Міністерство освіти і науки України
Харківський національний університет радіоелектроніки

Факультет Автоматики і комп’ютеризированих технологій
(повна назва)
Кафедра Комп’ютерно-інтегрованих технологій, автоматизації та робототехніки
(повна назва)

КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА
Пояснювальна записка

другий (магістерський)
(рівень вищої освіти)

РОЗРОБЛЕННЯ БІОНІЧНОЇ КОНСТРУКЦІЇ РОБОТА-РИБИ
(тема)

Виконав студент 6 курсу, групи КТРСм-22-2
Руденко Вероніка Олексіївна
(прізвище, ім’я, по батькові)

Спеціальності 151 Автоматизація та комп’ютерно-інтегровані технології
(код і повна назва напряму)

Тип програми Освітньо-професійна
Освітня програма Комп'ютеризовані та робототехнічні системи
(назва)

Керівник проф. каф. КІТАР Євсєєв В.В.
(посада, прізвище, ініціали)

Допускається до захисту
Зав. кафедри КІТАР _____ Невлюдов І. Ш.
(підпис) (прізвище, ініціали)

2024

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

14.01.2024 Руденко В.О.

ХАРКІВСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ РАДІОЕЛЕКТРОНІКИ

Факультет АКТ
Кафедра КІТАР
Рівень вищої освіти другий (магістерський)
Спеціальність 151 Автоматизація та комп’ютерно-інтегровані технології
Тип програми Освітньо-професійна
Освітня програма Комп'ютеризовані та робототехнічні системи
(шифр і назва)

ЗАТВЕРДЖУЮ:
Зав.кафедри _____
(підпис)
«__»_____2024р.

ЗАВДАННЯ
НА КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ

студентові Руденко Вероніці Олексіївні
(шифр і назва)
1. Тема роботи: Розроблення біонічної конструкції робота-риби

Затверджена наказом університету від №1288Ст від 03.11.2023
2. Термін подання студентом роботи до екзаменаційної комісії 19.01.2024р.
3. Вихідні дані до роботи: 3.1 Друк макету методом 3D-друку FDM; 3.2 20% заповненість при друці; 3.3 Частота коливань: 230-250; 3.4 Чотири хвостових ланки; 3.5 Зооморфність на рибу Salmo salar

4. Перелік питань, що потрібно опрацювати в роботі: 4.1 Вступ; 4.2 Аналіз конструкцій зооморфних мобільних роботів; 4.3 Аналіз моделі кінематики зооморфного робота-риби; 4.4 Вибір та обґрунтування виконавчих механізмів та матеріалів; 4.5 Аналіз особливостей керування зооморфним роботом-рибою; 4.6 Розробка кінематичної моделі; 4.7 Розробка моделі гідродинамічної сили, що діє на хвіст робота-риби; 4.8 Розробка 3D-моделі конструкції робота-риби; 4.9 Розробка тривимірної моделі збірки; 4.10 Зборка макета зооморфного робота-риби; 4.11 Розробка системи управління; 4.12 Вибір середовища моделювання; 4.13 Побудова розрахункової моделі; 4.14 Отримання результатів моделювання руху; 4.15 Постановка задач експериментів; 4.16 Порівняння результатів моделювання з експериментальним зразком та аналогічними рішеннями; 4.17 Висновки

5. Перелік графічного матеріалу із зазначенням креслеників, схем, плакатів, комп'ютерних ілюстрацій Графічний демонстраційний матеріал в форматі PowerPoint(*.ppt) формату А4 –13 сторінок.

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 сучасних систем керування мобільними роботами	2.09.2023-15.09.2023	виконано
2	Розробка кінематичної моделі	16.09.2023-23.09.2023	виконано
3	Модель гідродинамічної сили	24.09.2023-2.10.2023	виконано
4	Розробка 3D-моделі конструкції	3.10.2023-16.10.2023	виконано
5	Розробка тривимірної моделі збірки	17.10.2023-24.10.2023	виконано
6	Зборка макета зооморфного робота-риби	.10.2023-.10.2023	виконано
7	Розробка системи управління	25.10.2023-3.11.2023	виконано
8	Побудова розрахункової моделі	4.11.2023-12.11.2023	виконано
9	Отримання результатів моделювання руху	13.11.2023-16.11.2023	виконано
10	Експериментальні дослідження	17.11.2023-25.11.2023	виконано
11	Порівняння результатів моделювання з експериментальним зразком та аналогічними рішеннями	26.11.2023-15.12.2023	виконано

Дата видачі завдання 1 вересня 2023р.

Студент _____ Руденко В.О.
(підпис) (прізвище, ініціали)

Керівник роботи _____ Євсєєв В.В.
(підпис) (прізвище, ініціали)

РЕФЕРАТ

Пояснювальна записка: 92 с., 6 табл., 37 рис., 2 дод., 33 джерела.

РОБОТ FISH, ЗООМОРФНИЙ РОБОТ, МОБІЛЬНИЙ РОБОТ, СИСТЕМА УПРАВЛІННЯ, РОБОТ-РИБА, 3D МОДЕЛЬ ЗООМОРФНОГО РОБОТА-РИБИ, СИМУЛЯЦІЯ РУХУ, ЗООМОРФНИЙ РОБОТ-РИБА.

Мета дослідження – розробка дослідницького макету зооморфного мобільного роботу для дослідження методів переміщення у водному середовищі.

Об’єкт дослідження – процес переміщення зооморфного робота-риби.

Предмет дослідження – методи 3D моделювання та проектування для розрахунку кута вигину хвосту риби.

В даній кваліфікаційній роботі проаналізовано конструкції, моделі кінематики та особливості керування зооморфним роботом-рибою. Далі було проведено вибір та обґрунтування виконавчих механізмів та матеріалів. Розроблено кінематичну модель зооморфного робота-риби та модель гідродинамічної сили, що діє на хвіст робота. Розроблено 3D-моделі конструкції робота-риби та тривимірну модель збірки. Далі було зібрано макет зооморфного робота-риби. Після розроблено систему управління, розроблена структурна схема керування зооморфним роботом-рибою, обрано компоненти модулів та розроблено схему підключення модулів для керування зооморфним роботом-рибою. Наступним етапом було вибрано середовище моделювання, проведено побудову розрахункової моделі та отримано результати моделювання руху хвоста зооморфного робота-риби. Наступним етапом було проведено експериментальні досладження та аналіз отриманих результатів.

ABSTRACT

Explanatory note: 92 pages, 6 tables, 37 figures, 2 app, 33 sources.

ROBOT FISH, ZOOMORPHIC ROBOT, MOBILE ROBOT, CONTROL SYSTEM, ROBOT FISH, 3D MODEL OF ZOOMORPHIC ROBOT-FISH, MOTION SIMULATION, ZOOMORPHIC ROBOT-FISH.

The purpose of the research is to develop a research model of a zoomorphic mobile robot for researching methods of movement in the aquatic environment.

The object of research is the process of moving a zoomorphic robot-fish.

The subject of the research is 3D modeling and design methods for calculating the bend angle of the fish tail.

In this qualification paper, the constructions, kinematics models and control features of the zoomorphic fish robot are analyzed. Next, the selection and justification of executive mechanisms and materials was carried out. A kinematic model of the zoomorphic hydro fish robot and a model of the dynamic force acting on the robot's tail have been developed. 3D models of the robot-fish structure and a three-dimensional assembly of models were developed. Next, a model of a zoomorphic fish robot was assembled. After that, the control system was developed, the structure diagram for controlling the zoomorphic robot-fish was developed, the components of the modules were selected, and the connection diagram of the modules for controlling the zoomorphic robot-fish was developed. The next stage was the selection of the simulation environment, the construction of the calculation model and the result of the simulation of the tail movement of the zoomorphic robot-fish was obtained. The next stage was an experimental study and analysis of the obtained results.

ЗМІСТ

Перелік умовних скорочень 9
Вступ 10
1 Аналіз сучасних систем керування мобільних роботів 13
1.1 Аналіз конструкцій зооморфних мобільних роботів-риб 13
1.2 Аналіз моделі кінематики зооморфного робота-риби 19
1.3 Вибір та обґрунтування виконавчих механізмів та матеріалів 20
1.4 Аналіз особливостей керування зооморфним роботом-рибою 28
1.5 Постановка задач дослідження 30
2 Розробка конструкції макету зооморфного робота-риби 32
2.1 Розробка кінематичної моделі 32
2.2 Модель гідродинамічної сили, що діє на хвіст робота-риби 37
2.3 Розробка 3D-моделі конструкції робота-риби 41
2.4 Розробка тривимірної моделі збірки 47
2.5 Зборка макета зооморфного робота-риби 51
2.6 Розробка системи управління 55
2.7 Висновки до 2 розділу 59
3 Моделювання переміщення робота-риби 60
3.1 Вибір середовища моделювання 60
3.2 Побудова розрахункової моделі 62
3.3 Отримання результатів моделювання руху 63
3.4 Висновки до 3 розділу 67
4 Експериментальні дослідження та аналіз отриманих результатів 68
4.1 Постановка задач експериментів 68
4.2 Порівняння результатів моделювання з експериментальним зразком та аналогічними рішеннями 68
4.3 Охорона праці 70

4.4 Висновки до 4 розділу 71
Висновки 73
Перелік джерел посилань 74
Додаток А Апробація результатів наукових досліджень 79
Додаток Б Демонстраційний матеріал 91

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ СКОРОЧЕНЬ

ККД – коефіцієнт корисної дії;

ПЗ – програмне забезпечення;

ADAMS – автоматизований динамічний аналіз механічних систем;

AUV – автономні підводні апарати;

BCF – хвостовий плавець;

CNC – інтеграція з числовим управлінням;

DEA – діелектричний еластомерний привод;

FDM – fused deposition modeling;

IPMC – іонні полімерні металеві композити;

MPF – парний плавець;

SRAM – оперативна пам'ять;

SMA – сплав пам’яті форми.

ВСТУП

В часи сучасних технологій і високої комп'ютеризації в нашому суспільстві, робототехніка стає ключовим напрямом для вирішення різноманітних завдань, починаючи від промисловості та закінчуючи медициною та наукою. Однак одним зі значущих викликів, перед яким стає людство, є збереження та дбайливе використання водних ресурсів. У зв'язку з цим стає все актуальнішим розробка та впровадження технологічних рішень, спрямованих на моніторинг та збереження екосистем водних біотопів.

Однією з інноваційних та перспективних областей в робототехніці є створення зооморфних роботів, які імітують природний світ та адаптовані до конкретних середовищ. У цьому контексті виникає необхідність у створенні зооморфних роботів, які можуть ефективно взаємодіяти з водними середовищами для здійснення різноманітних завдань: від моніторингу водних ресурсів до допомоги у збереженні водних екосистем.

Впровадження роботів-риб у стаї риб для дослідження їх поведінки має значущий науковий та практичний потенціал, враховуючи сучасні виклики у сферах морського дослідження та управління водними ресурсами. Роботи-риби можуть бути використані для збору даних про морське середовище, такі як температура, солоність, рівень забруднення, інші хімічні показники. Вони можуть допомагати у вивченні змін у водних екосистемах та надають можливість моніторити вплив людської діяльності на океан.

Роботи-риби, імітуючи природних представників, можуть вбудовуватися в стаї риб для спостереження за їхньою поведінкою та взаємодією. Це дозволяє вченим отримувати унікальні дані щодо соціальної структури стаї, маршрутів міграцій, та взаємодії між окремими особинами. Роботи-риби можуть бути використані для дослідження ефективності заходів щодо екологічної реабілітації рибниць та відновлення популяцій риб. Їхні

дані можуть служити основою для розробки стратегій збереження та управління рибними ресурсами. Застосування роботів-риб у стаї може допомогти виявляти швидкі екологічні зміни в океані, такі як зміни в рівні води, температурі, чи рівні забруднення. Це важливо для прогнозування та адаптації до змін в морському середовищі.

Мета дослідження – розробка дослідницького макету зооморфного мобільного роботу для дослідження методів переміщення у водному середовищі.

Об’єкт дослідження – процес переміщення зооморфного робота-риби.

Предмет дослідження – методи 3D моделювання та проектування для розрахунку кута вигину хвосту риби.

Для досягнення поставленої мети необхідно вирішити такі завдання:

- провести аналіз конструкції зооморфних мобільних роботів-риб;
- провести аналіз моделі кінематики зооморфного робота-риби;
- провести вибір та обґрунтування виконавчих механізмів та матеріалів;
- провести аналіз особливостей керування зооморфним роботом-рибою;
- розробити кінематичну модель зооморфного робота-риби;
- розробити модель гідродинамічної сили, що діє на хвіст робота-риби;
- розробити 3D-моделі конструкції робота-риби;
- розробити тривимірну модель збірки;
- зібрати макет зооморфного робота-риби;
- розробити систему управління;
- провести вибір середовища моделювання;
- провести побудову розрахункової моделі;
- отримати результати моделювання руху хвоста зооморфного робота-риби;

- провести постановку задач експериментів;
- провести порівняння результатів моделювання з експериментальним зразком та аналогічними рішеннями.

Дана кваліфікаційна робота виконана згідно ДСТУ 3008 – 15 [1], керуючись навчальним посібником з дипломного проекту [2] та методичними вказівками [3], а результати даної кваліфікаційної роботи описані в наукових статтях, та їх можна побачити в гугл академії [4].

1 АНАЛІЗ СУЧАСНИХ СИСТЕМ КЕРУВАННЯ МОБІЛЬНИХ РОБОТІВ

1.1 Аналіз конструкцій зооморфних мобільних роботів-риб

Зооморфні роботи-риби є унікальними конструкціями, які спроектовані з метою відтворення основних механізмів руху та поведінки риб в природних умовах. Основною метою цих конструкцій є створення штучного пристрою, який може використовуватися в різних областях, включаючи дослідження водних середовищ, морську біологію, археологію та інші.

Зооморфні роботи-риби стараються імітувати морфологію та структуру справжніх риб. Це включає в себе форму тіла, голови, плавників та хвоста. Гнучкі матеріали та механізми дозволяють створювати рухливі елементи, що наближаються до природних рухів риб. Морфологічна схожість в контексті зооморфних мобільних роботів-риб вказує на те, що їх конструкція та форма намагаються якнайточніше імітувати анатомію та фізіологію справжніх риб. Це важливий аспект в розробці таких роботів, оскільки натуральні риби мають оптимально адаптовані форми для плавання у воді. Основні аспекти морфологічної схожості зооморфних роботів-риб з реальними рибами включають:

– зооморфні роботи-риби стараються відтворити основну форму тіла риби, яка є стрімкою та обтічною. Це допомагає зменшити гідродинамічний опір та полегшити рух води навколо робота;

– конструкція голови спроектована з урахуванням аналогічності до голови риби, що може включати утворення обтічного профілю та розміщення датчиків або камер для спостереження;

– важливою частиною морфологічної схожості є розробка плавників, які намагаються імітувати рухи та функції справжніх риб. Це може включати аналогічну структуру, розташування та рухливість плавників;

– хвостова частина робота-риби також спроектована для ефективного плавання. Морфологічна схожість у цьому випадку означає намагання відтворити хвостову частину риби з усіма її анатомічними особливостями;

– вибір матеріалів для конструкції робота-риби також може бути обумовлений морфологічною схожістю. Використання гнучких та еластичних матеріалів може надати роботу більш природній зовнішній вигляд.

Морфологічна схожість важлива не тільки для естетичних аспектів, але й для досягнення оптимальних гідродинамічних характеристик, що дозволяють роботу-рибі ефективно та енергоефективно плавати у водному середовищі. Під час плавання, риби використовують різні режими руху, включаючи рух тіла та/або хвостового плавця (BCF), рух серединного та/або парного плавця (MPF), а також комбіновані рухи декількох плавців [5]. Порівняльний аналіз цих режимів приведено в таблиці 1.1 .

Таблиця 1.1 – Порівняння режимів руху риби під час плавання

Режим руху	Опис	Особливості та функціонал
BCF	Рух тіла та хвоста у вигляді хвилеподібних коливань	Дозволяє досягти більшої потужності та ефективніший для швидкісного переміщення
MPF	Рухання центральних чи парних плавців для стабілізації та навігації	В основному використовується для переміщення з низькими швидкостями, відзначається високою маневреністю
Комбіновані рухи декількох плавців	Комплексне використання рухів різних плавців для досягнення потрібного напрямку та швидкості	Плавці з багатьма плавниками можуть ефективно забезпечити високу продуктивність руху, покращити маневреність і стійкість, а також виконувати різноманітні маневри, змінювати дії та обходити перешкоди та інші завдання

У своїй роботі Li та інші використовували біонічних дельфінів для імітації нового типу самоперекочування. Вони керували коливаннями грудних плавників, лівого та правого, з різними параметрами частоти та амплітуди. Отримані результати свідчать, що в порівнянні з традиційними біонічними рибами, які вміють тільки рухатися, автономне перекочування дозволяє дельфінам-роботам виявити додаткові можливості. Розумне використання грудних плавників може сприяти кращому розумінню механізму багатовимірного маніпулювання дельфіна, що надасть теоретичну підтримку проектуванню та виробництву роботизованих дельфінів. У майбутньому авторами планується дослідження взаємодії між хвостовим та грудними плавниками, покращення гнучкості біонічного дельфіна, підвищення ефективності обертання та реалізація рухливості з більшим числом ступенів вільності [6].

Крім того, Li та його колеги створили роботизовану рибу з двома грудними плавниками та одним хвостовим для вивчення керування нею. Спочатку, ними була розроблена гідродинамічна модель для грудного плавника, хвостового плавника та їх гібридного приводу, а потім експериментально досліджено керування в цих трьох сценаріях. Отримані експериментальні результати свідчать, що гібридний привід може дозволити роботам-рибам швидко обертатися та покращити їх рухливість. Ці результати можуть бути використані для отримання більш різноманітних режимів повороту та досягнення вищих швидкостей обертання для роботизованих риб в майбутньому [7].

Наступними, Kadiyam та інші розробили математичну модель руху на основі одного хвостового плавника та двох грудних плавників для прогнозування сили, що виникає від коливань жорстких плавників у воді. Вони запропонували новий метод керування рухом підводних роботів. Цей метод має простий дизайн та стабільне керування, а мобільність та стабільність роботизованої риби можна забезпечити за допомогою керування

кількома плавниками. Таким чином, рух з використанням кількох плавників може стати основним напрямом у розвитку підводних робототехнічних риб у майбутньому [8].

У статті Mignano та його колеги вперше вказали, що координація декількох взаємодіючих ласт може формувати та модулювати сили, які впливають на силу плавання, що створюється системою роботів з кількома ластами. Це забезпечує високу мобільність і стабільність. Однак для кращого розуміння взаємодії між декількома ластами та повною реалізацією її в системі проектування, необхідно провести подальші дослідження, щоб визначити, як на цю взаємодію впливає швидкість плавання, ефекти частоти помахів плавниками внаслідок перекриття сліду та еластичність плавників [9].

У роботі Bo Zhang та інші згідно з біологічними особливостями тунця, для проектування біонічної роботизованої риби враховували наступні вимоги:

– передня частина тунця має твердий скелет, в той час як хвіст, що виступає як привід, надає всю потрібну міць. З цим урахуванням, в головній і тулубній частині біонічна риба має бути спроектована як жорстка структура, в той час як хвістова частина повинна складатися з гнучкого матеріалу;

– рухи тунця здійснюються завдяки розтягуванню м'язів, тому особливо важливо правильно імітувати їх рух. Для виготовлення риб'ячого хвоста використовується силікагель з нульовим кутом нахилу, що має такі характеристики: в'язкість (мПа·с) від 2000 до 6800, умови сульфідування при 180 °С протягом 5-10 хвилин, твердість 0 за Шором;

– головну силу руху тунця створює похитування риб'ячого хвоста в рідині. Контролюючи параметри гойдання біонічної риби, можна досягти найкращого результату. Гнучкий риб'ячий хвіст прикріплюється до заднього кінця тіла риби через улов. Його конструкцію можна розглядати як консольну. Рух хвоста забезпечується за допомогою магнітної сили, що

виникає від взаємодії котушки і постійного магніту. Гнучкий риб'ячий хвіст натурально розгойдується під час русу суглобів [10]. Схема структури руху біонічної риби показана на рисунку 1.1.

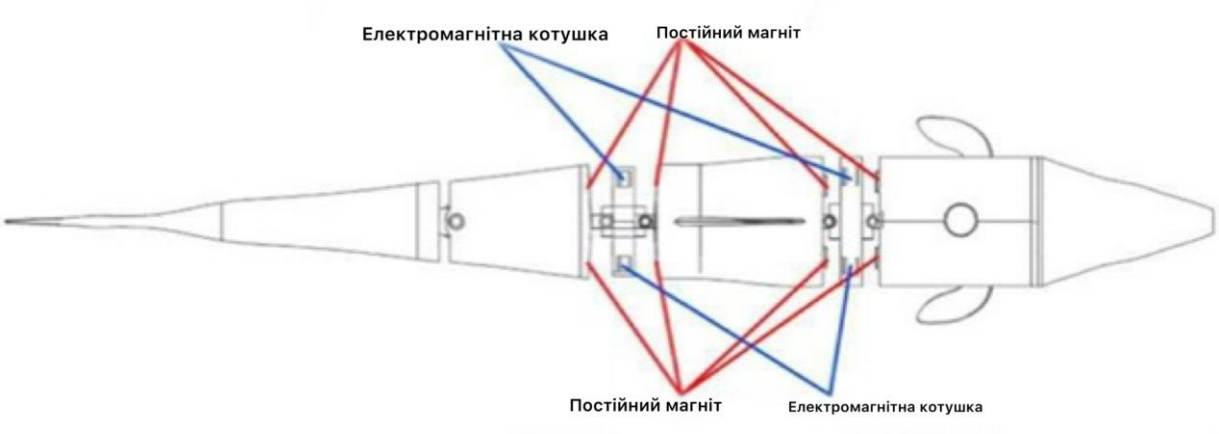


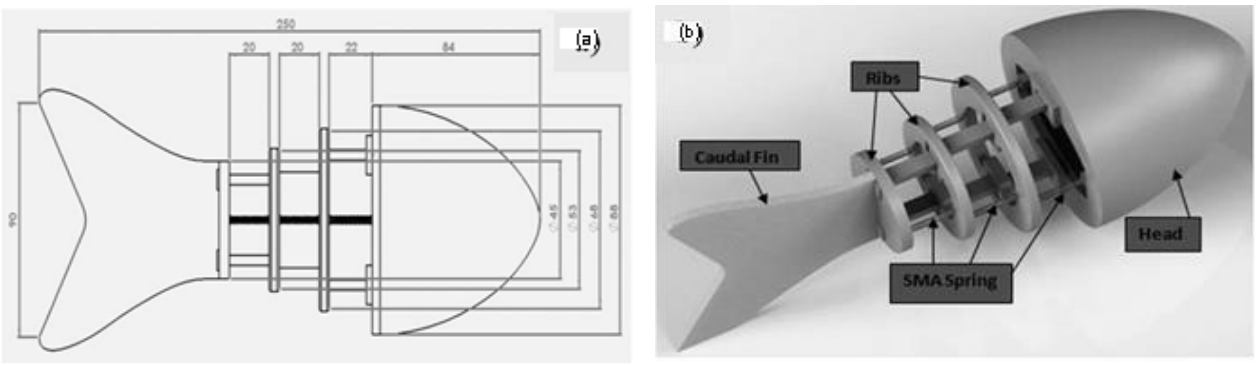
Рисунок 1.1 – Схема структури руху біонічної риби [10]

Головна частина біонічного робота, яка імітує риб'ячу голову, має аеродинамічну форму, що дозволяє значно зменшити опір під час плавання у воді. Для руху гнучкого риб'ячого хвоста біонічна риба використовує три гнучкі суглоби, що дозволяє їй просуватися вперед по воді. Під час руху вперед, за допомогою механізму керування грудними плавниками, можна змінити кут нахилу цих плавників, щоб завершити операцію плавання та переходу до пірнання.

Біонічна конструкція робота-риби складається з голови риби, тіла риби, першого суглоба, другого суглоба, третього суглоба, риб'ячого хвоста та хвостового плавця. Корпус тіла риби надрукований на 3D-принтері світлочутливим полімерним матеріалом. Головна частина риби оснащена панеллю керування на базі ARM. Усі дроти ланцюга обгорнуті водонепроникною ізоляційною шкірою. Подвійний драйвер H-моста L298N та одиночний модуль приводу постійного струму vnh5019 встановлені у герметичній камері. У задній частині риби автори використали

багатосекційний електромагнітний механізм для виконання різних рухів біонічної риби [10].

У роботі M. Muralidharan та інших, було продемонстровано роботизовану рибу, що приводиться в дію субкарангіформною рибою зі сплаву пам’яті форми (SMA) за допомогою механізму руху на основі пружини. Біонічна роботизована риба, розроблена з використанням пружинних приводів SMA та легких 3D-друкованих компонентів, може використовуватися для підводних робіт. Запропонована авторами конструкція SMA на основі пружини без традиційного двигуна та інших обертових приводів змогла досягти двостороннього ефекту пам’яті форми та відтворила субкарангіформну модель пересування. Авторами була розроблена позиційна кінематична модель, а динаміка запропонованого механізму була проаналізована та змодельована за допомогою автоматизованого динамічного аналізу механічних систем (ADAMS). Запропонована конструкція є масштабованою, легкою та економічно вигідною, що може підійти для застосування підводного спостереження [11]. На рисунку 1.2 представлено модель робота-риби, розробленого авторами.



а) б)

а) конфігурація запропонованої риби-біонічного робота;

б) структура запропонованого робота-риби

Рисунок 1.2 – Модель роботизованої риби [11]

1.2 Аналіз моделі кінематики зооморфного робота-риби

Зооморфні роботи-риби призначені для ефективного імітування рухів справжніх риб у природних умовах. Відмінність цих роботів від традиційних промислових моделей полягає у їхній гнучкій конструкції та здатності виконувати різноманітні рухи, які максимально наближені до природних.

Дані зооморфні роботи призначені для використання в різних сферах, де потрібна точна імітація рухів риби. Їх конструкція включає рухливі суглоби, що надають їм можливість гнучкого та плавного руху, схожого на той, що спостерігається у живих тварин. Зооморфні роботи можуть бути використані в багатьох галузях, включаючи науку, дослідження підводного світу, морське господарство та інші галузі, де точність рухів та натуральність руху риби важливі для досягнення поставлених завдань. На рисунку 1.3 представлено загальний вид робота Fish у тривимірному просторі [12].

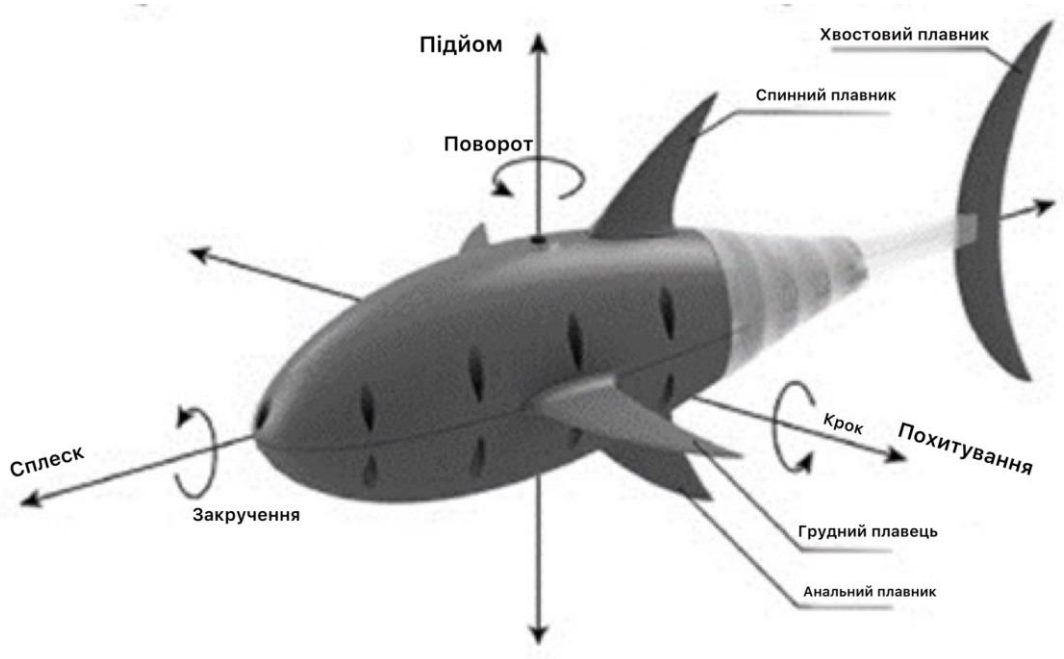


Рисунок 1.3 – Загальний вид робота Fish у тривимірному просторі [12]

У своїй роботі M. Muralidharan та інші, розробили позиційну кінематичну модель для свого прототипу робота-риби, а динаміка

запропонованого механізму була проаналізована та змодельована за допомогою автоматизованого динамічного аналізу механічних систем, представлену на рисунку 1.4 [11].

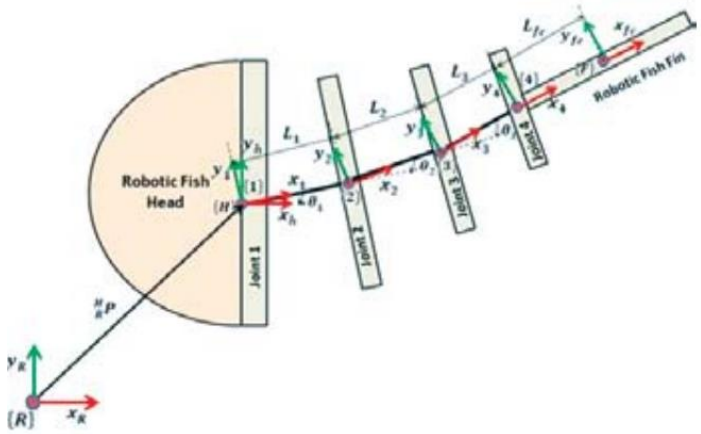


Рисунок 1.4 – Позиційна кінематична модель [11]

Наступним етапом роботи стане розробка кінематичної моделі саме під майбутню конструкцію зооморфного робота риби.

1.3 Вибір та обґрунтування виконавчих механізмів та матеріалів

Вибір матеріалів для зооморфних роботів риб є важливою складовою їхнього проектування і впливає на їхню масу, міцність, маневреність та стійкість в різних водних середовищах. Використання гнучких полімерних матеріалів, таких як силікони, у виготовленні риб'ячих тіл та плавників дозволяє досягти природнього руху. Ці матеріали мають високу еластичність та можуть відтворити рухи, подібні до реальних риб. Також, використання карбонових композитних матеріалів у конструкції скелету робота може надати необхідну жорсткість та міцність. Вони допомагають утримувати форму та забезпечують стійкість. Деякі конструкційні елементи, такі як каркаси та механізми керування, можуть бути виготовлені з алюмінієвих сплавів для зменшення ваги та забезпечення оптимальної міцності. В

таблиці 1.2 наведено детальну інформацію про матеріали, які можуть використовуватися для корпусу та компонентів зооморфних роботів риб [13].

Таблиця 1.2 – Матеріали для корпусу та компонентів зооморфних роботів риб

Матеріал		Призначення
Пластик	Полікарбонат	Матеріал дуже міцний, має високу стійкість до подряпин і зносу. Може бути використаний для створення прозорих вікон на корпусі робота-риби для камер або сенсорів
	Акриловий пластик	Прозорий матеріал, який може використовуватися для видимих вікон або оболонок корпусу робота. Має добру стійкість до води, добре піддається обробці
	Поліпропілен	Легкий пластик, добре витримує вологу, хорошої міцності. Може бути використаний для виготовлення корпусу або елементів плавників робота
Метали	Алюміній	Легкий, має високу стійкість до корозії, відмінний вибір для компонентів робота, які повинні залишатися легкими і міцними
	Нержавіюча сталь	Матеріал добре витримує вологу та корозію, і використовується для створення міцних та довговічних компонентів робота-риби.
Гума та силікон	Силікон	Гнучкий і водонепроникний матеріал, який може використовуватися для створення герметичних ущільнювачів або рухомих частин, таких як губки та плавники
Спеціальні матеріали	Гідрофобні покриття	Деякі компоненти робота-риби можуть бути оброблені спеціальними гідрофобними покриттями, щоб запобігти намоканню та забрудненню водою
	Текстурні покриття	Деякі роботи можуть мати текстурні покриття на своєму корпусі для камуфляжу або для зменшення опору води

Вибір матеріалів залежить від конкретних потреб і завдань робота-риби. Важливо враховувати властивості матеріалів, які стосуються міцності,

герметичності, маси та стійкості до впливу води. Для досягнення найкращих результатів рекомендується використовувати комбінацію різних матеріалів.

Організми, що існують у водному середовищі, володіють природною здатністю до ефективного пересування та плавання. Біоміміка в цій області, а саме імітація структур та механізмів руху водяних організмів, є важливою проблемою для дослідників. Дотримуючись цього принципу, вчені використовують технологію серводвигуна для створення автономних підводних апаратів (AUV), які намагаються імітувати рух риб [11].

Однак роботизовані риби, що використовують двигун, мають більші розміри та не здатні точно реплікувати рухи справжньої риби. Останнім часом, значний прогрес досягнуто в розробці розумних матеріалів, які стали альтернативою у приводах в біоміметиці. Важливими технологіями серед них є сплав із запам’ятовуванням форми (SMA), іонні полімерні металеві композити (IPMC), п’єзоелектричний, пневматичний та діелектричний еластомерний привод (DEA).

SMA виступає як життєздатна технологія приводу, завдяки його здатності генерувати м’язову активацію, мінімізувати шум та економити енергію при русі. Його унікальні властивості, такі як ефект пам’яті форми та псевдоеластичність, дозволяють йому працювати надійно при високих навантаженнях. SMA може приймати три різні кристалічні структури, а саме: подвійникований мартенсит (при низьких температурах), роздвоєний мартенсит (при механічних навантаженнях) і аустеніт (при високих температурах). Доцільно розробити спеціальну конструкцію SMA для конкретних застосувань з метою уникнення недоліків, таких як гістерезис. Використання SMA в біоміметиці набуває все більшого розповсюдження. Дослідники розробляють різноманітні біоміметичні системи на основі SMA, такі як роботизовані риби, медузи, черв’яки-дюймули та інші. Використання SMA у виконавчих механізмах дозволяє застосовувати різноманітні форми, такі як пружини, дроти та пластини. Такі винаходи, як роботи-риби, підводні

черепахи та інші системи з приводами SMA, вказують на потенціал цієї технології у біологічно інспірованих робототехнічних рішеннях [11].

В роботі Bo Zhang та інших, матеріали голови, тіла та середнього суглоба біонічної риби виготовлені зі світлочутливої смоли за допомогою технології 3D-друку. Готовий виріб має гладку поверхню, високу точність, поверхню під фарбування та відповідну твердість. Котушка, датчик Холла та інші компоненти пофарбовані водостійким клеєм. Блок живлення та противагу встановлено всередині першої секції для забезпечення взаємного становища центру важкості [10].

Для вибору типу пластику для виготовлення корпусу майбутньої біонічної конструкції робота-риби проведемо порівняльний аналіз розповсюджених типів, а саме PLA, ABS та PETG пластик. Результати порівняння за основними критеріями представлено в таблиці 1.3.

Таблиця 1.3 – Порівняння PLA, ABS та PETG пластику

Критерії	PLA	ABS	PETG
В’язкість	Низька	Висока	Середня
Температурна стійкість	Низька	Висока	Висока
Витривалість	Низька	Висока	Висока
Швидкість друку	Висока	Низька	Середня
З’єднання	Не дуже міцне	Дуже міцне	Дуже міцне
Екологічність	Більш екологічний	Менш екологічний	Більш екологічний
Гнучкість	Низька	Низька	Висока
Вартість	Низька	Середня	Середня

Обираючи матеріал для виготовлення корпусу майбутнього робота-риби, важливо врахувати кілька факторів. PLA є гарним вибором з урахуванням таких його властивостей:

– висока швидкість друку, це дозволяє швидко виготовити деталі, що важливо при прототипуванні;

– досить міцний і добре з'єднується, хоча його з'єднання не так міцні, як у ABS, воно вистачає для більшості випадків;

– більш екологічний, PLA виготовлений з біорозкладаючих матеріалів і менше негативно впливає на навколишнє середовище;

– доступна ціна, так як PLA зазвичай є більш доступним за ціною, що робить його привабливим для багатьох проектів.

Отже, обираючи PLA для корпусу, ми забезпечуємо високу якість, швидкість виробництва, дбаємо про навколишнє середовище і економимо кошти [13].

Далі, для управління мобільним роботом-рибою було обрано модуль ESP32-Cam, який дозволяє реалізувати систему комп’ютерного зору для розпізнавання та ідентифікації об’єктів у підводному навколишньому середовищі. Загальний вигляд ESP32-Cam представлено на рисунку 1.5.

Рисунок 1.5 – Загальний вигляд ESP32-Cam [14]

Основні характеристики ESP32-Cam включають:

– максимальна частота мікроконтролера – до 240 МГц (зазвичай 160 МГц);

– вбудована оперативна пам'ять – 520 кБ;

– зовнішня псевдостатична ОЗУ (PSRAM) – 4 Мб;

– підтримка microSD для зовнішнього сховища потужністю до 16 ГБ;

– розміри – 40,5 мм × 27 мм × 4,5 мм;

– вага – 10 г;

– камера OV2640 з роздільною здатністю 2 мегапікселі [14].

Наступним етапом є вибір двигуна, при виборі якого для біонічної конструкції робота-риби, необхідно провести порівняльний аналіз декількох типів двигунів. В першу чергу розглянемо переваги та недоліки коливального двигуна [15]. До переваг даного типу можна віднести:

– низька тривожна вібрація, так як коливальні силові установки працюють на набагато нижчих робочих частотах, що дозволяє уникнути тривожної вібрації у воді. Це важливо для уникнення спотворення довкілля під час руху;

– ефективність при високих частотах. Дослідження показують, що коливальні системи можуть мати дуже високий коефіцієнт корисної дії (ККД) навіть при високих частотах руху;

– менше шкоди навколишньому середовищу, так як коливальний рух може бути менш травматичним для довкілля, оскільки він не смокче об'єкти в пропелер, а відсуває їх.

До недоліків коливального двигуна можна віднести:

– складність конструкції, так як системи з коливальним рухом можуть бути складнішими для конструювання та керування порівняно з роторними приводами;

– обмежений тип руху, бо коливальний рух може бути менш універсальним для виконання деяких завдань, особливо якщо потрібен складний маневр.

Якщо говорити про переваги роторного типу двигуна, то можна виділити такі:

– роторні приводи можуть бути більш універсальними і використовуватися для широкого спектру рухів та завдань;

– роторні приводи можуть надати дуже швидку реакцію на зміни команд, що може бути важливим у деяких ситуаціях.

До недоліків роторних двигунів відносяться:

– тривожна вібрація. Роторні приводи можуть створювати тривожну вібрацію в воді, особливо при великих обертаннях;

– більша вага та габарити. Роторні приводи можуть бути важчими та більш об'ємними, що може вплинути на конструкцію та маневреність робота. Результати порівняння характеристик двигунів представлені в таблиці 1.4.

Таблиця 1.4 – Порівняння характеристик двигунів

Критерії	Коливальний двигун	Роторний двигун
Тривожна вібрація	Низька	Висока
Універсальність	Обмежена	Висока
Ефективність	Висока при низьких частотах	Залежить від застосування
Складність конструкції	Вище	Нижче
Маневреність	Залежить від конкретної конструкції	Висока
Габарити	Менші	Більші
Вага	Легший	Важчий

Лабораторні експерименти Sander C. Та інших продемонстрували ККД до 87%, тоді як роторні системи з невеликими пропелерами зазвичай не досягають ККД вище 40%. Ротаційний двигун страждає від втрат енергії в результаті обертового потоку води. Крім того, необхідно чинити тиск на обертовий вал, щоб запобігти проникненню води в систему, що призведе до втрати енергії через тертя [12].

Ще одним варіантом реалізації механізму, який призводить до руху хвостову чстину зооморфного робота-риби є серводвигуни. Використання серводвигунів для призводження до руху хвоста робота риби може бути обґрунтовано кількома причинами:

– плавний і точний рух, так як серводвигуни дозволяють забезпечити плавний та точний рух, що важливо для імітації природного плавання риби.

Вони можуть керувати рухом хвоста з великою точністю, що дозволяє роботу рухатися природнім чином у воді;

– висока ефективність та швидкість відгуку, серводвигуни здатні реагувати на сигнали керування дуже швидко, що дозволяє змінювати напрямок та швидкість руху хвоста миттєво. Це робить їх ефективними для створення реалістичного плавання робота риби;

– можливість програмованого керування. Серводвигуни можуть бути програмовані для виконання різних рухів та паттернів, що дозволяє легко адаптувати робота під різні сценарії або завдання. Це особливо важливо для роботів, які використовуються у віддалених чи автономних системах;

– серводвигуни часто працюють з низьким рівнем шуму та вібрацій, що може бути важливим фактором, особливо якщо робот використовується у водоймах, де шум може впливати на навколишнє середовище та рибу;

– легка інтеграція та керування, так як серводвигуни легко інтегруються в системи керування, і їх можна програмувати та керувати з використанням різноманітних алгоритмів. Це робить їх зручними для використання в різних роботах та дослідницьких проектах.

Наступним етапом необхідно провести порівняльний аналіз та вибір серводвигуна. Наразі, найрозповсюдженішими серводвигунами на ринку є серводвигуни PZ-15320, EMAX ES08MAII та Tower Pro 9g SG90. Основні характеристики кожного серводвигуна представлено в таблиці 1.5, а їх зовнішній вид на рисунку 1.6.

Таблиця 1.5 – Основні характеристики серводвигунів

Модель	PZ-15320	EMAX ES08MAII	Tower Pro 9g SG90
Робоча напруга	2,8 В ~ 4,2 В	4,8 В ~ 6 В	4,8 В ~ 6 В
Робоча швидкість	0,06 с/60° (2,8 В) 0,05 с/60° (3,7 В)	0,12 с/60° (4,8 В) 0,10 с/60° (6 В)	0,12 с/60° (4,8 В) 0,10 с/60° (6 В)
Пусковий момент	0,06 кг/см (2,8 В) 0,07 кг/см (3,7 В)	1,6 кг/см (4,8 В) 2 кг/см (6 В)	1,2 кг/см (4,8 В) 1,4 кг/см (6 В)
Розмір	14 х 6,2 х 17,9 мм	23 х 11,5 х 24 мм	21,5 х 11,8 х 22,7 мм
Вага	1,7 г	12 г	9 г

а) б) в)

а) загальний вигляд мікро-серводвигуна PZ-15320;

б) загальний вигляд серводвигуна EMAX ES08MAII;

в) загальний вигляд серводвигуна Tower Pro 9g SG90

Рисунок 1.6 – Серводвигуни PZ-15320, EMAX ES08MAII та Tower Pro 9g SG90 [16-18]

У результаті проведеного аналізу було обрано серводвигун Tower Pro 9g SG90.

1.4 Аналіз особливостей керування зооморфним роботом-рибою

Зазвичай, зооморфні роботи риби оснащені системами керування, які дозволяють контролювати рух і маневреність. Дані системи можуть включати в себе різні актуатори, такі як двигуни та сервоприводи, для контролю пропелерів, плавників і інших рухливих частин. Датчики, такі як гідролокатори, сонари, гідрофони, датчики температури і давлення, надають роботу інформацію про навколишнє середовище. Програмне забезпечення (ПЗ) оброблює ці дані і приймає рішення щодо руху і керування. Деякі зооморфні роботи риби можуть керуватися віддалено оператором, який визначає їх рух та маневри за допомогою радіокерування або інших систем зв'язку. Роботи риби можуть мати системи автономного керування, які дозволяють їм приймати рішення про рух і маневреність без втручання оператора. Це може включати в себе алгоритми навігації, штучний інтелект, машинне навчання та системи управління [19].

Програмне забезпечення робота-риби включає в себе алгоритми, які дозволяють роботу-рибі навігувати в водному середовищі. Це може включати в себе визначення оптимального шляху, уникнення перешкод, розпізнавання місцевості та точне позиціонування. ПЗ контролює рухливі компоненти, такі як пропелери, плавники та хвістовий відрізок, для забезпечення бажаного руху та маневреності. Програмне забезпечення зчитує дані з різних сенсорів, обробляє їх та використовує для прийняття рішень. Наприклад, воно може аналізувати звукові сигнали від гідрофонів або інші дані для розпізнавання об'єктів та визначення відстаней. Якщо робот може бути керований оператором з дистанції, ПЗ забезпечує зв'язок із зовнішніми інтерфейсами, такими як пульт дистанційного керування або програми для смартфонів. Програмне забезпечення може збирати дані про рух, навігацію і спостереження водного середовища. Ці дані можуть бути використані для аналізу роботи, моніторингу навколишнього середовища та вдосконалення алгоритмів. Керування та програмне забезпечення спільно дозволяють зооморфним роботам рибам функціонувати в водному середовищі, рухатися, маневрувати, взаємодіяти з навколишнім середовищем і виконувати завдання відповідно до їхнього призначення. Дані аспекти грають критичну роль у роботі з підводними системами і дослідженням морських об'єктів [20].

Насамперед, робот-риба повинен бути обладнаний різноманітними датчиками, що забезпечують навколишнє сприймання. Це включає в себе гіроскопи та акселерометри для визначення орієнтації в просторі, а також датчики відстані та висоти, щоб уникати перешкод. Камери та інфрачервоні датчики можуть бути використані для відображення оточуючого середовища та виявлення об'єктів. Вони можуть бути корисні для навігації та взаємодії з навколишнім світом. Також, можна використовувати технології, такі як комп'ютерне зорове розпізнавання або техніки обробки зображень для ідентифікації об'єктів та перешкод. Деякі роботи-риби можуть

використовувати гідроакустичні сенсори для навігації та виявлення об'єктів в воді [21].

В основу алгоритмів керування зооморфним роботом-рибою може вкладатися використання пропорційно-інтегрально-диференційних контролерів для стабілізації руху робота та управління його рухами, машинне навчання та нейромережі можуть використовуватися для розпізнавання зразків у даних датчиків та прийняття рішень, а такі алгоритми, як алгоритми глобальної локалізації та алгоритми побудови шляху допомагають роботу рухатися від точки до точки та уникати перешкод.

Роботизовані риби, також, можуть бути оснащені системами бездротового зв’язку для передачі даних та команд від оператора, а деяких роботів можна налаштувати на автономну роботу та надати можливість приймання рішень без зовнішнього втручання. Для будь-яких задач не останним є забезпечення тривалої роботи у воді, за рахунок надійних та ефективних джерел живлення, наприклад, акумулятори або дротове живлення [22].

1.5 Постановка задач дослідження

В ході проведеного аналізу у першому розділі, було виявлено, що тема даного дослідження є актуальною.

Метою даної роботи є розробка дослідницького макету зооморфного мобільного роботу для дослідження методів переміщення у водному середовищі. Об’єктом дослідження є процес переміщення зооморфного робота-риби. Предметом дослідження є методи 3D моделювання та проектування для розрахунку кута вигину хвосту риби. Методами дослідження є метод 3D моделювання та методу аналізу та вибору апаратних

модулів, метод скінченних елементів. Для досягнення поставленої мети потрібно вирішити наступні завдання:

- розробити кінематичну модель зооморфного робота-риби;
- розробити модель гідродинамічної сили, що діє на хвіст робота-риби;
- розробити 3D-моделі конструкції робота-риби;
- розробити тривимірну модель збірки;
- зібрати макет зооморфного робота-риби;
- розробити систему управління;
- провести вибір середовища моделювання;
- провести побудову розрахункової моделі;
- отримати результати моделювання руху хвоста зооморфного робота-риби;
- провести постановку задач експериментів;

провести порівняння результатів моделювання з експериментальним зразком та аналогічними рішеннями.

2 РОЗРОБКА КОНСТРУКЦІЇ МАКЕТУ ЗООМОРФНОГО РОБОТА-РИБИ

2.1 Розробка кінематичної моделі

Розробка кінематичної моделі робота-риби є важливим етапом у його створення з кількох причин. По-перше, кінематична модель дозволяє точно визначити рух кожного суглоба та частини робота-риби, що важливо для ефективної та плавної навігації у водному середовищі. По-друге, вона забезпечує можливість вивчення та оптимізації біомеханіки риби, що допомагає створити робота, максимально наближеного до природних рухів. Кінематична модель також є основою для розробки алгоритмів управління, які забезпечують реалістичну та ефективну взаємодію робота-риби з навколишнім середовищем. Цей процес також сприяє створенню точніших математичних моделей, які можуть використовуватися для прогнозування поведінки робота-риби в різних умовах. Зрештою, розробка кінематичної моделі робота-риби дозволяє покращити його функціональність, забезпечуючи ефективну взаємодію з водним оточенням та підвищуючи реалістичність його рухів [23].

Кінематична схема руху 4-ланкового хвоста робота-риби описується з використанням кутів повороту кожної ланки щодо попередньої. Припустимо, що у нас є 4 ланки ($O_1, O_2, ..., O_4$), пронумерованих від 1 до 4, починаючи від базової ланки (розташованої ближче до тіла робота) до кінцевого. Позначимо кути повороту відповідно як $\varphi_1, \varphi_2, ..., \varphi_4$, знаходження кутів повороту кожної ланки робота-риби необхідне для точного моделювання та управління його рухами. Ці кути визначають положення кожного суглоба, що дозволяє створити реалістичні та ефективні рухи, а також забезпечує можливість точної навігації у водному середовищі. Знання кутів повороту є ключовим

фактором у розробці алгоритмів управління, що сприяють максимальній функціональності та адаптації робота-риби до різних умов навколишнього середовища. Максимальний кут повороту цієї ланки через $\theta_1, \theta_2, ..., \theta_4$ відповідно, знаходження максимальних кутів повороту кожної ланки робота-риби є важливим кроком для забезпечення безпеки та ефективності його рухів. Це дозволяє визначити межі руху кожного суглоба, запобігаючи можливим зіткненням з навколишніми об'єктами та забезпечуючи стійкість робота в різних умовах. Центр важкості кожної ланки позначимо через l_n, знаходження центру важкості кожної ланки робота-риби необхідне забезпечення точності і стійкості його рухів. Знання розподілу мас дозволяє оптимізувати конструкцію та управління роботом, забезпечуючи більш ефективну взаємодію з навколишнім середовищем та зменшуючи ймовірність втрати рівноваги у різних умовах. Кінематична схема руху 4-ланкового хвоста робота-риби у 3-вимірному просторі (x_n^c, y_n^c, z_n^c) для кожної ланки подано на рисунку 2.1.

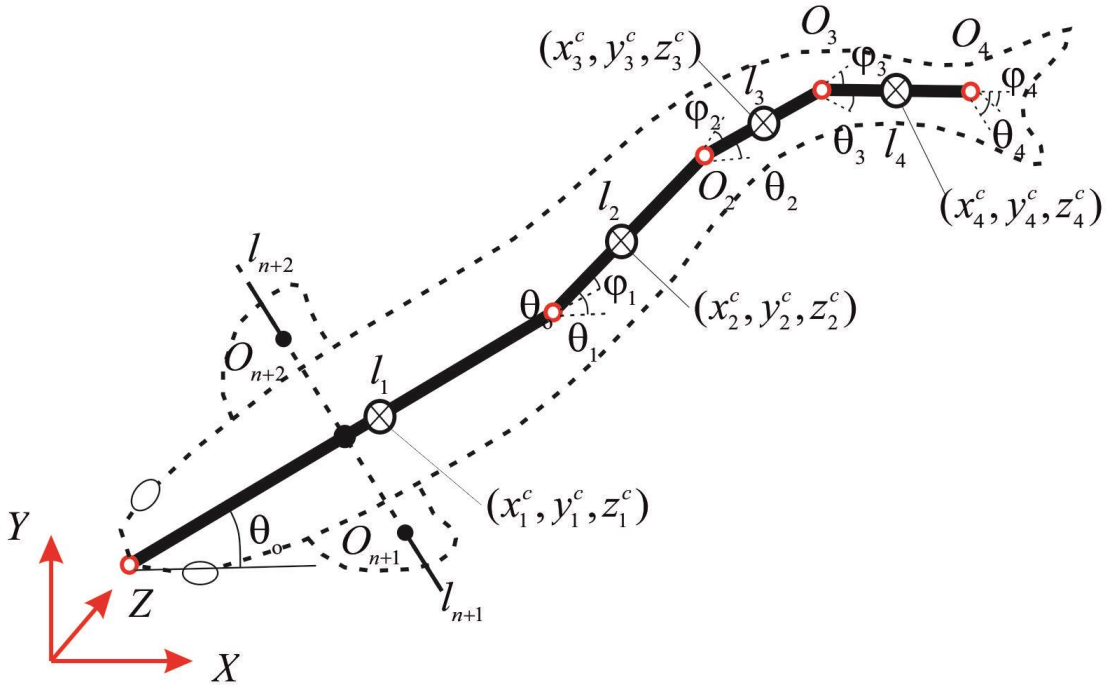


Рисунок 2.1 – Кінематична схема руху 4-ланкового хвоста робота-риби у 3-вимірному просторі

Для кінематичної схеми руху 4-ланкового хвоста робота в тривимірному просторі з урахуванням зазначених параметрів, представимо кожну ланку у вигляді трансформаційної матриці.

Трансформаційна матриця для ланки 1 (0_1):

$$T_1 = \begin{bmatrix} \cos\varphi_1 & -\sin\varphi_1 & 0 & 0 \\ \sin\varphi_1 & \cos\varphi_1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & l_1 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}. \quad (2.1)$$

Трансформаційна матриця для ланки 2 (O_2) відносно ланки 1 (O_1):

$$T_2 = \begin{bmatrix} \cos\varphi_2 & -\sin\varphi_2 & 0 & l_2\cos\varphi_2 \\ \sin\varphi_2 & \cos\varphi_2 & 0 & l_2\sin\varphi_2 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}. \quad (2.2)$$

Трансформаційна матриця для ланки 3 (O_3) відносно ланки 2 (O_2):

$$T_3 = \begin{bmatrix} \cos\varphi_3 & -\sin\varphi_3 & 0 & l_3\cos\varphi_3 \\ \sin\varphi_3 & \cos\varphi_3 & 0 & l_3\sin\varphi_3 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}. \quad (2.3)$$

Трансформаційна матриця для ланки 4 (O_4) відносно ланки 3 (O_3):

$$T_4 = \begin{bmatrix} \cos\varphi_4 & -\sin\varphi_4 & 0 & l_4\cos\varphi_4 \\ \sin\varphi_4 & \cos\varphi_4 & 0 & l_4\sin\varphi_4 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}. \quad (2.4)$$

Для кінематичної схеми руху 4-ланкового хвоста робота в тривимірному просторі з урахуванням зазначених параметрів, представимо кожну ланку у вигляді трансформаційної матриці.

Трансформаційна матриця для ланки 1 (0_1):

$$T_1 = \begin{bmatrix} \cos\varphi_1 & -\sin\varphi_1 & 0 & 0 \\ \sin\varphi_1 & \cos\varphi_1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & l_1 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}. \tag{2.5}$$

Трансформаційна матриця для ланки 2 (O_2) відносно ланки 1 (O_1):

$$T_2 = \begin{bmatrix} \cos\varphi_2 & -\sin\varphi_2 & 0 & l_2\cos\varphi_2 \\ \sin\varphi_2 & \cos\varphi_2 & 0 & l_2\sin\varphi_2 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}. \tag{2.6}$$

Трансформаційна матриця для ланки 3 (O_3) відносно ланки 2 (O_2):

$$T_3 = \begin{bmatrix} \cos\varphi_3 & -\sin\varphi_3 & 0 & l_3\cos\varphi_3 \\ \sin\varphi_3 & \cos\varphi_3 & 0 & l_3\sin\varphi_3 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}. \tag{2.7}$$

Трансформаційна матриця для ланки 4 (O_4) відносно ланки 3 (O_3):

$$T_4 = \begin{bmatrix} \cos\varphi_4 & -\sin\varphi_4 & 0 & l_4\cos\varphi_4 \\ \sin\varphi_4 & \cos\varphi_4 & 0 & l_4\sin\varphi_4 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}. \tag{2.8}$$

Наступним кроком на базі (2.5-2.8) виведемо загальну трансформаційну матрицю для хвоста робота, це дозволить точно описати та керувати його положенням у тривимірному просторі. Ця матриця поєднує інформацію про геометрію та кінематику кожної ланки, дозволяючи уявити складні рухи хвоста у вигляді єдиної математичної моделі. Маючи загальну трансформаційну матрицю, можна ефективно реалізовувати алгоритми управління, оптимізувати траєкторії руху та забезпечувати стійкість робота-риби в різних умовах навколишнього середовища. Це важливий крок у створенні біоміметичних систем, що наближають їх рух до природних та адаптивних характеристик риб у водному середовищі. Звідси загальна трансформаційна матриця для хвоста робота можна описати так:

$$T_{total} = T_1 \cdot T_2 \cdot T_3 \cdot T_4, \tag{2.9}$$

де T_{total} – загальна трансформаційна матриця для хвоста робота;

$T_1 \cdot T_2 \cdot T_3 \cdot T_4$ – трансформаційна матриця для кожної ланки відповідно.

Наведемо приклад розрахунку загальної трансформаційної матриці (2.9) для хвоста робота-риби за наступних вхідних умов, визначимо кути повороту відповідно як $\phi_1 = 15^0$, $\phi_2 = 18^0$, $\phi_3 = 18^0$, $\phi_4 = 20^0$, а центр важкості кожної ланки $l_1 = 30мм$, $l_2 = 13мм$, $l_3 = 10мм$, $l_4 = 15мм$, як показано на рисунку 2.1. Виходячи з вхідних даних, загальна трансформаційна матриця для хвоста робота T_{total} буде наступна:

$$T_{total} = \begin{bmatrix} 0,9392 & -0,3420 & 0 & 13,3539 \\ 0,3420 & 0,9392 & 0 & 30,1012 \\ 0 & 0 & 1 & 55,000 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}. \tag{2.10}$$

Це представляє собою трансформаційну матрицю, що описує положення кінцевої ланки (хвоста) робота-риби щодо базової ланки (тіла робота) у тривимірному просторі при заданих кутах повороту та довжинах ланок.

2.2 Модель гідродинамічної сили, що діє на хвіст робота-риби

Розробка моделі гідродинамічних сил, що діють на хвіст робота-риби, є ключовим аспектом для досягнення ефективного та біоміметичного плавання у водному середовищі. Ця модель дозволяє врахувати вплив води на динаміку хвоста, включаючи опір, що підтримує силу та маневреність. Реалістичне моделювання гідродинамічних впливів не лише підвищує точність рухів робота, а й сприяє мінімізації енергоспоживання. Дослідження гідродинамічних сил має важливе значення для розробки ефективних алгоритмів управління та створення більш ефективних та стійких біороботів у водному середовищі.

Ґрунтуючись на рисунку 2.1, розробимо візуальне уявлення розподілу гідродинамічних сил, що діють на хвіст проектованого робота-риби. Позначимо через F_V – інерційна сила рідини, F_J – підйомна сила, F_F – сила тяги, F_C – бічна сила, F_{D} – сила опору. У загальному розподілі гідродинамічних сил, що діють на хвіст, представлено на рисунку 2.2.

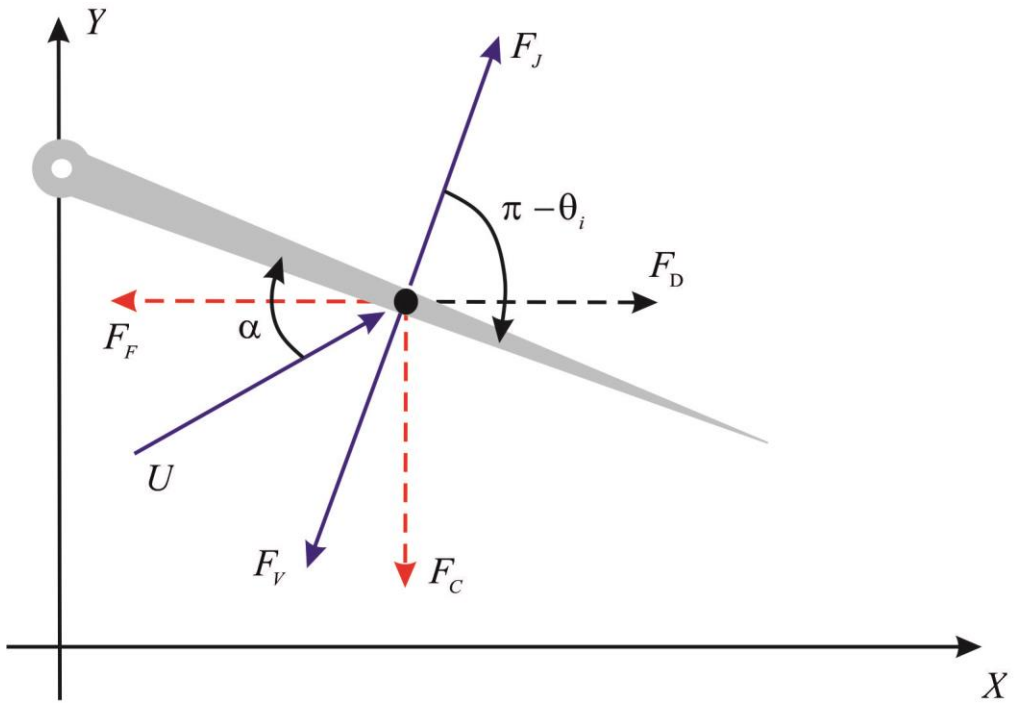


Рисунок 2.2 – Розподіл гідродинамічних сил, що діють на хвіст робота-риби

Припустимо, що хвостовий плавець роботизованої риби коливається в постійному потоці, що представляє собою U_m так що на хвостовий плавець діють інерційна та підйомна сили. Після цього компоненти сили тяги та поперечної сили розраховуються з використанням інерційної рідини та підйомної сили. Значення постійної витрати визначається як 0,08 м/с зменшення турбулентних ефектів. Ґрунтуючись на рисунку 2.2 можна помітити що F_V – це сила, пропорційна прискоренню та її можна розрахувати з виразу (2.11).

$$F_V = \pi\rho LC^2 U \sin(\alpha) + \pi\rho LC^2 U\alpha\cos(\alpha), \qquad (2.11)$$

де С – довжина хорди;

L – розмах хвостового плавця;

ρ – щільність води;

U – відносна швидкість у центрі хвостового плавця;

α – кут атаки.

Підйомна сила вертикальна потоку (F_J) визначається з наступного виразу:

$$F_J = 2\pi\rho LCU^2 \sin(\alpha)\cos(\alpha), \tag{2.12}$$

де С – довжина хорди;

L – розмах хвостового плавця;

ρ – щільність води;

U – відносна швидкість у центрі хвостового плавця;

α – кут атаки.

Відносні змінні швидкості та кута атаки залежать від часу, і перша похідна від них має бути отримана плавно. Ці сили поділяються на силу тяги осі X і бічну силу осі Y:

$$F_F = (F_V - F_J)\sin(2\pi - \sum_{t=1}^{N}\theta_t), \tag{2.13}$$

де θ_t – кут відхилення хвоста риби від нормалі F_J.

$$F_C = (F_V - F_J)\cos(2\pi - \sum_{t=1}^{N}\theta_t). \tag{2.14}$$

Якщо рух робота-риби розглядається у напрямку осі X, відносна швидкість у центрі хвостового плавця у напрямку осі Y виражається наступним рівнянням:

$$\begin{aligned} u_f = {} & l_1\theta_1\cos(\theta_1) + l_2(\theta_1+\theta_2)\cos(\theta_1+\theta_2) + l_3(\theta_1+\theta_2+\theta_3)\cos(\theta_1+\theta_2+\theta_3) + \\ & + l_4(\theta_1+\theta_2+\theta_3+\theta_4)\cos(\theta_1+\theta_2+\theta_3+\theta_4). \end{aligned} \tag{2.15}$$

Відносна швидкість у центрі хвостового плавця U, то вона визначається $\sqrt{\mathrm{U}_{\mathrm{m}}^2 + u_f^2}$, це випливає з того, що U_{m} та u_f перпендикулярні одна одній. Сила тяги (F_F) штовхає робота-рибу вперед, отже сила опору F_{D} діє тіло риби за напрямом течії з допомогою тертя. Визначення сили опору можна як наступного рівняння:

$$F_D = \frac{1}{2}\rho C_D V_f^2 S, \tag{2.16}$$

де C_{D} – коефіцієнт лобового опору;

V_f – відносна швидкість робота- риби;

S – площа основного тіла.

Припустимо, що у проектованому макеті робота-риби, голова робота-риби буде конічною, а значення коефіцієнта опору визначається рівним 0,5. На риб'ячий хвіст робота діють як гідродинамічні, так і зовнішні сили $\tau_i = [\tau_1, \tau_2, \tau_3, \tau_4]$, які можна виразити так:

$$if\left\{\begin{array}{l} active_link \to \tau_i = F_C l_i \cos(\sum_{i=1}^{N}\theta_i) - F_F l_i \sin(\sum_{i=1}^{N}\theta_i) + T_{i-1}^U \\ passive_link \to \tau_i = F_C l_i \cos(\sum_{i=1}^{N}\theta_i) - F_F l_i \sin(\sum_{i=1}^{N}\theta_i) \end{array}\right|_{last_link \to l_i = a_i}. \tag{2.17}$$

Розроблена роботизована риба приводиться в рух чотирма активними суглобами, що створюють силу тяги. Ці з'єднання приводяться в дію за рахунок серводвигуна постійного струму з вхідними моментами, що крутять, звідси:

$$T_i^U = A_{\max}\sin(2\pi f_T t \pm \Delta_i), \tag{2.18}$$

де $A_{\max}$ – амплітуда вхідного крутного моменту;

f_T – частота вхідного крутного моменту;

$\pm \Delta_i$ – фазовий кут між двома вхідними моментами.

Використовуючи рівняння Лагранжа, динамічна модель хвоста робота-риби коротко описується наступним рівнянням:

$$\begin{bmatrix} M_{11} M_{12} M_{13} M_{14} \\ M_{21} M_{22} M_{23} M_{24} \\ M_{31} M_{32} M_{33} M_{34} \\ M_{41} M_{42} M_{43} M_{44} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \theta_1 \\ \theta_2 \\ \theta_3 \\ \theta_4 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} N_1 \\ N_2 \\ N_3 \\ N_4 \end{bmatrix}. \quad (2.19)$$

Запропонована модель дозволяє врахувати взаємодію хвоста з навколишньою рідиною та передбачити динамічні характеристики руху, такі як прискорення, опір та підтримуючі сили. Розрахунок динамічної моделі ґрунтується на обліку фізичних параметрів хвоста, таких як геометрія, маса та гідродинамічні характеристики. Отримані результати дозволяють оптимізувати дизайн та управління роботом-рибою, покращуючи його маневреність, ефективність та адаптивність до різних умов водного середовища. Цей аналіз стає важливим інструментом для створення біоміметичних систем, здатних імітувати природні рухи риб у воді.

2.3 Розробка 3D-моделі конструкції робота-риби

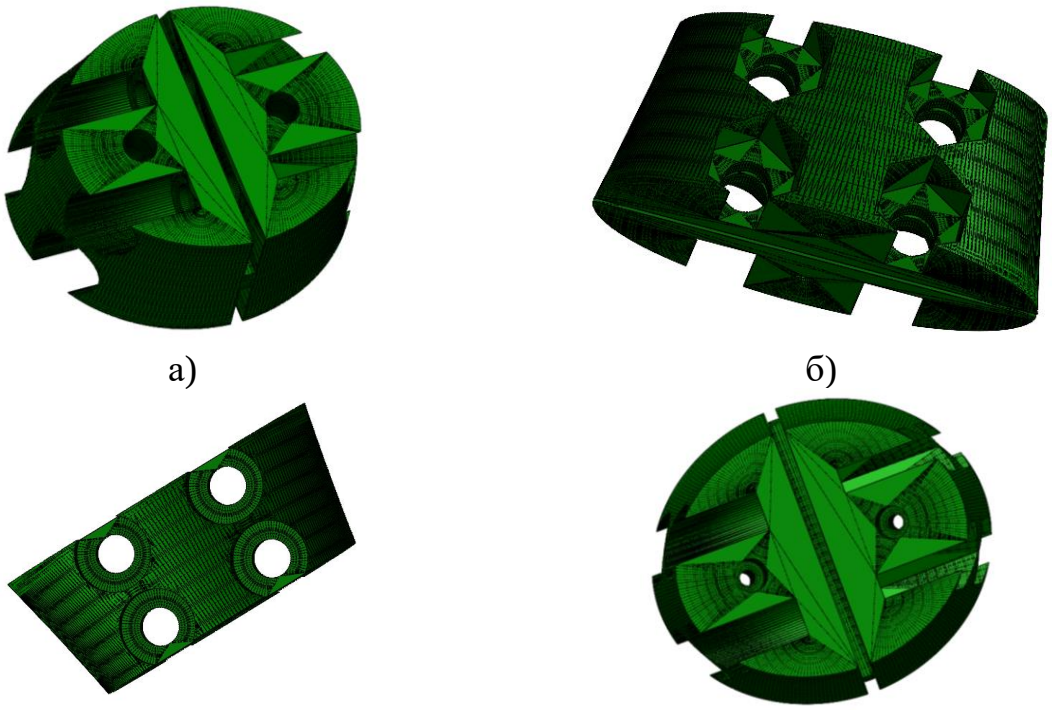
Розглядаючи вибір середовища моделювання для розроблення біонічної конструкції робота-риби, Solidworks видається оптимальним рішенням. По-перше, його інтуїтивний інтерфейс дозволяє зосередитися на творчому процесі, максимально використовуючи час та ресурси. Крім того, програма володіє широким спектром інструментів для точного моделювання складних геометричних форм, що важливо при створенні реалістичної

роботи риби. Solidworks дозволяє впроваджувати та оптимізувати механічні рухи, враховуючи фізичні аспекти рухів риби. Програма також підтримує велику кількість форматів файлів, що спрощує співпрацю з іншими інженерами та дослідниками [24].

Solidworks дозволяє проводити реалістичні динамічні та стрес-аналізи, важливі для визначення ефективності та надійності роботи риби. Використання цього програмного забезпечення сприяє інтеграції аеродинамічних та гідродинамічних аспектів при створенні біонічної конструкції. Solidworks підтримує швидкий прототипування, що дозволяє швидко впроваджувати та тестувати різні ідеї в реальному часі. Програма володіє активною спільнотою користувачів та доступом до розширень, що робить процес моделювання більш ефективним та гнучким. За своєю функціональністю Solidworks покликаний не лише створювати моделі, але й інтегрувати їх у повноцінні системи управління та моніторингу, що додає значний практичний аспект до дослідження біоніки роботів риб.

За допомогою ключових функцій Solidworks були реалізовані всі етапи конструювання 3D-моделей деталей майбутнього зооморфного робота. Використовуючи інтуїтивний інтерфейс програми, були створені складні геометричні форми, враховуючи не лише зовнішні аспекти, але й оптимізуючи механічні рухи для досягнення максимальної ефективності. Аналіз динамічних та стресових характеристик дозволив вдосконалити конструкцію, забезпечуючи високу надійність та відмінну функціональність майбутнього зооморфного робота [25].

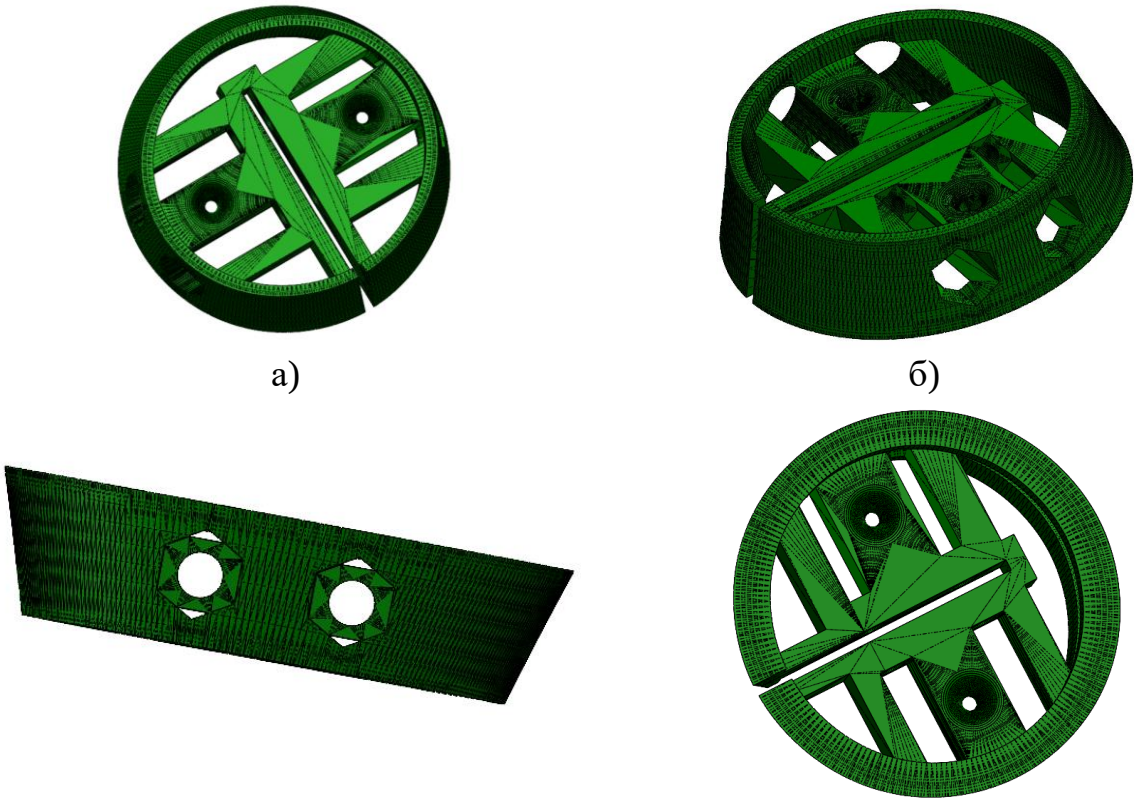
Детальний вид спроектованих 3D-моделей чотирьох активних сегментів хвоста зооморфного робота представлено на рисунках 2.3-2.6. В даних деталях спроектовано отвори, крізь які в подальшому буде протянуто волосінь, за допомогою якої хвіст робота буде виконувати свої рухи.



а) б)

в) г)

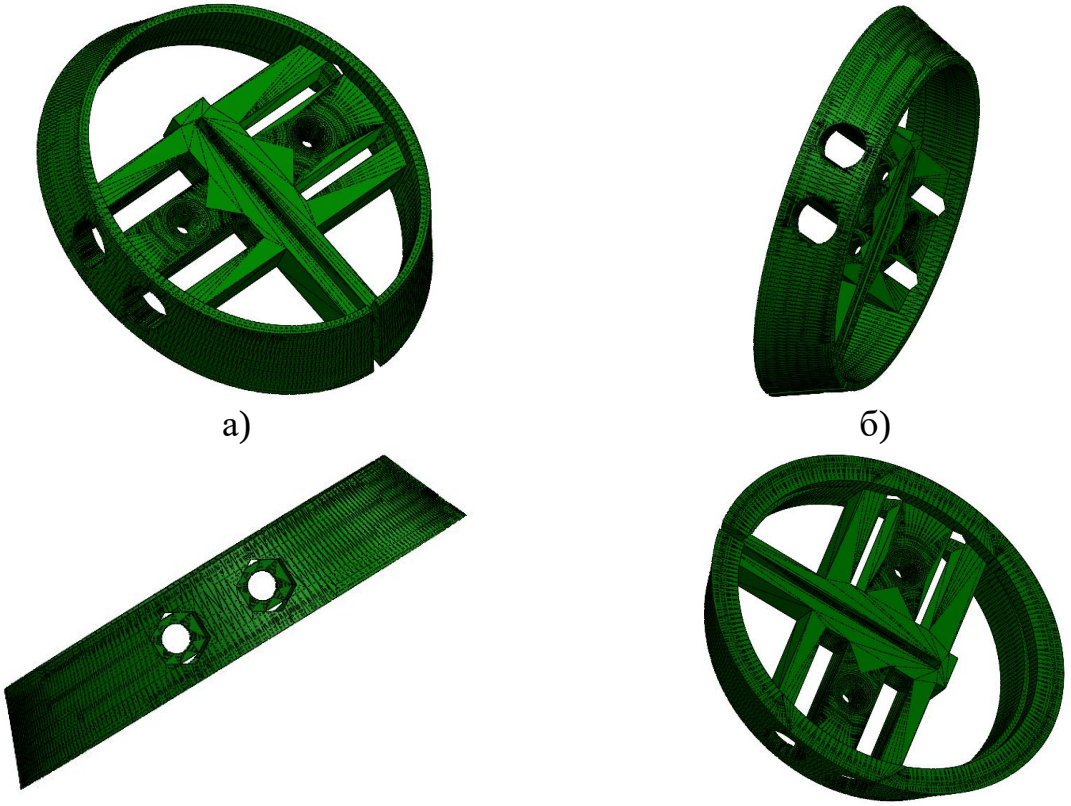
Рисунок 2.3 – Перше ребро активного сегменту хвоста зооморфного робота



а) б)

в) г)

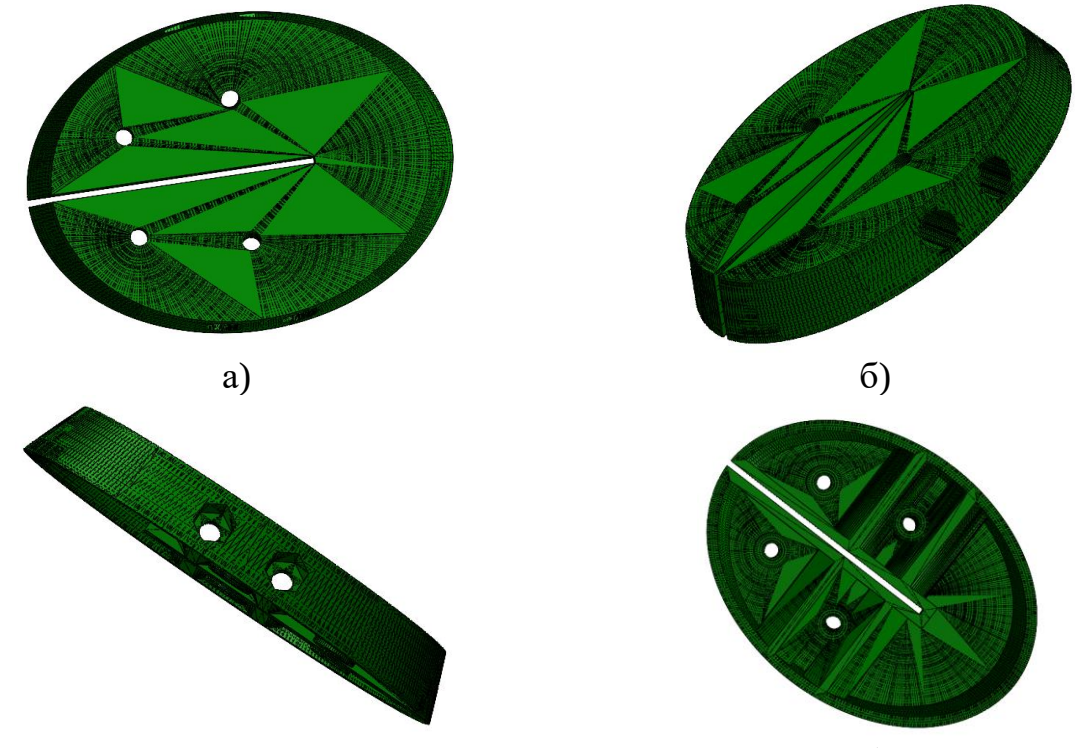
Рисунок 2.4 – Друге ребро активного сегменту хвоста зооморфного робота



а) б)

в) г)

Рисунок 2.5 – Третє ребро активного сегменту хвоста зооморфного робота

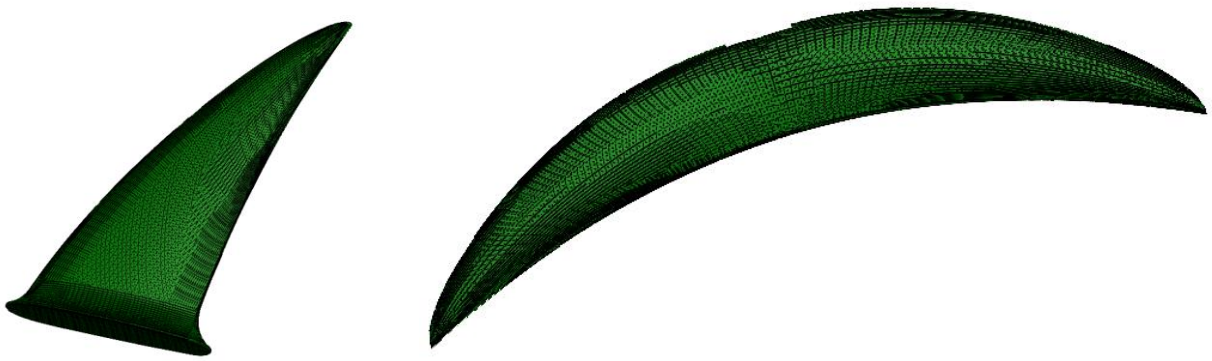


а) б)

в) г)

Рисунок 2.6 – Четверте ребро активного сегменту хвоста зооморфного робота

За аналогією, було побудовано всі необхідні деталі корпусу зооморфного робота-риби. Принцип 3D-моделювання плавця для робота-риби в програмі Solidworks включає в себе ретельне врахування гідродинамічних та аеродинамічних аспектів для досягнення оптимальних характеристик руху у водному середовищі. За допомогою вбудованих інструментів Solidworks, визначаються форма та розміри плавця, щоб максимально зменшити опір води та забезпечити ефективний плавальний рух. Спроектований грудний плавець робота-риби представлено на рисунку 2.7, а, при зборці макету їх знадобиться надрукувати у двох екземплярах, а хвостовий плавник представлено на рисунку 2.7, б.



а) б)

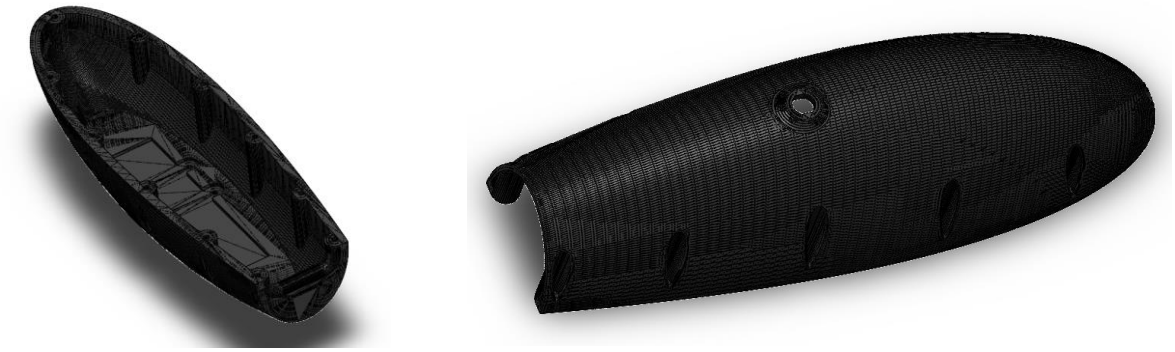
а) 3D-модель грудного плавця;

б) 3D-модель хвостового плавця

Рисунок 2.7 – Спроектовані деталі корпусу зооморфного робота

Наступним етапом проектування було моделювання основної частини корпусу мобільного робота, а саме тіла риби. У верхній частині тіла було зроблено отвір для можливості дротового живлення зооморфного робота або для реалізації підзарядки акумуляторів. 3D-моделювання корпусу тіла робота-риби включає ретельне врахування біологічних та інженерних аспектів для досягнення оптимальної функціональності та реалістичності. Починаючи з визначення загальної форми тіла, важливо ураховувати гідродинамічні властивості, забезпечуючи мінімальний опір води. Крім того,

при 3D-моделюванні корпусу тіла важливо враховувати внутрішню структуру для вбудування механізмів, які забезпечують реалістичні рухи майбутнього робота. Спроектовані 3D-моделі корпусу тіла зооморфного робота представлено на рисунку 2.8.



а) б)

а) 3D-модель нижньої частини тіла робота-риби;

б) 3D-модель верхньої частини тіла робота-риби

Рисунок 2.8 – Спроектовані деталі корпусу зооморфного робота

Основою хвостової частини робота, на яку будуть кріпитися ребра активного сегменту, стали спроектовані пластикові пластини, довжиною см. В пластинах підготовлені отвори для надійного скріплення з ребрами, за допомогою аналогічних отворів у деталях. Сама спроектована деталь представлена на рисунку 2.9.

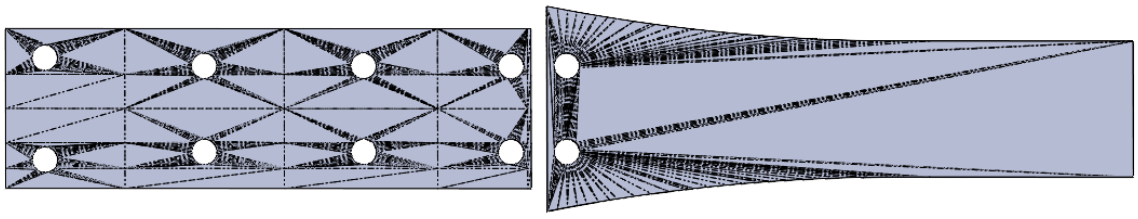


Рисунок 2.9 – Спроектована основа хвостової частини зооморфного робота

Також, було спроектовано невеликі закріпні деталі для надійного поєднання основних елементів корпусу зооморфного мобільного робота-риби, представлені на рисунку 2.10.

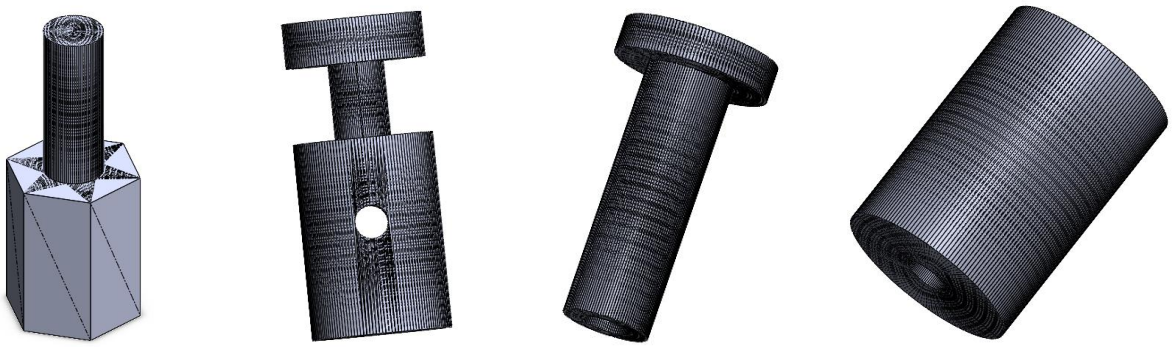


Рисунок 2.10 – Спроектовані деталі корпусу зооморфного робота

Після проектування всіх деталей корпусу мобільного робота, можна переходити до етапу розробки тривимірної моделі збірки.

2.4 Розробка тривимірної моделі збірки

У програмі Solidworks існують різні функції, які дозволяють поєднувати елементи між собою, щоб створити складні конструкції. Одна з ключових функцій – це "Assembly" (збірка). Ця функція дозволяє об'єднувати окремі деталі в єдину систему, надаючи можливість взаємодії та визначення їхніх взаємовідносин.

За допомогою функції "Assembly" можна встановлювати точні розташування та орієнтації кожної деталі в просторі. Також можна задавати обмеження та з'єднання між елементами, щоб вони взаємодіяли так, як потрібно для конкретного проекту. Це дозволяє створювати реалістичні та функціональні моделі, а також використовувати рухи та взаємодії між елементами в аналізі та симуляціях.

Під час роботи з функцією "Assembly" також можна використовувати стандартні компоненти, що спрощує інтеграцію різних деталей. Важливо наголосити, що ця функція дозволяє ефективно керувати складністю проекту та спрощує процес створення та модифікації багатокомпонентних систем в середовищі Solidworks.

Процес об'єднання двох елементів в програмі Solidworks за допомогою функції Assembly є досить простим. Для початку, відкривається новий файл Assembly, що створює пустий збірний файл (рис. 2.11).

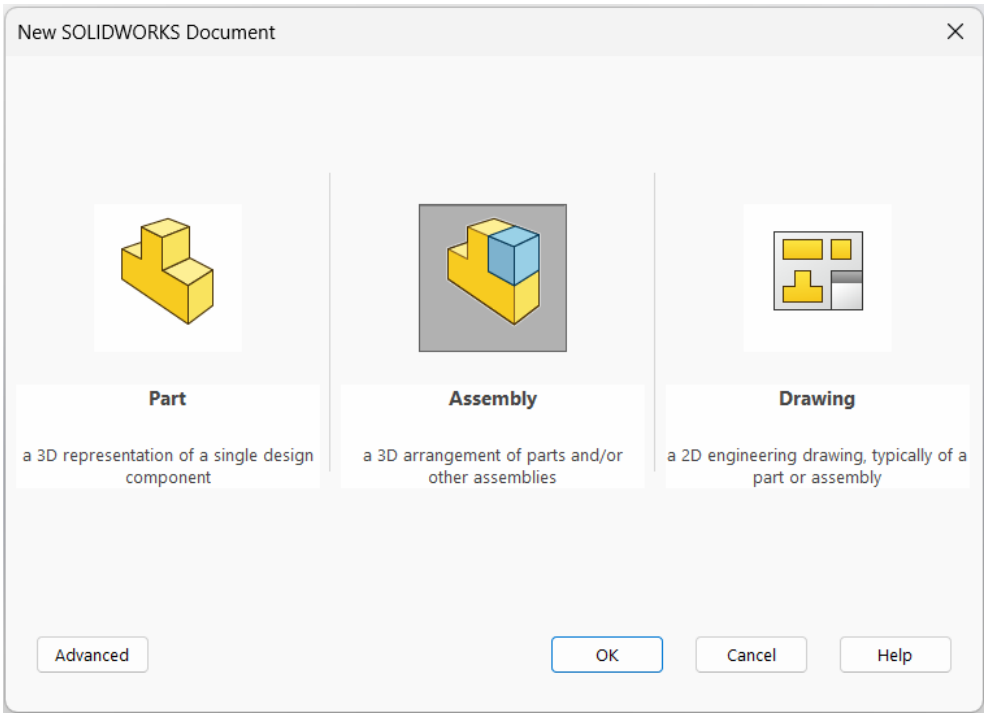
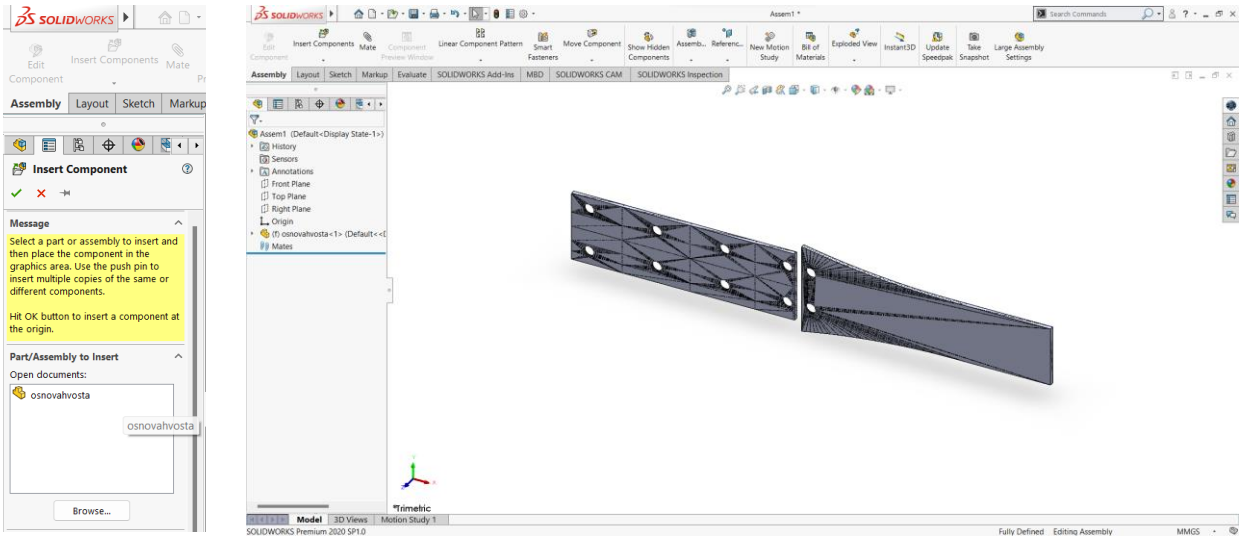


Рисунок 2.11 – Створення проекту Assembly в програмі Solidworks

Після цього, можна імпортувати або створити самостійні деталі, які необхідно об'єднати.

Використовуючи інструменти "Insert Components" або просто перетягуючи вікна деталей, розміщуємо їх у просторі Assembly. Після розміщення деталей можна задати їхні точні положення та орієнтації за допомогою різних обмежень та взаємодій (рис. 2.12).



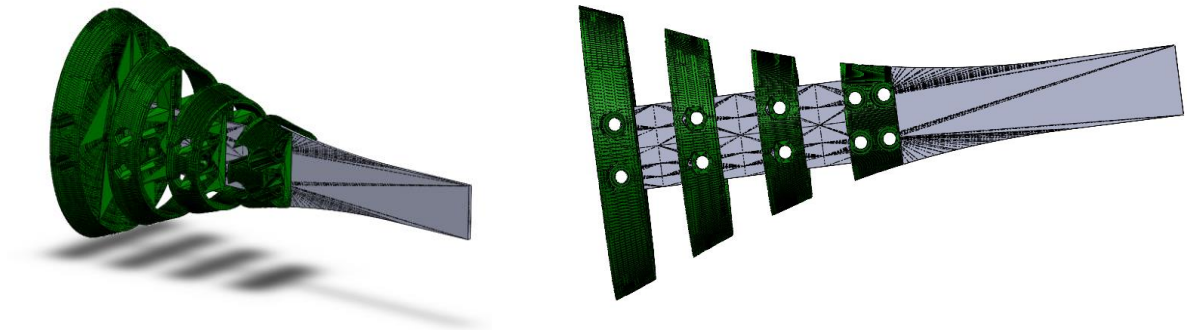
а) б)

а) налаштування розміщення початкової деталі;

б) розміщена деталь в робочому просторі

Рисунок 2.12 – Розміщення початкової деталі в робочому просторі

Функція "Mate" дозволяє визначити взаємні обмеження між елементами, такі як паралельність, перпендикулярність, відстань тощо. Після задання обмежень, можна використовувати команду "Apply" для застосування визначених властивостей. Поєднання деталей хвостової частини представлено на рисунку 2.13.



а) б)

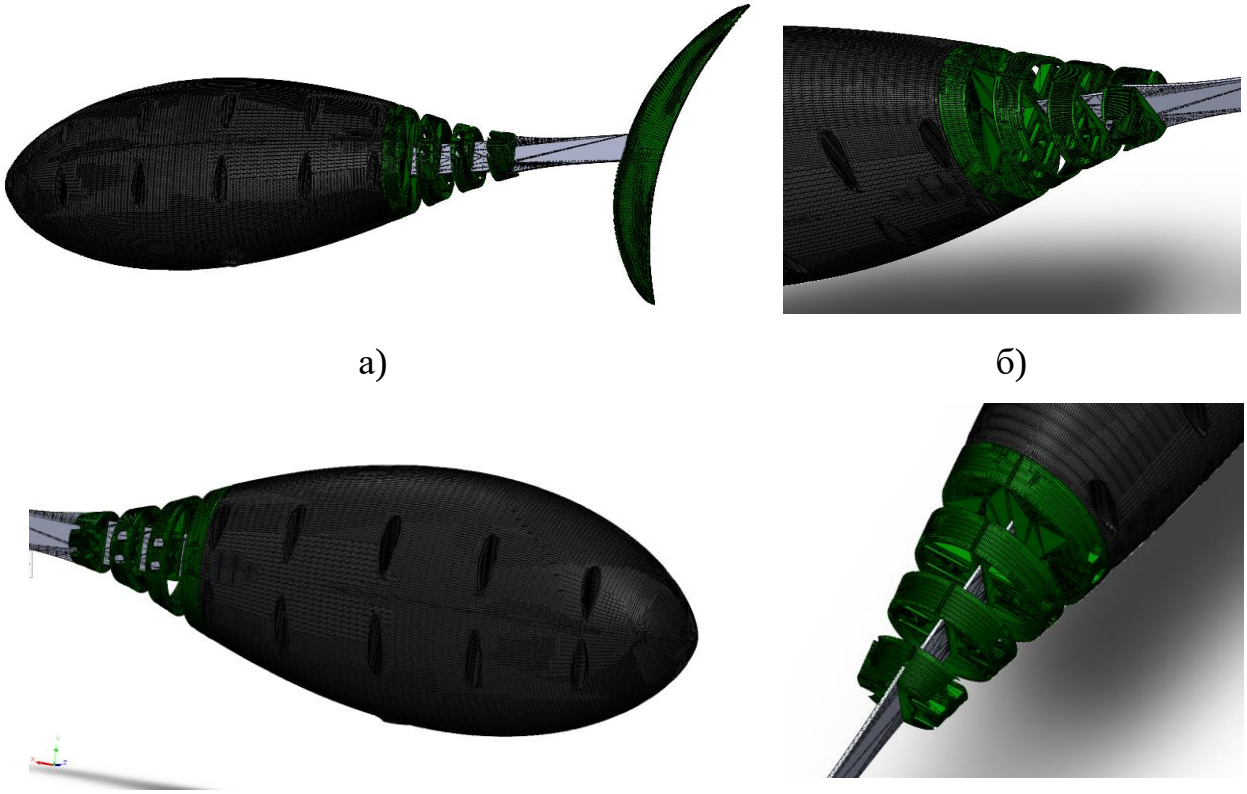
а) вид спереду;

б) вид збоку

Рисунок 2.13 – Збірка хвосторої частини зооморфного робота-риби

Коли об'єднання вже налаштовано, Solidworks дозволяє взаємодіяти з об'єднаними елементами у збірці, щоб перевірити, як вони взаємодіють між собою. Це може бути важливою частиною процесу проектування, оскільки дозволяє перевірити, чи відповідає збірка вимогам та функціональності.

Виконуючи вище вказані послідовності збірки у середовищі Solidworks, отримуємо деталізовану 3D-модель збірки мобільного зооморфного робота-риби, представлену на рисунку 2.14.



а) б)

в) г)

а) повна збірка;

б) хвостова частина збоку;

в) корпус робота-риби;

г) хвостова частина зверху

Рисунок 2.14 – Деталізована 3D-модель збірки зооморфного робота-риби

2.5 Зборка макета зооморфного робота-риби

Для проведення експериментальних досліджень, необхідно зібрати макет, згідно зі спроектованими 3D-моделями в розділі 2.4. Для виготовлення розроблених деталей буде використовуватися метод 3D-друку FDM (Fused Deposition Modeling), що був обраний через його простоту та доступність. FDM є найбільш поширеним методом 3D-друку, де пластиковий матеріал нагрівається та подається через сопло, формуючи тверді шари, які поступово створюють тривимірний об'єкт. У ролі матеріалу обрано PLA пластик, обраний в першому розділі. Для 3D-друку використовувався принтер Anet3D Pro [26]. Далі пропишемо основні налаштування слайсера UltiMaker Cura 5.2.2, які виставлялися в процесі друку:

– висота шару – 0,2 мм;

– висота першого шару – 0,2 мм;

– товщина стінки – 0,8 мм;

– товщина дна кришки – 0,8 мм;

– шар дна – 4 мм;

– щільність заповнення – 20 %;

– шаблон заповнення – лінія;

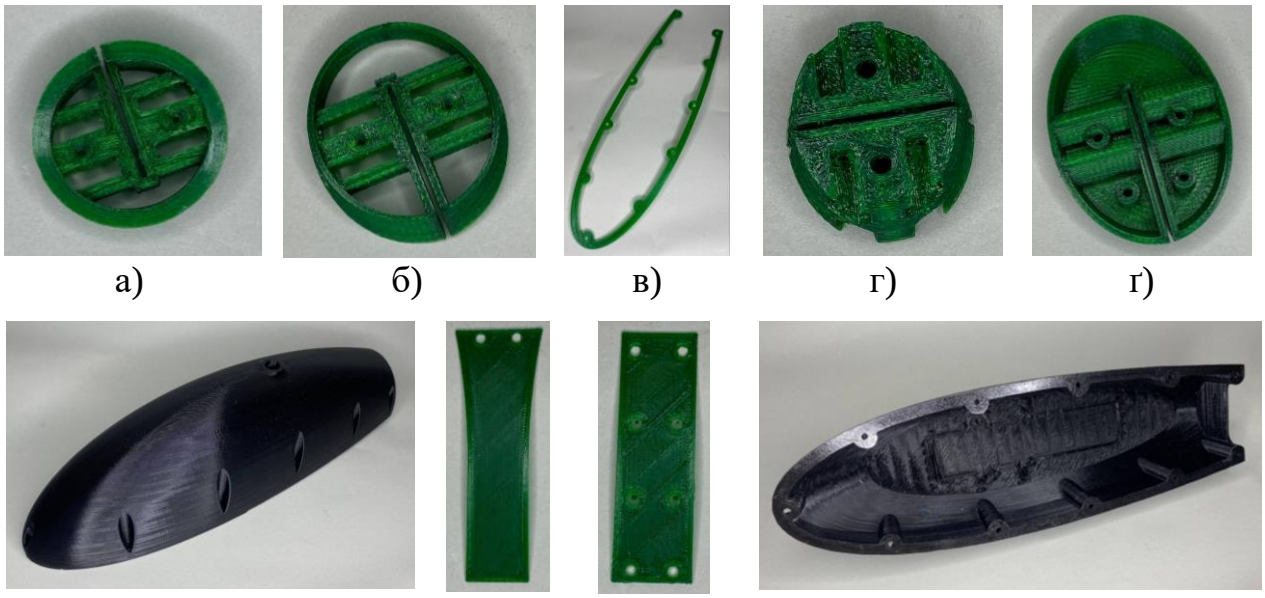
– температура сопла – 200 °C;

– температура столу – 60 °C;

– швидкість друку – 80 мм/с;

– висота підняття осі Z – 0,2 мм.

Надруковані деталі корпусу зооморфного робота-риби представлено на рисунку 2.15.



а) б) в) г) ґ)

д) е) є) ж)

а) надруковане друге ребро активного сегменту хвоста;

б) надруковане третє ребро активного сегменту хвоста;

в) надрукована прокладка між корпусом тіла;

г) надруковане перше ребро активного сегменту хвоста;

ґ) надруковане четверте ребро активного сегменту хвоста;

д) надрукована верхня частини тіла;

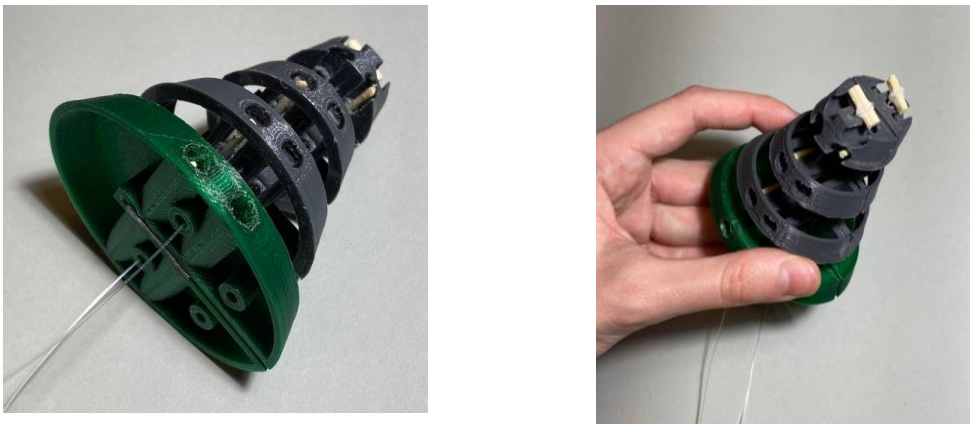
е) елемент основи хвостової частини;

є) елемент основи хвостової частини;

ж) надрукована нижня частини тіла

Рисунок 2.15 – Надруковані деталі корпусу робота-риби

Після того, як було надруковано всі елементи конструкції, наступним етапом необхідно зібрати макет зооморфного робота риби. Спочатку, було зібрано каркас хвостової частини, на основу хвосту було прикріплено чотири ребра хвоста та закріплено за допомогою допоміжних отворів. Потім, крізь отвори у ребрах дуло протягнуто волосінь та закріплено за перше ребро каркасу хвоста за допомогою дерев’яних паличок. Отриману конструкцію представлено на рисунку 2.16.



а) б)

а) вид збоку;

б) вид зверху

Рисунок 2.16 – Зібраний каркас хвостової частини

Після зборки каркасу хвостової частини, можна переходити до етапу заливки хвосту силіконом. Для виготовлення гнучкого хвосту зооморфного робота-риби було обрано силікон ЕЛАСТОЛЮКС Платинум 33, подібний з DragonSkin30 [27], але є дешевшим аналогом зі схожими характеристиками.

Перед початком роботи, форму, надруковану на 3D-принтері, для заливки хвосту було відшлифовано, щоб позбавитись від надлишок пластику та малюнку слоїв друку. Далі, необхідно було покрити деталь всередині вазиліном, який використовувався як роздільний матеріал при виготовлені форми, щоб запобігти окисленню матеріалів, а також для легкого діставання хвосту з форми. Силікон змішали в пропорції 1:1, а саме 75 г основи та 75 г затверджувача. Після ретельного перемішування, щоб вигнати зайві повітряні кульки та добре перемішати матеріал, за допомогою шприца 120 г силікону було залито у форму, крізь отвори у деталях. Так як виготовлення макету проводилось без використання спеціального технічного обладнання, а в домашніх умовах, необхідно було відстукати форму, щоб вигнати зайве повітря з вже залитої деталі. Так як температура повітря в приміщенні становить 17 ºС, а даний тип силікону повністю застигає при температурі вище 25 ºС, було прийнято рішення помістити форму на 20 годин в духову

шафу на мінімальну температуру та трохи відчинити її. Залита форма хвоста представлена на рисунку 2.17.

а) б)

а) залита форма;

б) форма, поставлена на підігрів

Рисунок 2.17 – Зібрана форма для виготовлення хвоста робота-риби

Після того, як силікон затвердів, модель було витягнуто з форми та отримано гнучкий хвост для зооморфного робота-риби, представлений на рисунку 2.18.

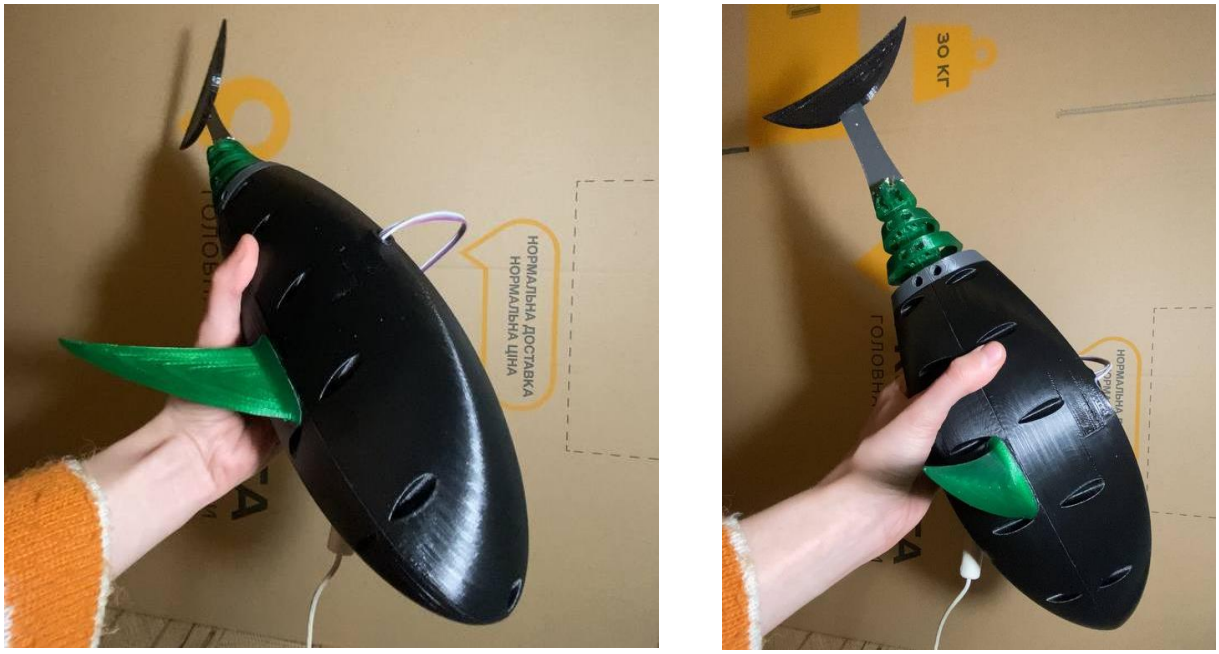
а) б)

а) виз збоку;

б) вид знизу

Рисунок 2.18 – Витягнута модель хвоста робота-риби

Після того, як було виготовлено хвостову частину, переходимо до зборки повного макета. Нижня частина тіла корпусу робота зчеплюється з хвостовою частиною болтами за допомогою двох допоміжних отворів. Всередині тіла риби розміщуються всі виконавчі механізни, такі як серводвигун, ESP32-CAM та акумулятори. Загальний вид зібраного макету зооморфного робота риби представлено на рисунку 2.19.



а) б)

а) виз спереду;

б) вид збоку

Рисунок 2.19 – Загальний вид зібраного макету робота-риби

2.6 Розробка системи управління

Розробка системи управління зооморфним роботом-рибою необхідна для забезпечення ефективного контролю та управління його рухами, функціональністю та поведінкою. У межах даних досліджень пропонується наступна структурна схема управління, що представлена рисунку 2.20.

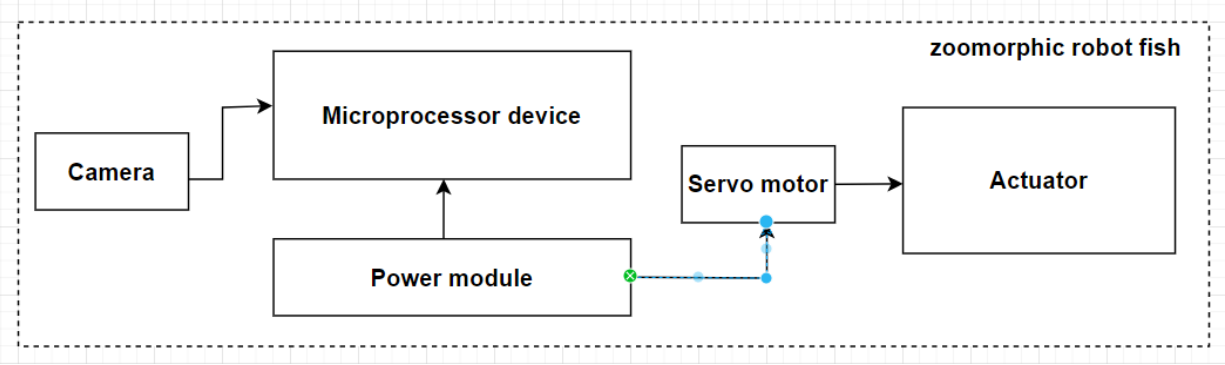


Рисунок 2.20 – Структурна схема керування зооморфним роботом-рибою

Вибір ESP32-Cam для модуля системи керування зооморфним роботом-рибою обгрунтовується його багатофункціональністю та перевагами. Модуль забезпечує високу продуктивність, підтримує бездротові технології Wi-Fi та Bluetooth, що дозволяє здійснювати бездротове керування та передачу даних. Вбудована камера ESP32-Cam надає можливість отримання відеопотоку, що є важливим для візуального моніторингу навколишнього середовища та прийняття рішень на основі візуальної інформації. Компактні розміри та енергоефективність модуля роблять його придатним для вбудовування в обмежені простори робота-риби. Підтримка різних інтерфейсів і простота використання роблять ESP32-Cam привабливим вибором для розробки системи управління, забезпечуючи високу гнучкість і ефективність в інтеграції з іншими компонентами зооморфного робота [14]. Загальний вигляд ESP32-Cam представлений рисунку 2.21.

Рисунок 2.21 – Загальний вигляд ESP32-Cam

Вибір акумулятора 18650 зі знижувальним модулем для зооморфного робота-риби обґрунтовується кількома факторами. Акумулятори 18650 відомі своєю високою енергетичною густиною, що забезпечує достатнє живлення для тривалого часу роботи робота без необхідності постійної заміни батарей. Використання понижуючого модуля дозволяє ефективно керувати напругою акумулятора, підтримуючи стабільну напругу всіх рівнях заряду. Це важливо для забезпечення нормальної роботи всіх компонентів системи керування та моторів робота [28].

Вибір серводвигуна Tower Pro 9g SG90 для реалізації коливання хвоста зооморфного робота-риби обґрунтований кількома ключовими факторами. Перш за все, Tower Pro 9g SG90 є компактним і легким серводвигуном, що особливо важливо при інтеграції в зооморфного робота, де обмежені розміри та вага. Цей фактор дозволяє ефективно керувати рухом хвоста без надмірного навантаження на механічну конструкцію.

SG90 забезпечує високу точність позиціонування та відмінну стабільність у роботі, що важливо для імітації природних рухів риби. Його широкий діапазон робочих температур та надійність роблять його придатним для використання у різних умовах навколишнього середовища [18]. Загальний вигляд серводвигуна представлений рисунку 2.22.

Рисунок 2.22 – Загальний вигляд серводвигуна Tower Pro 9g SG90

Модуль понижуючого перетворювача напруги DC-DC LM2596S був обраний для системи управління зооморфним роботом-рибою через його високу стабільність та ефективність. Здатність працювати з широким діапазоном вхідної напруги робить його універсальним для різних джерел живлення. Простота налаштування вихідної напруги та низький рівень шумів забезпечують гнучкість та надійність у роботі системи управління. Висока ефективність перетворення енергії знижує споживання електроенергії, що важливо задля тривалої автономної роботи робота. Надійність та доступність модуля, а також його низька вартість роблять LM2596S оптимальним вибором для забезпечення ефективного та економічного електроживлення зооморфного робота-риби [29]. Загальний вигляд модуля DC-DC LM2596S представлений рисунку 2.23.

Рисунок 2.23 – Загальний вигляд модуля DC-DC LM2596S

Схема підключення всіх основних модулів управління зооморфним роботом-рибою представлена рисунку 2.24.

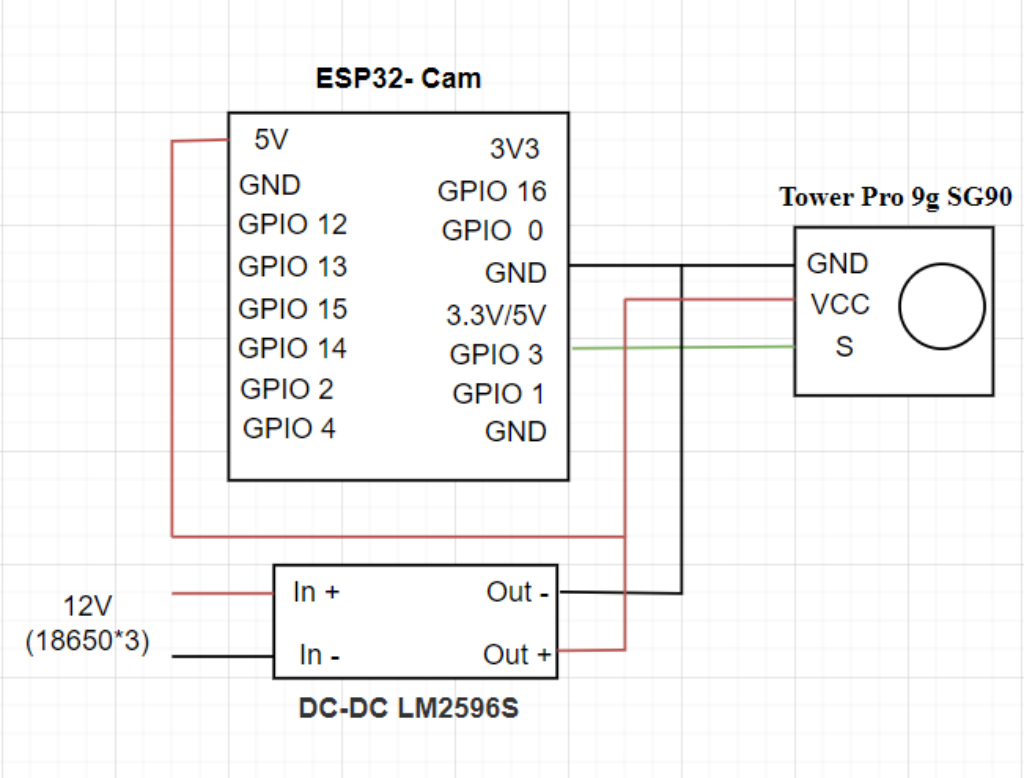


Рисунок 2.24 – Схема підключення модулів для керування зооморфним роботом-рибою

2.7 Висновки до 2 розділу

В ході виконання другого розділу даної кваліфікаційної роботи з розробки конструкції макету зооморфного роботариби, було розроблено кінематичну схему руху 4-ланкового хвоста робота-риби у 3-вимірному просторі та виведено загальну трансформаційну матрицю для хвоста робота. Розроблено моделі гідродинамічних сил, що діють на хвіст робота-риби. Наступним етапом роботи була розробка 3D-моделі конструкції робота-риби та тривимірної моделі зборки. Далі було виготовлено гнучкий хвіст зооморфного робота з силікону та зібрано макет робота-риби. Заключним етапом другого розділу стала розробка системи управління, розроблена структурна схема керування зооморфним роботом-рибою, обрано компоненти модулів та розроблено схему підключення модулів для керування зооморфним роботом-рибою.

3 МОДЕЛЮВАННЯ ПЕРЕМІЩЕННЯ РОБОТА-РИБИ

3.1 Вибір середовища моделювання

При виборі середовища моделювання переміщення зооморфного робота-риби слід звернути увагу на кілька ключових факторів. Моделювання рухів робота-риби вимагає високої точності та реалізму, оскільки ці роботи повинні функціонувати у складних водних середовищах. Вибір відповідного середовища моделювання дозволяє забезпечити максимально точне відтворення реальних рухів риби. Також, середовище моделювання повинно підтримувати можливості інтерактивного моделювання та створення анімацій. Це особливо важливо для аналізу різних сценаріїв рухів та оптимізації дизайну робота.

Якщо мета включає в себе створення фізичного прототипу робота-риби, важливо вибрати середовище, яке підтримує інтеграцію з числовим управлінням (CNC) та виробничим процесом. Така інтеграція полегшує перехід від віртуального прототипу до реального пристрою. У випадку, якщо робота над проектом ведеться в команді, важливо, щоб обране середовище моделювання дозволяло легко обмінюватися даними та спільно працювати над моделлю, хмарні засоби зберігання та спільної роботи можуть бути великим плюсом. Важливими факторами також є доступність програми та відповідність бюджету.

Розглядаючи такі популярні середовища моделювання, як Fusion 360 [30], SolidWorks, AutoCAD [31] та Blender [32], важливо звертати увагу на конкретні характеристики кожної програми. В таблиці 3.1 представлено детальний порівняльний огляд цих середовищ, зосереджуючись на їхніх можливостях для моделювання переміщення робота-риби.

Таблиця 3.1 – Порівняльний аналіз середовищ моделювання

Характеристики	Fusion 360	SolidWorks	AutoCAD	Blender
Тривимірне моделювання	Висока точність та гнучкість	Потужні інструменти моделювання	Основне призначення – 2D та 3D CAD	З фокусом на творчість і 3D
Інтерактивність та анімація	Можливі створення анімацій	Інструменти для анімацій та сцен	Обмежена, менше функціональності	Добре підходить для анімацій
Інтеграція з числовим управлінням та виробництвом	Інтеграція з CAM, генерація коду для CNC	Повна інтеграція з CAM	Обмежена, можливості розширюються за допомогою додаткових модулів	Менше орієнтована на виробництво
Спільна робота, обмін даними	Хмарне зберігання, спільна робота	Можливість спільної роботи	Хмарне зберігання, спільна робота	Можливість обміну даними
Доступність та бюджет	Платна, але є безкоштовна версія для студентів та стартапів	Платна, потужні функції, але висока вартість	Платна, але існує версія для студентів	Безкоштовна та відкрита програма

SolidWorks є гарним вибором для моделювання та симуляції переміщення зооморфного робота-риби з кількома вагомими причинами. Дане CAD-середовище відзначається високою точністю та реалізмом у моделюванні механічних систем. Вона надає розширені можливості для створення складних 3D-моделей, що важливо при проектуванні та імітації руху зооморфних роботів [33].

SolidWorks дозволяє використовувати різноманітні матеріали та властивості, щоб точно відобразити фізичні характеристики робота-риби та

взаємодію його частин під впливом водяного середовища. Це важливо для реалістичної симуляції руху та поведінки робота в воді.

Платформа SolidWorks також надає зручні інструменти для створення та аналізу рухових механізмів. Інтеграція з іншими модулями дозволяє використовувати імітації та симуляції для перевірки працездатності та оптимізації руху хвоста робота-риби. SolidWorks володіє широким спектром інструментів для візуалізації та анімації, що дозволяє наглядно представити рух робота в водяному середовищі. Це корисно для спостереження та аналізу його роботи в реальних умовах [24].

Загалом, SolidWorks забезпечує комплексні можливості для розробки, моделювання та симуляції зооморфних роботів-риб, допомагаючи вдосконалити їхню механіку та функціональність у водяному середовищі.

3.2 Побудова розрахункової моделі

Для проведення симуляції руху робота-риби, через велику кількість полігонів в основній 3D-моделі та малу продуктивність комп’ютеру, було прийнято рішення розробити спрощену модель хвостової частини, в якій є хвостовий плавник, хребет хвосту та четверте ребро, яке має кріпитися до тіла риби та є статичним. Розроблена модель представлена на рисунку 3.1.

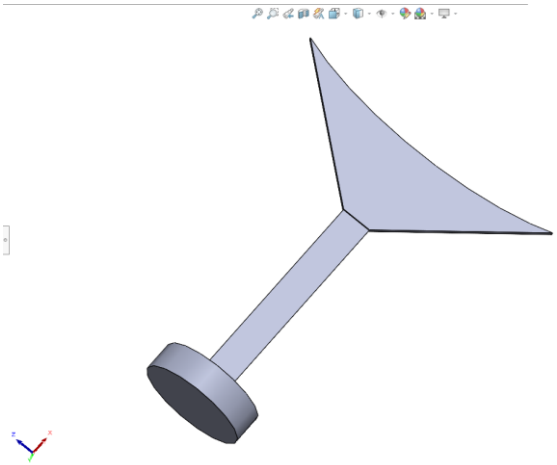


Рисунок 3.1 – Загальний вигляд спрощеної моделі хвостової частини

Після розробки спрощеної моделі, переходимо у вкладку Evaluate та переходимо в режим SimulationXpress Analysis Wizard. Першим етапом вказуємо статичні деталі, які будуть жорсткі та не будуть приймати активного руху в симуляції. Далі обираємо які сили чи тиск та як впливатимуть на окремі елементи моделі. Наступним етапом був вибір матеріалів для елементів моделі, для хвостової частини мобільного робота було обрано матеріал ABS пластик з характеристиками, представленими на рисунку 3.2.

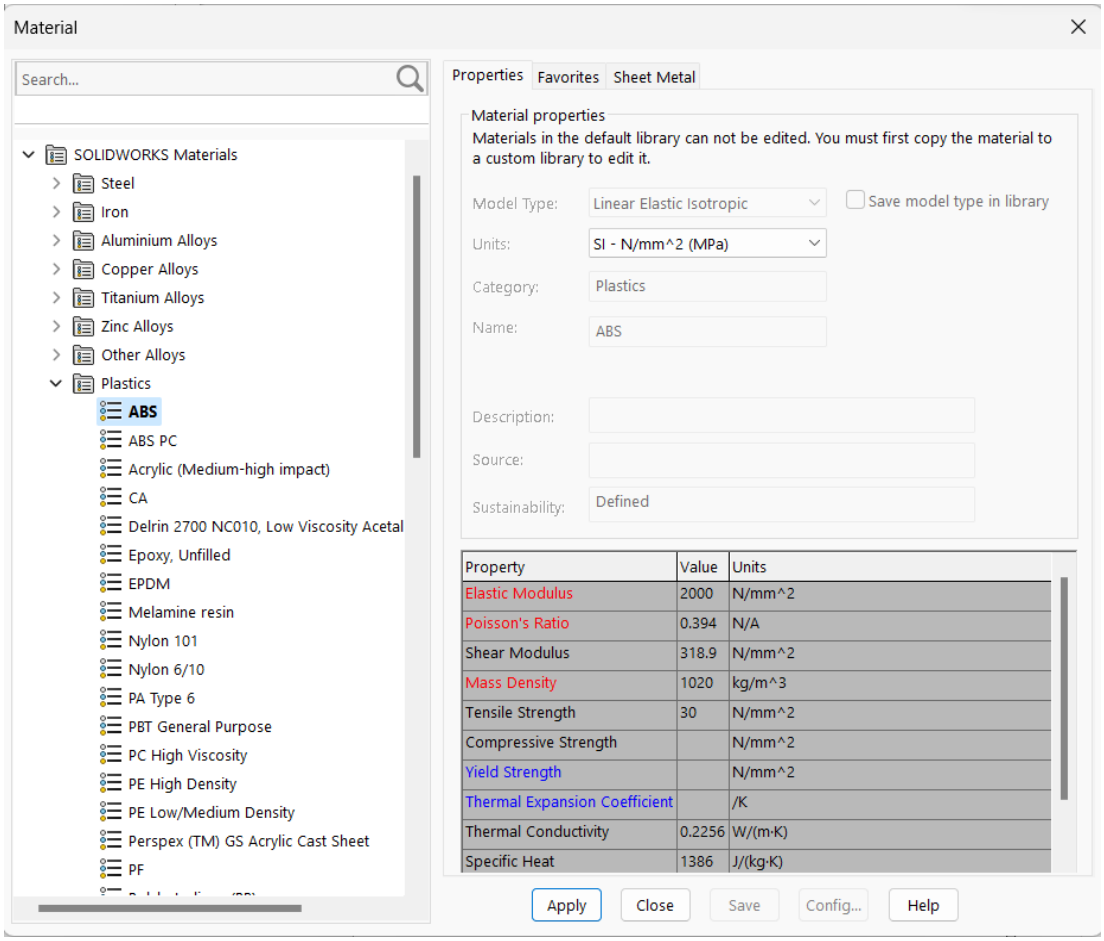


Рисунок 3.2 – Вибір матеріалів для розробленої моделі в симуляції

3.3 Отримання результатів моделювання руху

Після вибору матеріалів переходимо до запуску симуляції. Значення Deformation scale даної моделі дорівнює 0,0140021. На рисунку 3.3

представлено результати типу ділянки Static nodal stress Stress. У SolidWorks, "Static Nodal Stress" вказує на значення напруження, яке вимірюється вузловими точками (нодами) моделі при проведенні статичного аналізу. В статичному аналізі модель розглядається як статична, тобто враховуються тільки статичні навантаження, і досліджуються напруження та деформації в статичних умовах без зміни часу.

"Static Nodal Stress" визначає, які напруження виникають у вузлах моделі під впливом зовнішніх навантажень. Ці напруження вимірюються вузловими точками і допомагають інженерам та дизайнерам зрозуміти, де на моделі можуть виникнути найбільші напруження та потенційні місця для виникнення деформацій або поломок.

Так як розрахунки статичного аналізу базуються на припущенні сталості навантажень і розглядають модель без урахування динамічних ефектів, було отримано Це значення є однією з основних величин, які слід розглядати при проектуванні для забезпечення безпеки та надійності конструкцій.

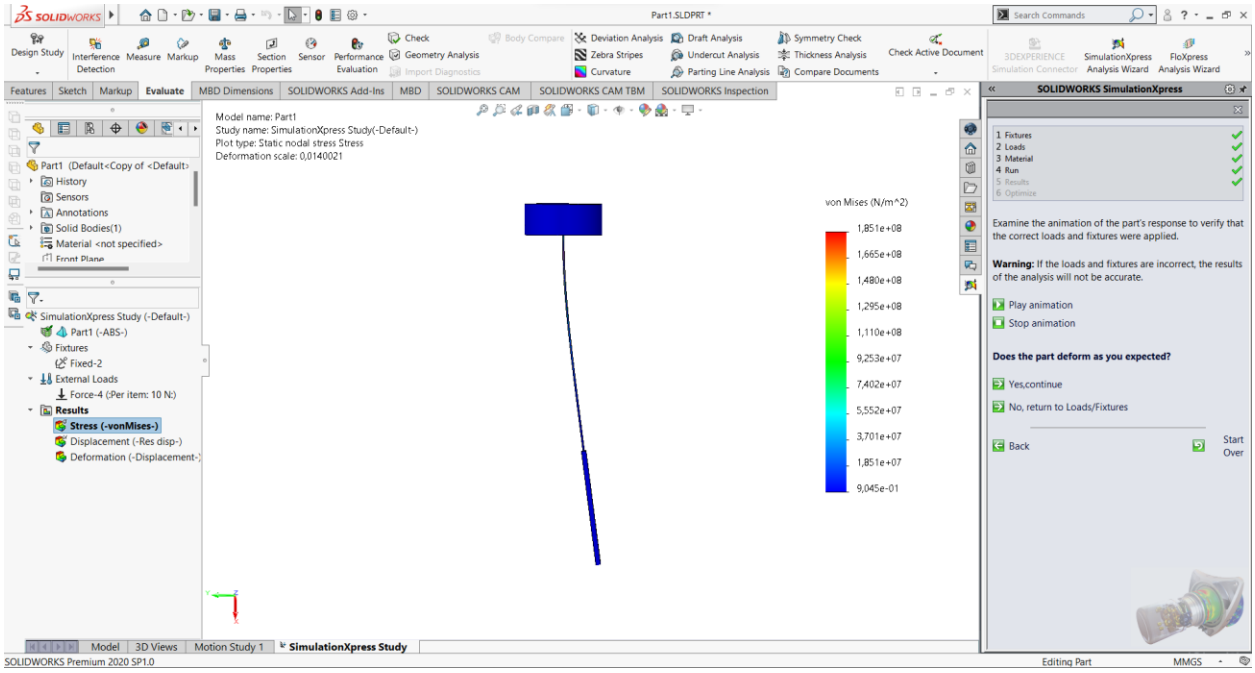


Рисунок 3.3 – Результати типу ділянки Static nodal stress Stress

"von Mises stress" вимірюється в одиницях тиску, тобто в Паскалях (N/m²). У даному випадку значення "von Mises stress" дорівнює 0,9045 Паскаля. Це означає, що в контексті аналізу напружень максимальне еквівалентне напруження за критерієм von Mises в конкретній точці або області матеріалу дорівнює 0,9045 Паскаля, як показано на рисунку 3.4.

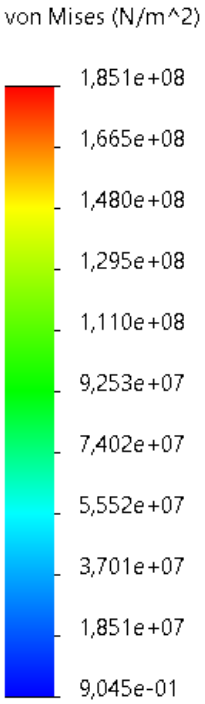


Рисунок 3.4 – Максимальне еквівалентне напруження за критерієм von Mises

"Static Displacement" вказує на розмір та напрям зміщень точок або вузлів в статичному аналізі конструкцій. Це величина, яка визначає, наскільки переміщається кожен вузол або точка структури під впливом статичних навантажень.

Static Displacement вимірюється в одиницях довжини, таких як метри чи дюйми, залежно від одиниць, обраної в системі вимірювання в програмному забезпеченні. Це значення може бути важливим для інженерного аналізу, оскільки воно дозволяє визначити, як зміщаються конструктивні елементи під впливом навантажень. За допомогою даних про зміщення можна визначити, чи відбуваються деформації в межах

припустимих значень, і як це може вплинути на зовнішні та внутрішні властивості конструкції. Також ці дані можуть служити для подальших розрахунків, наприклад, для визначення напруг чи деформацій в матеріалах. На рисунку 3.5 представлено результати типу ділянки Static displacement Displacement.

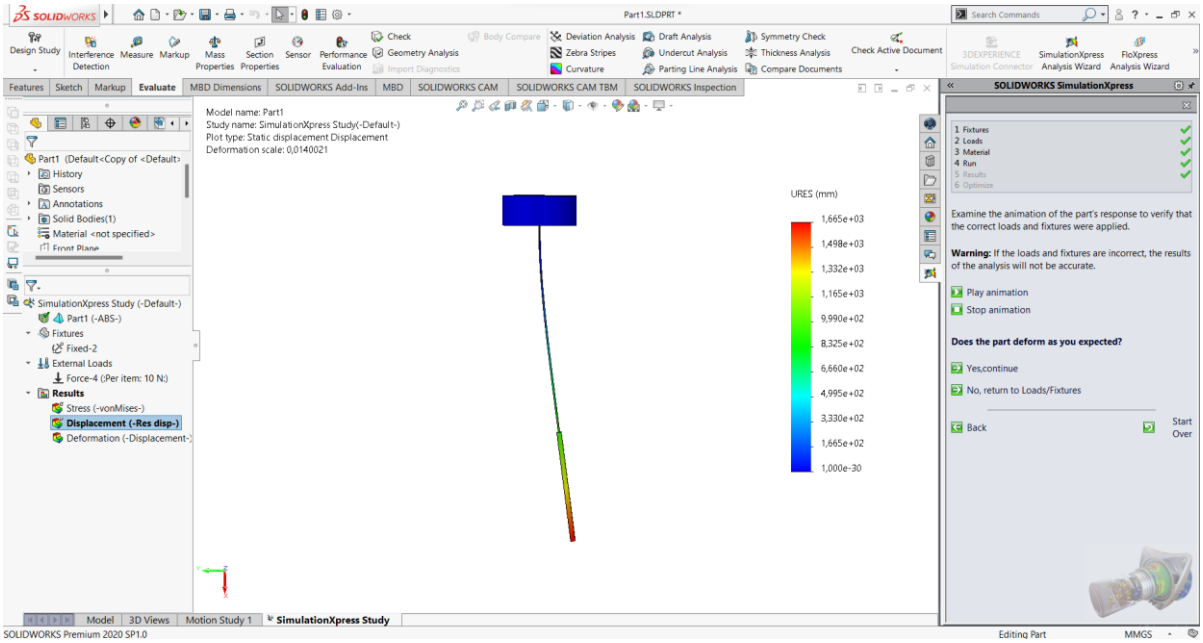


Рисунок 3.5 – Результати типу ділянки Static displacement Displacement

Частина деталі, позначена синім кольором, представляє мале зміщення або незначні деформації. Матеріал у цих областях може зазнавати менше напруг і деформацій, так як ця частина деталі прікріплена до основної частини корпусу риби та не є рухливою.

Зелений колір хвостової частини представляє помірні зміщення або деформації. Такі зони можуть показати наявність середніх напруг та деформацій.

Червоний колір позначає великі зміщення або значні деформації. Великі напруги та деформації можуть відзначатися червоним кольором, що показує, що хвостовий плавник знаходитиметься під великою напругою.

3.4 Висновки до 3 розділу

В ході написання третього розділу даної кваліфікаційної роботи було проведено порівняльний аналіз різних середовищ моделювання та обрано середовище моделювання SolidWorks, далі було проведено побудову розрахункової моделі та проведено симуляцію руху хвостової частини зооморфного робота-риби.

4 ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНІ ДОСЛІЖЕННЯ ТА АНАЛІЗ ОТРИМАНИХ РЕЗУЛЬТАТІВ

4.1 Постановка задач експериментів

Постановка задач експерименту дослідження максимального кута вигину хвостової частини зооморфного роботу-риби.

Методи проведення експерименту: фізичний експеримент на базі розробленого макету та методи порівняльного аналізу.

Очікувані результати експериментальних досліджень:

– отримання фізичних показників кута вигину на розробленому макеті та порівняння його з отриманими результатами моделювання;

– розрахунок частоти руху хвосту зооморфного робота-риби.

Для досягнення мети експерименту необхідно виконати наступні завдання:

– розробити фізичний макет мобільного зооморфного робота;

– розробити систему керування;

– розробити програму керування виконавчим пристроєм;

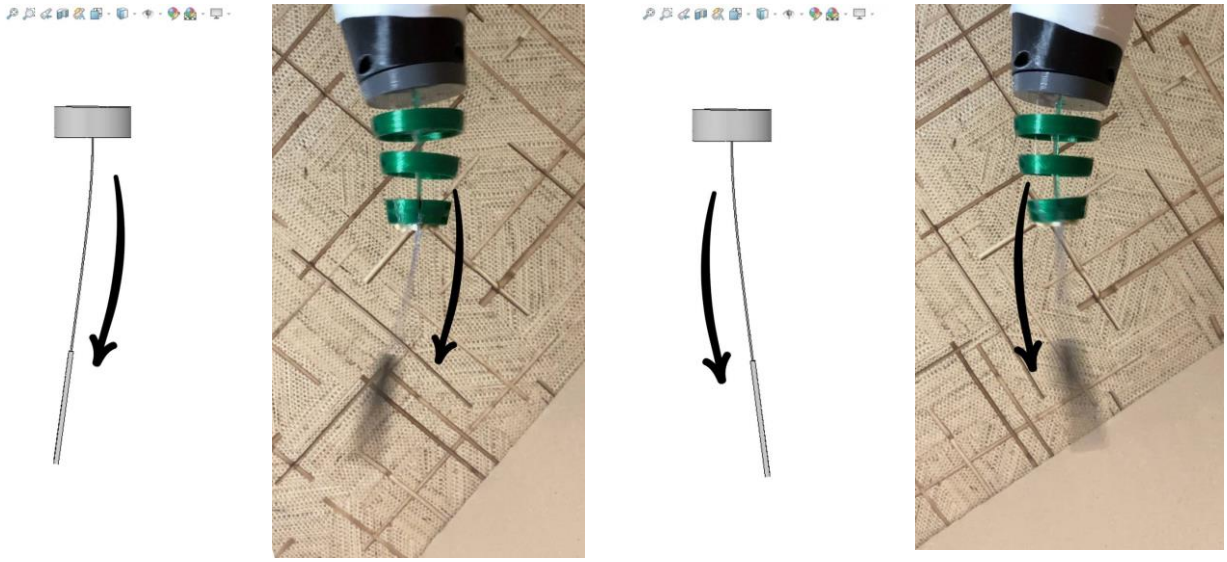
– забезпечити живлення 5 В;

– забезпечити відео-фіксацію процесу проведення експериментальних досліджень.

4.2 Порівняння результатів моделювання з експериментальним зразком та аналогічними рішеннями

У результаті проведених експериментальних досліджень було отримано, що при 5 В частота руху хвостової частини зооморфного робота дорівнює 240-250 коливань в хвилину.

Якість зображення активного хвостового плавника погіршилася, так як фото були зроблені у русі, під час роботи макету зооморфного робота. Порівняння результатів, отриманих при порівнянні фізичних показників кута вигину на розробленому макеті та показників кута вигину під час симуляції представлено на рисунку 4.1.



а) б) в) г)

а) результат симуляції руху хвосту вправо;

б) результат руху хвосту макету вправо;

в) результат симуляції руху хвосту вліво;

г) результат руху хвосту макету вліво

Рисунок 4.1 – Результати експериментальних досліджень

На рисунку 4.2 представлено максимальний кут вигину хвостової частини на фізичному макеті мобільного зооморфного робота-риби.

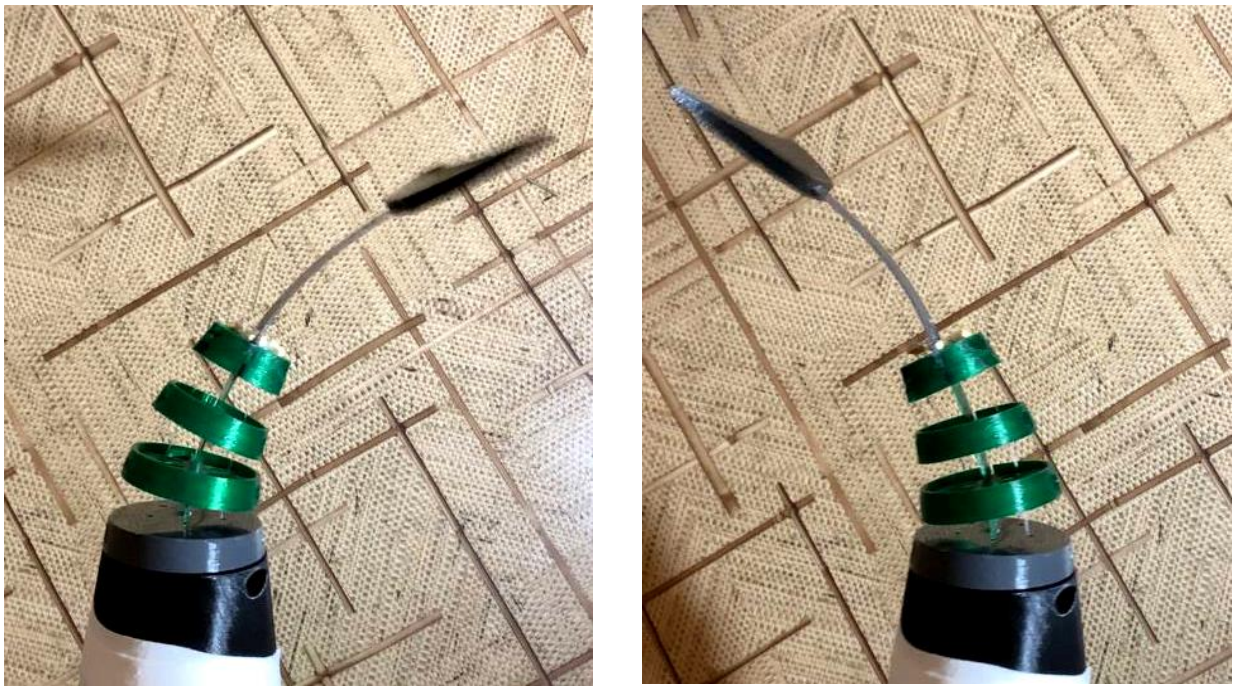


Рисунок 4.2 – Максимальний кут вигину хвосту макета робота-риби

4.3 Охорона праці

Для проведення розрахунків освітлення лабораторії, важливо враховувати кілька ключових параметрів, таких як потужність світлових джерел, висота розташування світильників, коефіцієнт відбиття поверхні, та відстань між світильниками.

Визначимо вихідні параметри:

– потужність світлових джерел P = 4000 лм;

– площа лабораторії A = 100 м²;

– висота підвісу світильників H = 2,5 м;

– коефіцієнт відбиття стін та стелі ρ = 0,8;

– коефіцієнт витрати світлового потоку CU = 0,7.

Розрахунок світлового потоку $Flux$ проводиться за формулою:

$$P \ / \ A \ = \ 4000 \ / \ 100 \ = \ 40 \ лм / м^2. \qquad (4.1)$$

Витрата світлового потоку на висоті H :

$$Flux_H = Flux \cdot (H^2) / (H^2 + D^2), \quad (4.2)$$

де D – відстань між світильниками.

Загальна витрата світлового потоку:

$$Total_Flux = Flux_H \cdot CU \cdot \rho. \quad (4.3)$$

При умові, що відстань між світильниками (D) дорівнює 4 м, то світловий потік на висоті H :

$$Flux_H = 40 \cdot (2,5^2) / (2,5^2 + 4^2) \approx 12,17 \text{ лм/м}^2. \quad (4.4)$$

Потім обчислимо загальну витрату світлового потоку:

$$Total_Flux = 12,17 \cdot 0,7 \cdot 0,8 \approx 6,79 \text{ лм/м}^2. \quad (4.5)$$

Отже, при заданих параметрах, у лабораторії буде приблизно 6,79 люменів світлового потоку на кожний квадратний метр.

4.4 Висновки до 4 розділу

Під час написання четвертого розділу даної кваліфікаціної роботи було виконаноо постановку задач експерименту дослідження максимального кута вигину хвостової частини зооморфного роботу-риби. Визначено методи проведення експерименту, а саме фізичний експеримент на базі розробленого макету та методи порівняльного аналізу. Та визначено очікувані результати експериментальних досліджень. Проведено порівняння результатів

моделювання з експериментальним зразком та аналогічними рішеннями та проведено розрахунки освітлення лабораторії.

ВИСНОВКИ

В ході виконання даної кваліфікаційної роботи було проведено аналіз конструкції зооморфних мобільних роботів-риб, проаналізовано моделі кінематики зооморфного робота-риби. Далі було проведено вибір та обґрунтування виконавчих механізмів та матеріалів. Проаналізовано особливості керування зооморфним роботом-рибою. Наступним етапом роботи була розробка кінематичної моделі. Далі було побудовано модель гідродинамічної сили, що діє на хвіст робота-риби. Після, розроблено 3D-моделі конструкції робота-риби та тривимірну модель збірки. Зібрано сам макет зооморфного робота-риби, розроблено систему управління, а саме розроблена структурна схема керування зооморфним роботом-рибою, обрано компоненти модулів та розроблено схему підключення модулів для керування зооморфним роботом-рибою. Далі було обрано середовище моделювання та побудована розрахункова модель. Отримано результати моделювання руху. Заключним етапом роботи було проведення експериментальних досліджень, порівняння результатів моделювання з експериментальним зразком та аналогічними рішеннями.

ПЕРЕЛІК ДЖЕРЕЛ ПОСИЛАНЬ

1. ДСТУ 3008-15. Документація. Звіти у сфері науки та техніки. структура та правила оформлення. – Введ. 2015-06-22. – К. Держстандарт України, 2017 – 29 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. Токарєва, Г.В. Пономарьова. – Київ-58, пр. Космонавта Комарова, 1, 2016. – 320с.

3. Методичні вказівки з підготовки та захисту кваліфікаційної роботи здобувачами другого (магістерського) рівня вищої освіти спеціальності 151 Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології, освітньо-професійних програм: «Автоматизоване управління технологічними процесами»; «Комп'ютерно-інтегровані технологічні процеси і виробництва»; «Комп'ютеризовані та робототехнічні системи» / Упоряд.: І. Ш. Невлюдов Р. В. Артюх В. В. Безкоровайний Н. П. Демська В. В. Євсєєв О. І. Филипенко О. М. Цимбал. Харків: ХНУРЕ, 2021. 55 с.

4. Руденко В. О. Аналіз будови роботизованих риб та їх переміщення у воді / В. О. Руденко // «Automation and Development of Electronic Devices» ADED-2022 : Collection of Students' Scientific Paper. – Kharkiv : Kind of Kharkiv National Universitety of Radio Elektronics [electronic edition], 2022. – Part 2. – P. 151-155.

5. Zhiwei Wang, Chengliang Dong, Lijun Zhang et al. Review of multi-fin propulsion and functional materials of underwater bionic robotic fish. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part C: Journal of Mechanical Engineering Science, April 12, 2022.

6. Li Z, Xia D, Zhou X, et al. The hydrodynamics of self-rolling locomotion driven by the flexible pectoral fins of 3-D bionic dolphin[J]. *Journal of Ocean Engineering and Science*, 2021.

7. Li Z, Ge L, Xu W, et al. Turning characteristics of biomimetic robotic fish driven by two degrees of freedom of pectoral fins and flexible body/caudal fin[J]. *International Journal of Advanced Robotic Systems*, 2018, 15(1): 172988141774995.

8. Kadiyam J, Mehta C, Mohan S, et al. Implementation of a robust motion control scheme for an Ostraciiform inspired underwater robot with caudal and pectoral fins[J]. *IFAC-PapersOnLine*, 2019, 52(21): 283–290.

9. Mignano, Anthony P, Kadapa, et al. Passing the Wake: Using Multiple Fins to Shape Forces for Swimming, *Biomimetics (Basel)*, 2019, 4(1): 23.

10. Zhang B, Chen Y, Wang Z, Ma H. Research and Experiment on a Bionic Fish Based on High-Frequency Vibration Characteristics. Biomimetics. 2023; 8(2):253. https://doi.org/10.3390/biomimetics8020253.

11. M. Muralidharan, I.A. Palani. Development of Subcarangiform Bionic Robotic Fish Propelled by Shape Memory Alloy Actuators. Defence Science Journal, Vol. 71, No. 1, January 2021, pp. 94-101, DOI : 10.14429/dsj.71.15777.

12. Sander C. van den Berg, Rob B.N. Scharff, Zoltán Rusák, Jun Wu, OpenFish: Biomimetic design of a soft robotic fish for high speed locomotion, HardwareX, Volume 12, 2022, e00320, ISSN 2468-0672, https://doi.org/10.1016/j.ohx.2022.e00320.

13. PETG // 3D BRO, 2023. URL: https://petg.com.ua/?gclid=CjwKCAjwnOipBhBQEiwACyGLunZNNaAX6_S3K5RoTRZhysA6oC3wcafpefXhumEwaOwvr2MFhYYANRoCUIIQAvD_BwE (дата звернення : 10.10.2023).

14. Модуль ESP32-CAM з камерой OV2640, WiFi и Bluetooth // RoboStore, 2023. URL: https://www.robostore.com.ua/modul-esp32-cam-bluetooth-wi-fi-esp32-s-kameroy-ov2640/ (дата звернення : 09.10.2023).

15. C.H. White, G.V. Lauder, H. Bart-Smith Tunabot flex: a tuna-inspired robot with body flexibility improves high-performance swimming Bioinspiration Biomimetics, 16 (Mar 2021), Article 026019.

16. PZ-15320 Digital Sub-Micro Servo Motor // Siqma Robotics, 2023. URL: https://store.siqma.com/pz-15320-servo.html (дата звернення : 15.11.2023).

17. Сервопривід EMAX ES08MA II 12g 180° // RoboStore, 2023. URL: https://www.robostore.com.ua/detaliikomplektuyushiedlyarobototehniki/servoprivody/servoprivod-emax-es08ma-ii-12g-180/ (дата звернення : 15.11.2023).

18. Сервопривід Tower Pro SG90 micro servo 9g // Mini-Tech, 2023. URL: https://www.mini-tech.com.ua/servomotor-sg90 (дата звернення : 15.11.2023).

19. Бердник, Ю. М. (2019). Адаптивна система керування підводним роботом (Master's thesis, КПІ ім. Ігоря Сікорського).

20. Chao Cheng, Jun Fu, Hang Su, Luquan Ren, Recent Advancements in Agriculture Robots: Benefits and Challenges, Machines, 11, 1, (48), (2023). https://doi.org/10.3390/machines11010048.

21. Руденко В. О. Аналіз будови роботизованих риб та їх переміщення у воді / В. О. Руденко // «Automation and Development of Electronic Devices» ADED-2022 : Collection of Students' Scientific Paper. – Kharkiv : Kind of Kharkiv National Universitety of Radio Elektronics [electronic edition], 2022. – Part 2. – P. 151-155.

22. P. Phamduy, R. LeGrand, M. Porfiri Robotic fish: Design and characterization of an interactive idevice-controlled robotic fish for informal science education, IEEE Robot. Autom. Mag., 22 (1) (2015), pp. 86-96.

23. Манічкін М. Аналіз кінематики та розробка моделі розрахунків елементів матриці гомогенних перетворень для зооморфного мобільного робота / М. Манічкін // Автоматизація та Приладобудування («Automation and Development of Electronic Devices» ADED-2023): збірник студентських наукових статей, 2023. – Харків : ХНУРЕ, 2023. – Вип. 2. – С. 49-54.

24. Solidworks 3D CAD // Solidworks, 2023. URL: https://www.solidworks.com/ru/online-product-trials (дата звернення : 16.11.2023).

25. Development of a 3D Model of a Manipulator for Mobile Robotic Platforms Based on Unigraphics NX / V. Yevsieiev, I. Nevliudov, N. Demska, Y. Valkivskyi // Вчені записки Таврійського національного університету імені В. І. Вернадського. – Серія : Технічні науки. – 2022. – Т. 33(72), № 1. – С. 157–164.

26. 3D принтер Anet A8 Steel PRO от AST3D Украина // AST 3D, 2023. URL: https://ast3d.com.ua/product/3d-printer-anet-a8-steel-pro (дата звернення : 16.11.2023).

27. Силікон Smooth on Dragon Skin™ 10 Medium, 910 г // Creative, 2023. URL: https://becreative.kiev.ua/ua/p1465143049-silikon-smooth-dragon.html (дата звернення : 16.11.2023).

28. Аккумулятор Samsung INR18650-30Q Li-Ion 18650 3000mAh // SaleZone, 2023. URL: https://salezone.com.ua/p1418713756akkumulyatorsamsunginr18650.html?source=merchant_center&gclid=CjwKCAjw7IeUBhBbEiwADhiEMZCvZ0vhFWswJlh9QGZbZBIS-xdCTjsbQ2E3LEncxHwX-i9UTEtypBoCosEQAvD_BwE (дата звернення : 16.11.2023).

29. Перетворювач DC-DC знижуючий LM2596 з вольтметром // ComerceWholesale, 2023. URL: https://comerce.com.ua/ua/p1854205975-preobrazovatelponizhayuschijlm2596.html?source=merchant_center&gclid=Cj0KCQiAtaOtBhCwARIsAN_x3K6HmGxQvlQaII28G1SfjitkoaZ0H7qTXb9hGRScYPAgbE0TAzXX4MaArxQEALw_wcB (дата звернення : 18.11.2023).

30. Autodesk Fusion 360: більше, ніж CAD, це майбутнє дизайну та виробництва // AUTODESK, 2023. URL: https://www.autodesk.com/products/fusion360/overview?term=1YEAR&tab=subscription (дата звернення : 18.11.2023).

31. Продукти AutoCAD // AUTODESK, 2023. URL: https://forums.autodesk.com/t5/produkti-autocad-ukrainskoyu/bd-p/6163 (дата звернення : 19.11.2023).

32. Blender 4.0 // Blender, 2023. URL: https://www.blender.org/ (дата звернення : 19.11.2023).

33. Невлюдов І.Ш., Євсєєв В.В., Демська Н.П., Руденко В.О. (2022). Розробка 3D-моделі зооморфного мобільного робота для вертикальних переміщень по металевим поверхням. Наука і техніка сьогодні, № 4(4) 2022. С.354. , с. 163-174. DOI: https://doi.org/10.52058/2786-6025-2022-4(4)-163-174.