 мікрон (1 мікрон = 0,001 мм), в залежності від вимог до деталізації та роздільної здатності принтера.

Коли модель розділена на шари, процес друку розпочинається. У 3D DLP друку використовується спеціальний вид принтера, який має ряд УФ-світлодіодів (LED) або лазерів, що випромінюють ультрафіолетове (УФ) світло.

На початковому етапі принтер створює тонкий шар рідинного фотополімеру на платформі. Фотополімер є спеціальним матеріалом, який полімеризується або затвердівається під впливом УФ-світла.

Після нанесення шару рідинного фотополімеру, УФ-світло випромінюється через маску, яка має форму поточного перерізу об'єкта. Це призводить до полімеризації фотополімеру та його затвердіння відповідно до форми шару.

Коли перший шар затвердіває, платформа опускається на відстань, відповідну товщині наступного шару. Процес нанесення рідинного фотополімеру та випромінювання УФ-світла повторюється, поки не буде створено всю тривимірну модель.

Коли друк завершено, оброблений об'єкт дістається з принтера та може бути підданий постобробкам, таким як видалення підтримуючих структур або обробка поверхні для отримання більш гладкої або деталізованої поверхні, обмивка та полірування якщо це є необхідним.

Таким чином, 3D DLP друк використовує технологію фотополімеризації та цифрову модель, щоб надрукувати об'ємні об'єкти шар за шаром, що дозволяє отримати високу деталізацію, якість та швидкість друку (рисунок 1.1).



Рисунок 1.1 – Зовнішній вигляд 3D DLP принтера [1]

1.2 Для чого використовують DLP друк

DLP 3D друк використовують в наступних галузях:

а) в ювелірній справі використання 3D DLP друку дає практично необмежену безліч можливостей для виготовлення складних та витончених ювелірних виробів з високою точністю, деталізацією та швидкістю. Ось деякі способи використання 3D DLP друку у ювелірній справі:

1) створення моделей для лиття (рисунок 1.2): 3D DLP друк дозволяє ювелірам створювати деталізовані 3D моделі прикрас, які потім можна

використовувати для виготовлення литви за допомогою традиційних технологій лиття в ковші або вакуумному литтю [2];

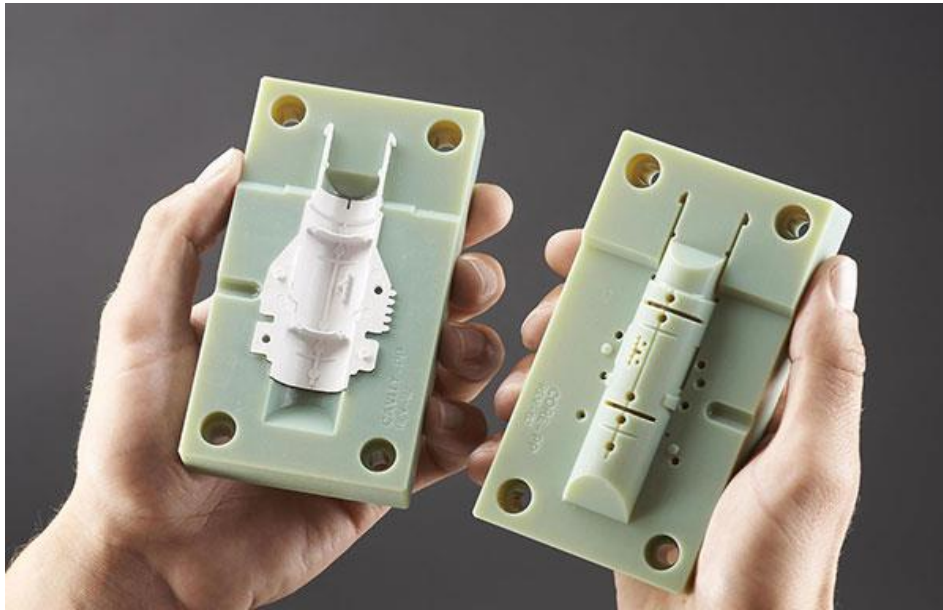


Рисунок 1.2 – Створена форма для лиття на 3D принтері [2]

2) за допомогою 3D DLP друку ювеліри можуть швидко та ефективно створювати прототипи та макети нових дизайнів прикрас, що дозволяє їм випробовувати різні варіанти та вносити корективи до дизайну перед виготовленням реального виробу;

3) завдяки можливостям індивідуалізації 3D друку, ювеліри можуть створювати унікальні та персоналізовані ювелірні вироби, адаптовані до конкретних вимог та бажань клієнтів;

4) 3D DLP друк дозволяє створювати складні та витончені форми та структури, які були б важко або неможливо виготовити за допомогою традиційних методів виготовлення;

5) 3D DLP друк може бути використаний для виготовлення заготовок та каркасів для подальшого оздоблення та додавання додаткових деталей та прикрас.

Використання 3D DLP друку в ювелірній справі дозволяє ювелірам створювати вражаючі та унікальні прикраси з високою якістю та ефективністю виробництва;

б) використання 3D DLP друку у стоматології дозволяє стоматологам створювати високодеталізовані та індивідуалізовані стоматологічні вироби з високою точністю і ефективністю. Ось деякі конкретні застосування 3D DLP друку в стоматології:

1) за допомогою 3D DLP технології можна виготовляти точні індивідуалізовані протези, коронки та мостовидні вироби, які ідеально підходять до форми та розміру зубів пацієнта. Це дозволяє стоматологам забезпечити пацієнтів якісними та комфортними рішеннями для відновлення зубної щілини;

2) 3D DLP друк дозволяє створювати деталізовані моделі зубів та челюстей на основі сканування внутрішньої структури ротової порожнини пацієнта. Ці моделі використовуються для планування лікування, виготовлення спеціальних апаратів та протезування;

3) за допомогою 3D DLP друку можна виготовляти індивідуалізовані апарати, такі як брекети, вирівнювальні трейї, а також апарати для корекції прикусу і тд. і тп.. Це дозволяє стоматологам забезпечувати пацієнтам ефективно та комфортно лікування;

4) за допомогою 3D DLP друку можна виготовляти навчальні моделі зубів та челюстей для використання у стоматологічних навчальних програмах. Ці моделі допомагають студентам стоматології отримувати практичні навички та розуміння структури зубів.

Використання 3D DLP друку в стоматології дозволяє значно поліпшити якість лікування, зменшити час виготовлення стоматологічних виробів та забезпечити індивідуальний підхід до кожного пацієнта;

в) використання 3D DLP друку у мистецтві та дизайні відкриває безліч можливостей для творчого вираження та створення унікальних та інноваційних проєктів. Ось деякі способи використання 3D DLP друку у цих областях:

1) створення скульптур і скульптурних інсталяцій за допомогою 3D DLP друку дозволяє митцям реалізовувати складні та деталізовані скульптури з

різноманітними формами та текстурами. Ця технологія дозволяє перетворювати віртуальні ідеї в реальні трирозмірні об'єкти без обмежень у формі та розмірі;

2) митці та дизайнери можуть використовувати 3D DLP друк для створення унікальних дизайнів виробів, таких як прикраси, аксесуари, стильні предмети інтер'єру та інше. Це дозволяє їм експериментувати з формами, текстурами та структурами, щоб створити інноваційні та привабливі продукти;

3) в архітектурному дизайні 3D DLP друк може використовуватися для створення моделей будівель, ландшафтів та інших архітектурних об'єктів. Ці моделі дозволяють митцям та дизайнерам візуалізувати свої концепції та демонструвати їх клієнтам та співробітникам;

4) створення художніх інструментів і матеріалів: 3D DLP друк може бути використаний для створення спеціальних художніх інструментів, шаблонів та матеріалів, які допомагають митцям в їхніх творчих процесах. Це може включати в себе створення кистей, штампів, малюнків та інших художніх інструментів.

Загальною перевагою використання 3D DLP друку у мистецтві та дизайні є можливість створення складних та інноваційних проектів, які раніше були б важко або неможливо втілити в життя за допомогою традиційних методів виготовлення;

г) використання 3D DLP друку у виробництві сувенірної продукції відкриває безліч можливостей для створення унікальних, персоналізованих та привабливих сувенірів. Ось деякі способи використання 3D DLP друку у цій галузі:

1) створення індивідуалізованих подарунків: Виробництво сувенірів за допомогою 3D DLP друку дозволяє створювати персоналізовані подарунки з унікальним дизайном. Це можуть бути, наприклад, ключниці з ім'ям або ініціалами, магніти на холодильник з фотографією, статуетки з вигравіруваними текстами та інші індивідуальні вироби;

2) виготовлення тематичних сувенірів: 3D DLP друк дозволяє виготовляти сувеніри різних форм, розмірів і тематик. Це можуть бути сувеніри, пов'язані з

місцевими пам'ятниками, традиціями, культурою або природою. Наприклад, мініатюрні моделі визначних споруд, символічні предмети або артефакти;

3) створення колекційних сувенірів: За допомогою 3D DLP технології можна створювати унікальні колекційні сувеніри, які мають великий попит серед колекціонерів та любителів антикваріату. Це можуть бути, наприклад, мініатюрні моделі історичних артефактів, статуетки персонажів культових фільмів або ігрових серій, репліки відомих творів мистецтва та інше;

4) виготовлення рекламних сувенірів: Багато компаній використовують сувенірну продукцію як ефективний інструмент маркетингу та реклами. 3D DLP друк дозволяє створювати оригінальні та цікаві рекламні сувеніри, такі як логотипи компаній, корпоративні подарунки, промо-акції та інше.

Використання 3D DLP друку в сувенірній продукції дозволяє створювати унікальні та привабливі вироби, які привертають увагу клієнтів та роблять їхні спогади незабутніми.

1.3 Аналіз видів 3D друку

Є багато видів 3D друку, але було розглянуто основні 2, такі як: 3D SLS принтер (Selective Laser Sintering) – це пристрій для адитивного виробництва, який використовує технологію селективного лазерного спікання для створення тривимірних об'єктів. Основний принцип роботи полягає в тому, що лазер нагріває та з'єднує мікроскопічні частинки порошкового матеріалу (наприклад, полімерів, металів або кераміки), шар за шаром, у відповідності до цифрової моделі об'єкта.

Основні компоненти 3D SLS принтера включають:

- лазер є головним компонент принтера, який використовується для нагрівання та спікання порошкового матеріалу;
- платформа, на якій розташовується тонкий шар порошкового матеріалу, а потім піднімається чи опускається для створення нових шарів об'єкта;

- деякі принтери мають підігрівач, який допомагає підтримувати оптимальну температуру порошку під час друку;
- бак, в якому розміщений порошковий матеріал, і система, яка подає його на робочу платформу;
- електроніка та програмне забезпечення, які керують рухом лазера, робочої платформи та інших компонентів принтера.

3D SLS (рисунок 1.3) принтери широко використовуються в промисловому виробництві для виробництва прототипів, деталей для авіаційної, медичної та автомобільної промисловості, а також для виготовлення замовних виробів у невеликих сараях [3].



Рисунок 1.3 – Зовнішній вигляд SLS 3D принтера [3]

3D SLA принтер (рисунок 1.4) (Stereolithography) – це тип 3D принтера, який використовує технологію світлочутливої полімеризації для створення тривимірних об'єктів. Основний принцип роботи полягає в тому, що ультрафіолетове (УФ) світло полімеризує рідинний фотополімерний матеріал шар за шаром, утворюючи тривимірні об'єкти.



Рисунок 1.4 – Зовнішній вигляд 3D SLA принтера [4]

Основні компоненти 3D SLA принтера включають:

- резервуар з рідинним фотополімером являє собою контейнер, в якому міститься рідинний фотополімерний матеріал;
- платформа друку являє собою підставку, на якій формується об'єкт. Платформа поступово піднімається під час друку нових шарів об'єкта;
- ультрафіолетове (УФ) світло або лазер – це ультрафіолетове світло або лазер використовуються для полімеризації рідинного фотополімеру. Світло випромінюється через маску, створюючи образ кожного шару об'єкта;
- маска SLA – це пристрій, що містить шаблон або маску, який фокусує світло на потрібних областях рідинного фотополімеру;
- механізми руху – це конструкція принтера та система моторів, які керують рухом платформи та інших компонентів для створення об'єктів шар за шаром.

3D SLA принтери зазвичай використовуються для створення високодеталізованих об'єктів з гладкою поверхнею, таких як моделі, прототипи, вироби медичного призначення, ювелірні вироби тощо. Вони добре підходять для виробництва деталей з високою точністю і високою якістю.

Основна різниця між SLA (Stereolithography), SLS (Selective Laser Sintering) принтерами полягає в технології, яку вони використовують для створення об'єктів, а також у матеріалах, які вони використовують:

а) SLA (Stereolithography):

1) SLA використовує технологію світлочутливої полімеризації. Ультрафіолетове світло або лазер використовуються для полімеризації рідинного фотополімеру, утворюючи шари об'єкта;

2) як матеріали використовуються рідинні фотополімери;

б) SLS (Selective Laser Sintering):

1) SLS використовує технологію селективного лазерного спікання. Лазер нагріває та з'єднує порошковий матеріал шар за шаром, утворюючи об'єкт;

2) як матеріал використовуються порошкові матеріали, такі як полімери, метали або кераміка.

1.4 Аналіз існуючих видів пост-оброблювальних систем та як вони відрізняються

На сьогоднішній день було розроблено 3 основні види ультрафіолетових камер:

а) ультрафіолетові камери з лампами низького тиску.

На даний момент вони в основному використовуються у невеликих лабораторіях та маленьких промислових підприємствах. Вони є економічно доступними та ефективними для полімеризації різних матеріалів, що робить їх популярними серед початківців у сфері 3D-друку.

Переваги:

- ефективно полімеризують різні матеріали;
- мають достатню потужність для швидкого затвердіння виробів;
- мають меншу вартість у порівнянні з іншими типами камер.

Недоліки:

- потребують часті заміни ламп;
 - великі споживання енергії;
 - потребують певного часу для досягнення оптимальної температури;
- б) ультрафіолетові камери з лампами високого тиску.

На даний момент вони широко використовуються у великих промислових установках, де вимагається висока продуктивність та якість обробки. Вони застосовуються у виробництві великих обсягів 3D-друкованих деталей у таких галузях, як автомобільна промисловість, медичні технології та аерокосмічна промисловість.

Переваги:

- швидше затверджують матеріали;
- мають довший термін служби ламп;
- забезпечують кращу якість обробки.

Недоліки:

- мають вищу вартість в порівнянні з камерами з низьким тиском;
 - мають більш високі вимоги до установки та обслуговування;
- в) ультрафіолетові камери з LED-діодами.

На даний момент вони використовуються у різних галузях, включаючи медицину, електроніку та авіаційну промисловість. Вони дозволяють полімеризувати матеріали з високою точністю та енергоефективністю, що робить їх популярними серед виробників, які цінують якість та економію енергії.

Переваги:

- енергоефективні;
- мають найдовший термін служби;
- швидко набирають оптимальну температуру.

Недоліки:

- більша ціна, ніж у попередніх видів;
- обмежені у можливостях обробки певних матеріалів.

Також було проаналізовано 2 існуючих постоброблювальних камери.

Полімеризатор Formlabs From Cure (рисунок 1.5).



Рисунок 1.5 – Зовнішній вигляд полімеризатора From Cure [5]

From Cure – це пристрій для полімеризації який розроблений компанією Formlabs для зміцнення та підвищення якості надрукованих деталей із фотополімерної смоли на 3D принтерах.

Основні характеристики Form Cure:

- Form Cure оснащений 13 світлодіодами;
- користувач може налаштувати час й інтенсивність випромінювання в залежності від точного матеріалу й необхідних характеристик;
- пристрій має вбудований нагрівач, що дозволяє легко контролювати температуру всередині камери, що є корисним за деяких умов;
- формулятори обладнання цифровим дисплеєм для зручного керування процесом полімеризації;

– пристрій спроектований так, щоб вміщати деталі різних розмірів, що робить його універсальним для різних типів проектів.

Form Cure розроблено для оптимальної післяполімеризації деталей, роздрукованих на 3D-принтерах Formlabs. Після друку деталі поміщаються в камеру Form Cure, де вони опромінюються ультрафіолетовим світлом, що призводить до полімеризації смоли та зміцнення структури.

Пристрій забезпечує рівномірне та контрольоване опромінення, що дозволяє досягти високої міцності та стабільності деталей. Регульовані параметри опромінення та контроль температури забезпечують оптимальні умови для різних типів смол та вимог проекту.

Anycubic Wash Cure 2.0 (рисунок 1.6).



Рисунок 1.6 – Зовнішній вигляд камери пост обробки Anycubic Wash Cure 2.0

[6]

Anycubic Wash&Cure 2.0 – це пристрій 2 в 1, який поєднує функції механічного очищення та ультрафіолетової полімеризації для деталей, виготовлених з використанням 3D DLP принтерів.

Ось його основні характеристики та функції:

– пристрій оснащений вбудованим баком для рідини, який призначений для ефективного видалення залишків смоли з поверхні надрукованих деталей;

- Anycubic Wash&Cure 2.0 має вбудовані ультрафіолетові лампи потужністю 405 нм, які забезпечують рівномірну та ефективну полімеризацію;
- користувачі мають можливість налаштувати час та інтенсивність опромінення відповідно до вимог матеріалу та характеристик деталей;
- пристрій оснащений інтуїтивно зрозумілою панеллю керування з РК-дисплеєм, що полегшує процес налаштування та використання;
- наявність вбудованого нагрівача дозволяє контролювати температуру всередині камери, що особливо корисно для певних типів смол та процесів полімеризації.

2 РОЗРОБКА МОДЕЛІ УЛЬТРАФІОЛЕТОВОЇ КАМЕРИ

2.1 Вибір компонентів для розробки постоброблювальної камери

Під час другого етапу буде проведено розробку структурної схеми (рисунок 2.1) та буде створена 3D модель постоброблюваної камери. Першим етапом є створення самої структурної схеми для розуміння роботи схеми й вірного обирання компонентів.

Основними компонентами ультрафіолетової камери є:

- блок живлення(БЖ);
- мікроконтролер;
- ультрафіолетові стрічки або матриці;
- реле;
- кнопки;
- система охолодження;
- екран;
- двигун;
- кнопки.



Рисунок 2.1 – Розроблена структурна схема постоброблювальної камери

На розробленій схемі представлена робота проекту, на якій видно для чого й як будуть використовуватись усі компоненти. Джерело живлення буде живити усю систему та один із найголовніших компонентів мікроконтролер, буде в свою чергу за допомогою реле керувати ультрафіолетовою стрічкою, також вона буде керувати двигуном, який буде обертати платформу зі швидкістю 1об/хв, та екраном на якому буде висвічуватись відповідна інформація про стан системи та скільки часу полімеризації залишилось. Також на створеній схемі зображено що мікроконтролер не буде керувати вентилятором, тому що це не є потрібним, він починає свою роботу із підключенням системи до мережі. Також на схемі видно що кнопки також не керуються мікроконтролером, бо вони при натисканні замикають мережу й подається логічний сигнал який даватиме зрозуміти що мікроконтролеру потрібно буде щось зробити.

Наступним чином після створення структурної схеми, потрібно розробити алгоритм обирання вірних та відповідних для проекту компонентів.

Першим кроком потрібно обрати сам мікроконтролер та вже на основі нього буде проводитись відбір інших сумісних із ним компонентів.

Після проведених аналізів було обрано мікроконтролер ArduinoUno (рисунок 2.2) через низку причин:

а) простота використання:

1) Arduino Uno має дуже простий інтерфейс та просте середовище розробки (IDE), що робить його ідеальним вибором для цього проекту, тому що програмування на ньому не потребує великих навичок та підходить будь якому користувачу;

б) достатня кількість входів/виходів:

1) Arduino Uno має 14 цифрових входів/виходів та 6 аналогових входів, що достатньо для підключення всіх необхідних компонентів у проекті;

2) Arduino Uno має можливість розширення через різні модулі, якщо потрібний додатковий функціонал або піни;

в) низька вартість та доступність:

1) Arduino Uno дуже доступний за ціною, що робить його ідеальним для використання в проєкті якщо малий бюджет;

г) відповідність завданням проєкту:

1) Arduino Uno має достатню продуктивність для керування реле, кнопками, екранами, двигунами та ультрафіолетовими стрічками;

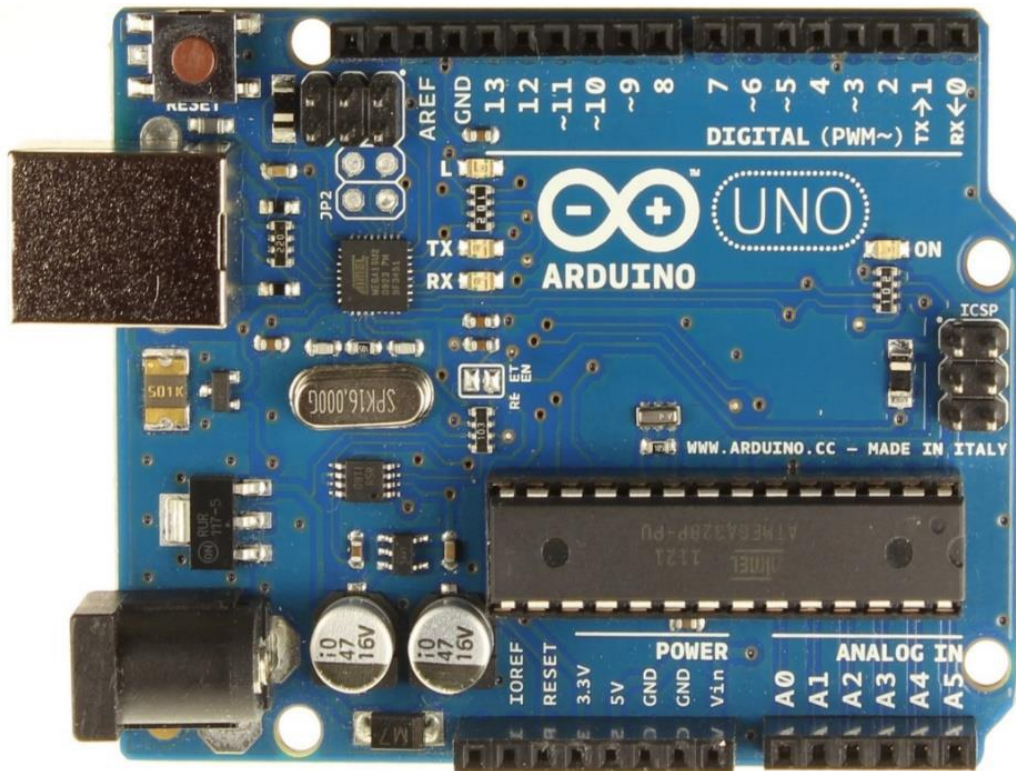


Рисунок 2.2 – зовнішній вигляд Arduino Uno[7]

Також були розглянуті інші претенденти на цю роль, але вони не підходять через низку причин:

а) Raspberry Pi:

1) він вимагає більше ресурсів (живлення, охолодження і тд.) та знань для налаштування та використання, так само може бути надмірно складним та потужним для розроблюваного проєкту що не є доцільним;

2) більш висока ціна за Arduino Uno;

б) STM32:

1) STM32 є більш потужним та гнучким мікроконтролером але його використання вимагає більш глибоких знань у програмуванні та електроніці;

в) ESP32:

1) він є більш складним у використанні та налаштуванні порівняно з Arduino Uno.

Таким чином Arduino Uno – це ідеальний вибір для проекту завдяки своїй простоті, доступності та достатній кількості входів/виходів. Він забезпечує всі необхідні функції для управління компонентами проекту і його використання дозволить зосередитись на розробці та реалізації функціоналу, а не на складних налаштуваннях та програмуванні мікроконтролера.

Другим кроком є обирання ультрафіолетової стрічки або матриці.

Після проведених аналізів для проекту було обрано ультрафіолетові стрічки (рисунок 2.3) через наступні переваги:

– стрічки можна легко розмістити та встановлювати у різних системах через їх гнучкість, що дозволяє точно підлаштуватися під форму та розміри камери. Гнучкість стрічки дозволяє обертати навколо об'єктів або встановлювати в обмежених просторах при необхідності;

– ультрафіолетові стрічки в основному мають клейову основу для кріплення, що спрощує її встановлення та фіксацію на поверхні;

– стрічки в основному забезпечують більш рівномірне розподілення світла по поверхні, що важливо для рівномірної полімеризації;

– стрічка споживає менше енергії, порівняно з матрицями, що знижує загальні енерговитрати проекту;

– стрічка виділяє менше тепла в порівнянні з матрицями, що є важливим для контролю температури в камері.



Рисунок 2.3 – Зовнішній вигляд ультрафіолетової стрічки [8]

Також для більшої наочності потрібно розглянути й матрицю.

Переваги використання:

- уф-матриці забезпечують потужніше випромінювання, що може прискорити процес полімеризації. Підходить для завдань, що вимагають високої інтенсивності ультрафіолетового світла на малій площі;

- матриці займають менше місця, що може бути корисним.

Недоліки використання:

- матриця потребує більш складне кріплення та ретельнішу установку для забезпечення правильного розподілу світла. Можуть бути потрібні додаткові тепловідведення або системи охолодження через вище тепловиділення;

- матриці нерівномірно розподіляють світло, що може призвести до нерівномірної полімеризації об'єктів що вимагає дуже точного налаштування та калібрування;

– матриці споживають більше енергії, що збільшує вимоги до блоку живлення та загальні енерговитрати, що потребує більш сильного охолодження.

Таким чином використання УФ-стрічки у проекті є кращим вибором завдяки гнучкості, простоті установки, рівномірному освітленню, енергоефективності та меншому тепловиділенню. УФ-матриці можуть бути корисними у певних ситуаціях, що вимагають високої інтенсивності світла, але у проекті стрічки будуть забезпечувати більш стабільний та зручний процес полімеризації.

Третім кроком є обирання підходящого реле. Для того щоб обрати реле потрібно знати що це таке тому, реле – це електромеханічний пристрій, який використовується для керування ланцюгами з високою напругою або струмом за допомогою низьковольтних сигналів. Реле функціонує як перемикач, який може замикати або розмикати електричний ланцюг залежно від сигналу, поданого на його вхід, що управляє.

Для проекту, що складається з блоку живлення, мікроконтролера Arduino Uno, ультрафіолетових стрічок, кнопок, системи охолодження (в нашому випадку вентилятора), екрану та двигуна, важливо вибрати реле, яке зможе надійно керувати УФ-стрічками. Розглянемо ключові параметри вибору реле:

– воно повинно мати котушку, яка працює при напрузі, сумісній із виходами Arduino Uno. Зазвичай це 5 В реле;

– контакти реле повинні витримувати робочу напругу та струм навантаження, що підключається до них. Наприклад, якщо УФ стрічки працюють при 12 В і споживають до 10 А, реле повинно витримувати ці параметри;

– у розроблюваному проекті набагато краще використовувати електромеханічне реле для простоти та економічності. Однак, якщо потрібна висока надійність та швидкість перемикання, можна розглянути твердотільне реле.

Таким чином для розроблюваного проекту підійде реле Songle SRD-05VDC-SL-C (рисунок 2.4). Воно має наступні характеристики:

- напруга котушки 5 В DC (підходить для керування від Arduino Uno);
- максимальний струм, що комутується 10 А при 250 В AC або 30 В DC (підходить для УФ-стрічок);
- 1 канал (Single Pole Double Throw, SPDT) більше й не потрібно.



Рисунок 2.4 – Зовнішній вигляд реле Songle SRD-05VDC-SL-C [9]

Таким чином для керування УФ-стрічками оптимально використовувати 5 В електромеханічне реле, таке як Songle SRD-05VDC-SL-C. Воно сумісне з Arduino Uno та здатне комутувати навантаження з напругою до 30 В DC та струмом до 10 А, що підходить для УФ-стрічок. Правильне підключення реле забезпечить надійне керування УФ-стрічками, гарантуючи стабільність та безпеку системи.

Четвертим кроком є обирання двигуна для обертання платформи. Для управління платформою, що обертається, якій потрібне гнучке налаштування швидкості (приблизно 1 оборот в хвилину, але можливість налаштування важливіше), знадобиться двигун з точним керуванням і можливістю

регулювання швидкості. Після проведених аналізів було знайдено 2 підходящих двигуна.

Кроковий двигун 28BYJ-48.

Переваги використання:

- дозволяє точно контролювати положення платформи та швидкість обертання;

- легко керується за допомогою драйвера та мікроконтролера наприклад, з використанням драйвера ULN2003 та Arduino Uno;

- дозволяє досягти низьких швидкостей через вбудований редуктор, що корисно для точного налаштування обертів;

- можна легко змінити швидкість обертання, змінюючи кількість кроків за секунду.

Недоліки використання:

- вимагає складного керування необхідна синхронізація кроків, особливо при зміні швидкості;

- споживає більше енергії у порівнянні з DC двигуном.

DC двигун із редуктором.

Переваги використання:

- керується за допомогою ШІМ (широтно-імпульсна модуляція) або контролера швидкості;

- мотори з редуктором часто міцніші та довговічніші ніж аналоги;

- легко змінюється шляхом зміни напруги або ШІМ-сигналу;

- вони є більш енергоефективні ніж крокові двигуни.

Недоліки:

- менш точне позиціонування: Не такий точний як кроковий двигун.

Таким чином було обрано двигун N20 з редуктором (рисунок 2.5), через високу точність та стабільність, а також тому що він легко керується за допомогою Arduino Uno та драйвера L298N.



Рисунок 2.5 – Зовнішній вигляд двигуна постійного струму з редуктором [10]

Наступним кроком потрібно вибрати екран для відображення інформації про стан системи, тобто скільки хвилин ще буде йти полімеризація. Для проекту екран має бути сумісним із Arduino Uno та забезпечувати зручне відображення даних.

Після проведених аналізів було обрано дисплей LCD 16x2 з інтерфейсом I2C. Тепер треба розібрати чому саме він, розглянемо на основі двох існуючих:

а) LCD 16x2 з паралельним інтерфейсом:

- 1) доступний, популярний, добре підтримується;
- 2) займає багато пінів на Arduino;

б) LCD 16x2 з інтерфейсом I2C:

- 1) доступний, використовує всього 2 піна (SDA та SCL) на Arduino, зручний у підключенні;
- 2) трохи дорожче, ніж паралельний;

Таким чином для проекту найкраще підходить LCD дисплей з інтерфейсом I2C, оскільки він звільняє піни Arduino для інших завдань і легко інтегрується в схему. Його переваги:

- використовує лише 2 піни для зв'язку, залишаючи інші піни вільними для інших компонентів (наприклад, реле, кнопок та двигуна) що є дуже корисним у розроблюваній системі через малу кількість пінів;
- менш громіздка проводка, спрощує проектування та налагодження схеми;
- підтримується більшістю бібліотек Arduino, що спрощує програмування.

Вибір I2C LCD 16x2 (рисунок 2.6) дисплея для проекту є оптимальним рішенням завдяки його простоті підключення, економії пінів та підтримці Arduino. Він дозволить легко відображати необхідну інформацію та інтегруватись з іншими компонентами схеми.

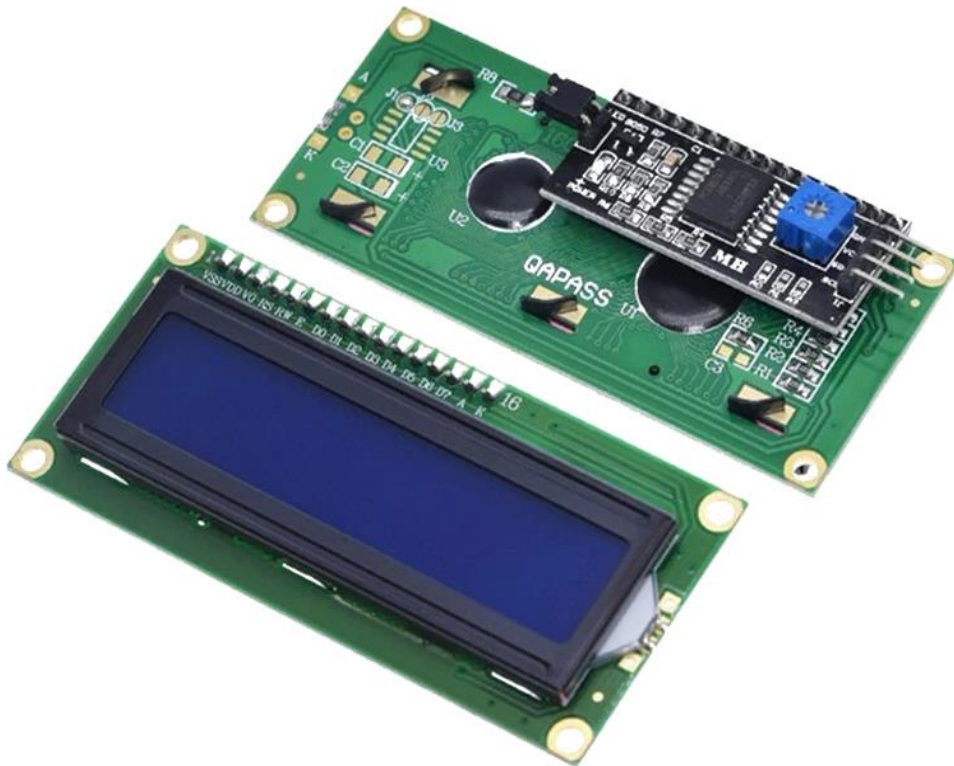


Рисунок 2.6 – Зовнішній вигляд дисплею I2C LCD 16x2 [11]

Наступним кроком потрібно обрати блок живлення для усієї системи, для того щоб його обрати потрібно знати детальні характеристики компонентів системи та для чого вони використовуються:

а) Arduino Uno: використовується для управління системою:

1) живлення: 5 В через USB або VIN (7-12 В);

2) споживання: близько 50 мА (без урахування підключених компонентів);

б) ультрафіолетові стрічки використовуються для полімеризації об'єкту у середині самої камери:

1) напруга: 12 В;

2) споживання: 14,4 Вт/м (наприклад, при довжині стрічки 1 м буде 1,2 А);

в) реле Songle SRD-05VDC-SL-C: використовується для керування УФ-стрічкою, підключеною до 12 В:

1) напруга котушки 5 В;

2) струм котушки: близько 70 мА;

г) кроковий двигун 28BYJ-48 із драйвером ULN2003: використовується для обертання платформи на якій буде стояти об'єкт який піддається полімеризації:

1) напруга: 5 В;

2) споживання: приблизно 240 мА на фазу, 4 фази (близько 960 мА);

г) дисплей I2C LCD 16x2 використовується для відображення інформації про стан системи:

1) напруга живлення 5 В.

Тепер час розрахувати необхідні данні для вибору блоку живлення, першим етапом буде розрахунок струмів за формулою:

$$A_{iB} = \sum_{s=1}^n B_s, \quad (2.1)$$

де В – напруга.

Таким чином отримуємо наступне:

$$A_{5\text{ В}} = 0,5 + 0,1 + 0,2 = 0,8,$$

$$A_{12\text{ В}} = 2 + 0,3 = 2,3.$$

Тепер час розрахувати сумарну потужність за формулою:

$$P_{i\text{ В}} = U \cdot A_{i\text{ В}}, \quad (2.2)$$

де U – напруга;

$A_{i\text{ В}}$ – розрахований струм.

Таким чином отримуємо наступне:

$$P_{5\text{ В}} = 5 \cdot 0,8 = 4 \text{ Вт},$$

$$P_{12\text{ В}} = 12 \cdot 2,3 = 27,6 \text{ Вт}.$$

Таким чином за допомогою цих розрахунків стало ясно що для цього проекту потрібен блок живлення з двома входами на 12 В та 5 В або з одним на 12 В та додаткового використання перетворювача напруги, та також потужністю більшою за 35 Вт.

Після проведених аналізів було обрано блок живлення MEAN WELL RS-35-12 (рисунок 2.7) через низку причин:

- вихідна напруга дорівнює 12 В, що ідеально підходить для компонентів, що потребують 12 В (УФ-стрічки, вентилятор, драйвер двигуна);
- вихідний струм до 2,92 А, що достатньо для живлення всіх компонентів у проекті;
- компактний розмір, зручний для інтеграції у корпус пристрою;
- легкість монтажу, завдяки стандартним отворах кріплення і роз'ємам;

- захист від перенапруги запобігає пошкодженню підключених компонентів;
- захист від перевантаження струмом захищає блок живлення та компоненти від перевантажень;
- захищає систему у разі короткого замикання;
- ККД до 82%, що означає менше тепловиділення та ефективніше використання енергії;
- не потрібне активне охолодження (Вент), що зменшує шум та підвищує надійність.



Рисунок 2.7 – Зовнішній вигляд MEAN WELL RS-35-12 [12]

Також як раніше було розглянуто у даного блоку лише 1 вихід на 12 В, а деякі компоненти проекту потребують напруги в 5 В, тому потрібно використовувати перетворювач напруги. Після проведених аналізів було обрано LM2596 DC-DC (рисунок 2.8) через низку причин:

- проект використовує блок живлення на 12 В та має компоненти, що працюють на 5 В. LM2596 ідеально підходить для зниження напруги з 12 В до 5 В;
- здатний забезпечувати до 3 А, що достатньо для живлення компонентів;

– високий ККД перетворювача означає, що менше енергії буде губитися у вигляді тепла, що важливо для підтримки стабільної температури всередині камери.

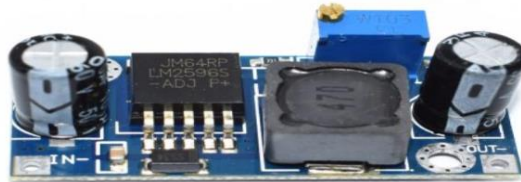


Рисунок 2.8 – Зовнішній вигляд перетворювача напруги LM2596 DC-DC [13]

Наступним кроком буде обирання вентилятора для охолодження блоку живлення та ультрафіолетової стрічки, тому потрібно розрахувати параметри які допоможуть обрати вентилятор.

Для розрахунку нам знадобиться значення теплової потужності, вона розраховується наступним чином:

$$Q = U \cdot I, \quad (2.3)$$

де Q – тепла потужність;

U – напруга;

I – Струм.

Тепер потрібно розрахувати цю потужність для кожного компоненту щоб отримати сумарну теплову потугу.

Arduino Uno:

$$Q = 12 \cdot 0,5 = 6.$$

Уф-стрічки:

$$Q = 12 \cdot 0,2 = 2,4.$$

Реле:

$$Q = 5 \cdot 0,07 = 0,35.$$

Екран:

$$Q = 5 \cdot 0,02 = 0,1.$$

Кроковий двигун:

$$Q = 5 \cdot 0,96 = 4,8.$$

Наступним кроком можна переходити до розрахунку вже самого повітряного потоку за формулою:

$$CFM = \frac{Q}{\Delta T \cdot K}, \quad (2.4)$$

де Q – сумарна теплова потуга;

ΔT – цільова температура.

Таким чином отримуємо наступне:

$$CFM = \frac{14,85}{30 \cdot 1,75} = 0,69.$$

Виходячи з розрахунку у роботі потрібен вентилятор з повітряним потоком приблизно 0,7 CFM за цими даними можна вибрати вентилятор із запасом повітряного потоку, наприклад Arctic F8 [14]. Він має наступні переваги:

- високий повітряний потік 31 CFM що набагато перевищує мінімальні вимоги до охолодження системи з тепловою потужністю близько 38,85 Вт. Це забезпечує ефективне охолодження навіть за максимального навантаження;
- низька ціна 5 USD (196 UAH), робить Arctic F8 чудовим вибором для проектів що дозволяє не жертвувати при цьому якістю та продуктивністю;
- вентилятор легко інтегрується в систему завдяки стандартному розміру та простоті монтажу;
- робоча напруга дорівнює 12 В, що є відповідним до обраного блоку живлення;
- маленькі розміри.

Таким чином Arctic F8 (рисунок 2.9) є оптимальним вибором для проекту ультрафіолетової камери, пропонуючи чудове поєднання високої продуктивності, економічності та надійності. Цей вентилятор здатний ефективно впоратися з охолодженням системи, забезпечуючи стабільну роботу всіх компонентів та запобігаючи перегріву.



Рисунок 2.9 – Зовнішній вигляд вентилятора Arctic F8 [14]

Залишився останній крок – обирання кнопок. Після проведених аналізів була обрана модель тактової кнопки Omron B3F-1002 через низку причин:

- номінальна напруга: 5 В що ідеально підходить під Arduino Uno;
- номінальний струм: 50 мА;
- стандартний розмір (6x6 мм) що робить цю модель ідеальною для проекту бо не будуть займати багато місця;
- B3F-1002 має високий ресурс, що означає, що вона може витримувати до 100 000 циклів натискання. Це гарантує тривалий термін служби пристрою без необхідності заміни кнопки;
- Omron B3F-1002 має невелику ціну яка ідеально підходить.

Таким чином тактова кнопка Omron B3F-1002 (рисунок 2.10) є відмінним вибором завдяки своїй надійності, низькій ціні та відповідності вимогам щодо напруги та струму. Вона легко інтегрується у схему та забезпечує зручність використання.



Рисунок 2.10 – Зовнішній вигляд тактової кнопки Omron B3F-1002 [15]

Після того, як було обрано всі компоненти моделі можна зібрати її та створити схему підключення (рисунок 2.11).

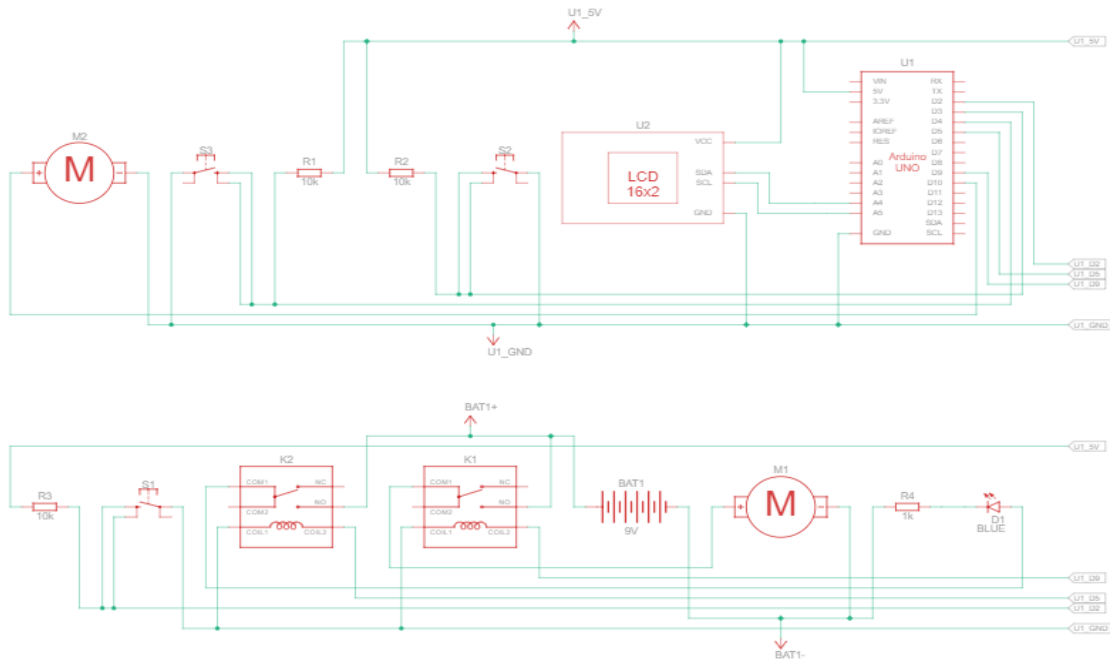


Рисунок 2.11 – Розроблена схема підключення

Також було дуже схематично зображено розташування усіх компонентів у середині самого пристрою (рисунок 2.12).

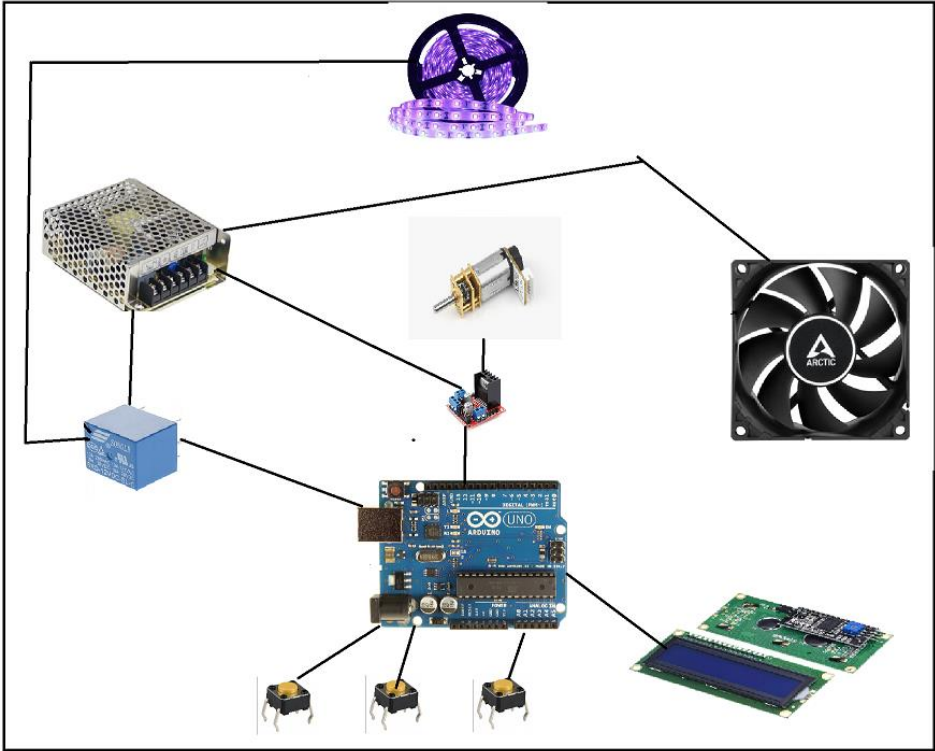


Рисунок 2.12 – Зображення схематичного розташування компонентів у пристрої

2.2 Створення 3D моделі ультрафіолетової камери

Після того як було створено структурну схему та по ній вибрано необхідні компоненти настав час для створення 3D моделі самої ультрафіолетової камери, щоб її створити ще потрібно обрати відзеркалюючу поверхню всередині самої камери щоб процес полімеризації проходив швидше та обрати матеріали для корпусу.

Першим чином потрібно обрати матеріал для корпусу. Після проведених аналізів найкращім вибором є оргскло через низку причин:

- оргскло (рисунок 2.13) не пропускає УФ-випромінювання, що захищає навколишнє середовище та користувачів від потенційно шкідливих ефектів УФ-світла. Це особливо важливо для безпеки під час роботи з УФ-камерами;
- через свою прозорість оргскло дозволяє спостерігати за процесом полімеризації усередині камери, не відкриваючи її. Це покращує контроль над процесом та дозволяє візуально перевіряти стан об'єкта;
- оргскло легше і міцніше за звичайне скло, що робить його зручним для використання в переносних пристроях. Воно також менш крихке, що знижує ризик пошкоджень та підвищує довговічність корпусу;
- оргскло має хорошу стійкість до більшості хімічних речовин, що важливо в умовах роботи або використання. Воно не схильне до корозії або руйнування під впливом більшості полімеризуючих агентів.

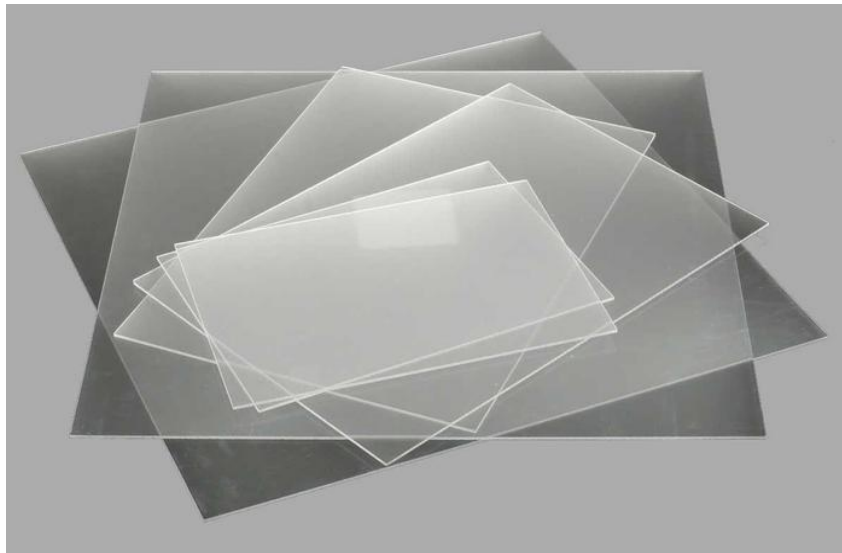


Рисунок 2.13 – Зовнішній вигляд оргскла [16]

Наступним кроком потрібно вибрати світловідбивну поверхню для більш рівномірної полімеризації та для того, щоб ультрафіолетову стрічку можна було розташувати в одному місці, а не по всій камері. Після проведених аналізів було зрозуміло що в основному використовують такі види світловідбивних поверхонь:

а) дзеркальна плівка (Mylar):

1) висока здатність, що відображає (до 98%). Забезпечує рівномірний розподіл УФ-світла;

2) простота монтажу та припасування під будь-які розміри камери;

3) стійкість до УФ-випромінювання, довговічність матеріалу, що є важливим для тривалого використання;

4) необхідно стежити за відсутністю бульбашок та складок при встановленні;

б) алюмінієва фольга:

1) висока відображальна здатність (до 95%). Доступний і недорогий матеріал;

2) легкість обробки та встановлення, може бути легко змінений до розмірів камери;

3) м'якість і схильність до пошкоджень є проблемою через яку можуть виникати нерівномірності поверхні;

4) не завжди рівномірна поверхня: Це може призвести до нерівномірного розподілу ультрафіолетового світла.

Таким чином після детального порівняння було обрано дзеркальну плівку Mylar (рисунок 2.14). Дзеркальна плівка (Mylar) є найбільш поширеним вибором для УФ-камер завдяки своїм відмінним властивостям, що відбивають ультрафіолетове світло, легкості монтажу і стійкості до УФ-випромінювання. Цей матеріал забезпечує рівномірний розподіл світла, що сприяє більш швидкій та якісній полімеризації об'єктів усередині камери.

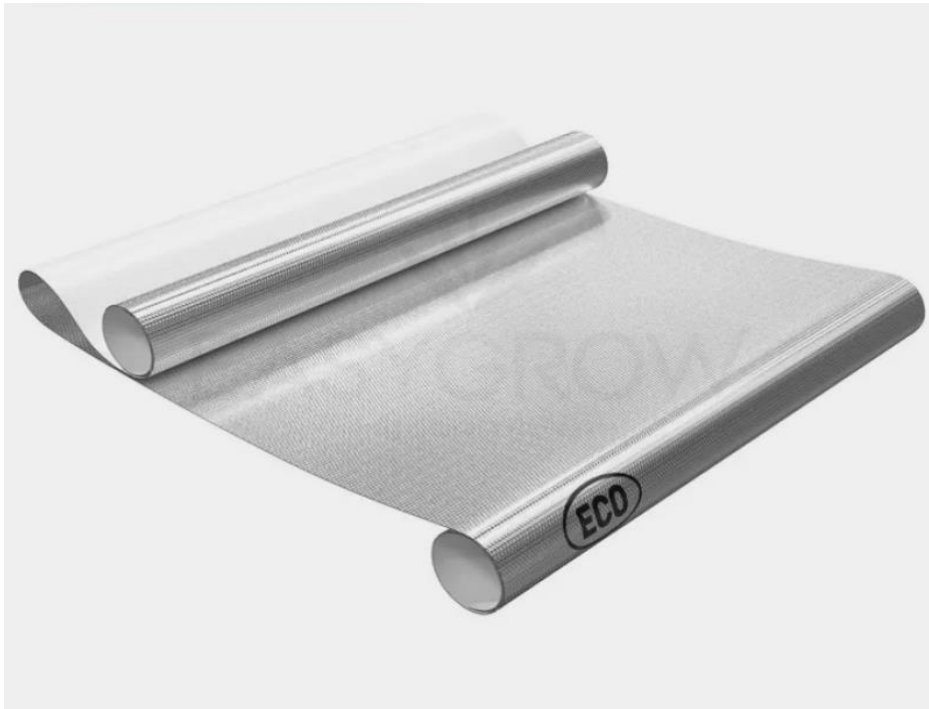


Рисунок 2.14 – Зовнішній вигляд світловідбиваючої плівки Mylar [17]

Тепер коли обрані всі матеріали потрібно перейти до створення самої моделі побудованої камери. Модель буде розроблено в програмі Blender [15] інтерфейс програми буде наведено нижче (рисунок 2.15).

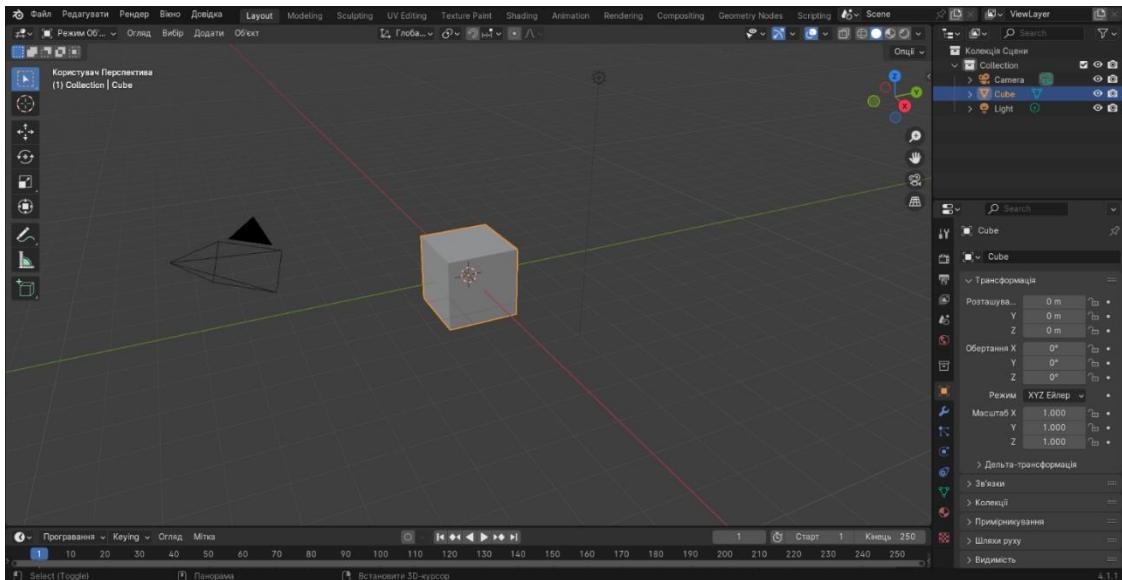


Рисунок 2.15 – Зовнішній вигляд інтерфейсу програми Blender[18]

Першим кроком було створено платформу на якій стоїть вся камера, також у середині цієї платформи знаходяться всі компоненти. Також одразу було створено особливі отвори для УФ-стрічки та для двигуна щоб він міг контактувати із платформою, також одразу було встановлено в нього екран та 3 кнопки (рисунок 2.16).

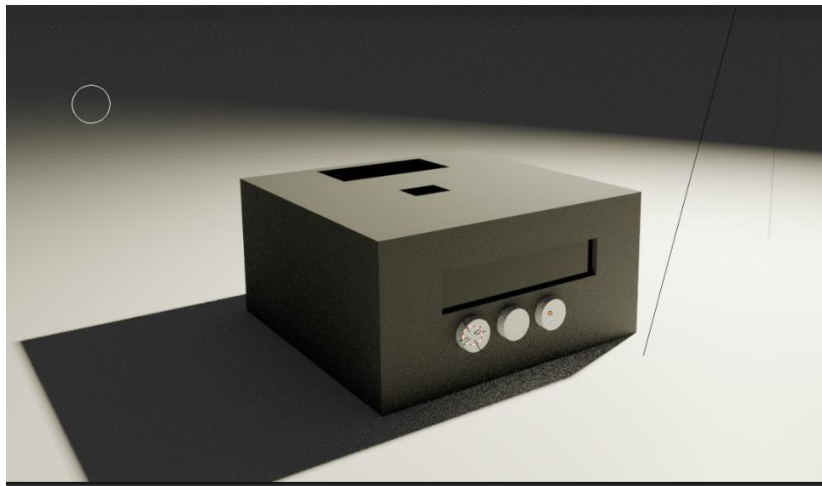


Рисунок 2.16 – Зовнішній вигляд створеної платформи із трьома кнопками та екраном

Наступним кроком було створено обертову платформу яка об'єднана із двигуном (рисунок 2.17).

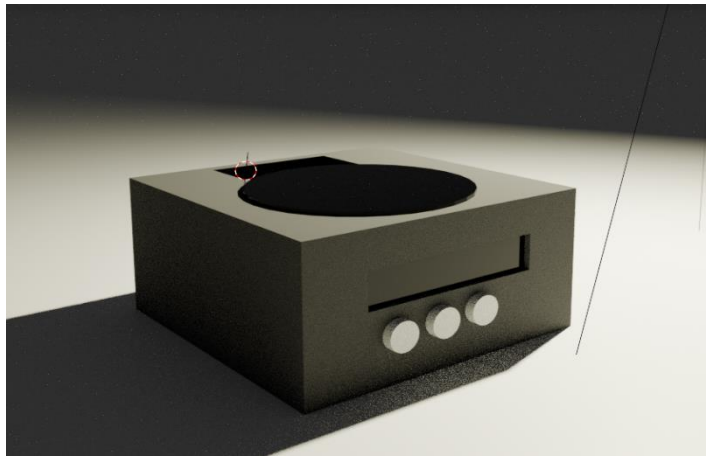


Рисунок 2.17 – Зовнішній вигляд створеної платформи із обертовою платформою

Третім кроком було створено відокремлену платформу яка стоїть вертикально та містить у собі ультрафіолетову стрічку яка буде стояти в одному місці (рисунок 2.18).

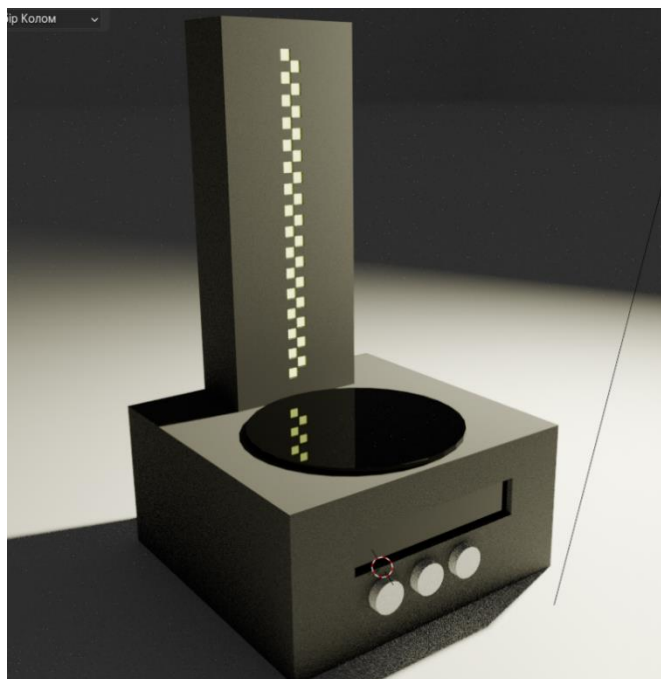


Рисунок 2.18 – Зовнішній вигляд створеної платформи із спеціальним місцем для ультрафіолетової стрічки

Останнім кроком було створено корпус з оргскла, двері та ручку щоб було можна відчиняти двері (рисунок 2.19).



Рисунок 2.19 – Зовнішній вигляд повністю створеної моделі ультрафіолетової камери для постобробки

3 РОЗРОБЛЕННЯ ФУНКЦІОНАЛЬНОГО МАКЕТУ

3.1 Вибір середі розробки

Для створення моделі було проведено аналіз існуючих платформ для моделювання електронних схем таких як TinkerCad, Fritzing та Wowki.

Tinkercad (рисунок 3.1) – це безкоштовна онлайн-платформа для 3D-дизайну, електроніки та кодування. Вона розроблена компанією Autodesk та призначена для простого та інтуїтивно зрозумілого створення 3D-моделей та електронних схем. Tinkercad широко використовується для освітніх цілей, хобі та швидких прототипів.

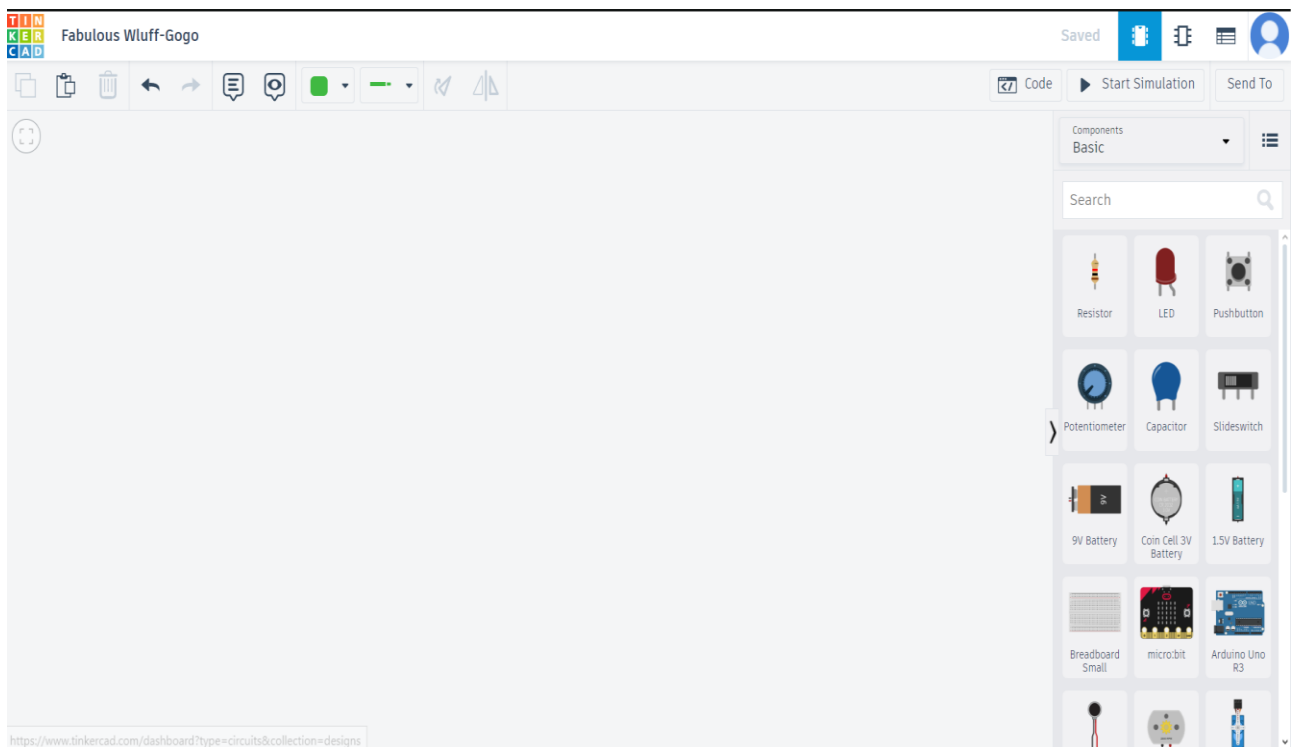


Рисунок 3.1 – Скріншот робочого інтерфейсу TinkerCad [19]

Під час аналізу було виділено наступні переваги Tinkercad. Він має інтуїтивно зрозумілий інтерфейс, який робить його простим та зручним для швидкого створення та тестування схем. Оскільки Tinkercad є веб-програмою, то не потрібно встановлювати додаткове програмне забезпечення на комп'ютер.

Можна працювати над проектом з будь-якого пристрою, який має доступ до Інтернету.

Tinkercad надає можливість швидкого створення схеми та макету, що особливо корисно для початкових етапів проектування та перевірки різноманітних концепцій. Tinkercad має вбудовану підтримку Arduino, що дозволяє нам моделювати та програмувати мікроконтролери прямо у браузері. Це дуже зручно для роботи з Arduino Uno у розроблюваній системі.

Також можна бачити, як створена схема працює в реальному часі, та вносити будь які зміни під час роботи. Це полегшує процес налагодження та тестування. Tinkercad надає доступ до широкої бібліотеки електронних компонентів, що дозволяє легко знаходити і додавати необхідні елементи у вашу схему. Tinkercad має активну спільноту користувачів та безліч навчальних матеріалів, що може бути корисним при виникненні питань чи проблем.

Також під час аналізу було виділено наступні мінуси використання TinkerCad. Він відмінно підходить для простих та середніх за складністю проектів, але його функціонал може бути обмежений для більшості складних професійних схем та будь-яких моделей, відсутня підтримка багат шарових друкованих плат та складних трасувань що обмежує в роботі. Незважаючи на наявність базової бібліотеки компонентів, Tinkercad може не мати всіх необхідних складних проектів елементів, що обмежує його використання у професійному середовищі також відсутність необхідних компонентів визиває іноді труднощі, та навіть часом може бути причиною щоб змінити програму.

Tinkercad працює лише онлайн, що потребує постійного доступу до інтернету. Це може бути незручно в умовах обмеженого або відсутнього інтернет-з'єднання. Оскільки Tinkercad є веб-програмою, його продуктивність може залежати від швидкості інтернет-з'єднання та потужності браузера. Це може стати проблемою роботи з великими проектами або складними моделями.

Також є обмежена інтеграція з іншими професійними інструментами для дизайну та симуляції.

Fritzing (рисунок 3.2) – це платна програма з відкритим вихідним кодом, призначена для створення електронних схем, макетів та друкованих плат (PCB). Вона розроблена для спрощення процесу проектування та документування електронних схем, а також створення друкованих плат.

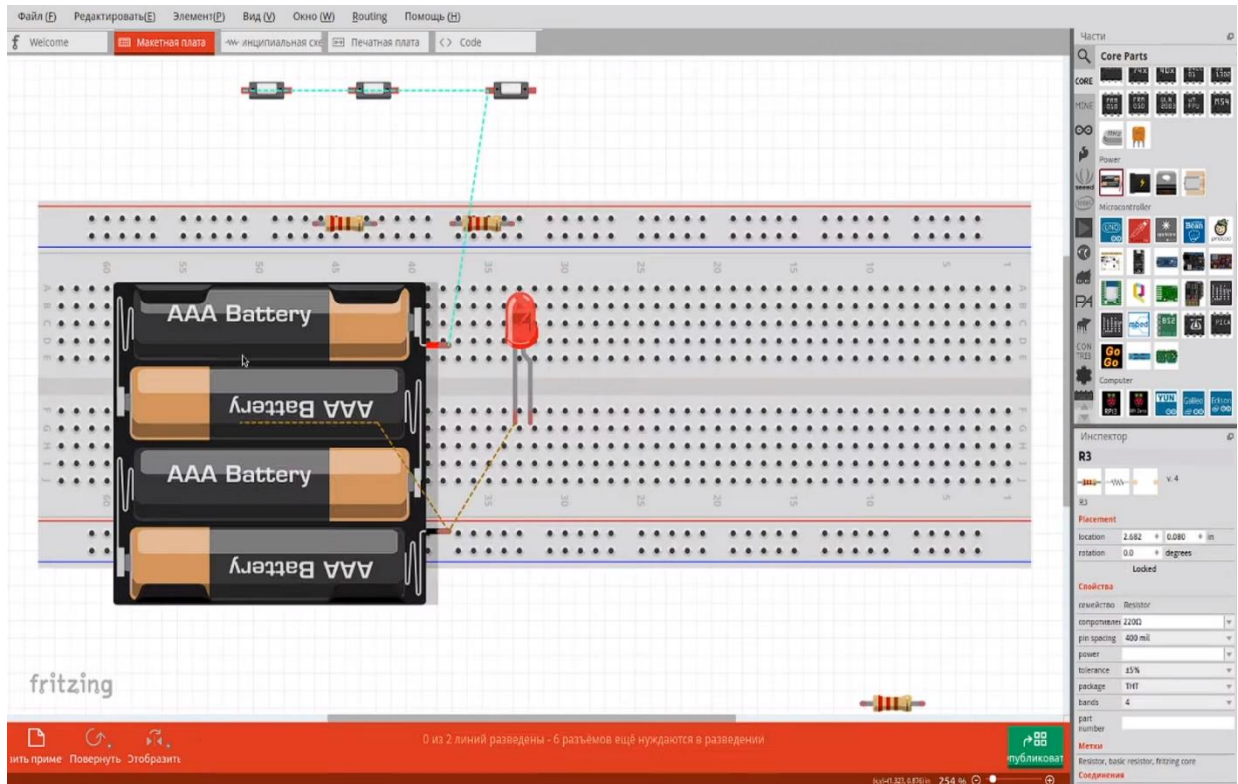


Рисунок 3.2 – Скріншот робочого інтерфейсу Fritzing [20]

Fritzing є програмою достатньо простою для використання та також має інтуїтивно зрозумілий інтерфейс що робить його доступним для початківців та людей для яких це лише хоббі. Також є можливість створювати макети на макетних платах (breadboard), що полегшує процес прототипування та тестування схем. Можливість проектування друкованих плат та підготовки файлів для їхнього виробництва. Вона є програмою з відкритим вихідним кодом, що дозволяє спільноті вносити покращення та додавання.

Також не дивлячись на усю простоту програми вона підходить для середніх за складністю проектів, але може бути обмежена для професійних та складніших схем. У порівнянні з професійними інструментами у Fritzing менше можливостей для налаштування та аналізу схем.

Через те, що це є програма яку потрібно встановлювати вона може потребувати більше ресурсів та через це може уповільнюватися під час роботи з великими проектами або схемами з великою кількістю компонентів.

Wokwi (рисунок 3.3) – це онлайн-платформа для симуляції та розробки проектів на основі мікроконтролерів, таких як Arduino, ESP32, ESP8266 та інших. Вона дозволяє користувачам створювати, тестувати та налагоджувати свої проекти прямо у браузері, не вимагаючи фізичних компонентів.

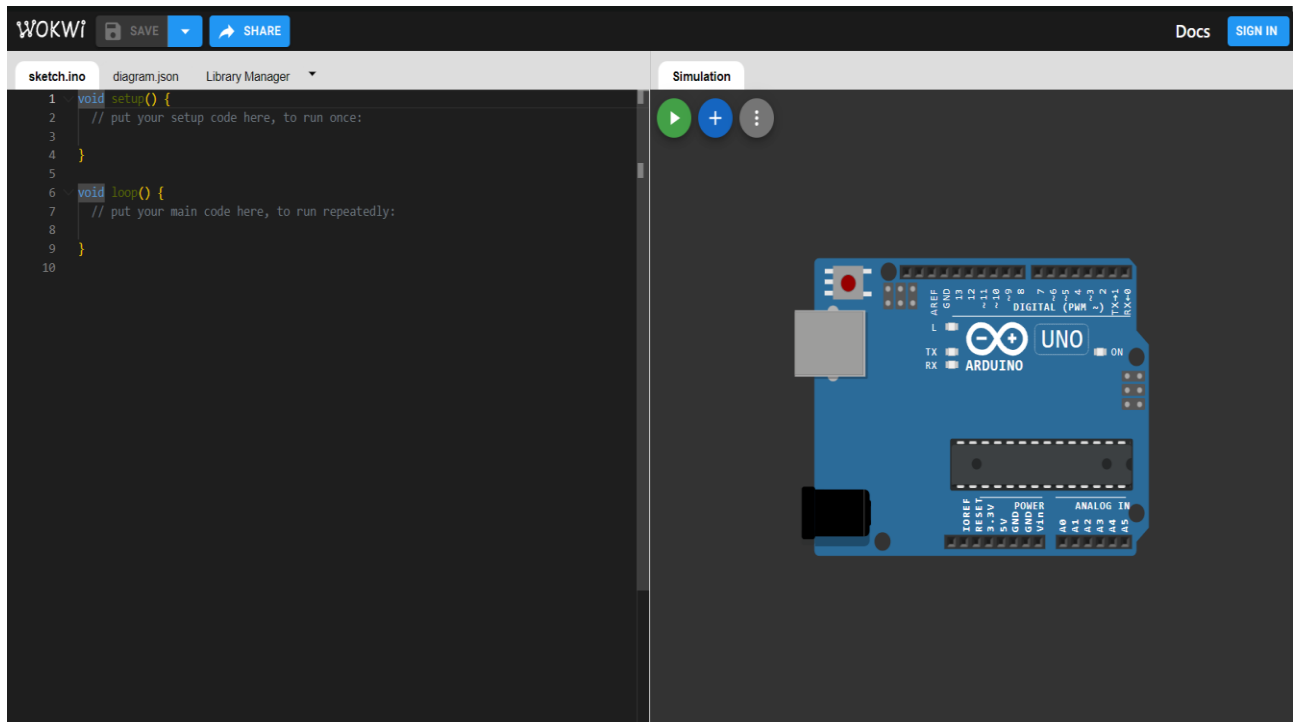


Рисунок 3.3 – Скріншот зображення інтерфейсу Wokwi [21]

Платформа доступна онлайн та не потребує встановлення додаткового програмного забезпечення. Підходить для використання на будь-якому пристрої з браузером та доступом до Інтернету.

Не потрібно купувати та збирати фізичні компоненти для тестування проектів. Швидке прототипування та тестування ідей перед їх реалізацією в реальності. Відмінний інструмент для навчання програмування мікроконтролерів та електроніки.

Підтримка інтерактивних симуляцій, що допомагає краще зрозуміти роботу схем та взаємодію компонентів.

Також має активну спільнота користувачів, де можна знайти підтримку та обмінюватися ідеями. Має постійне оновлення та додавання нових компонентів та функцій.

Не дивлячись на усі переваги, Wowкі також має низку недостатків які можуть стати фатальними для створення схеми.

Деякі складні проекти та реальні апаратні взаємодії можуть бути важко симулювати точно. Дуже обмежені можливості у порівнянні з фізичним прототипуванням.

Продуктивність симуляції може залежати від швидкості підключення до Інтернету та потужності пристрою. У великих та складних проектах може виникнути затримка чи повільна робота.

Незважаючи на велику бібліотеку компонентів, не всі компоненти можуть бути доступні для симуляції. Для специфічних чи рідкісних компонентів може знадобитися створення власних моделей.

Таким чином після повного аналізу трьох популярних програм для роботи було обрано саме TinkerCad через його візуальні та складові переваги.

Іншими словами Tinkercad – це потужний та доступний інструмент, який робить 3D-дизайн та електроніку доступними для всіх, від новачків до досвідчених користувачів. Він ідеально підходить для освітніх цілей, творчих проектів та швидкого прототипування, пропонуючи інтуїтивно зрозумілий інтерфейс та багатий функціонал.

3.2 Написання алгоритму роботи

Так як розроблювана система існує для того щоб світити ультрафіолетовим світлом на витвори з фотополімерів, основною її задачею є підтримка цього стану за допомогою кнопок та візуального інтерфейсу.

Для цього в системі було продумано 3 кнопки при натисканні яких буде додаватися час (натискання кнопки №1), відніматися час (натискання кнопки

№2) та запускання самої системи (натискання кнопки №3) УФ-освітлення.

Основний алгоритм роботи системи буде представлений на рисунку 3.4.

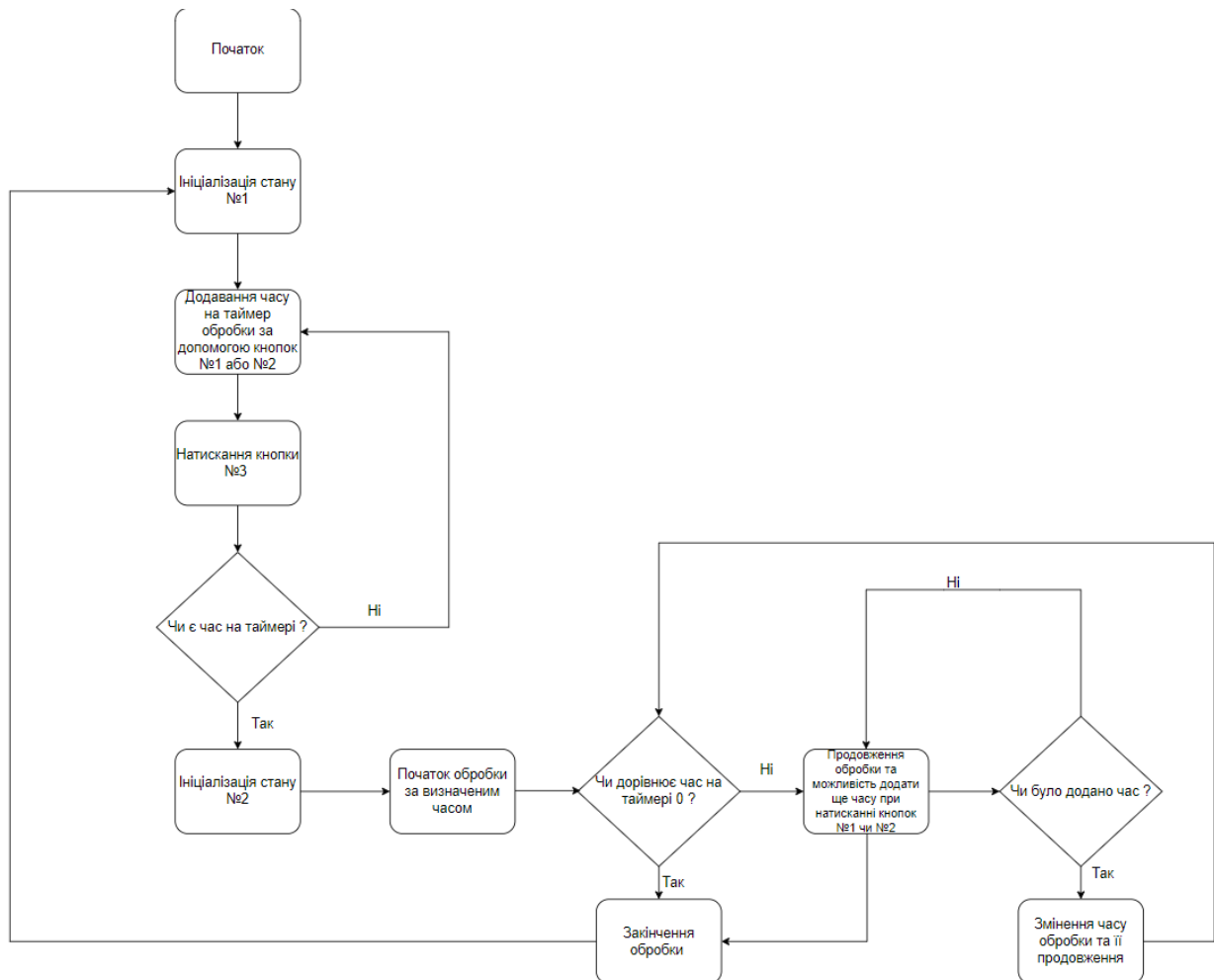


Рисунок 3.4 – Алгоритм роботи системи

Першим кроком буде проводитись ініціалізація усіх компонентів системи. Перший етап включає налаштування та підготовку до роботи всіх апаратних і програмних елементів, щоб система була готова до подальшого виконання завдань.

Після завершення ініціалізації, система перейде до стану №1. У цьому стані система буде очікувати дій від користувача, таких як натискання кнопок. Стан №1 є режимом очікування, де система не виконує активних дій, але готова реагувати на введення від користувача.

Наступним кроком є можливість зміни стану №1. Ця зміна відбудеться, якщо користувач за допомогою кнопок №1 та №2 додасть час на таймер обробки.

Кожне натискання кнопки №1 або №2 збільшує або зменшує значення таймера відповідно, підготовлюючи систему до наступного етапу.

Кінцевий перехід до стану №2 відбувається при натисканні кнопки №3. Цей перехід можливий лише за умови, що на таймері є встановлений час. Кнопка №3 запускає стан №2, активуючи основні функції системи.

Стан №2 передбачає запуск обертової платформи та увімкнення ультрафіолетового освітлення. У цьому стані система виконує свою основну функцію, забезпечуючи обробку протягом заданого часу. Користувач може скоротити або збільшити час роботи, натискаючи відповідні кнопки.

Після закінчення встановленого часу роботи в стані №2 система автоматично перейде до стану №1, повертаючись до режиму очікування дій від користувача. Цей цикл повторюється, забезпечуючи безперервну роботу системи відповідно до введених користувачем параметрів.

3.3 Створення схеми в TinkerCad

Використання усіх компонентів які було обрано в другому розділі буде максимізовано, деякі компоненти неможливо буде використати бо їх немає в TinkerCad, вони будуть замінені на компоненти які мають схожий принцип дії.

Першим кроком створення системи потрібно визначити яких компонентів немає в TinkerCad та якими компонентами їх можливо замінити. Першим відсутнім компонентом системи є вентилятор, в TinkerCad його немає в наявності, тому він буде замінений двигуном який має схожий принцип дії (рисунок 3.5).

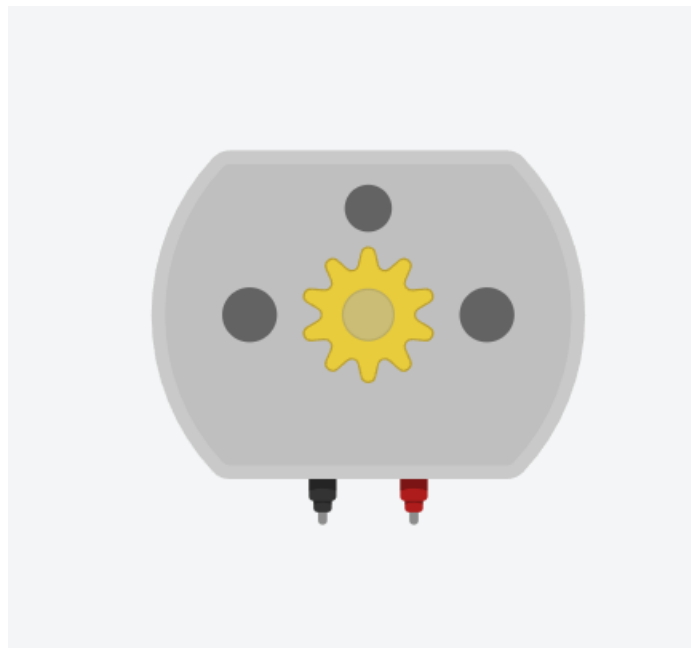


Рисунок 3.5 – Зовнішній вигляд двигуна [22]

Другим компонентом системи якого немає в TinkerCad буде ультрафіолетова стрічка, тому вона буде замінена простим синім світлодіодом (рисунок 3.6), так як УФ-стрічка буде керуватися через реле, то для світлодіода буде використовуватись резистор так як він може вийти зладу.

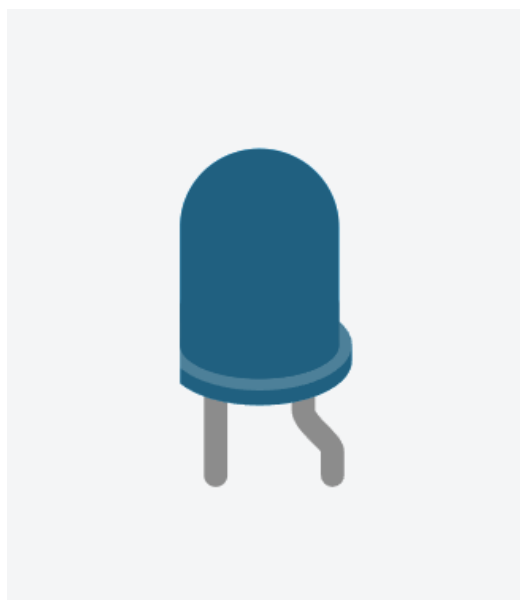


Рисунок 3.6 – Зовнішній вигляд світлодіода [22]

Третім елементом якого немає в TinkerCad є БЖ котрий було обрано в другому розділі, тому він буде замінений батарейкою на 9В так як це найбільш наближений варіант який можливо знайти в TinkerCad (рисунок 3.7).



Рисунок 3.7 – Зовнішній вигляд батарейки [22]

Таким чином, було обрано і виділено всі необхідні компоненти, яких немає в TinkerCad. Після детального аналізу було вирішено, які з цих компонентів використовуватимуться для створення схеми. Всі інші компоненти, які є в наявності, також були враховані. Тепер розглянемо всі компоненти, які використовуються в схемі.

Основним контролером системи є Arduino Uno. Цей мікроконтролер відповідає за управління всіма іншими компонентами та реалізацію запрограмованих функцій. До Arduino Uno підключені два двигуни, один з яких служить заміною для вентилятора. Цей двигун імітує функціонал вентиляції або руху повітря в системі, що є важливим для підтримки потрібних умов.

Крім того, використовується світлодіод, який служить заміною для ультрафіолетової стрічки. Для взаємодії з користувачем в системі передбачені

три тактові кнопки. Ці кнопки дозволяють користувачу змінювати час на таймері, перемикати стани системи та виконувати певні дії.

Для відображення інформації користувачеві використовується LCD екран. На цьому екрані можуть відображатися поточний стан системи, залишковий час на таймері, повідомлення та інші дані, що забезпечує зручність користування системою. Два реле використовуються для керування живленням великих навантажень, таких як двигуни або інші потужні пристрої, які не можуть безпосередньо керуватися виходами Arduino.

Також в схемі використовуються пара резисторів. Вони необхідні для обмеження струму через світлодіод і забезпечення правильного рівня сигналів для кнопок. Усі ці компоненти разом утворюють інтегровану систему (рисунок 3.8), здатну виконувати складні завдання за допомогою Arduino Uno. Правильне підключення та програмування цих компонентів дозволяє реалізувати запланований алгоритм роботи системи, забезпечуючи її функціональність та надійність.

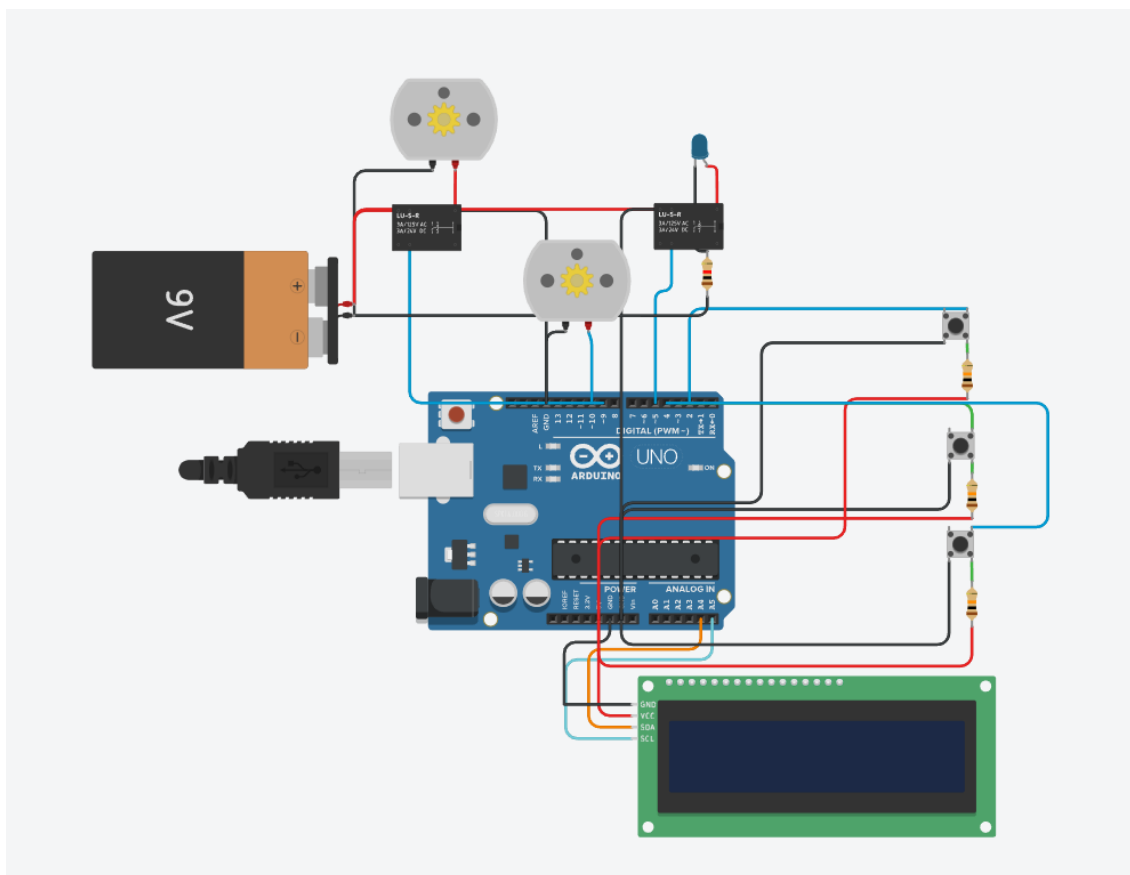


Рисунок 3.8 – Створена схема в TinkerCad [22]

Створення схеми почалося з підготовки робочої поверхні та розміщення всіх компонентів. У центрі розташували головний елемент – мікроконтролер Arduino Uno, оскільки до нього підключатимуться інші пристрої. Першим кроком було підключення компонентів, для яких достатньо напруги, яку може забезпечити Arduino Uno. Спершу підключили тактові кнопки. Вони підключені до цифрових входів Arduino, а інший кінець – до землі через резистори, щоб уникнути брязкоту контактів.

Наступним компонентом став LCD екран, необхідний для відображення інформації. З'єднання було виконано через кілька аналогових висновків Arduino, які підключилися до відповідних контактів. Живлення та земля екрану підключені до виводів 5 V та GND на Arduino.

Після підключення кнопок та LCD екрану, наступним кроком стало підключення двигуна. Оскільки наш двигун вимагає 5V напруги, які можуть надати Arduino Uno, підключення було відносно простим. Один висновок двигуна був безпосередньо підключений до цифрового виходу Arduino, який забезпечує управління двигуном. Другий вивід двигуна з'єднаний із землею (GND) на Arduino. Таке підключення забезпечує достатнє живлення та керування двигуном без необхідності використання транзистора або зовнішнього джерела живлення. Для контролю роботи двигуна використовували один із цифрових висновків Arduino, який відповідає за включення та вимикання двигуна відповідно до програми, завантаженої в мікроконтролер. Це дозволило інтегрувати двигун у загальну систему, керовану Arduino Uno, та забезпечити його стабільну роботу.

Для підключення компонентів, що вимагають більшої напруги, ніж може дати Arduino Uno, таких як вентилятор та УФ-стрічка, використовували реле та зовнішній блок живлення (батарею). Реле з'єднані з цифровими висновками Arduino для керування, а його інший кінець – з вентилятором та УФ-стрічкою, які підключені до блока живлення через реле. Так як УФ-стрічка була замінена

світлодіодом, для його захисту використовували резистор, підключивши його послідовно зі світлодіодом та реле.

Наприкінці всі компоненти, включаючи реле, що були підключені Arduino Uno для управління перевірили на надійність та правильність всіх з'єднань, забезпечивши коректну роботу всієї системи. Таким чином, схема була завершена і всі компоненти інтегровані для спільного функціонування.

3.4 Реалізація роботи схеми

Написання коду та виконання усієї логіки відбувається за розробленим алгоритмом роботи системи.

Код використовує небагато пінів на Arduino в рамках створення онлайн моделі.

Першим кроком схема для роботи потребує розпінування та додавання необхідних бібліотек для управління компонентами:

```
#include <Wire.h>
#include <LiquidCrystal_I2C.h>
LiquidCrystal_I2C lcd(0x27, 16, 2);
const int motor1Pin = 9;
const int motor2Pin = 10;
const int ledPin = 5;
const int button1Pin = 2;
const int button2Pin = 3;
const int button3Pin = 4;
```

Система має 5 остановних станів, перший стан – це стан WELCOME (рисунок 3.9). Коли система переходить у цей стан, на екрані з'являється привітальне повідомлення, що вітає користувача. Система тут зупиняється і

очікує на подальші дії користувача. Вона стоїть на місці, поки не отримає сигнал від кнопки №1 або №2. Це дає користувачеві можливість взаємодіяти з системою, вибираючи один з цих варіантів для продовження роботи.

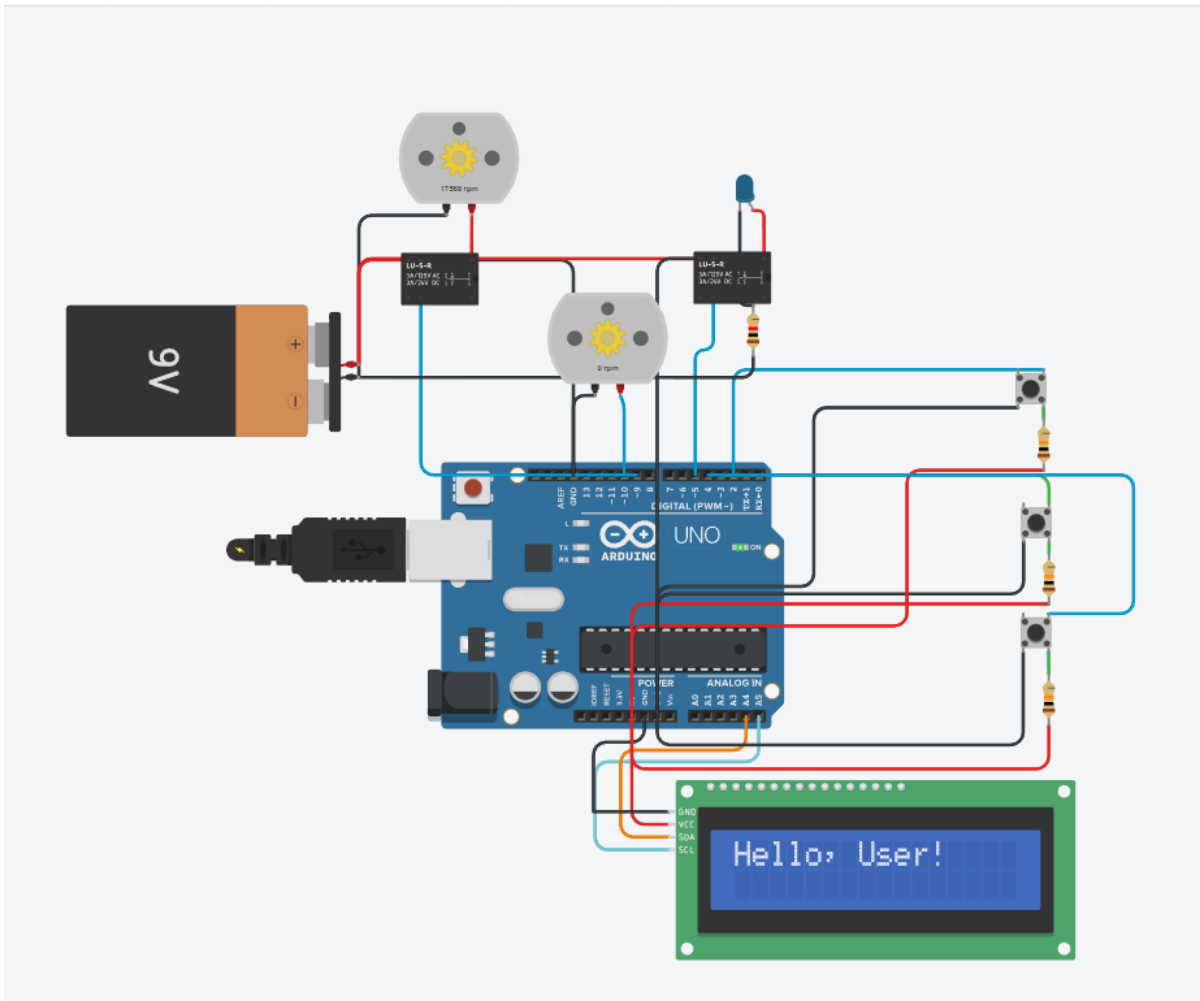


Рисунок 3.9 – зображення стану WELCOME

```

if (currentState == WELCOME) {
    if (digitalRead(button1Pin) == LOW || digitalRead(button2Pin) == LOW) {
        currentState = COUNTDOWN;
        lastInteractionTime = millis();
        updateLCD();
    }
}

```

У другому стані, що називається "COUNTDOWN" (рисунок 3.10), система очікує на натискання будь-якої з кнопок №1 або №2. Якщо жодна з цих кнопок

не натиснута протягом 10 секунд, система автоматично переходить у третій стан, який має назву "IDLE". У стані "IDLE" на екрані виводиться повідомлення "User, are you here?" і система очікує подальших дій користувача. Якщо будь-яка кнопка натиснута, система повертається до другого стану, готового до прийому команд.

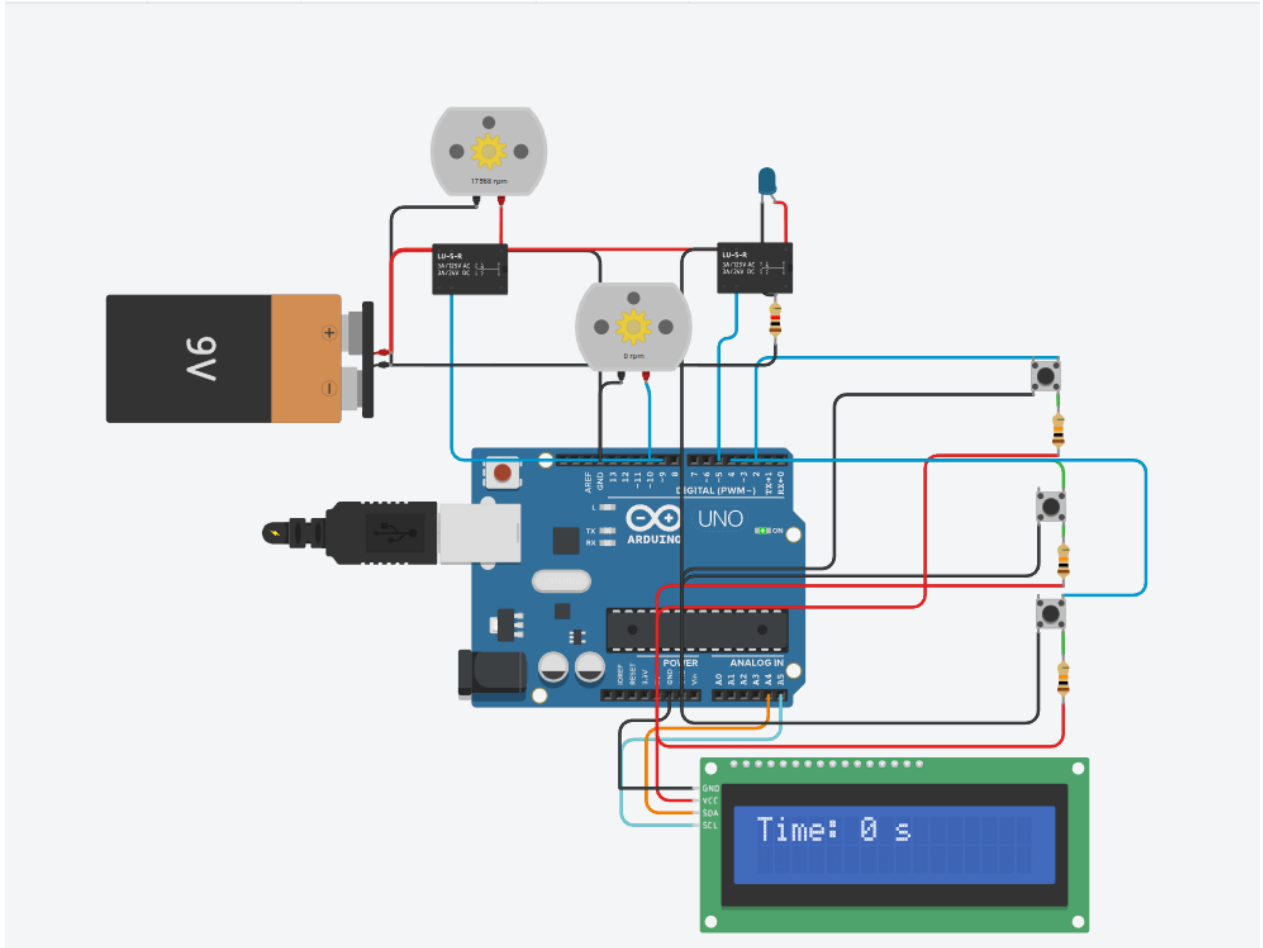


Рисунок 3.10 – Зображення стану COUNTDOWN

```

else if (currentState == COUNTDOWN) {
    handleButtons();
    if (millis() - lastInteractionTime >= interactionTimeout) {
        currentState = IDLE;
        showIdleMessage();
    }
} else if (currentState == IDLE) {
    if (digitalRead(button1Pin) == LOW || digitalRead(button2Pin) == LOW) {

```

```

currentState = COUNTDOWN;
lastInteractionTime = millis();
updateLCD();
}
}

```

У четвертому стані система знаходиться тоді, коли була натиснена кнопка №3 і на таймері встановлено певний час. Після активації цього стану відбувається подача сигналу на запуск другого мотору та включення ультрафіолетового освітлення. Коли час, встановлений на таймері, закінчується, система автоматично переходить у другий стан для очікування подальших команд (рисунок 3.11).

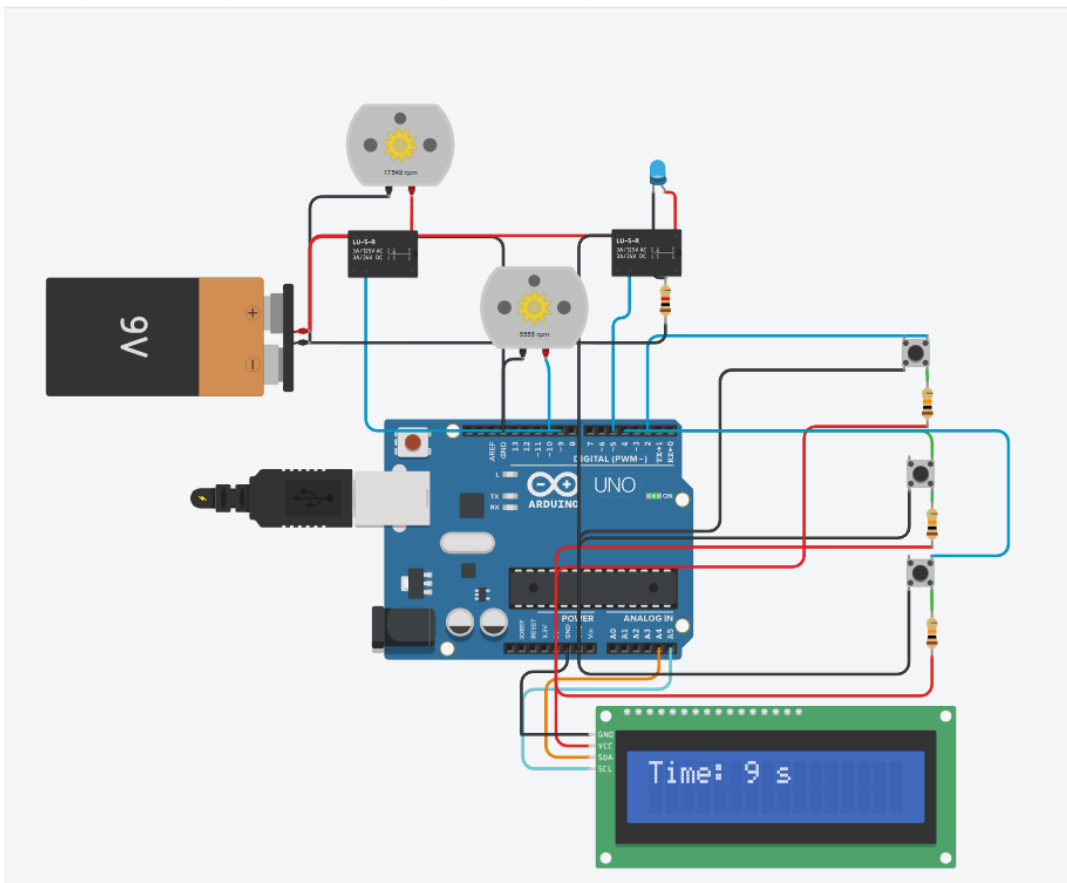


Рисунок 3.11 – Зображення стану RUNNING

```

else if (currentState == RUNNING) {

```

```

    handleRunningState();
}
void handleRunningState() {
    if (millis() - startTime >= countdownTime) {
        stopSecondSystem();
        currentState = COUNTDOWN;
        updateLCD();
    } else {
        remainingTime = (countdownTime - (millis() - startTime)) / 1000;
        lcd.setCursor(6, 0);
        lcd.print(remainingTime);
        lcd.print(" s ");
    }
}
}

```

Крім того, у четвертому стані існує можливість насильно зупинити процес, натиснувши кнопку №3. Це призведе до переходу системи у п'ятий стан, який має назву "STOPPED" (рисунок 3.12). У цьому стані всі дії, які виконувалися у четвертому стані, припиняються негайно.

Система дозволяє користувачу додавати або віднімати час, використовуючи доступні кнопки. Це може бути корисно, наприклад, якщо потрібно коригувати тривалість таймера або завершити цикл обробки повністю зменшивши час до 0. Крім того, натискання кнопки №3 ще раз повертає систему у четвертий стан, де можна продовжити або змінити виконання попередніх дій.

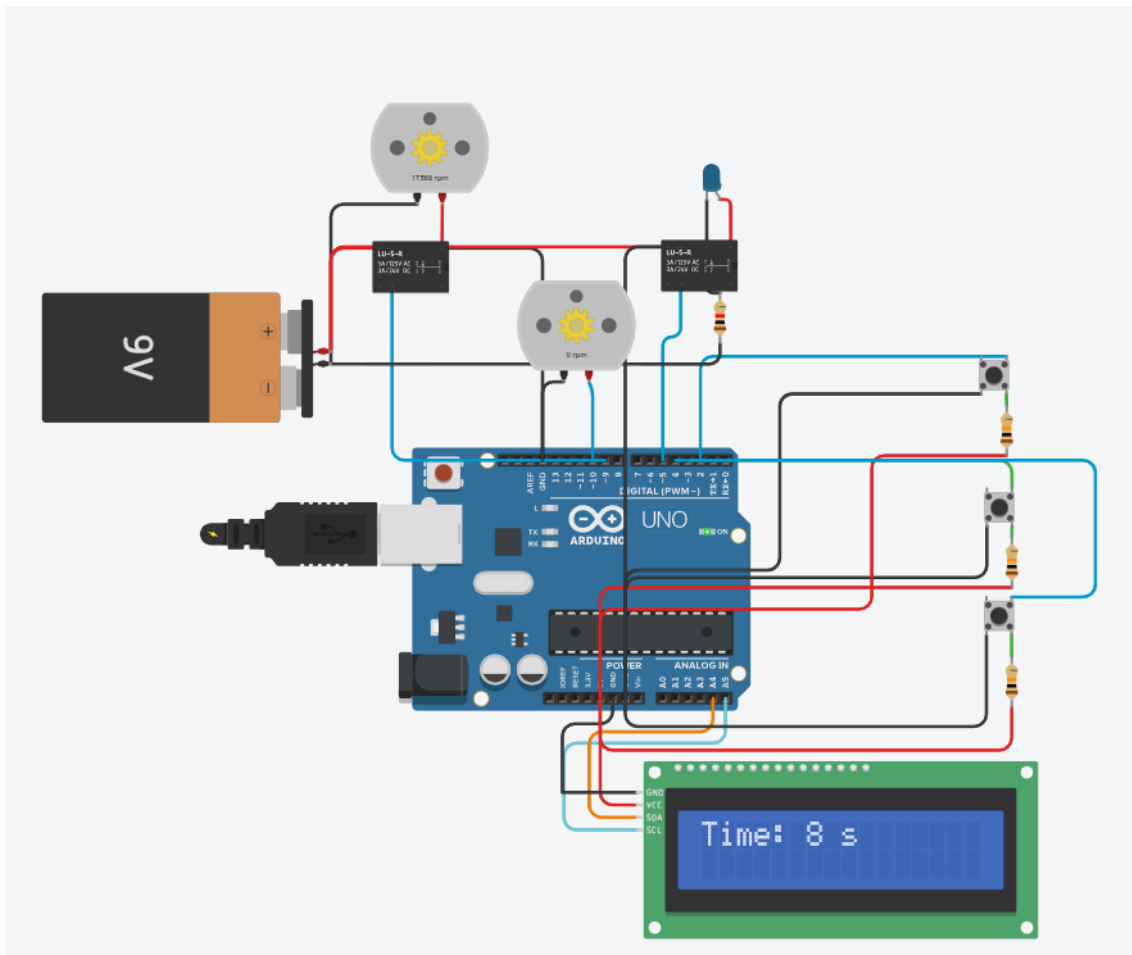


Рисунок 3.12 – Зображення стану STOPPED

```

else if (currentState == STOPPED) {
    handleStoppedState();
}
void handleStoppedState() {
    if (digitalRead(button1Pin) == LOW) {
        remainingTime += 10000;
        countdownTime = remainingTime;
        delay(200);
        updateLCD();
        lastInteractionTime = millis();
    }
}

```

3.5 Перевірка стійкості системи

У системі саме двигун піддається перевірці з кількох причин. По-перше, двигун є основним виконавчим механізмом, що відповідає за виконання фізичної роботи, такої як, обертання обертової платформи. Його правильна робота безпосередньо впливає всю систему.

По-друге, двигун має динамічні властивості, такі як тимчасові константи і коефіцієнти посилення, які можуть впливати на стійкість всієї системи. Перевірка стійкості дозволяє переконатися, що система не вагатиметься або виходити з ладу при зміні вхідних сигналів або навантажень.

Таким чином він буде піддаватися перевірці за допомогою трьох основних критеріїв , критерій Найквіста , критерій Михайлова та критерій Рауса-Гурвица

Першим критерієм буде розглянут критерій Раута-Гурвица.

Так як у роботі створювався лише макет у TinkerCad , то за основу були взяті середні значення для двигуна:

– коефіцієнт посилення двигуна – $K_d = 2$;

– часова константа двигуна – $\tau_d = 0,5$.

Перевірку можна зробити за наступним характеристичним рівнянням :

$$\tau_d s + (1 + K_d), \quad (3.1)$$

де K_d – коефіцієнт посилення двигуна;

τ_d – часова константа двигуна.

Замінивши в ньому значення отримаємо:

$$0,5s + (1 + 2).$$

Тепер перевіримо всі коефіцієнти характеристичного рівняння. У нашому випадку це $a_0 = 0,5$ та $a_1 = 3$, які обидва є додатними числами. Отже, перший критерій виконан.

Далі, для застосування іншого критерію, ми перевіряємо, щоб усі коефіцієнти були додатні. У нашому випадку, $a_0 > 0$ та $a_1 > 0$, тому інший критерій також виконаний.

Це все можна також порахувати у MATLAB запрограмувавши це (рисунок 3.13). Також це було зроблено для точної перевірки наших розрахунків.

```
Kd_2 = 2;
tau_d_2 = 0,5;
den_2 = [tau_d_2 1 + Kd_2];
disp('Результат перевірки на устійчивість за критерієм Рауса-Гурвіца:');
rout_gurwitz_result = all(real(roots(den_2)) < 0);
disp(rout_gurwitz_result);
```

```
--
Kd_2 = 2;
tau_d_2 = 0.5;
den_2 = [tau_d_2 1 + Kd_2];
disp('Результат перевірки на устійчивість за критерієм Рауса-Гурвіца:');
rout_gurwitz_result = all(real(roots(den_2)) < 0);
disp(rout_gurwitz_result);
Результат перевірки на устійчивість за критерієм Рауса-Гурвіца:
    1
```

Рисунок 3.13 – Скріншот результату критерія Рауса-Гурвіца

Як бачно на скріншоті все було пораховано вірно тому що значення 1 означає що всі реальні частини коренів є від'ємними, тому за критерієм Рауса-Гурвіца система є стійкою.

Тепер перевіримо систему за критерієм Найквіста, що це таке – критерій Найквіста є одним з методів аналізу стійкості лінійних систем. Він базується на вивченні траєкторії передаточної функції в комплексній площині при зміні

частоти. Цей метод отримав свою назву на честь американського інженера Гаррі Найквіста.

Таким чином критерій Найквіста працює за 3 основними діями першим з яких є побудова переданої функції системи яка являє собою відношення вихідної змінної до вхідної в комплексній площині s . Вона має наступний вигляд:

$$G(s) = \frac{K_d}{\tau_d s + 1}, \quad (3.2)$$

де K_d – коефіцієнт посилення двигуна;

τ_d – часова константа двигуна.

За допомогою цієї передаточної функції можна побудувати діаграму Найквіста. Вона буде показувати траєкторію $G(j\omega)$ при зміні частоти ω від 0 до нескінченності.

Після побудови діаграми Найквіста ми можемо визначити, чи траєкторія обходить точку $-1+j0$ (критична точка на комплексній площині) проти годинникової стрілки. Якщо вона обходить цю точку, система нестійка. Якщо ж не обходить - система стійка.

Це все також можна перевірити через MATLAB що й було зроблено (рисунок 3.14).

```
Kd_2 = 2;
tau_d_2 = 0,5;
G_2 = tf(Kd_2, [tau_d_2 1]);
figure;
nyquist(G_2);
title('Діаграма Найквіста ');
if all(real(roots([tau_d_2 1 + Kd_2])) < 0)
    disp('Система стійка за критерієм Найквіста.');
```

else

```
disp('Система не стійка за критерієм Найквіста.');
```

end

```
>> Kd_2 = 2;
tau_d_2 = 0.5;
G_2 = tf(Kd_2, [tau_d_2 1]);
figure;
nyquist(G_2);
title('Діаграма Найквіста ');
if all(real(roots([tau_d_2 1 + Kd_2])) < 0)
    disp('Система стійка за критерієм Найквіста.');
```

else

```
    disp('Система не стійка за критерієм Найквіста.');
```

end

Система стійка за критерієм Найквіста.

```
^^
```

Рисунок 3.14 – Скріншот критерія Найквіста

Також під час перевірки на стійкість системи будується діаграма Найквіста (рисунок 3.15) на якій й стає зрозуміло що є вона стійкою, або ні.

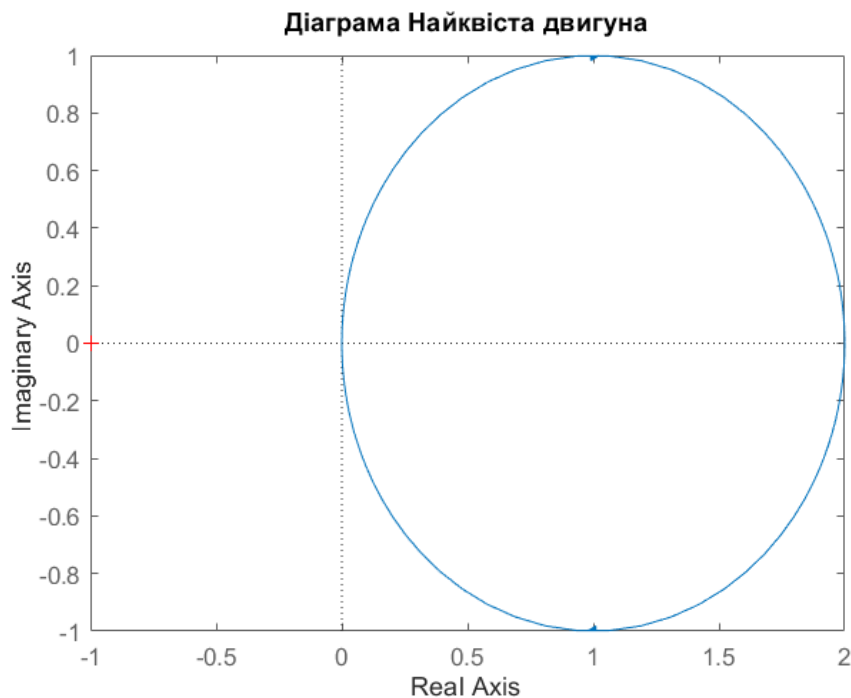


Рисунок 3.15 – Діаграма Найквіста

Останнім критерієм за яким також можна перевірити систему є критерій Михайлова. Критерій Михайлова – це метод аналізу стабільності лінійних

систем керування у частотній області. Він базується на побудові Михайловського графіка, який представляє собою графік у комплексній площині, де реальна частина відповідає за посилення, а уявна – за фазове зміщення.

Також все починається з побудови передатної функції $G(s)$:

$$G(s) = \frac{K_d}{\tau_d s + 1}, \quad (3.3)$$

де K_d – коефіцієнт посилення двигуна;

τ_d – часова константа двигуна.

Далі потрібно знайти частотні характеристики, це відбувається простою заміною s на $j\omega$:

$$G(j\omega) = \frac{K_d}{\tau_d j\omega + 1}.$$

Також потрібно провести аналіз амплітуд і фаз:

$$[G(j\omega)] = \frac{K_d}{(\tau_d \omega)^2 + 1},$$

$$\angle G(j\omega) = \arctan(-0,5\omega).$$

Наступним кроком є перевірка стійкості, вона буде відбуватися за допомогою MATLAB (рисунок 3.16).

$$Kd_2 = 2;$$

$$\tau_d_2 = 0,5;$$

$$\omega = \text{logspace}(-1, 2, 500);$$

$$\text{Re_H_2} = Kd_2 ./ (1 + (\tau_d_2 * \omega).^2);$$

```

Im_H_2 = -Kd_2 .* (tau_d_2 * omega) ./ (1 + (tau_d_2 * omega).^2);
if all(Re_H_2 <= 0)
    disp('Система стійка за критерієм Михайлова');
else
    disp('Система нестійка за критерієм Михайлова');
end
figure;
plot(Re_H_2, Im_H_2);
xlabel('Re(H(j\omega))');
ylabel('Im(H(j\omega))');
title('Михайловський графік двигуна');

```

```

>> Kd_2 = 2;
tau_d_2 = 0.5;
omega = logspace(-1, 2, 500);
Re_H_2 = Kd_2 ./ (1 + (tau_d_2 * omega).^2);
Im_H_2 = -Kd_2 .* (tau_d_2 * omega) ./ (1 + (tau_d_2 * omega).^2);
if all(Re_H_2 <= 0)
    disp('Система стійка за критерієм Михайлова');
else
    disp('Система нестійка за критерієм Михайлова');
end
figure;
plot(Re_H_2, Im_H_2);
xlabel('Re (H(j\omega)) ');
ylabel('Im (H(j\omega)) ');
title('Михайловський графік двигуна');
Система нестійка за критерієм Михайлова

```

Рисунок 3.16 – Скріншот критерія Михайлова

Також під час перевірки на стійкість відбувається побудова графіка Михайлова (рисунок 3.17).

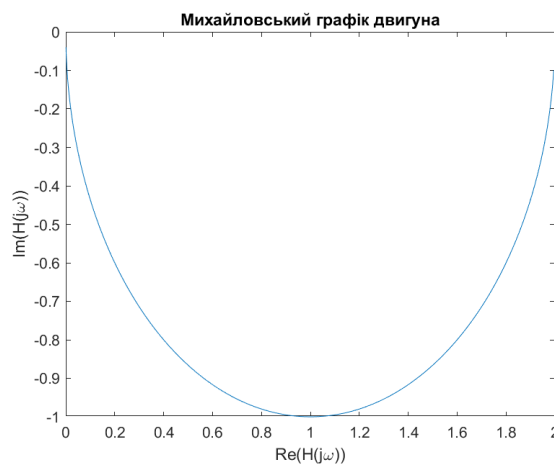


Рисунок 3.17 – Графік Михайлова

Таким чином система була перевірена на стійкість трьома різними критеріями, критерієм Михайлова, Найквіста та Рауса-Гурвіца, двоє з яких потребували побудови графіка/діаграми.

ВИСНОВКИ

У процесі виконання кваліфікаційної роботи було проведено аналіз існуючих на даний момент DLP 3D-принтерів, камер для полімеризації. Після детального розгляду усіх існуючих камер для полімеризації було вирішено використовувати саме замкнений варіант з використанням світловідбиваючої плівки на стінках самої камери, так як це підвищить якість та швидкість полімеризації моделі.

В проведеному аналізі існуючих DLP 3D-принтерів було детально розглянуто як відбувається сам процес друку та галузі в яких вони використовуються на даний момент часу.

Було проведено аналіз використовуваних компонентів в камерах полімеризації та на основі цього для створюваної власноруч було вибрано необхідні компоненти за багатьма критеріями.

Було розроблено детальний алгоритм роботи системи щоб було наглядно бачно як вона працює, також ця дія допомагає легше зібрати схему.

Також було проведено аналіз трьох основних програм та веб-ресурсів у якому буде проведено збір структурної схеми та моделювання роботи самої системи.

Такий підхід до роботи дає краще розуміння для роботи з макетуванням, бо обираючи якусь програму потрібно розуміти що у ній можуть бути не всі компоненти які потрібні для системи та також у ній повинні бути компоненти якими вони будуть замінені.

Також система була перевірена на стійкість за допомогою критеріїв Михайлова, Рауса-Гурвіца та Найквіста. За розрахунками та побудовою графіків/діаграм яких було зрозуміло що система є достатньо стійкою для нормального та повноцінного функціонування.

ПЕРЕЛІК ДЖЕРЕЛ ПОСИЛАНЬ

1. ДСТУ 3008: 2015 Інформація та документація. Звіти у сфері науки і техніки. Структура і правила оформлення. ДП «УкрНДНЦ», 2016. – 31 с.
2. Невлюдов І. Ш. Дипломне проектування для студентів усіх форм навчання спеціальностей 151 «Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології» [Текст]: навч. посіб. / І. Ш. Невлюдов, А. О. Андрусевич, О. В. Токарева, Г. В. Пономарьова. – Київ: НАУ, – 2016. – 320 с.
3. Методичні вказівки до Підготовки атестаційної роботи бакалавра для студентів усіх форм навчання спеціальності 151 «Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології» освітньої програми: «Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології» / упоряд.: І. Ш. Невлюдов, О. В. Токарева, Г. В. Пономарьова. – Харків: ХНУРЕ, – 2019. – 36 с
4. Anycubic Photon Ultra DLP 3D принтер // 3D-друк.укр. URL: <https://3d-печать.укр/product/anycubic-photon-ultra-dlp-3d-принтер/>
5. Invernizzi, M., Natale, G., Levi, M., Turri, S., & Griffini, G. (2016). UV-Assisted 3D Printing of Glass and Carbon Fiber-Reinforced Dual-Cure Polymer Composites. *Materials*, 9(7), 583. doi: 10.3390/ma9070583
6. Barkāne, A., Platnieks, O., Jurinovs, M., Grauzēlienē, S., Ostrauskaite, J., Gaidukovs, S., & Habibi, Y. (2021). UV-Light Curing of 3D Printing Inks from Vegetable Oils for Stereolithography. *Polymers*, 13(8), 1195. doi: 10.3390/polym13081195
7. Jacobsen, A., Jorgensen, T., Tafjord, Ø., & Kirkhorn, E. (2015). Concepts for 3D print productivity systems with advanced DLP photoheads. In *Emerging Digital Micromirror Device Based Systems and Applications VII* (p. 937605). SPIE. <https://doi.org/10.1117/12.2084962>
8. Al-Sharo, Y., Abu-Jassar, A., Lyashenko, V., Yevsieiev, V., Maksymova, S. A Robo-hand prototype design gripping device within the framework of sustainable

development, Indian Journal of Engineering, 20 2023 e37ije1673.
<https://doi.org/10.54905/disssi.v20i54.e37ije1673>

9. Lyashenko, V., Abu-Jassar, A.T., Yevsieiev, V., Maksymova, S. Automated Monitoring and Visualization System in Production, Int. Res. J. Multidiscip. Technovation, 5(6) 2023 09-18. <https://doi.org/10.54392/irjmt2362>

10. Пристрій для очищення та сушіння Anycubic Wash and Cure 2.0// Prom.ua.URL https://prom.ua/ua/p1993828200-ustrojstvo-dlya-ochischneniya.html?utm_source=google_pmax&utm_medium=cpc&utm_content=pmax&utm_campaign=Pmax_cpa_50_tehnika_i_elektronika&gad_source=1&gclid=Cj0KCQjw6PGxBhCVARIsAlumnWYnbuSgqDYwjGDd-K70iW8fcadrKrTG1ffwd995Gl9UkWzmEV1oSXUaAu2jEALw_wcB

11. Arduino Ua. Arduino Uno [Електронний ресурс]. Режим доступу: <https://doc.arduino.ua/ua/hardware/Uno>.

12. **Prom**. СВІТЛОДІОДНА LED СТРИЧКА UV УЛЬТРАФІОЛЕТОВА SMD5050 IP20 60/МЕТР [Електронний ресурс]. Режим доступу: [https://prom.ua/ua/p2011363404-svetodiodnaya-led-lenta.html?utm_source=google_pmax&utm_medium=cpc&utm_content=pmax&utm_campaign=Pmax_cpa_1_50_dom_i_sad&gad_source=1&gclid=Cj0KCQjw3ZayBhDRARIsAPWzx8p9dfzLXtNhSlib730MiRC4Jbr_qnOF4MPFLdED9ulAAFZ3W1wEQaAtyiEALw_wcB](https://prom.ua/ua/p2011363404svetodiodnayaledlenta.html?utm_source=google_pmax&utm_medium=cpc&utm_content=pmax&utm_campaign=Pmax_cpa_1_50_dom_i_sad&gad_source=1&gclid=Cj0KCQjw3ZayBhDRARIsAPWzx8p9dfzLXtNhSlib730MiRC4Jbr_qnOF4MPFL-dED9ulAAFZ3W1wEQaAtyiEALw_wcB).

13. **Mini-tech**. Реле электромеханическое Songle SRD-05VDC-SL-C [Електронний ресурс]. Режим доступу: <https://www.mini-tech.com.ua/srd-05vdc-sl-c>.

14. Arduino Ua. Кроковий двигун 5В 28BYJ-48 [Електронний ресурс]. Режим доступу: [<https://arduino.ua/ua/prod216-shagovii-dvigatel-5v-28byj-48>].

15. Arduino Ua. LCD 1602 I2C символный дисплей 16x2 (синий) [Електронний ресурс]. Режим доступу: [<https://arduino.ua/ua/prod6188-lcd-1602-i2c-simvolnii-displei-16x2-sinii>]

16. MEAN WELL. Блок живлення RS-35-12, 36 Вт, 12 В, 3 А [Електронний ресурс]. Режим доступу: [<https://meanwell.kiev.ua/ua/p9108345-blok-pitaniya-mean.html>]

17. Arduino Ua. DC-DC понижающий конвертер LM2596 с 4.5-40В до 3-35В [Електронний ресурс]. Режим доступу: [<https://arduino.ua/prod650-dc-dc-ponizuyuchii-konverter-lm2596-z-4-5-40v-do-3-35v>].

18. Telemart.ua. Кулер для корпуса Arctic F8 (ACFAN00205A) Black [Електронний ресурс]. Режим доступу: [<https://telemart.ua/ua/products/arctic-f8-acfan00205a-black/>].

19. Octopart. Omron B3F-1052 [Електронний ресурс]. Режим доступу: [<https://octopart.com/b3f-1052-omron-15165>].

20. Markogroup. Акрилові листи (оргскло) [Електронний ресурс]. Режим доступу: [<https://markogroup.com/uk/ship-supply/acrylic-sheets-plexiglass/>].

21. Hydroponics.in. Світловідбивна плівка для рослин ECO Diamond Silver Mylar 1,2 x 1 м x 75м [Електронний ресурс]. Режим доступу: [<https://hydroponics.in.ua/ua/svetootrazhayushaya-plyonka-heavy-duty-diamond-mylar-12-h-1-m>].

22. Blender. [Електронний ресурс]. Режим доступу: [<https://www.blender.org>].лорпв

23. Кучерук, В., Кулаков, П., Ліман, В. Онлайн-сервіс WOKWI: як симулятор мікропроцесорних систем [Електронний ресурс]// Вимірювальна та обчислювальна техніка в технологічних процесах. - 2023. -- С. 1-6. - Режим доступу: <https://vottp.khmnu.edu.ua/index.php/vottp/article/view/139/131>.

24. Кривонос, О.М., Кривонос, М.П. Огляд середовища для роботи з Arduino Fritzing [Текст]// Інформаційно-комунікаційні технології в освіті. - 2019.

- С. 2. - Режим доступу: <https://conf.ztu.edu.ua/wp-content/uploads/2019/12/162-1.pdf>.

25. Кривонос, О.М., Кузьменко, Є.В., Кривонос, М.П., Кузьменко, С.В. FRITZING - спеціалізоване прикладне програмне забезпечення для моделювання електронних пристроїв на базі платформи Arduino [Текст] // Information Technologies in Education. - 2020. - С. 1-13. - Режим доступу: <http://ekhsuir.kspu.edu/bitstream/handle/123456789/17620/767-Текст%20статті-1578-1-10-20210427.pdf?sequence=1&isAllowed=y>.

26. Павлюс, В.П. Використання сервісу TinkerCad Circuits для дистанційного вивчення курсу «Основи робототехніки» [Електронний ресурс]// Збірник тез доповідей міжрегіональної науково-практичної конференції «Інформаційно-інтерактивні технології як засіб удосконалення освітнього процесу». - 2021. - С. 5. - Режим доступу: <https://gi.edu.ua/koledzh/pidrozdzily/biblioteka/repozytorii/732-vykorystannia-servisu-tinkercad-circuits-dlia-dystantsiinoho-vyvchennia-kursu-osnovy-robototekhniky>.

27. Дурєєв, В.О., Бондаренко, С.М. Частотний критерій стійкості Михайлова [Електронний ресурс] // Автоматика раннього виявлення надзвичайних ситуацій. - 2022. - С. 5. - Режим доступу: <http://repositsc.nuczu.edu.ua/handle/123456789/15771>.

28. Критерій стійкості Гурвіца [Електронний ресурс] // Вікіпедія. - Режим доступу: https://uk.wikipedia.org/wiki/Критерій_стійкості_Гурвіца. - Назва з екрана.

29. Критерій стійкості Найквіста [Електронний ресурс] // ni.biz.ua. - Режим доступу: http://ni.biz.ua/11/11_24/11_24820_kriteriy-ustoychivosti-naukvista.html#google_vignette. - Назва з екрана.

30. Критерій Гурвіца [Електронний ресурс] // ni.biz.ua. - Режим доступу: http://www.ni.biz.ua/2/2_3/2_35428_kriteriy-gurvitsa.html. - Назва з екрана.

31. Tinkercad [Электронный ресурс] // Tinkercad. - Режим доступа:
<https://www.tinkercad.com/dashboard>.

32. Wokwi [Электронный ресурс] // Wokwi. - Режим доступа:
<https://wokwi.com>.