

**МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ**  
**НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ УКРАЇНИ**  
**«КИЇВСЬКИЙ ПОЛІТЕХНІЧНИЙ ІНСТИТУТ**  
**імені ІГОРЯ СІКОРСЬКОГО»**

**Приладобудівний факультет**  
**Кафедра автоматизації та систем неруйнівного контролю**

«На правах рукопису»  
УДК 620.179.16

До захисту допущено:  
Завідувач кафедри

\_\_\_\_\_Юрій КИРИЧУК  
«\_\_»\_\_\_\_\_2024\_р.

**Магістерська дисертація**  
**на здобуття ступеня магістра**  
**за освітньо-професійною програмою**  
**Комп'ютерно-інтегровані системи та технології в приладобудуванні**  
**зі спеціальності 151 «Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані**  
**технології»**

**на тему: «Системи управління біоподібним роботом»**

Виконав : студент II курсу, групи ПК-21мп  
Куранда Антон Володимирович \_\_\_\_\_

Науковий керівник: завідувач кафедри автоматизації  
та систем неруйнівного контролю, д.т.н., доц.  
Киричук Юрій Володимирович \_\_\_\_\_

Консультант розділу :  
завідувач кафедри економічної кібернетики, д.е.н., проф .  
Бояринова Катерина Олександрівна \_\_\_\_\_

Рецензент: доцент кафедри ІВТ, к.т.н., доцент  
Самарцев Юрій Миколайович \_\_\_\_\_

Засвідчую, що у цій магістерській дисертації  
немає запозичень з праць інших авторів без  
відповідних посилань.

Студент \_\_\_\_\_Куранда А.В.

Київ – 2024 року

**МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ**  
**НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ УКРАЇНИ**  
**«КИЇВСЬКИЙ ПОЛІТЕХНІЧНИЙ ІНСТИТУТ**  
**імені ІГОРЯ СІКОРСЬКОГО»**

**Приладобудівний факультет**  
**Кафедра автоматизації та систем неруйнівного контролю**

Рівень вищої освіти – другий (магістерський)

Спеціальність – 151 «Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології»

Освітньо-професійна програма «Комп'ютерно-інтегровані системи та технології в приладобудуванні»

ЗАТВЕРДЖУЮ

Завідувач кафедри

\_\_\_\_\_Юрій КИРИЧУК

«\_\_\_»\_\_\_\_\_2024 р.

## **Завдання**

### **на магістерську дисертацію студенту Куранді Антону Володимировичу**

1. Тема дисертації: «Системи управління біоподібним роботом» науковий керівник магістерської дисертації Киричук Юрій Володимирович, завідувач кафедри автоматизації та систем неруйнівного контролю, доктор технічних наук, доцент затверджені наказом по університету від 08 листопада 2023 р. №5188-с
2. Термін подання студентом дисертації: 08 січня 2024 р.
3. Об'єкт дослідження: біоподібні роботи.
4. Вихідні дані: предмет досліджень – системи управління біоподібними роботами.
5. Перелік завдань, які потрібно розробити: визначення поняття «біоподібний робот» та особливостей використання в неруйнівному контролі; дослідження типів та структури біоподібних роботів; аналіз системи управління біоподібним роботом; визначення основних напрямів удосконалення системи управління біоподібним роботом; проектно-конструкторські роботи та створення моделі біоподібного робота; розробка стартап-проєкту.
6. Орієнтований перелік графічного (ілюстративного) матеріалу: 5 плакатів А1.

7. Орієнтований перелік публікацій: Основні напрями удосконалення системи управління біоподібними роботами в неруйнівному контролі в умовах Індустрії 4.0» // Куранда А.В., Киричук Ю.В. – Збірник праць ХІХ Всеукраїнської науково-практичної конференції студентів, аспірантів та молодих вчених «Ефективність та автоматизація інженерних рішень у приладобудуванні», 20 – 21 грудня 2023 р. – К.: ПБФ, КПІ ім. Ігоря Сікорського. – 2023. – 480 с. (С. 185 – 188).

8. Консультанти розділів дисертації:

| Розділ                   | Прізвище, ініціали та посада консультанта                   | Підпис, дата   |                  |
|--------------------------|---|----------------|------------------|
|                          |   | Завдання видав | Завдання прийняв |
| Розробка стартап-проєкту | Бояринова К.О.<br>завідувач кафедри економічної кібернетики |                |                  |

7. Дата видачі завдання 01 вересня 2023 р.

#### Календарний план

| № п/п | Назва етапів виконання магістерської дисертації   | Строк виконання етапів дисертації | Примітка |
|-------|---|-----------------------------------|----------|
| 1.    | Формулювання завдання магістерської дисертації  | 1.09.2023                         | Виконано |
| 2.    | Проведення аналізу сучасного стану застосування біоподібних роботів в неруйнівному контролі та визначення основних їх типів | 21.09.2023                        | Виконано |
| 3.    | Дослідження системи управління біоподібними роботами  | 12.10.2023                        | Виконано |
| 4.    | Підготовка пропозицій щодо удосконалення системи з врахуванням Індустрії 4.0  | 26.10.2023                        | Виконано |
| 5.    | Проектно-конструкторські роботи та створення моделі біоподібного робота   | 16.11.2023                        | Виконано |
| 6.    | Розробка стартап-проєкту  | 06.12.2023                        | Виконано |
| 7.    | Формулювання висновків та оформлення пояснювальної записки та презентації   | 25.12.2023                        | Виконано |

Студент

Антон КУРАНДА

Науковий керівник дисертації

Юрій КИРИЧУК

## РЕФЕРАТ

Магістерська дисертація: 112 стор., 26 рис., 28 табл., 10 додатків, і 56 бібліографічних найменувань.

**Мета дисертації:** підвищення ефективності системи управління біоподібним роботом для цілей НРК в умовах Індустрії 4.0.

**Об'єкт дослідження** – біоподібні роботи.

**Предмет досліджень** – системи управління біоподібними роботами.

**Отримані результати:** визначено поняття «біоподібний робот» та особливості їх використання в неруйнівному контролі; узагальнено типи біоподібних роботів; розкрито особливості системи управління біоподібним роботом; запропоновано основні напрями удосконалення системи управління біоподібним роботом; здійснено конструювання та моделювання біоподібного робота; розроблено стартап - проєкт.

**Наукова новизна одержаних результатів**

*Уперше* надано визначення поняття біоподібного роботу.

*Удосконалено* систему управління біоподібним роботом, що ґрунтується на використанні досягнень Індустрії 4.0

*Дістали подальшого розвитку положення* щодо використання біоподібних роботів в неруйнівному контролі.

**Практичне значення одержаних результатів.** Підвищення ефективності системи управління біоподібним роботом призводить до розширення можливостей їх використання як в НРК, так і інших сферах.

**Публікації.** Основні напрями удосконалення системи управління біоподібними роботами в неруйнівному контролі в умовах Індустрії 4.0» // Куранда А.В., Киричук Ю.В. – Збірник праць ХІХ Всеукраїнської науково-практичної конференції студентів, аспірантів та молодих вчених «Ефективність та автоматизація інженерних рішень у приладобудуванні», 20 – 21 грудня 2023 р. – К.: ПБФ, КПІ ім. Ігоря Сікорського. – 2023. – 480 с. (С. 185 – 188)

**ключові слова:** БІОПОДІБНИЙ РОБОТ, ДАТЧИК, ІНДУСТРІЯ 4.0, НЕРУЙНІВНИЙ КОНТРОЛЬ, СИСТЕМА УПРАВЛІННЯ, ШТУЧНИЙ ІНТЕЛЕКТ.

## ABSTRACT

Master's dissertation: 112 pages, 26 figures, 28 tables, 10 Annexes, and 56 references.

**Research goal and objectives:** increasing the efficiency of the management system of a biosimilar robot for the purposes of NRK in the conditions of Industry 4.0.

**Object of research:** is biosimilar /biomimetic robots.

**Subject of research:** Control systems of a biosimilar/biomimetic robot

**Scientific contribution:** the concept of " biosimilar " and the features of their use in Non-Destructive Testing (NDT) are defined; the types of biosimilar robots are summarized; the features of the biosimilar robot control system are revealed; the main areas of improvement of the biosimilar robot management system are proposed; construction and modeling of a biosimilar robot was carried out; a start-up project has been developed.

### **Scientific novelty of the obtained results**

For the first time, the definition of the concept of a biosimilar robot is given.

The management system of a biosimilar robot based on the use of Industry 4.0 achievements has been improved.

Provisions regarding the use of biosimilar robots in non-destructive testing were further developed.

**Practical value of obtained results:** Increasing the efficiency of the biosimilar robot management system leads to expanding the possibilities of their use both in the NDT and in other areas.

**Publications:** The main directions of improvement of the control system of biosimilar robots in Non-Destructive Testing in the conditions of Industry 4.0 // Kuranda A.V., Kyrychuk Yu.V. - Proceedings of the XIX All-Ukrainian scientific and practical conference of students, postgraduates and young scientists "Efficiency and automation of engineering solutions in instrument construction", December 20-21, 2023 - K.: PBF, KPI named after Igor Sikorsky. - 2023. - 480 p. (p. 185 – 188)

**keywords:** ARTIFICIAL INTELLIGENCE, BIOSIMILAR ROBOT, CONTROL SYSTEM, INDUSTRY 4.0, NON-DESTRUCTIVE TESTING, SENSOR.

## ЗМІСТ

|  |     |
|--|-----|
| ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ, СКОРОЧЕНЬ І ТЕРМІНІВ .....                | 7   |
| ВСТУП .....  | 8   |
| РОЗДІЛ 1   |     |
| ВИКОРИСТАННЯ БІОПОДІБНИХ РОБОТІВ_В НЕРУЙНІВНОМУ                      |     |
| КОНТРОЛІ .....   | 11  |
| 1.1 Місце і роль біоподібних роботів в неруйнівному контролі .....   | 11  |
| 1.2 Типи роботизованих систем .....                                  | 16  |
| 1.3.Аналіз програмного забезпечення роботів .....                    | 25  |
| Висновки до розділу 1 .....  | 28  |
| РОЗДІЛ 2   |     |
| СИСТЕМИ УПРАВЛІННЯ БІОПОДІБНИМ РОБОТОМ .....                         | 30  |
| 2.1 Структурні особливості біоподібного робота .....                 | 30  |
| 2.2 Система управління біоподібними роботами .....                   | 32  |
| 2.3 Напрями удосконалення системи управління біоподібними роботами в |     |
| умовах Індустрії 4.0 .....   | 40  |
| Висновки до розділу 2 .....  | 43  |
| РОЗДІЛ 3   |     |
| ПРОЄКТНО-КОНСТРУКТОРСЬКИЙ РОЗДІЛ .....                               | 44  |
| 3.1 Принципові підходи до конструювання біоподібного робота .....    | 44  |
| 3.2 Математичне моделювання .....                                    | 55  |
| 3.3 Створення моделі біоподібного робота.....                        | 61  |
| Висновки до розділу 3 .....  | 68  |
| РОЗДІЛ 4   |     |
| РОЗРОБКА СТАРТАП-ПРОЄКТУ .....                                       | 70  |
| 4.1 Опис ідеї проєкту.....   | 70  |
| 4.2 Аналіз ринкових можливостей запуску стартап-проєкту .....        | 74  |
| 4.3 Розроблення ринкової стратегії проєкту .....                     | 81  |
| 4.4 Бізнес модель та розроблення маркетингової програми .....        | 84  |
| стартап-проєкту.....   | 84  |
| Висновки до розділу 4 .....  | 90  |
| ВИСНОВКИ .....   | 91  |
| ПЕРЕЛІК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ .....                                    | 94  |
| ДОДАТКИ .....  | 100 |

**ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ, СКОРОЧЕНЬ І ТЕРМІНІВ**

|      |                                   |
|------|-----------------------------------|
| АПА  | Автономні підводні апарати        |
| АСУ  | Автоматизована система управління |
| БПЛА | Безпілотні літальні апарати       |
| БПР  | Біоподібний робот                 |
| БПРЗ | Біоподібний робот-змія            |
| ВР   | Віртуальна реальність             |
| ІТ   | Інформаційні технології           |
| МГР  | Магнітні гусеничні роботи         |
| НРК  | Неруйнівний контроль              |
| ОТ   | Операційні технології             |
| САУ  | Система автоматичного управління  |
| СУ   | Система управління                |
| УЗ   | Ультразвуковий                    |
| ШІМ  | Широтно-імпульсна модуляція       |

## ВСТУП

**Актуальність тематики дослідження.** Неруйнівний контроль (НРК) включає велику групу методів аналізу, які використовуються в цивільному, медичному та промисловому секторах для оцінки властивостей матеріалів, тканин, компонентів або структур без заподіяння будь-якої шкоди. НРК є життєво необхідним для забезпечення цілісності критично важливих частин та соціальної безпеки.

Сучасні компоненти все частіше представляють складні форми та геометрію для перевірки. Використання традиційних підходів ручного контролю створює певні труднощі та обмеження в НРК.

Роботизація пропонує багато переваг для НРК, щоб впоратися зі зростаючими вимогами, включаючи підвищену надійність і вищу швидкість перевірки. Крім того, роботи дозволяють дістатися до місць перевірок, які не є легкодоступними для операторів-людей і дозволяють виводити людей із потенційно небезпечних середовищ. Однак передбачувана складність і високі витрати обмежили використання роботів для НРК. Як наслідок, весь потенціал, який можна було б отримати від інтеграції роботизованих платформ із датчиками, виконавчими механізмами та програмним забезпеченням не був повністю вивчений.

Наразі це все ще може революціонізувати спосіб виконання та задуму роботизованого НРК. Роботи часто керуються заздалегідь визначеними інструментами, створеними за допомогою програмного забезпечення для планування шляху в автономному режимі. Нещодавні досягнення в галузі електроніки, робототехніки, сенсорних технологій та програмного забезпечення прокладають шлях для нових розробок в області роботизованого НРК. Крім того, наразі активізувалися дослідження щодо використання біологічних принципів в робототехніці для відтворення природної поведінки та вирішення складних проблем.



З іншого боку сучасні цифрові технології, такі як штучний інтелект, цифрові двійники або Інтернет речей, відкривають нові можливості для НРК – як для контролю якості на виробництві, так і для забезпечення безпеки в операціях. Крім того, Індустрія 4.0 процвітає завдяки інформації, і це саме те, що забезпечує НРК. Ці два аспекти та пов'язані з ними нові варіанти використання та бізнес-моделі призвели до появи нової галузі знань: НРК 4.0, це злиття НРК з сучасними цифровими технологіями.

**Метою роботи** є підвищення ефективності системи управління біоподібним роботом для цілей НРК в умовах Індустрії 4.0.

Для досягнення мети необхідно було вирішено такі **завдання**:

визначення поняття «біоподібний робот» та особливостей їх використання в неруйнівному контролі;

дослідження типів та структури біоподібних роботів;

аналіз системи управління біоподібним роботом;

визначення основних напрямів удосконалення системи управління біоподібним роботом;

практичні кроки щодо проектування, конструювання та моделювання біоподібного робота;

розробка стартап-проєкту.

*Об'єкт дослідження* – біоподібні роботи.

*Предмет досліджень* – системи управління біоподібними роботами.

Отримані результати: визначено поняття «біоподібний робот» та особливості їх використання в неруйнівному контролі; узагальнено типи біоподібних роботів; розкрито особливості системи управління біоподібним роботом; запропоновано основних напрями удосконалення системи управління біоподібним роботом; здійснено конструювання та моделювання біоподібного робота; розроблено стартап-проєкт.

***Наукова новизна одержаних результатів***

*Уперше*

надано визначення поняття біоподібного роботу.

*Удосконалено*

систему управління біоподібним роботом, що ґрунтується на використанні досягнень Індустрії 4.0.

*Дістали подальшого розвитку положення*

щодо використання біоподібних роботів в неруйнівному контролі.

**Практичне значення одержаних результатів.** Підвищення ефективності системи управління біоподібним роботом призводить до розширення можливостей їх використання як в НРК, так і інших сферах.

**Публікації.** Основні напрями удосконалення системи управління біоподібними роботами в неруйнівному контролі в умовах Індустрії 4.0 // Куранда А.В., Киричук Ю.В. – Збірник праць ХІХ Всеукраїнської науково-практичної конференції студентів, аспірантів та молодих вчених «Ефективність та автоматизація інженерних рішень у приладобудуванні», 20 – 21 грудня 2023 р. – К.: ПБФ, КПІ ім. Ігоря Сікорського. – 2023. – 480 с. (С. 185 – 188)

**Структура та обсяг дисертації.** В першому розділі розкрито особливості використання біоподібних роботів в неруйнівному контролі та їх види. В другому розділі представлено конструктивні особливості та системи управління біоподібними роботами та надано пропозиції щодо удосконалення їх систем. Третій розділ містить практичні розробки щодо проектування, конструювання та 3-D моделювання біоподібного робота. В четвертому розділі представлено стартап-проект.

Загальний обсяг роботи 112 сторінок, у тому числі 100 сторінок основного тексту, 26 рисунків, 28 таблиць, 10 додатків та 56 використаних джерел.

## **РОЗДІЛ 1**

### **ВИКОРИСТАННЯ БІОПОДІБНИХ РОБОТІВ**

#### **В НЕРУЙНІВНОМУ КОНТРОЛІ**

#### **1.1 Місце і роль біоподібних роботів в неруйнівному контролі**

Аналіз підходів щодо визначення терміну біоподібний робот свідчить, що наразі більшого використання мають такі як біоробот, біоміметичний робот. Тому біоподібний робот розглядається як автоматичний пристрій чи система, що використовується для виконання різних завдань та операцій, спроектовані з врахуванням імітації структури або функції біологічної речовини або матеріалу.

Неруйнівний контроль (НРК) – це мультидисциплінарна група методів аналізу, що використовуються в науці та промисловості для оцінки властивостей матеріалів та/або забезпечення цілісності компонентів/структур, не завдаючи їм шкоди. НРК використовується для забезпечення цілісності та надійності продукції, контролю виробничих процесів, зниження виробничих витрат та підтримки єдиного рівня якості. Без нього безпека та надійність компонентів можуть опинитися під серйозною загрозою. Це робить НРК вирішальним для запобігання катастрофічним аваріям, таким як аварії літаків і локомотивів, витоки і вибухи трубопроводів, аварії ядерних реакторів і катастрофи кораблів тощо. Галузі застосування НРК це аерокосмічна, авіаційна, аеронавтика; виробництво електроенергії (атомна, вітрова, електрична); нафта і газ, нафтохімічна промисловість; хімічна; інфраструктура (мости, автомагістралі, будівлі); транспорт (автомобільний, залізничний, морський); будівництво тощо.

Традиційні технології НРК важко реалізувати без автоматичного виявлення складних компонентів, особливо автоматичного високоточного неруйнівного виявлення компонентів криволінійної поверхні зі змінною кривизною, змінною товщиною та складним контуром. Таким чином, роботизована техніка НРК як комбінація техніки маніпулятора та техніки НРК

може ще більше підвищити ефективність і точність НРК. Роботизована техніка НРК поєднує в собі фізичний принцип НРК з гнучким контролем руху просторового положення шарнірного маніпулятора. З неруйнівним контролем як обмеженням він контролює положення руху та кут азимута передавального та приймального перетворювача. Таким чином, традиційна техніка НРК еволюціонувала від площини до криволінійної поверхні, від 2D до багатьох вимірів і від штучності до інтелекту, в унікальну і систематичну міждисциплінарну роботизовану техніку НРК.

Роботизація НРК інженерних вузлів і конструкцій є одним зі стратегічних завдань багатьох галузей промисловості. Це дозволяє підвищити точність і швидкість перевірки, одночасно скорочуючи час інспектування та пов'язані з цим витрати на оплату праці, на відміну від ручної перевірки. Використання роботів може забезпечити додаткову гнучкість і автономність автоматизованого НРК. Автоматизована роботизована інспекція може бути корисною в різних промислових сценаріях, починаючи від інтеграції НРК в процес виробництва компонентів з дуже складною геометрією, таких як зубчасті колеса, і закінчуючи періодичним капітальним ремонтом великих конструкцій в процесі експлуатації (наприклад, у нафтохімічній та аерокосмічній промисловості).

Перевірка численних компонентів (наприклад, у виробництві автомобілів) або протяжних конструкцій (наприклад, обшивки літаків) трудомістка та вимагає багато часу. Деякі методи НРК, такі як відеоінспекція, вихрострумний та ультразвуковий (УЗ) можна легко автоматизувати, і тому останнім часом зростає інтерес до розробки роботизованих систем для НРК. Існує багато застосувань роботів-скелелазів і автономних мініатюрних роботизованих транспортних засобів для використання в НРК, які підходять для перевірки великих конструкцій, де доступ операторів може бути небезпечним або обмеженим. Переваги використання роботів в НРК наведено в таблиці 1.1.

Таблиця 1.1 – Переваги використання роботів в НРК

| № п/п | Переваги                | Пояснення   |
|-------|-------------------------|---|
| 1.    | Підвищена точність      | Мінімізація ризику людської помилки та забезпечення точних та стабільних результатів  |
| 2.    | Дистанційна перевірка   | Використання для небезпечних та важкодоступних місць  |
| 3.    | Послідовність           | Роботи підтримують постійну швидкість і методологію перевірки, зменшуючи мінливість результатів у порівнянні з інспекторами-людьми  |
| 4.    | Ефективність            | Прискорення процесу перевірки, що призводить до швидшого часу виконання робіт і підвищення продуктивності   |
| 5.    | Повторюваність          | Можуть багаторазово перевіряти одні й ті ж компоненти з однаковим рівнем точності, що робить їх ідеальними для контролю якості та довгострокового моніторингу                     |
| 6.    | Збір даних              | Можливість збирання та запису значного обсягу даних під час перевірок, які можна аналізувати на предмет тенденцій та використовувати для прогнозованого технічного обслуговування |
| 7.    | Скорочення часу простою | Час простою для технічного обслуговування зводиться до мінімуму   |
| 8.    | Рентабельність          | Зменшуються витрати на оплату праці та підвищується загальна ефективність.  |
| 9.    | Безпечність             | Підвищення безпеки та зниження ризику нещасних випадків або впливу небезпечних речовин  |
| 10.   | Операції 24/7           | Роботи можуть працювати цілодобово, забезпечуючи безперервний моніторинг та інспекцію, що особливо цінно в таких галузях, як виробництво енергії та аерокосмічна промисловість    |

Як бачимо з таблиці використання роботів в НРК дає можливість розширити можливості контролю; доступ до важкодоступних місць; підвищити ефективність процесу, не зважаючи на те, що початкові інвестиції в роботизоване обладнання можуть бути значними, але це призводить до значної економії коштів у довгостроковій перспективі. Роботи можуть працювати 24/7 без перерв, зменшуючи витрати на оплату праці. Крім того, вони можуть виконувати перевірки швидше, скорочуючи час простою та підвищуючи операційну ефективність; безпеку для інспекторів; надання даних в режимі реального часу (дані можуть бути зібрані та проаналізовані на місці,

що дозволяє негайно відповідні приймати рішення). Основні напрями використання це перш за все замкнутий простір; екстремальні температури; небезпечні матеріали.

Останнім часом відбулися значні розробки в технологіях залежно від потреб, застосувань і вартості різних місій. Популярності також набуло використання так званої біоніки, біоміметики або біомімікрії.

*Біомімікрія* відноситься до процесу імітації живих рослин і тварин у спосіб, у який вони вирішують проблеми або вирішують завдання, що стоять перед ними.

У галузі біомімікрії ї було запропоновано кілька рамок. З одного боку, доступні два стандарти ISO: ISO 18458 «Біоміметика – термінологія, концепції та термінології», який забезпечує основу для біоміметичної термінології та метод використання в науці, промисловості та освіті; та ISO 18459 «Біомімікрія – біоміметична оптимізація», який визначає функції та сфери застосування методів біоміметичної оптимізації для продовження терміну служби та зменшення маси компонентів [11].

*Біоніка* та *біоміметика* – це два терміни, пов'язані з дисципліною біомімікрія. *Біомімікрія* походить від двох грецьких слів; «біо» означає природу, а «мімезис» – наслідування. Мається на увазі розробка нової системи для вирішення людських проблем шляхом наслідування природи або черпаючи натхнення з природного дизайну чи процесу. Біоніка і біоміметика зазвичай розглядаються як синоніми, оскільки вони мають схоже значення. Однак ключова відмінність біоніки від біоміметики полягає в їх походженні. Термін «*біоніка*» вперше був введений в 1960 році Джеком Стілом та визначається як розвиток сучасної системи або набору функцій на основі аналогічної системи, що існує в природі [11]. Під біонікою мається на увазі дещо інше – реплікація біологічних систем технічними засобами. Цей термін зазвичай використовується в контексті протеза чи штучної шкіри тощо [15].

Термін «*біоміметика*» вперше ввів Отто Шмітт у 1969 році. Він визначив його як процес імітації утворення, структури або функції біологічно

виробленої речовини або матеріалу з метою виробництва або синтезу штучного продукту. Це явище може бути застосовано до структур, механізмів, процесів або функцій [19].

Біоміметичні розробки розглядаються як двигун інновацій і стають популярними не тільки у високотехнологічних галузях, але і в багатьох традиційних галузях, особливо в галузі матеріалознавства та нанотехнологій. Було проведено багато різних досліджень для отримання розумних матеріалів, модифікаторів поверхні, нанокомпозитів тощо з використанням біомімікрії. Нанотехнології – це ще одна галузь, яка використовує біоміметику як інструмент для інновацій нових застосувань. Біоміметика також стала двигуном сталого розвитку, оскільки вона допомагає генерувати багато стійких технологій шляхом вивчення природи.

Дослідження біоміметичної робототехніки в даний час проводяться в багатьох науково-дослідних установах по всьому світу з метою розробки класу біоміметичних роботів, які демонструють набагато більшу компетентність і надійність у продуктивності в неструктурованих середовищах, ніж роботи, які використовуються в даний час. Очікується, що біоміметично розроблені роботи будуть більш сумісними та стабільними, ніж нинішні роботи. Конструктори таких роботів використовують переваги нових розробок у матеріалах, технологіях виготовлення, датчиках і виконавчих механізмах, щоб забезпечити широкий спектр можливостей, які дозволяють цим роботам імітувати біологічні процеси та систем. Біоміметичний механізм являє собою напівавтономну або автономну систему, яка має здатність функціонувати в складному середовищі. Біоміметичний механізм може бути розроблений і спланований таким чином, щоб він був адаптивним в умовах непередбачуваних змін і виконував багатофункціональні завдання.

Біоміметику можна умовно розділити на три категорії:

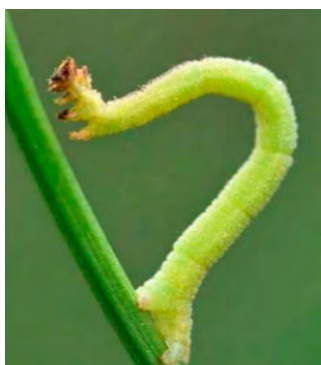
форма і функції,

біокібернетика, сенсорні технології та робототехніка,

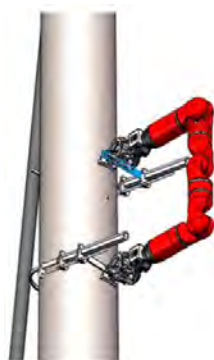
нанобіоміметика [19] .

В цілому в центрі уваги знаходиться функціональний механізм, а не обов'язково біологічна форма його реалізації, і це необхідно враховувати при реалізації проєктів.

Біоміметика – це міждисциплінарна співпраця біології та технологій, яка пропонує вирішення практичних проблем шляхом аналізу біологічних систем та перенесення їх принципів у застосування. На рисунку 1.1 представлено приклад біоміметики та механічний принцип робота-лазака на стовпі.



(а) гусениця



(б) 3D-візуалізація



(в) робот для лазіння

Рисунок 1.1 – Біоміметика та механічний принцип робота-лазака на стовпі [4]

У міру стрімкого розвитку нових матеріалів, нових структур і передових методів управління, біонічні роботи поступово переходять від стадії імітації форми і поведінкової ходи істот до біоміметичної системи, заснованої на електромеханічних системах і біологічних характеристиках.

## 1.2 Типи роботизованих систем

До основних типів роботизованих систем, які наразі використовуються в світі для НРК можна віднести такі:

1. дистанційно керовані транспортні засоби;
2. безпілотні літальні апарати (БПЛА) або дрони;
3. повзуни та альпіністи;
4. крабові системи;
5. магнітні гусеничні системи;



6. автономні підводні апарати;
7. роботизовані руки;
8. колаборативні роботи;
9. моделі штучного інтелекту.

### *Дистанційно керовані транспортні засоби (ДКТЗ)*

Використання: підводний контроль (споруди, трубопроводи, корпуси суден).

Особливості: мають різноманітні датчики, камери. Можуть отримувати зображення, виконувати УЗ вимірювання товщини та навіть проводити тестування магнітних частинок у зануреному середовищі. Управління здійснюється з поверхні (як правило, на надводному судні) за допомогою блоку наземного керування, де оператор приймає рішення та керує транспортним засобом в режимі онлайн. Однією з головних тенденцій для ДКТЗ є «автономність» для деяких конкретних завдань, таких як, наприклад, відстеження позицій, динамічне позиціонування (або утримання станції), автоматичне визначення напрямку та автоматичний контроль глибини [54].

Проблеми: Параметрична невизначеність (у вигляді доданої маси, гідродинамічних коефіцієнтів і т.д.). Ця проблема зростає з модульними можливостями нинішніх ДКТЗ (наприклад, здатність транспортного засобу підтримувати різноманітні модулі інструментів або полози; один або два полози маніпулятора, водострумний інструментальний полоз, поворотний щітковий полоз, полоз трубопровідної камери, різак для дроту та кабелю, а також роторний дисковий різак тощо).

Високодинамічний характер підводного середовища, який, серед іншого, створює значні перешкоди для транспортного засобу у вигляді підводних течій та взаємодії з хвилями на мілководді.

Управління ковзним режимом ефективно вирішує вищезгадані проблеми і тому є життєздатним вибором для управління підводними апаратами та змінами моделі, а невизначеності та перешкоди можуть бути компенсовані

компонентом управління ковзанням. Однак загальновідомо, що стандартний SMC вводить в систему високочастотні сигнали, провокуючи високу комутацію в виконавчих механізмах, що призводить до її зносу і зменшення терміну служби .

***Безпілотні літальні апарати (БПЛА) або дрони.***

Використання: повітряні інспекції великих споруд (мости, вітрові турбіни, промислові об'єкти).

Особливості: оснащені камерами високої роздільної здатності та тепловійними технологіями (Рис.1.2) . Фіксують візуальні дані, інфрачервоне зображення та інші, які допомагають вивчити дефекти або аномалії. Використовують аеродинамічні сили для забезпечення підйомної сили транспортного засобу, можуть літати автономно або пілотуватися дистанційно [37].



Рисунок 1.2 – Ультразвуковий дрон Voliro T для НРК

БПЛА, також відомі як дрони, можна класифікувати на основі кількох факторів, таких як принцип польоту, місія, вага, силова установка, управління, дальність висоти, конфігурація, призначення, спосіб запуску, корисне навантаження, рівень автономності, розмір, витривалість і дальність. Загальноприйняті класифікації БПЛА наведено в таблиці 1.2.

Таблиця 1.2 – Класифікація БПЛА

| № п/п | Принцип класифікації | Характеристика  |
|-------|----------------------|---|
| 1.    | Принцип польоту      | з фіксованим крилом, поворотним крилом, гібрид, з маховим крилом та інші типи БПЛА, які відрізняються механізмом польоту. |
| 2.    | Місія                | відповідно до їхньої місії, наприклад, розвідка, спостереження, атака, транспортування, пошук і порятунок тощо            |
| 3.    | Вага                 | мікро-БПЛА, малі БПЛА, тактичні БПЛА, БПЛА середньої висоти та довготривалості, висотно-довготривалі БПЛА тощо            |
| 4.    | Силова установка     | можуть живитися від електричних, паливних, сонячних або інших джерел.   |
| 5.    | Управління           | дистанційно пілотованими, автономними, напівавтономними або мати інші типи управління                                     |
| 6.    | Діапазон висоти      | низьковисотні БПЛА, висотні БПЛА та стратосферні БПЛА   |
| 7.    | Конфігурація         | моноротор, мультиротор, нахил-ротор, нахил-крило та інші.   |
| 8.    | Призначення          | наприклад, військове, цивільне, комерційне, промислове, наукове тощо.   |
| 9.    | Спосіб запуску       | можуть запускатися з землі, повітря, моря або мати інші типи способів запуску   |
| 10.   | Корисне навантаження | можуть нести різне корисне навантаження, таке як датчики, камери, системи зв'язку, зброя, вантажі та інші                 |
| 11.   | Рівень автономності  | можуть мати різні рівні автономності, такі як повністю автономні, напівавтономні, керовані людиною та інші                |
| 12.   | Розмір               | як міні-БПЛА, ручні БПЛА, переносні БПЛА, БПЛА, встановлені на транспортному засобі тощо                                  |
| 13.   | Витривалість         | короткою витривалістю, БПЛА з довгою витривалістю, БПЛА наддовгою витривалістю тощо.                                      |
| 14.   | Радіус дії           | БПЛА малої дальності, БПЛА середньої дальності, БПЛА великої дальності  |

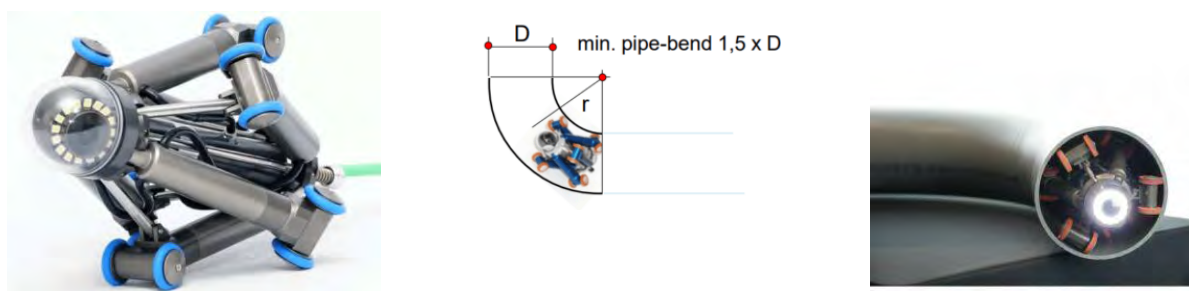
### ***Крабові системи***

**Використання:** трубопроводи

**Особливості:** Привід складається з 6 підпружинених важелів приводу двигуна (Рис.1.3. а). У поєднанні з планетарною трансмісією, 32 радіальними кульковими підшипниками та 12 колесами з гумовим покриттям ці двигуни дозволяють крабовому гусеничному роботу досягти максимального зчеплення всередині трубопроводів і з легкістю виконувати перевірку. Підпружинені приводні важелі також забезпечують точне центрування робота всередині

труби, що дозволяє роботу адаптуватися до нерівних поверхонь і навіть переміщатися повз поперечні перерізи.

Унікальна конструкція роботів дозволяє їм долати круті повороти (всього  $0,8 \times D$ ) і переміщатися по вертикалі в межах трубопроводів (Рис. 1.3 б). Установки спеціально розроблені для навігації по трубопроводах діаметром від 50 мм до 1 000 мм (Рис. 1.3 в) [37].



а) Робот                      б) Навігаційні можливості    в) Робот в трубопроводі

Рисунок 1.3 – Робот Endo Control Crab Crawler Robot [37]

Робот Guardian S (рис.1.4) – це надійна, багатоцільова, портативна мобільна платформа IoT, яка несе кілька корисних навантажень датчиків, надаючи інформацію в режимі реального часу, захищаючи людину-оператора від небезпеки.



Рисунок 1.4 – Модель Sarcos Guardian S [9, 37]

Дуже цікаву концепцію робота представила компанія Sarcos Robotics, здатного проникати в самі важкодоступні місця. Робот нагадує змію. Умовно пристрій можна розділити на 3 секції. Головна, центральна і хвостова частини. Головна і хвостова частини оснащені приводами гусеничного типу, центральна частина являє собою гнучкий механізм, за допомогою якого робот здатний переміщатися по важкодоступних місцях. Оптимізований для непередбачуваних середовищ, робот Guardian S призначений для навігації нерівною, складною місцевістю та обмеженим простором. Крім того, цей робот забезпечує подовжений час роботи та бездротові операції на великій відстані, що робить перевірки та віддалене спостереження більш ефективними, ніж будь-коли раніше [9]. До основних переваг також можна віднести: легкий і портативний; можливе спілкування в реальному часі; розширена навігація; підключення до хмари; настроювані пакети датчиків; безпосередня ситуаційна обізнаність; покриття відео на 360°магнітний і водонепроникний IP65; мобільна платформа IoT; підвищена безпека. Технічні характеристики робота наведено в Додатку А.

### ***Магнітні гусеничні роботи (МГР)***

**Використання:** для проведення контролю поверхонь чорних металів; в т.ч. нафтовій і газовій промисловості

**Особливості:** МГР (Рис.1.5.) призначені для використання на плоских і злегка вигнутих сталевих поверхнях.



Рисунок 1.5 – 3D-візуалізація Magnet Crawler II (ескіз САD: Фелікс Бернхард, DFKI) [37]

Залежно від сфери застосування, носій може бути легко оснащений повним набором модульних інструментів, заснованих на гідроабразивному або піскоструминному покритті. Можуть переміщатися по зовнішній стороні труб та резервуарів, виконуючи магнітопорошкові випробування та УЗ вимірювання товщини для виявлення корозії та дефектів.

Magnet-Crawler II – це легкий, компактний робот-альпініст для магнітних поверхонь. Робот використовує два мотори-редуктори для приводу своїх магнітних твілів і використовує еластичний хвіст для підвищення його стійкості. У передній частині робота вбудована система Odroid інтегрована з поворотною камерою 720р, платою вводу/виводу, двома світлодіодними прожекторами та одним світлодіодним ліхтарем стеження. Magnet-Crawler II живиться від літій-полімерних батарей і управляється через WLAN. Відеосигнал робота виводиться на пульт-термінал робота. Робот використовується для огляду корпусів суден. Технічні характеристики Magnet-Crawler II наведено в таблиці 1.3.

Таблиця 1.3 – Технічні характеристики Magnet-Crawler II

| Показники      | Характеристика   |
|----------------|--|
| Розмір:        | 330 x 300 x 130 мм   |
| Вага:          | 1230 г   |
| Живлення:      | 11,1 В – літій-полімерна батарея 800 мАг (час роботи близько 30 хв.) |
| Привід/двигун: | 2 мотор-редуктори 12 В постійного струму з енкодерами                |
| Датчики:       | 3-осьовий датчик прискорення   |

Джерело: [37]

### ***Автономні підводні апарати (АПА)***

**Використання:** для перевірки корпусів суден, трубопроводів та підводних споруд

**Особливості:** це програмовані роботизовані транспортні засоби, які, залежно від своєї конструкції, можуть дрейфувати, їздити або ковзати океаном

без контролю в реальному часі з боку людини-оператора. Деякі апарати періодично або безперервно зв'язуються з операторами за допомогою супутникових сигналів або підводних акустичних маяків, щоб забезпечити певний рівень контролю. На відміну від дистанційно керованих транспортних засобів, які прив'язані до службового судна, безпілотні літальні апарати не мають фізичного зв'язку зі своїм оператором. Вони програмуються або контролюються операторами, які можуть перебувати на судні або навіть на березі. На відміну від інших роботизованих систем, які майже миттєво передають відео через свої троси в диспетчерську на кораблі, АПА зберігають всі дані, включаючи зображення та інші дані датчиків, на бортових комп'ютерах до тих пір, поки їх не можна буде отримати після того, як АПА буде відновлено в кінці занурення.

Розміри АПА можуть варіюватися від кількох сотень фунтів до кількох тисяч фунтів. Вони можуть ковзати від поверхні моря до океанських глибин і назад, а можуть зупинятися, зависати і рухатися, як це роблять дирижаблі або вертольоти в повітрі. Повністю автономні операції несуть енергію на борту. Потужність дозволяє пропелерам або двигунам переміщати АПА по воді і достатня для роботи датчиків на АПА. Більшість АПА використовують спеціалізовані акумулятори, хоча деякі АПА використовують паливні елементи або акумуляторну сонячну енергію. Деякі АПА, такі як планери, мінімізують потреби в енергії, дозволяючи гравітації та плавучості приводити їх у рух.

### ***Роботизована рука***

**Використання:** універсальні роботи, які можуть використовуватися в різних галузях промисловості.

**Особливості:** біонічні роботи-маніпулятори в основному призначені для імітації системи рук людини та реалізації характеристик і функцій людських завдань. У порівнянні з традиційними механічними руками, роботи-біонічні маніпулятори здатні ефективно виконувати поставлені завдання в різних

складних умовах з точки зору високої ефективності, низького споживання енергії та високої екологічної адаптивності.

Роботи з біонічною рукою в основному поділяються на біонічних одноруких роботів і біонічних роботів з двома руками. Біонічні дворуки роботи не тільки можуть працювати разом обома руками в порівнянні з антропоморфними однорукими роботами, але також мають високу відмовостійкість. Це значно покращує експлуатаційні характеристики біонічних дворуких роботів та діапазони їх застосування, коли вони стикаються зі складними завданнями [10].

### ***Колаборативні роботи***

Використання: універсальне

Особливості: призначені для роботи разом з інспекторами, розширюючи їх можливості та підвищуючи безпеку. Можуть працювати з УЗ контролем або вихрострумовим зондами в той час як оператор керує процесом перевірки.

### ***Моделі штучного інтелекту***

Використання: універсальне

Особливості: працюють із широким спектром платформ візуальної зйомки, починаючи від камер відеоспостереження та одномонтованих камер і закінчуючи просунутими чотириногими роботами та дронами (Рис.1.6).



Рисунок 1.6 – Модель штучного інтелекту Levatas [37]

Спеціально розроблені повністю робочі моделі можуть бути використані з Boston Dynamics Spot, роботом-собакою для зчитування аналогових датчиків, теплових аномалій і виявлення змін.



### 1.3. Аналіз програмного забезпечення роботів

Програмне забезпечення біоподібних роботів відіграє значну роль для їх функціонування. Нижче наведено опис основного.

*Адаптивне керування роботом за допомогою оптимізації* (ARC-OPT) – це набір інструментів для управління робототехнічними системами на основі оптимізації. Це полегшує інтуїтивно зрозумілу специфікацію, виконання та оптимізацію реактивних завдань роботів, які включають кілька одночасно запущених підзадач. ARC-OPT включає в себе різні моделі роботів і розв'язувачі, які дозволяють реалізовувати ієрархічні, зважені або гібридні схеми управління на складних роботах з багатьма ступенями свободи, таких як гуманоїди [6].

*Біологічно натхненна мова на основі графів* (Bagel) це мова програмування на основі графів, де вузли визначають алгоритми, які передають вхідні значення на вихідні порти, а ребра визначають потік даних у вузлах. Крім того, граф Бублика визначає глобальні входи та виходи, які дозволяють використовувати весь граф на вищому рівні як єдиний вузол Бублика. Таким чином, інтерфейс основних алгоритмів такий самий, як і інтерфейс композиції основних алгоритмів, і ті самі графи використовуються для визначення нових алгоритмів і складових мереж. Це, а також можливість об'єднання декількох ребер на одному вході за допомогою декількох функцій злиття, дозволяють ефективно моделювати ієрархічну архітектуру, засновану на поведінці [8].

*Оптимізація поведінки та навчання роботів* (BOLeRo) надає інструменти для вивчення поведінки роботів [16]. Це включає в себе поведінкові репрезентації, а також навчання з підкріпленням, оптимізацію «чорного ящика», а також еволюційні алгоритми та імітаційне навчання. Забезпечує інтерфейс C++ і Python, щоб бути ефективним там, де це потрібно, а також бути гнучким і зручним, де продуктивність не є проблемою. Оскільки бібліотека надає інтерфейс C++, її легко інтегрувати в більшість роботизованих

фреймворків, наприклад, в операційну систему роботів (ROS) або конструктор роботів (Rock).

**Комп'ютерне проектування до моделювання.** Метою програми CAD-2-SIM є полегшення перенесення технічних характеристик механізмів з програм автоматизованого проектування на програмне забезпечення для моделювання [17]. Зокрема, програма дозволяє експортувати числові дані, що описують кінематичні та динамічні властивості механізму, без ручного втручання з програми САПР у формати опису декількох симуляційні середовища. Завдяки цій прямій трансформації даних забезпечується швидший і стабільніший процес розробки. У програмі CAD-2-SIM використовується угода Шет-Уікера і схема перерахування на основі графів.

**Гібридна динаміка роботів** (\_Hybrid Robot Dynamics (HyRoDun)) це модульний програмний верстак, написаний на C++ для розв'язання кінематики та динаміки дуже складних послідовно-паралельних гібридних роботів, які стають все більш популярними в останні роки. Вони успадковують переваги та кінематичну складність обох архітектур і, отже, вимагають ретельного ставлення до їх аналізу та контролю. На відміну від традиційних методів, які покладаються на неявне вирішення обмежень для замикання циклу, HyRoDun застосовує цілісний підхід до роботи зі складністю цих систем. Він повторно використовує рішення замкнутої форми для обмеження циклічного замикання паралельних механізмів, які зазвичай використовуються при проектуванні послідовно-паралельних гібридних роботів [25]. Кінематики можуть зробити свій внесок у бібліотеки підмеханізмів у HyRoDun, щоб можна було збагатити каталог підтримуваних паралельних механізмів. Крім того, для гнучкості без шкоди для ефективності, програмне забезпечення може вміщувати будь-які паралельні механізми за допомогою чисельного підходу в явній формі. Цей програмний інструмент служить ефективною та безпомилковою альтернативою вже існуючому загальному програмному забезпеченню для кінематики та динаміки багатьох тіл.

*Machina Arte Robotum Simulans* (MARS) це кросплатформний інструмент моделювання та візуалізації, створений для досліджень робототехніки. Він складається з основної структури, що містить усі основні компоненти моделювання, графічного інтерфейсу (на основі Qt), 3D-візуалізації (з використанням OSG) та фізичного рушія (на основі ODE). MARS розроблений модульним способом і може бути використаний дуже гнучко, наприклад, запустивши фізичну симуляцію без візуалізації та графічного інтерфейсу [27]. Можна розширити MARS, написавши власні плагіни, і багато плагінів, що представляють різні функції.

*Фреймворк машинного навчання Maja* (MMLF) – це загальна структура для задач у галузі навчання з підкріпленням (RL), написана на python та надає набір алгоритмів, пов'язаних з RL, і набір еталонних доменів. Крім того, він легко розширюється і дозволяє автоматизувати бенчмаркінг різних агентів [29].

*Зв'язок каналів передачі даних на рівні вузла.* Сучасні роботизовані системи поставляються з безліччю децентралізованих датчиків і керуючих електронік, яким часто потрібно взаємодіяти один з одним. Протокол NDLCom дозволяє обмінюватися невеликими пакетами даних між мікроконтролерами, FPGA і комп'ютером. Кожен учасник з'єднується з одним зі своїх сусідів за допомогою з'єднання «точка-точка» і повинен пересилати вхідні повідомлення відповідно до адреси одержувача в заголовку пакета. Реалізації для отримання, пересилання та декодування повідомлень існують у C/C++ та VHDL [33]. Візуалізація, логування та експорт отриманих даних здійснюється в графічному інтерфейсі користувача.

Phobos – це додаток для Blender'a, що дозволяє редагувати та експортувати роботів для симуляції MARS. Створення адекватних імітаційних моделей робота є складним завданням, яке, особливо у світі відкритого вихідного коду та досліджень, часто зводиться до редагування складних користувацьких файлів даних вручну. Phobos є додатком з відкритим вихідним кодом для Blender'a, розробленим для спрощення цього завдання, дозволяючи

користувачеві створювати моделі роботів у візуальному, інтерактивному інтерфейсі користувача та підтримуючи їх експорт як файли URDF, а також описи роботів SMURF для використання з симуляцією MARS.

*pySPACE* – це модульне програмне забезпечення для обробки сегментованих часових рядів і даних векторних ознак. Спеціально розроблене для забезпечення розподіленого виконання та емпіричної оцінки ланцюгів обробки сигналів і може використовуватися для порівняльного аналізу та онлайн-додатків. Автоматично завантажує, обробляє та зберігає різні набори даних. Алгоритми обробки сигналів (вузли) і більші перетворення декількох наборів даних (операцій) можуть бути легко об'єднані. Автоматична обробка може виконуватися паралельно на багатоядерній системі або кластері.

*reSPACE* (reconfigurable Signal Processing and Classification Environment) – це реконфігуроване середовище обробки та класифікації сигналів. Розроблено для полегшення розробки апаратних прискорювачів на основі FPGA для вбудованих і мобільних систем. Використовує процес розробки на основі моделей для прискорення розробки прискорювачів. Особлива увага приділяється застосуванню в таких областях, як обробка сигналів і зображень, а також машинне навчання [26].

*Rock* це програмний фреймворк для розробки роботизованих систем. Базова компонентна модель базується на Orocos RTT (Real Time Toolkit). Rock надає всі інструменти, необхідні для створення та запуску високопродуктивних та надійних роботизованих систем для широкого спектру застосувань у дослідженнях та промисловості. Він містить багату колекцію готових до використання драйверів і модулів для використання у вашій власній системі, і може бути легко розширений, додавши нові компоненти [40].

## **Висновки до розділу 1**

На основні аналізу можна визначити, що біоподібний робот – це автоматичний пристрій чи система, що використовується для виконання різних завдань та операцій та спроектований з врахуванням імітації структури

або функції біологічно виробленої речовини або матеріалу. При проєктуванні біоміметичних роботів головним є не копіювання природних матеріал та структур, а розуміння принципів проєктування та фізико-хімічних механізмів, які визначають оптимізовану структурну та геометричну організацію біологічних систем, а також її зв'язок з багатьма функціями. Для НРК використовують різні типи біоподібних роботів в залежності від функціональних завдань та особливостей. Програмне забезпечення відіграє одну з вирішальних ролей для роботи робота.

## РОЗДІЛ 2

### СИСТЕМИ УПРАВЛІННЯ БІОПОДІБНИМ РОБОТОМ

#### 2.1 Структурні особливості біоподібного робота

Структура біоподібного робота буде залежати безумовно від типу та виконуваних функцій. Нижче на Рис. 2.1 – 2.3 наведено кілька прикладів.

Експериментальна робот-платформа SmartHex показана на Рис. 2.1. Робот використовує біонічну структуру та принцип легкої конструкції. Робот оснащений камерою Kinect, силовим модулем, панеллю управління, системою датчиків. Камери Kinect використовувалися для виявлення перешкод і розпізнавання місцевості. Силовий модуль забезпечував живлення всього робота. Плата управління використовувалася для зв'язку між головним комп'ютером і цифровою сервосистемою. Система датчиків використовувалася для отримання сигналів ставлення і сигналів струму.

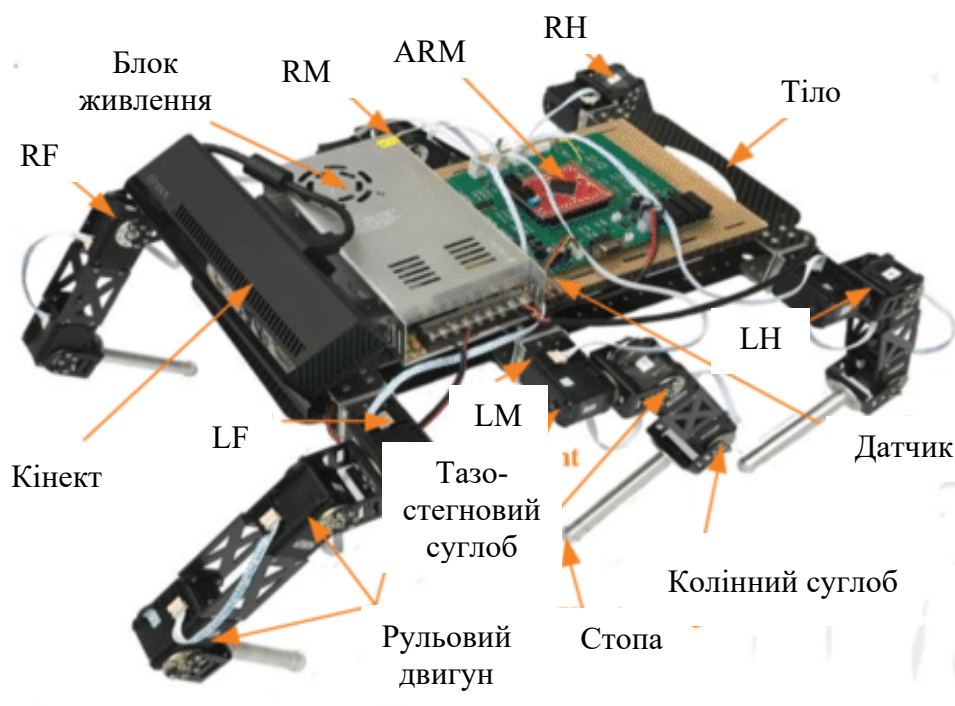
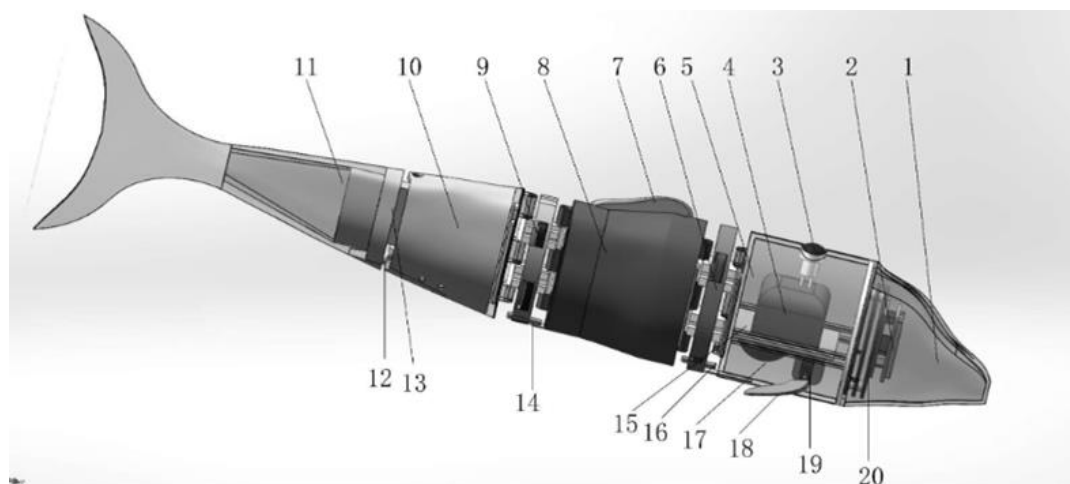


Рисунок 2.1 – Структура біоміметичного робота павука [52]



1

Рисунок 2.2 – Тривимірна будова біонічних механічних риб [13]

1 — риб'яча голова; 2 — приводна плита; 3 — вимикач живлення; 4 — джерело живлення; 5 — перше тіло риби; 6 — перший приводний шарнір; 7 — спинний плавець; 8 — друге тіло риби; 9 — другий приводний шарнір; 10 — третє тіло риби; 11 — гнучкий риб'ячий хвіст; 12 — третій спільний датчик Холла; 13 — третій приводний шарнір; 14 — другий спільний датчик Холла; 15 — опорна пластина акумулятора; 16 — перший спільний датчик Холла; 17 — протизвага; 18 — грудний плавець; 19 — рульовий механізм грудного плавця; 20 — ланцюгова плата управління.

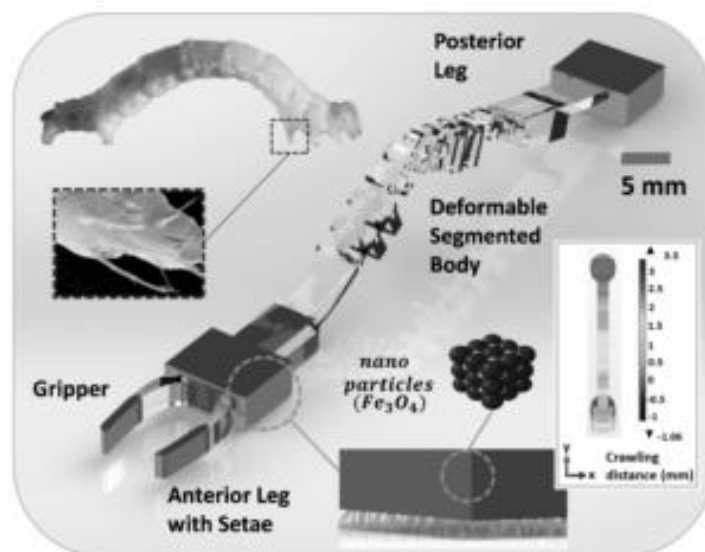


Рисунок 2.3 – Робот гусеничний [15]

Дослідження структури біоподібних роботів, свідчить що, будь-який робот має такі складові:

корпус (тіло);

система управління;

сенсорна система;  
система живлення;  
комунікаційна система;  
виконавчий механізм.

## 2.2 Система управління біоподібними роботами

Систему управління можна охарактеризувати як систему, яка може контролювати вихідну ситуацію. По суті, це пристрій або набір пристроїв, який може керувати, командувати та регулювати роботу іншого пристрою або системи, яка використовує контури керування. Так ця система може контролювати і регулювати роботу іншої системи. Система складається з різних елементів і пристроїв, які з'єднані між собою для виконання процесу. Система управління формується взаємозв'язком компонентів, і таким чином досягається її конфігурація, яка буде керувати системою. Основними компонентами системи управління є виконавчі механізми, датчики, еталонний вхід і система. Система це процес або установка, якою потрібно керувати, а виконавчий механізм перетворює керуючий сигнал в сигнал живлення. Датчик вимірює вихід системи, а еталонний вхід представляє необхідний вихід.

Системи управління допомагають контролювати рухи і функції робота і таким чином отримувати запланований результат .

Основними компонентами системи є (Рис. 2.4):

датчик: вимірює змінну системи;

контролер: виконує процес порівняння та обчислень;

модуль керування: це обладнання для виконання керуючого впливу в процесі, керуючий елемент отримуватиме сигнали від контролера і, відповідно до цього, він виконуватиме певні дії.

Датчики для мобільних роботів дозволяють взаємодіяти з навколишнім середовищем, приймати рішення в режимі реального часу і автономно виконувати поставлені завдання.





Рисунок 2.4 – Схема управління

Датчики, як правило, поділяються на дві групи: внутрішні датчики та зовнішні датчики. Внутрішні отримують інформацію про самого робота, тоді як зовнішні датчики збирають інформацію в навколишньому середовищі. Виділяють кілька типів датчиків (Табл. 2.1)

Таблиця 2.1 – Основні типи датчиків та їх характеристики

| № п/п | Датчики      | Особливості  |
|-------|--------------|--|
| 1.    | Положення    | Дозволяють роботу знати своє положення в певній зоні. Необхідні для автономної навігації та планування маршруту. Використовуються в декількох перемикачах, включаючи тактильні перемикачі бампера, кнопкові перемикачі та кінцеві вимикачі.  |
| 2.    | Наближення   | Для виявлення об'єктів, що знаходяться поблизу, без необхідності фізичного контакту з роботом. Ці датчики дуже корисні для уникнення перешкод і уникнення зіткнень, ключових функцій в автономній навігації. Ці датчики бувають двох різновидів: фоторезистори та ультразвукові датчики. |
| 3.    | Відстані     | Для вимірювання дальності переміщення між різними опорними положеннями   |
| 4.    | Зображення   | Використовуються роботом для отримання зображень навколишнього середовища. Ці датчики корисні для виявлення об'єктів, автономної навігації та планування маршруту  |
| 5.    | Температури  | Пристрої, які дозволяють роботу вимірювати температуру навколишнього середовища  |
| 6.    | Освітленості | Пристрої, які дозволяють роботу визначити стан освітленості. Використовують два різних типи датчиків освітленості: фотоелектричні елементи та фоторезистори.   |

Вихід, вироблений роботизованою системою, називається станом та позначається через  $x$ . Стан залежить від його попередніх станів, стимулу (сигналів), що подається на виконавчі механізми та фізики навколишнього середовища. Станом може бути будь-яке положення, швидкість, кутова швидкість, сила тощо. Роботи не можуть визначити точний стан  $x$ , але вони можуть оцінити його за допомогою датчиків, прикріплених до них. Ці оцінки позначаються через  $y$ . Інженер-робототехнік несе відповідальність за вибір досить датчиків або за те, щоб добре відкалібрувати датчики, щоб вони могли виробляти  $y \sim x$ .

Еталон – стан мети, якого ми хочемо досягти, позначається за допомогою  $r$ . Помилка – різниця між еталоном і оцінкою називається похибкою. Керуючий сигнал – стимул, що виробляється/виводиться контролером, відомий як керуючий сигнал, він позначається за допомогою  $u$ .

Динаміка – її ще називають системною моделлю станції/системи, вона вказує на те, як система поводитиметься в нестатичних умовах. На динаміку впливає навколишнє середовище, яке може змінюватися і не завжди лінійно.

Рівень автономності відрізняється від робота до робота. Деякими роботами керують дистанційно люди-оператори. Інші роботи можуть працювати без будь-якого втручання людини. І велика кількість роботів покладаються як на дистанційне керування, так і на автономну поведінку.

Крім того виділяють такі типи систем:

*система з відкритим контуром* – відома як система без зворотного зв'язку. В цьому типі керуючий вплив не залежить від виходу системи; немає зворотного зв'язку і отримати необхідний вихід від такого типу системи дійсно складно.

Переваги: проста конструкція; економічність; простота в обслуговуванні; стабільність.

Недоліки: значні похибки: не надійність, будь-які зміни у вихідних даних не можуть бути виправлені автоматично.

*система управління замкнутим циклом.* У цьому типі СУ є датчик, який вимірює вихідний сигнал, і він використовує зворотний зв'язок від чутливого значення для впливу на вхідну змінну управління; вихід буде впливати на вхідну величину таким чином, що він може підтримувати необхідне вихідне значення. Для управління з розімкнутим контуром немає зворотного зв'язку, як у замкнутому циклі. Так за допомогою зворотного зв'язку в замкнутому циклі система управління здатна коригувати зміни на виході, що виникають через збурення. Функція зворотного зв'язку системи замкнутого циклу робить її автоматичною. У цій системі вихід весь час перевіряється, щоб його можна було порівняти з потрібним входом і якщо він не близький до потрібного входу, то був би сигнал про помилку. Таким чином, перевіряючи сигнал помилки, керуючі елементи в системі зроблять необхідні дії, і таким чином можна буде досягти необхідного результату.

Переваги: високий діапазон пропускну здатності; точність; стабільність.

Недоліки: дорожче, конструкція складна; потрібне додаткове обслуговування; за рахунок зворотного зв'язку коефіцієнт посилення знижується; менш стабільна.

Регулятор зворотного зв'язку передає вихід системи на контролер, і контролер порівнює цей вихід з необхідним значенням. Регулятор прямого зв'язку буде виявляти збурення безпосередньо і вживати належних заходів, щоб усунути ефект цього збурення з виходу.

Переваги регулятора зі зворотним зв'язком: вимірює контрольовану змінну; вживатиме належних заходів незалежно від джерела перешкод; знизить чутливість контрольованої змінної до збурень, а також до зміни процесу. Недоліки: коригувальні дії відбудуться лише після порушення; реакція не стабільна.

Переваги регулятора прямого зв'язку: змінна збурення; виправить порушення до того, як внесе будь-які зміни в процес. Недоліки: не дуже чутливий, тому іноді не може виміряти порушення; не буде жодних коригувальних дій для невимірних збурень.

Переваги САУ: може зменшити споживання енергії; виробнича праця скоротиться; не буде жодних людських помилок; може підтримувати експлуатаційні обмеження; захист обладнання; безперебійна робота [10].

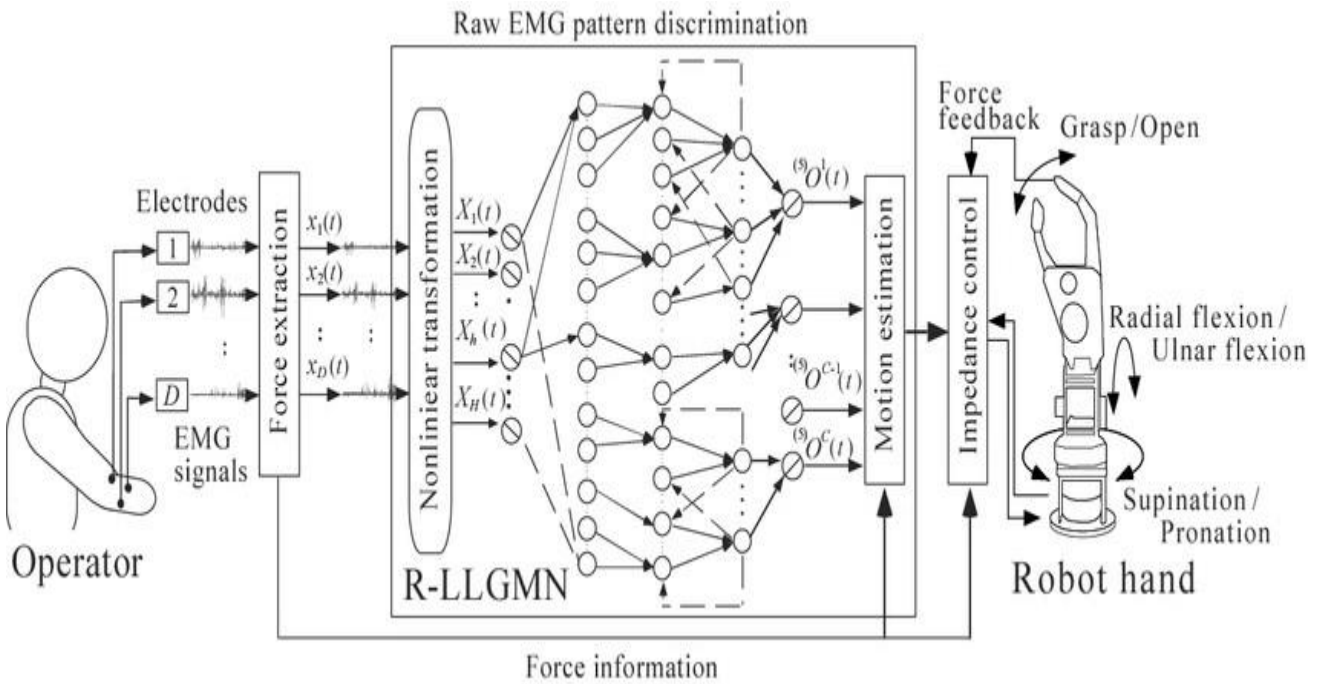


Рисунок 2.5 – Система управління для робота-руки [10]

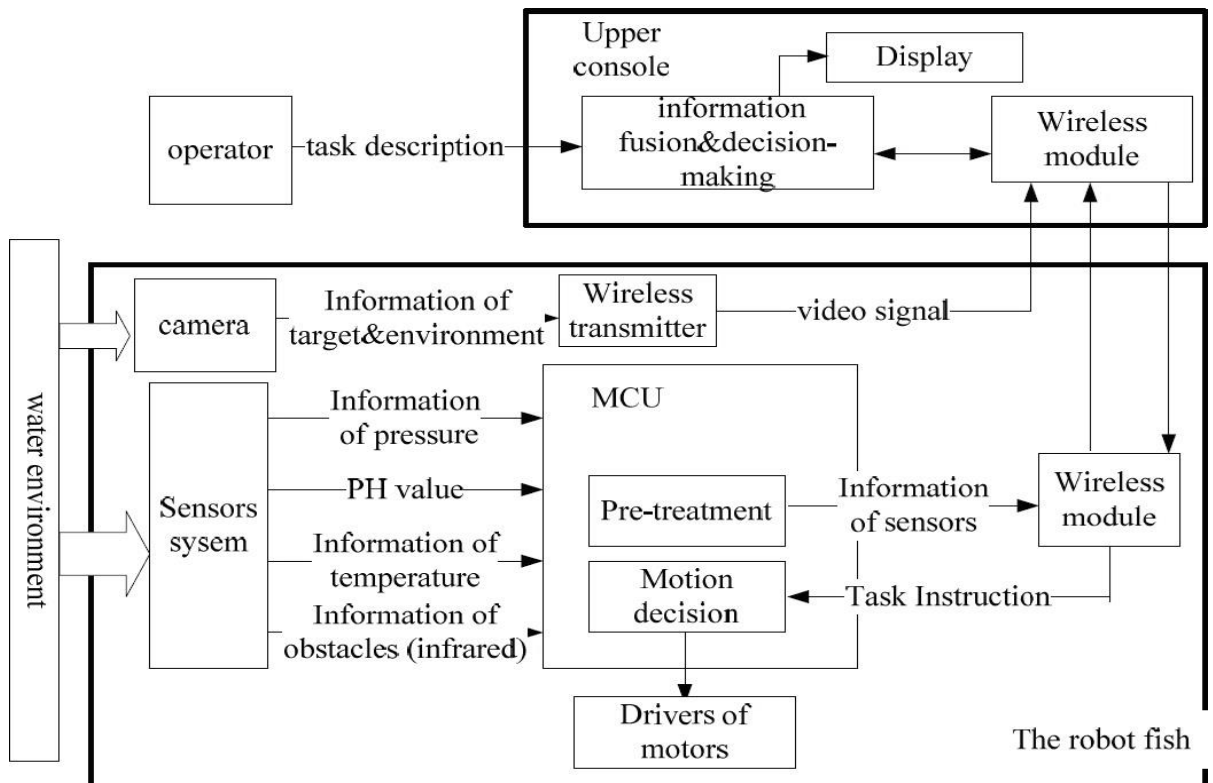
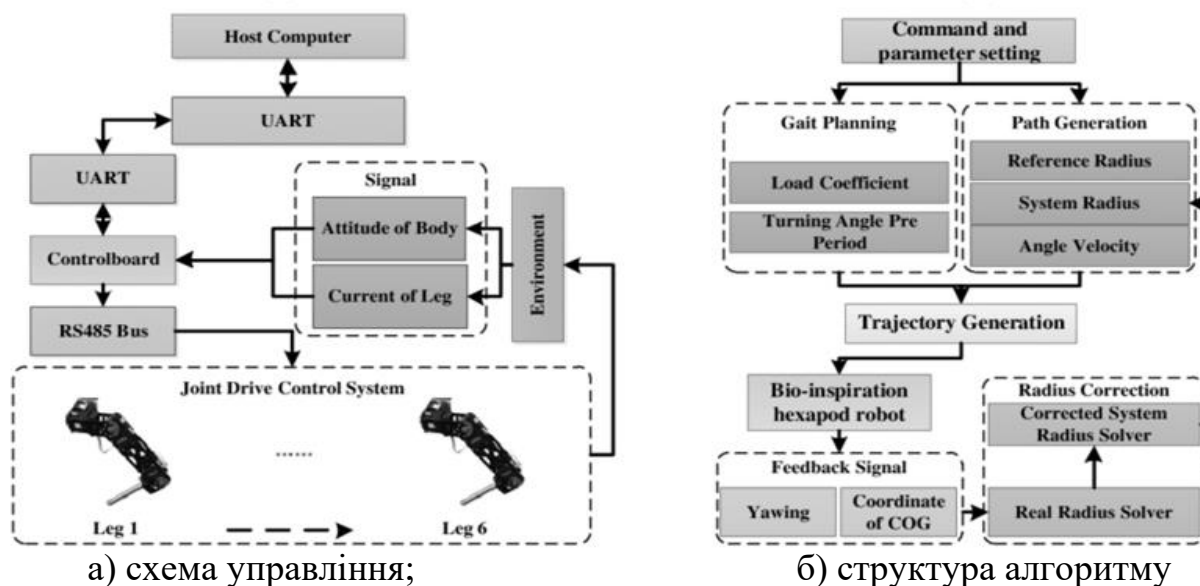


Рисунок 2.6 – Система управління роботом рибою [13]

Апаратна архітектура робота показана на Рис. 2.7. В основі головний комп'ютер, комп'ютери та серводвигуни.



а) схема управління;

б) структура алгоритму

Рисунок 2.7 – Схема та алгоритм управління біоміметичним роботом пауком [52]

Структура алгоритму показана на Рис.2.7 ( б). Вся система складається з налаштування команд і параметрів, планування ходи, генерації шляху, генерації траєкторії ноги, експериментального прототипу, сигналу зворотного зв'язку та алгоритму корекції радіуса. Команда забезпечувала вхідні дані для системи управління. Планування ходи контролювалося параметрами ходи і кутом повороту. Крім того, генерація шляху контролювалася опорним радіусом, радіусом системи та швидкістю кута повороту. На початку корекції радіус системи дорівнював опорному радіусу. Потім робот відрегулював радіус системи, щоб усунути відхилення. Коли відхилення дорівнювало 0, радіус системи збігався до значення. Вважалось, що радіус системи – це параметр, який змушує робота отримувати потрібний реальний радіус. Разом модуль планування ходи та модуль генерації шляху згенерували траєкторію кінчика стопи. За допомогою зворотної кінематики були отримані керуючі сигнали кожної ноги для приводу робота. Вся архітектура алгоритму

знаходилася в замкнутому циклі управління і могла досягати різних форм руху відповідно до параметрів [52].

На платформі віртуального прототипу, як тільки сигнал зворотного зв'язку був доданий до оригінального алгоритму кінематики, було встановлено замкнутий цикл управління. Структура моделювання показана на Рис.2.8, який складався з вхідних параметрів, кінематичного керування, віртуального прототипу, сигналу зворотного зв'язку та алгоритму корекції радіуса.

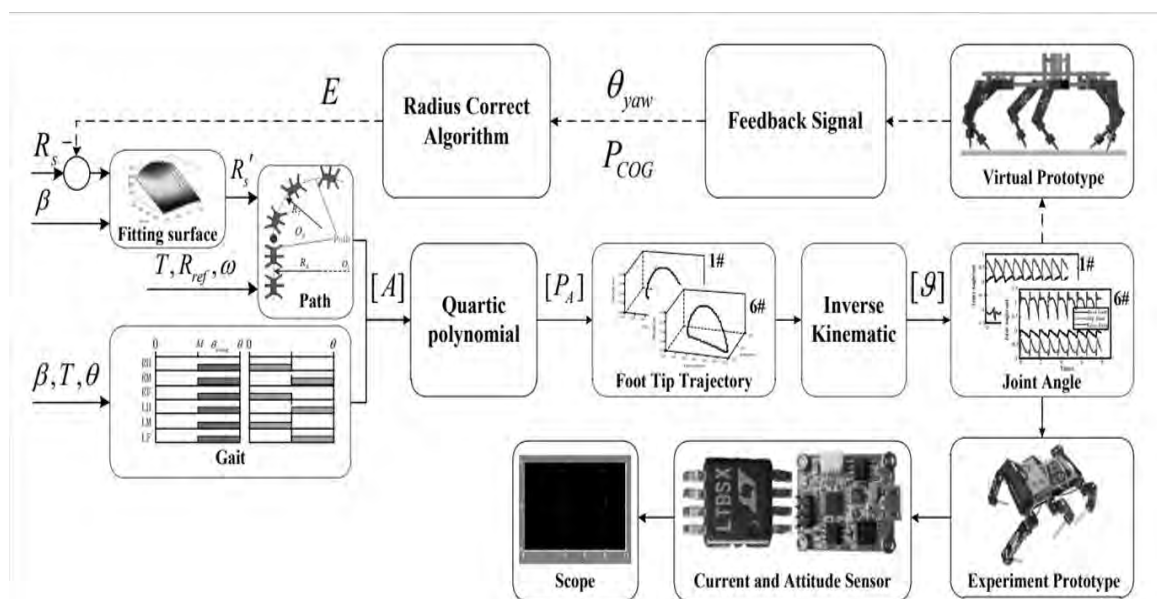


Рисунок 2.8 – Структура моделювання [52].

Мобільні роботи покладаються на алгоритми оцінки стану для визначення положення та орієнтації робота у світовій системі відліку. Для цієї мети зазвичай використовуються численні датчики, такі як інерційний вимірювальний блок, спільні енкодери та контактні датчики для виявлення контакту ноги з землею. Точність алгоритму оцінки стану відіграє вирішальну роль у надійності керування та пересування роботизованої системи. Методи злиття датчиків, що спираються на підходи фільтра Калмана, широко використовуються в літературі для оцінки стану робота.

Системи управління мобільними роботами розглядаються як ієрархічні структури базової поведінки. З цієї причини використання генетичного програмування (GP) для розробки СУ для мобільних роботів є перевагою. GP

– це техніка еволюційного обчислення (ЕО) [5], спрямована на автоматичне створення комп'ютерних програм. Основна мета GP полягає в тому, щоб дозволити комп'ютерам самопрограмувати себе, тобто, виходячи з заданих первинних форм поведінки.

Еволюційна система управління (ЕОС) складається з двох основних модулів. Перший, який називається EMSS (система виконання, управління та нагляду), відповідає за виконання та керування алгоритмом, відповідальним за весь еволюційний процес (Рис.2.9) Другий модуль під назвою DGP (розподілене генетичне програмування) є розширенням класичного алгоритму GP для підтримки еволюції системи керування роботами. DGP — це алгоритм, який відповідає за весь еволюційний процес системи керування роботами.

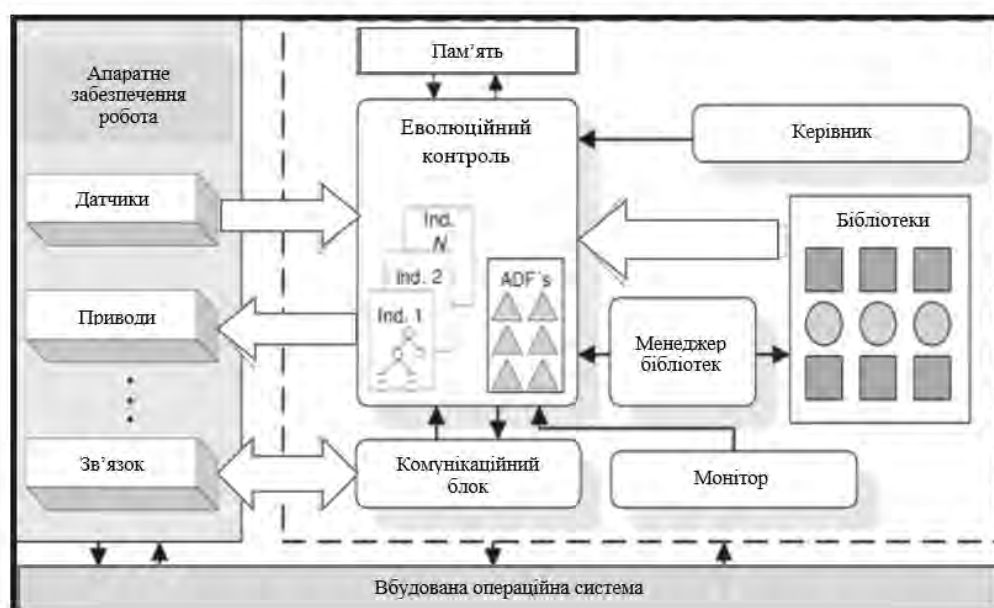


Рисунок 2.9 – Базова структура EMSS

На основі аналізу систем управління біоподібними роботами можна зробити висновок, що до основних вимог системи управління можна віднести:

здатність розуміти ключові параметри навколишнього середовища, такі як висота перешкоди і відстань між роботом і перешкодою;

можливість відстежувати стабільний стан робота в режимі реального часу та підтримувати стабільний стан робота;

контролювати запас стабільності робота в режимі реального часу, щоб уникнути аварій.

### **2.3 Напрями удосконалення системи управління біоподібними роботами в умовах Індустрії 4.0**

Індустрія 4.0 означає четверту промислову революцію, перехід від виробництва ізольованих машин з комп'ютерним керуванням до концепції розумної фабрики, де машини, матеріали та персонал пов'язані цифровими технологіями, щоб активно адаптуватися до змін у робочому процесі. Вона виникає в результаті злиття операційних технологій (ОТ) та інформаційних технологій (ІТ), що дозволяє підвищити гнучкість і виробляти унікальні індивідуальні продукти відповідно до індивідуальних вимог замовника [26]. Технології Індустрії 4.0 можна об'єднати у фізичні та цифрові технології. Фізичні технології в основному стосуються виробничих технологій, таких як адитивне виробництво. Цифрові технології в основному стосуються сучасних інформаційно-комунікаційних технологій та моделювання тощо [31, 48].

Разом з тим Індустрія 4.0 вносить свої коригування в підходи використання різних систем та технологій, зокрема і в робототехніці. Вона охоплює нові технології, які поєднують фізичний, цифровий і біологічний світи, впливаючи на всі дисципліни, економіки, галузі та уряди.

Штучний інтелект вже оточує нас, від суперкомп'ютерів, дронів і віртуальних помічників до 3D-друку, розумних термостатів, датчиків, що носяться, і мікрочіпів, менших за піщинку [32]. В Індустрії 4.0 виділяють шість керівних принципів: оперативна сумісність; віртуалізація; децентралізація рішень; ємність у реальному часі; орієнтація на обслуговування; модульність. Таким чином, злиття технологій для економії часу та прийняття певних рішень і зменшення помилок відрізняє Індустрію 4.0 від інших промислових революцій.



Віртуальна реальність (VR) відіграє важливу роль в Індустрії 4.0 і пропонує нові способи використання у робототехнічних додатках за допомогою віртуального виробництва. В даний час вона використовується для візуалізації руху машин і багатотілесних систем, використовуючи віртуальні сутності та представляючи інформацію у вигляді стандартних графіків і числових даних.

Індустрія 4.0 також фокусується на штучному інтелекті та великих даних. Роботизовані системи контролю можуть отримувати значні обсяги даних і як наслідок, дослідження роботизованого НРК також повинні включати певні зусилля щодо впровадження нових підходів до візуалізації та аналізу даних.

Іншими важливими моментами в контексті Індустрії 4.0 є хмарні обчислення та системна інтеграція. Це дозволяє підключати практично будь-що – системи до віддалених переглядачів, системи до інших підключених систем, системи на різних підприємствах і навіть по всьому світу. Стандартизовані інтерфейси для машинного зв'язку, такі як OPC UA, дозволяють системам взаємодіяти.

Моделі зчитування датчиків мають інтелект, щоб адаптуватися та працювати в широкому діапазоні реальних умов і середовищ. Моделі штучного інтелекту працюють із широким спектром платформ візуальної зйомки, починаючи від камер відеоспостереження та одномонтованих камер і закінчуючи просунутими чотириногими роботами та дронами.

Цей підхід безпосередньо вплинув на розробку інструментарію MATLAB, орієнтованого на роботизацію НРК, здатного до складного планування шляху, уникнення перешкод і зовнішньої синхронізації між роботами і пов'язаними з ними зовнішніми системами НРК. Впровадивши повне зовнішнє управління роботизованим обладнанням вдається синхронізувати збір даних НРК з позиціями на всіх точках шляху та дозволяє в майбутньому розвивати додаткову функціональність, специфічну для завдань інспекції НРК.

**Удосконалення меню бібліотек роботів.** Роботизовані інспекційні системи можуть отримувати значні обсяги даних. Як наслідок, дослідження роботизованого НРК та НРК також повинні включати певні зусилля для впровадження нових підходів до візуалізації та аналізу даних.

Для поточної програми НРК відхилення від конструкції САУ і вимоги як до грубих, так і до точних перевірок, що залежать від вимірних даних НРК, вимагають гнучкості в плануванні шляху, що виходить за рамки того, що в даний час доступно в існуючому програмному забезпеченні для програмування автономних роботів [52].

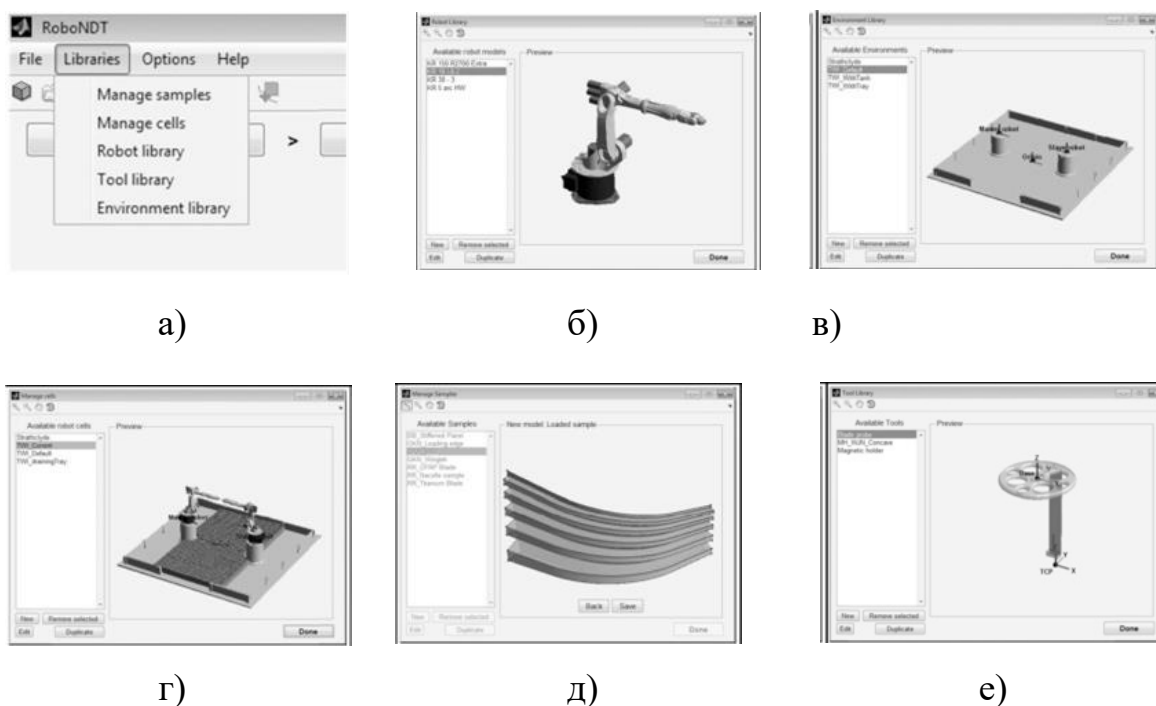


Рисунок 2.10 – Меню бібліотек (а), бібліотека роботів (б), бібліотека середовища (в), керування комірками (г), керування зразками (д) та бібліотека інструментів (е)

**Удосконалення програмного забезпечення.** Ключовими завданнями є генерація та модифікація шляху роботи інструментом, високошвидкісний збір даних НРК, інтеграція вимірювань поверхні та загальна візуалізація результатів вимірювань у зручний для користувача спосіб.

Необхідно нове програмне рішення, яке дозволяє здійснювати гнучке планування траєкторії для обстеження складних криволінійних поверхонь, які часто зустрічаються в інженерному виробництві.

Отже, вимоги сучасних систем обробки даних Індустрії 4.0 пропонують нові виклики та завдання, а також можливості для використання датчиків для НРК. Однак для того, щоб скористатися цими можливостями, необхідно здійснити трансформацію від класичного НРК до систем, які можуть легко взаємодіяти з існуючими мережами, а також виступати в якості постачальника даних для хмарних і периферійних обчислень. Як наслідок, НРК є важливим джерелом інформації для використання необхідних великих даних або відповідного аналізу даних, а також для використання машинного навчання.

Таким чином, поточні науково-дослідні проекти для NDT 4.0 мають на меті ініціювати технологічний стрибок у напрямку інтелектуальних сенсорних систем НРК. Вони надають відповідні дані та інформацію для пам'яті цифрового продукту вздовж і на всіх етапах усього циклу цінності продукту (або життєвого циклу продукту).

## **Висновки до розділу 2**

Системи управління біоподібним роботом мають важливе значення для функціонування робота та якісного отримання запланованого результату та повинна бути адаптована до реального середовища. Основними компонентами системи є датчик, контролер та модуль керування. Рівень автономності роботів відрізняється. Деякими роботами керують дистанційно люди-оператори. Інші роботи можуть працювати без будь-якого втручання людини. На сьогодні Індустрія 4.0 вносить свої коригування в підходи використання різних систем та технологій, зокрема і в робототехніці. РНРК повинен розвиватися з розробкою нових інструментів, включаючи автономну робототехніку, симуляцію віртуальних близнюків, Інтернет речей, кібербезпеку, хмарні обчислення. Оскільки це ще більше підвищує якість проведення НРК.

## РОЗДІЛ 3

### ПРОЄКТНО-КОНСТРУКТОРСЬКИЙ РОЗДІЛ

#### 3.1 Принципові підходи до конструювання біоподібного робота

В неструктурованому середовищі є механізми пересування, які неймовірно ефективні, що розвивалися протягом мільйонів років та які є безцінним джерелом для інженерного натхнення. Одним із таких ефективних механізмів пересування є локомоція змії. Широке існування цих істот майже в будь-якому середовищі, починаючи від річок і закінчуючи пустелями та лісами, чітко демонструє ефективність їхньої унікальної моделі пересування. Це свідчить про те, що змієподібні механізми пересування можуть бути ідеальними альтернативними стратегіями для пересування в неструктурованому середовищі.

На додаток до ефективного пересування в багатьох середовищах, змієподібний роботизований механізм із характеристиками, подібними до біологічних змій, забезпечує ряд переваг перед звичайними роботизованими системами. Ці переваги, включаючи малий поперечний переріз тіла, внутрішню стабільність, гіпернадлишковість і високу адаптивність, свідчать про те, що змієподібні роботи, створені за біологічним натхненням, є багатим напрямком досліджень для розробки роботизованої системи, здатної працювати в різноманітних середовищах. Крім того, пересування змії є відносно ефективним типом пересування, який споживає менше енергії порівняно з іншими біологічними формами з подібними розмірами, вагою та швидкістю. Найбільш помітними особливостями роботів-змій є їх адаптивність, універсальність, масштабованість і надійність.

Тому біоподібний робот-змія (БПРЗ) був вибраний для дослідження, враховуючи такі показники:

- функціональні можливості (використання на суші, так і воді);
- чудова прохідність;
- модульність;

герметичність та надійність від проникання пилу та рідин;  
стійкість до механічних пошкоджень.

Це універсальні механізми, що складаються з безлічі ланок і з'єднань, які дозволяють рухатися гнучко, повторюючи рухи справжньої змії та на відміну від колісних, гусеничних та ножних механізмів, забезпечують високу стабільність і, як правило, БПРЗ за своєю суттю є більш міцним, реалізуючи різні способи пересування.

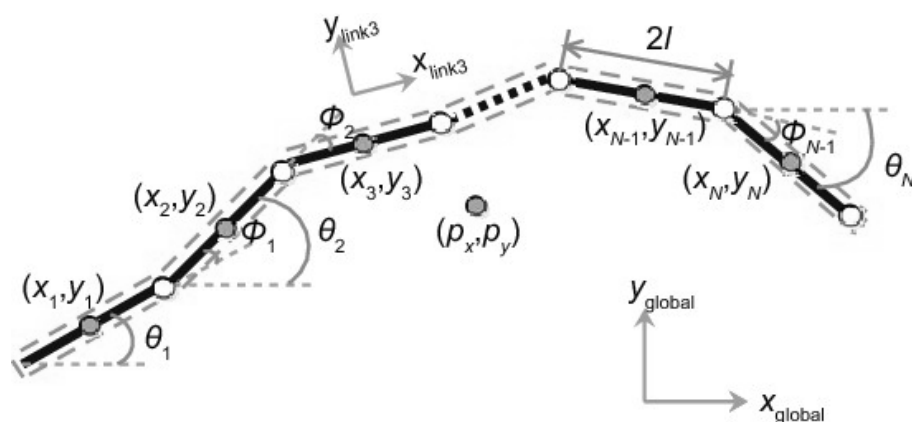


Рисунок 3.1 – Схема скелета БПРЗ [21]

Ще однією перевагою БПРЗ є їх модульна конструкція та гіпернадмірність. Є багато випадків, коли робот повинен працювати у віддалених і важкодоступних середовищах, що робить обслуговування пошкодженого робота дуже дорогим. Однак корпус модульного БПРЗ складається з кількох однакових модулів, що робить його відносно недорогим у виробництві та ремонті.

Звичайно до недоліків можна віднести перш за все обмежену вантажопідйомність та складну систему керування через значну модульність. Механізм БПРЗ, як правило, складається з безлічі послідовно з'єднаних модулів здатних згинатися в одній або декількох площинах. Багато ступенів свободи БПРЗ ускладнюють їх керування, але забезпечують потенційні навички пересування в складних умовах та можуть перевершити мобільність

колісних, гусеничних і роботів з ногами. БПРЗ мають характеристики стабільного руху та сильної пристосованості порівняно з традиційними промисловими роботами. В останні роки все більше уваги приділяється БПРЗ через їх широкі перспективи застосування [47].

Найшвидший і найпоширеніший змієподібний рух, який використовують біологічні змії, називається *латеральною/бічною хвилеподібністю*. Рух вперед досягається цією схемою руху шляхом поширення хвиль від передньої до задньої частини тіла змії, використовуючи нерівності місцевості та зариваючи її тіло в землю. Це також найбільш застосовуваний шаблон руху для БПРЗ. Змії використовують нерівності на місцевості, щоб штовхатися та просуватися вперед за допомогою бічної хвилястості. Було також виявлено, що найважливішою вимогою бічної хвилястості у біологічних змій є існування анізотропної сили тертя землі, яка дозволяє змії рухатися вперед навіть на відносно гладких поверхнях.

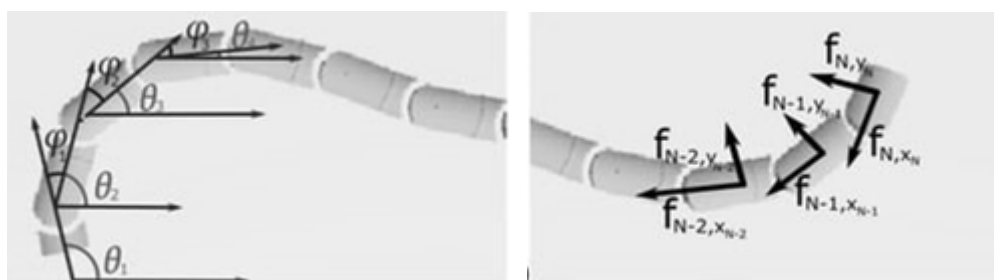
Друга модель руху називається «*бічним звиванням*» і в основному використовується біологічними зміями, які рухаються однорідними поверхнями. Частина змії лежить відносно нерухомо на землі, тоді як інша частина тіла піднята та переміщена вперед, що призводить до петляючого руху під час пересування. Зазвичай можна спостерігати серед змій, що рухаються м'якими та слизькими поверхнями, такими як піщані пустелі. У цьому типі пересування змія використовує дві окремі частини тіла як статичні точки контакту, щоб піднімати та згинати інші частини.

Ще одним типом пересування є *прямолінійна (недальна) локомоція*, який ще називають гусеничною локомоцією, в основному проявляється у важких змій. Попередні дослідження цього типу пересування показали, що при прямолінійному пересуванні зміїні ребра діють як ноги, подібно до ходьби, однак змія не пересувається на своїх ребра. При прямолінійному русі, подібно до дощових черв'яків, змія рухається прямолінійно, і на відміну від іншого типу пересування, бокова взаємодія з навколишнім середовищем не є істотною. Натомість хвиля скорочення та розслаблення, що проходить через вентральні

м'язи разом із частинами тіла, що піднімають, є основним засобом пересування.

Рух робота викликаний зміною його внутрішньої форми, подібно до руху природних змій. Суглоби робота, які з'єднують його сегменти, визначаються серією кутів, які описують його конфігурацію. Природа хвилеподібного пересування дозволяє розробляти простіші математичні моделі, які фіксують основну поведінку БПРЗ під час пересування, і які добре підходять для аналізу та проєктування управління.

Анізотропна сила тертя забезпечує рух БПРЗ, створюючи нижчі коефіцієнти тертя в поздовжньому напрямку суглобів в порівнянні з нормальним напрямком. Така різниця в коефіцієнтах дозволяє суглобам ковзати вперед.



Кути з'єднання і тяга

сили тертя в нормальному і тангенціальному напрямку.

Рисунок 3.2 – Кут з'єднання та сили тертя БПРЗ [5]

БПРЗ повинні мати здатність перемикатися між різними режимами ходи, щоб адаптуватися та долати складні умови. Для досягнення імітації руху змій необхідно використати режими пересування, засновані на серпентиноїдній кривій Хіросе і її тривимірних варіаціях [50]. Ці криві можна описати як синусоїдальні хвилі (Рис.3.3), що поширюються по тілу, одна для горизонтального руху, а інша для можливого вертикального руху, як показано нижче (3.1):

$$\alpha(n, t) = \begin{cases} A_x * \sin(\omega_x t + n * \delta_x), n = \text{odd} \\ A_y * \sin(\omega_y t + n * \delta_y + \phi), n = \text{even} \end{cases} \quad (3.1),$$

де  $n$  – число двигунів;

$A_x$  і  $A_y$  – амплітуди хвиль;

$\delta_x$  і  $\delta_y$  – просторова частота;

$\omega_x$  і  $\omega_y$  – тимчасова частота;

$\phi$  – різниця фаз між синусоїдальними.

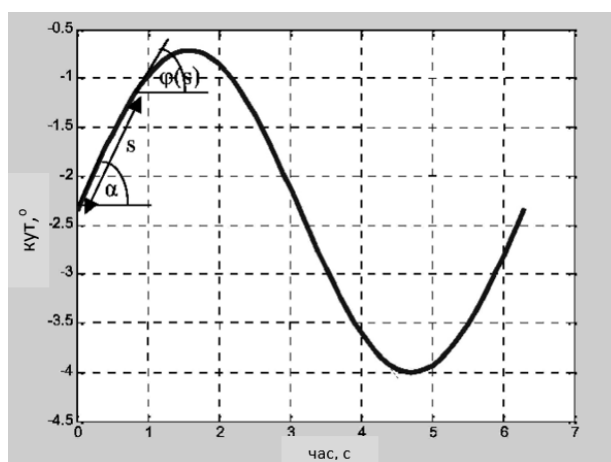


Рисунок 3.3 – Синусоїдальний кривий рух БПРЗ

Для БПРЗ, що рухаються по суші, запропоновано закон керування наведенням за лінією прямої видимості (line of sight – LOS), який демонструє експоненціальну стабілізацію бажаної прямолінійної траєкторії за заданої умови параметра відстані випередження. Для БПРЗ, що рухаються під водою, закон управління повинен обробляти течії невідомого напрямку та величини. Для цього запропоновано та показано, що інтегральний закон керування прямою видимістю (ILOS) експоненціально стабілізує бажану прямолінійну траєкторію за заданих умов на дистанції випередження та інтегральних параметрах посилення [44]. Для деяких застосувань бажано також контролювати швидкість руху робота вперед. Замість того, щоб використовувати налаштування параметрів схеми ходи на основі залежності між цими параметрами та швидкістю, які складають керування швидкістю у



розімкнутому циклі, доцільно включити керування швидкістю зі зворотним зв'язком у закон керування, вирішуючи задачу керування маневруванням. Закони управління маневруванням, засновані на біологічно натхненних віртуальних голономічних обмеженнях, пропонуються для БПЗ, що рухаються як на суші, так і під водою.

Таким чином блок керування БПЗ складається з двох основних компонентів.

- 1) контролер моделі ходи, який рухає БПЗ вперед відповідно до бічної хвилястості моделі ходи
- 2) контролер курсу, який спрямовує БПЗ на бажаний шлях, а потім уздовж нього.

*Контролер моделі ходи.* При цьому бокова хвилястість досягається шляхом керування суглобом БПЗ відповідно до синусоїдального посилення

Це означає, що спільні координати експоненціально відслідковують опорні координати.

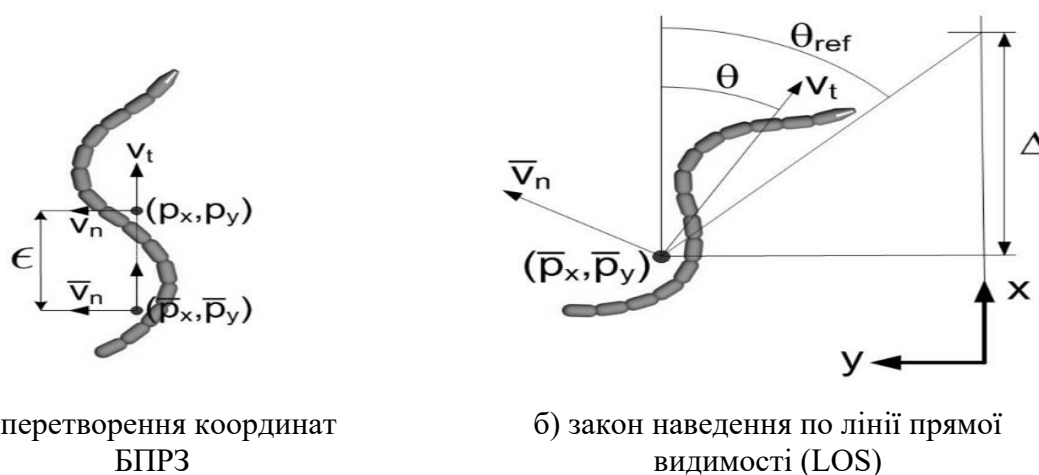


Рисунок 3.4 – Схема руху БПЗ з врахуванням LOS [51]

*Контролер курсу.* Для спрямування БПЗ на потрібний прямий шлях, використовуємо закон прямої видимості (LOS).

Контроль пересування БПРЗ і синхронне планування ходи є важким завданням через їхню багатозв'язану структуру тіла. У цей момент необхідні одночасні рухи і на послідовність ходи не повинні впливати зовнішні перешкоди. Один з методів контролю, які можна застосовувати для біоміметичних систем є CPG (Central Pattern Generators). Контроль пересування на основі CPG має такі переваги: вихідні сигнали є стабільними та демонструють граничні цикли; вони можуть керувати рухом робота без потреби у складній динамічній моделі; замкнуту структуру сенсорного зворотного зв'язку можна легко адаптувати.

CPG зустрічаються у багатьох хребетних і можуть бути моделюється як контролер пересування. Крім того, ці моделі не потребують динамічної моделі системи на відміну від звичайних контролерів. Імітуючи спинний мозок, контролер пересування на основі CPG забезпечує ритмічне та стабільні виходи. Простою та ефективною моделлю CPG є АСРО (Amplitude-Controlled Phase Oscillato). АСРО на основі осциляторів Курамото (вперше запропонована Йошікі Курамото і є математичною моделлю, що використовується для опису синхронізації) можуть виробляти ритмічні виходи проти зовнішніх перешкод завдяки своїм функціям і поведінці граничного циклу [52] Цей тип осцилятора визначається так:

$$\dot{\phi}_i = \omega_i + \sum_j^N (\mu_{ij} r_j \sin(\phi_j - \phi_i - \phi_{ij})) \quad (3.2),$$

$$\ddot{r}_i = a_r \left( \frac{a_r}{4} (R_i - r_i) - \dot{r}_i \right) \quad (3.3),$$

$$\ddot{x}_i = a_x \left( \frac{a_x}{4} (X_i - x_i) - \dot{x}_i \right) \quad (3.4),$$

$$\theta_i = x_i + r_i \cos(\phi_i) \quad (3.5),$$

Де  $\theta_i$ ,  $r_i$  і  $x_i$  знаходяться змінні стану, які визначають фазу, амплітуду та зміщення коливань, відповідно.  $R_i$ ,  $X_i$  і  $w_i$  є бажаною амплітудою, зміщенням, і частота відповідно.  $N$  кількість осциляторів з  $i$ -м і  $j$ -м осциляторами.  $a_r$  і  $a_x$  є позитивними константи швидкості конвергенції. Виходи генератора виражається як  $x_i$ . параметри  $i$  є зв'язком ваги та різниці фаз між  $i$ -м та  $j$ -м осциляторами. також визначає швидкість корекції  $j$ -го зв'язку. Спроектована модель побудована як двонаправлена мережа ланцюгового типу. Звідси:

$$\theta_i^\infty(t) = X_i + R_i \cos(w_i t + \varphi_0) \quad (3.6),$$

Тут  $\varphi_0$  початкова фаза осцилятора. Для будь-яких початкових умов виходи збігаються до бажаних параметрів керування, і на виходи не впливають зовнішні перешкоди. Таким чином, амплітуду та зсув коливань можна легко модулювати, а вихідні сигнали зв'язаних осциляторів демонструють стаціонарні стійкі моделі змійчастого руху.

**Сенсорний механізм.** При проектуванні БПРЗ необхідно враховувати такі аспекти як функціональність, простота та економічна ефективність. Досить важливим є вибір сенсорного механізму, проектування модулів та розробка системи керування для забезпечення ефективності конструкції робота для пересування по нерівній поверхні з перешкодами.

Щоб розробити ефективну схему керування БПРЗ для роботи в реальних середовищах, датчики є необхідним інгредієнтом. На відміну від людської ходьби, де доступний візуальний зворотний сигнал від очей, біологічна змія збирає інформацію з навколишнього середовища, відчуваючи контактні сили. Оскільки ці контактні сили між роботом і навколишнім середовищем відповідають за генерацію руху, такий сенсорний механізм, здається, також підходить для БПРЗ. Таку інформацію можна зібрати за допомогою датчиків

сили на поверхні ланок робота або датчика крутного моменту на кожному з'єднанні.

**Стратегії керування БПРЗ.** На відміну від багатьох процесів і простих механічних систем, у яких успішно використовуються традиційні підходи до керування на основі моделі, ці підходи непридатні для керування БПРЗ в реальному часі. Причина полягає в тому, що БПРЗ, які не оснащені пасивними колесами та не мають властивостей анізотропного тертя черевної луски їхнього природного аналога, належать до сімейства робототехнічних систем із недостатнім приводом, для яких звичайні методи керування на основі моделі є обчислювально дорогими та складними.

Отже, більшість стратегій керування пересуванням для безколісних БПРЗ засновані на генеруванні біологічно інспірованих періодичних команд кута суглоба (шаблонів ходи) для досягнення бажаного типу руху шляхом налаштування його параметрів.

1) *Стратегії управління в структурованому середовищі.* Щоб керувати БПРЗ в структурованому середовищі, пропонуються моделі ходи з різними властивостями, такими як міцність. При цьому більшість запропонованих моделей ходи мають дуже схожу структуру. Наприклад, на плоских поверхнях більшість розроблених контролерів базується на синусоїдальному паттерні ходи, що генерує кути з'єднання наступним чином [17]:

$$q_i = A \sin(\omega t + \phi(i - 1)) \quad (3.7),$$

де  $q_i$ ;  $i = 1, 2, \dots, N$  – кути з'єднання,

$N$  – кількість зв'язків,

$\omega$  – часова частота,

$\phi$  – просторова частота,

$A$  – амплітуда синусоїдальної хвилі.

Замість використання нелінійних осциляторів, таких як (3.7) введено біоінспірований осцилятор, а саме центральний генератор шаблонів (CPG). Ця

система складається з мережі з'єднаних «нейронів», здатних виробляти ритмічні рухові моделі без використання будь-яких зовнішніх даних. Використовуючи такі осцилятори, мережа CPG буде генерувати ритмічну опору для кожного суглоба. Отже, за допомогою серії послідовних ритмічних сигналів з певною різницею фаз можна генерувати опорні кути з'єднання для створення змієподібної локомоції.

2) *Стратегії управління в неструктурованому середовищі.* БПРЗ повинні мати можливість ефективно пересуватися в неструктурованому середовищі, відчувати навколишнє середовище та відповідно адаптувати форму свого тіла та рухи. Загалом, є два типи нерівностей, з якими БПРЗ повинні мати справу в реальному середовищі: 1) бічні нерівності, де перешкоди знаходяться збоку від робота; 2) вертикальні нерівності, які виникають, коли робот рухається вперед по негладких поверхнях, тобто роботи рухаються вперед по нерівній місцевості.

*Пересування в середовищах з бічними нерівностями.* Перший тип нерівностей, з якими повинен мати справу БПРЗ, коли з боків робота є деякі перешкоди, яких робот може або уникнути, або використовувати їх як точки штовхання. З використанням інформації від тактильних датчиків, встановлених на боці суглобів, запропоновано алгоритм досягнення пересування з перешкодами враховуючи, що кожна частина тіла змії змушена точно слідувати шляху, який проходить модуль голови. У результаті, коли головний модуль робота контактує з новою точкою штовхання, алгоритм підгонки кривої з подальшим методом дискретизації обчислює опорний кут для решти з'єднань для майбутніх кроків, поки нова перешкода не торкнеться головний модуль.

Іншим методом досягнення адаптивного пересування змії в середовищах з бічними нерівностями є стратегії керування на основі форми.

У стандартній роботі траєкторії повинні генеруватися для суглобів БПРЗ на основі параметризованих функцій ходи. Можна приблизно описати

фактичну форму робота, використовуючи оцінені параметри ходи, і використати цю інформацію для досягнення адаптивної локомоції.

*Пересування по поверхнях з нерівностями.* Такі нерівності на поверхні під роботом можуть бути дуже малими порівняно з розміром ланки робота, тому їх можна моделювати, змінюючи властивість тертя поверхні. Щоб розробити адаптивну схему пересування, придатну для таких середовищ можна використовували зворотний зв'язок від тертя тіла та кута нахилу, відповідно, для адаптивної зміни параметрів моделі ходи. Подібні методи також використовуються з використанням CPG, де параметри CPG налаштовуються для досягнення бажаної моделі пересування шляхом зміни частоти, амплітуди, фазових затримок або форми хвилі вихідного сигналу GPC.

Схема керування роботом наведена в Додатку В, де вхідними параметрами є бажана амплітуда, зміщення та фазове співвідношення зв'язків. Кожен осцилятор відповідає кожній ланці робота. Після отримання заданих параметрів мережі CPG генерує потрібні синусоїдальні кути, а потім ШІМ сигнали застосовуються для керування серводвигунами. Практично, спроектована мережа визначає наступні чотири системи вимоги як до регулятора амплітуди, частоти і фазовий регулятор, регулятор зсуву та вихідну величину.

Відчуття є ключем до адаптації в будь-якому робототехнічному механізмі, оскільки розумний контролер повинен збирати інформацію з навколишнього середовища та використовувати її для адаптивного керування поведінкою системи. Однак розробка такого сенсорного механізму в БПРЗ є складним завданням. На відміну від гуманоїдних роботів, де для сприйняття навколишнього середовища широко використовуються головні камери та пристрої виявлення та визначення відстані, у БПРЗ розміщення бортової камери є складним через постійні рухи всіх модулів робота. Таким чином, більшість існуючих БПРЗ, призначених для пересування в неструктурованому середовищі, оснащені певним типом датчиків крутного моменту, сили або

тиску, щоб збирати інформацію про навколишнє середовище, відчуваючи взаємодію з оточенням. Для досягнення цієї мети на деяких роботах встановлено бічні контактні перемикачі для виявлення бічного контакту з навколишнім середовищем. Інші, такі як використовували датчики тиску, прикріплені під модулями роботів. У більш пізніх роботах розглядалася конструкція з резисторами датчика сили (FSR), тензометричними датчиками та складною спеціальною системою вимірювання крутного моменту на основі кулачкового механізму для оснащення БПРЗ чутливими механізмами.

### 3.2 Математичне моделювання

Математична модель БПРЗ звичайно, залежить від його конструкції. Для класифікації різних конструкцій БПРЗ визначаємо основні властивості, такі як тип з'єднань; кількість ступенів свободи; з пасивними коліщатками або без них.

Більшість БПРЗ складаються з ланок, з'єднаних поворотними шарнірами з однією або двома ступенями свободи. У деяких роботів ланки є розтяжними (тобто призматичні з'єднання). Щоб досягти бажаної властивості тертя для бокової хвилястості, деякі БПРЗ оснащені пасивними колесами. Коли використовуються колеса, динаміка взаємодії між БПРЗ і поверхнею землі часто ігнорується.

Далі математичне моделювання різних БПРЗ поділяється на кінематику та динаміку (Додаток Б).

#### *Кінематика описує геометричний аспект руху.*

Для БПРЗ без коліс тертя між роботом та землею суттєво впливає на рух БПРЗ. Таким чином, для цих БПРЗ динаміка повинна бути змодельована для моделей пересування, таких як **бічна хвилястість**.

Переходи зі ковзанням (на основі встановленого закону тертя Кулона) і зіткнення з землею моделюються як миттєві переходи. Це призводить до точної моделі просторового кулонівського тертя, де належним чином враховується як

напрямок сили тертя, так і справжня фаза прилипання. Для безколісних роботів-змійок важливо точно описати фрикційний контакт між безколісними роботами-змійками та землею як щодо переходів із застряганням, так і щодо напрямку сили тертя під час ковзання по поверхні землі. Ця остання властивість також відрізняє безколісних БПРЗ від, наприклад, ножих механізмів, які найчастіше намагаються «прилипнути» до землі, а не ковзати по ній. Динаміка БПРЗ описується рівністю заходів, яка включає рівняння Ньютона-Ейлера для неімпульсної частини руху, а також рівняння удару. Конкретний вибір координат призводить до ефективного способу запису рівнянь системи. Установлена значущість законів сили дозволяє записати кожен конститутивний закон за допомогою одного рівняння та дозволяє уникнути явного перемикавання між рівняннями (наприклад, коли відбувається зіткнення між роботом-змією та поверхнею землі), навіть якщо це гібридна система. Це вигідно, оскільки ланки робота-змії неодноразово стикаються з поверхнею землі під час, наприклад, пересування шляхом повороту вбік.

Більшість математичних моделей, які описують динаміку руху БПРЗ, були обмежені планарним (2D) рухом, а 3D-математичні моделі БПРЗ були розроблені лише нещодавно. 3D-моделі спрощують тестування та розробку 3D-схем змієподібних рухів, таких як синус-ліфтинг і бічний рух. Фізичний механізм під назвою Open Dynamics Engine (ODE) використовувався для моделювання 15-ланкового БПРЗ замість отримання явних виразів для його динаміки в [15]. Таке програмне забезпечення дозволяє легко змінювати геометрію БПРЗ, якщо це необхідно, а час, необхідний для підготовки робочої моделі, відносно короткий [15].

Тому моделювання робота виконується за допомогою програмного забезпечення Matlab - Simulink з комбінацією інструменту SimScare, що дозволяє ефективно і швидко проводити багатотілесне моделювання, формулюючи і вирішуючи рівняння руху будь-якої механічної системи.

Під час реалізації змієподібного робота перевага надавалася модульній конструкції, оскільки використання модульної архітектури полегшує заміну



або додавання модулів, як наслідок, зменшуючи або збільшуючи ступені свободи. Поточна конструкція складається з модулів для кожної з ланок кузова, на додаток до індивідуального головного модуля та хвостового модуля.

Модель БПРЗ складається з  $n$  ланок, з'єднаних  $n - 1$  карданними шарнірами з двома ступенями свободи (тобто обертальними шарнірами). Нехай  $u \in \mathbb{R}^{6n}$  – вектор, що містить поступальну та обертальну швидкості всіх ланок робота-змійки, диференціальні міри  $du$  і  $dt$  будуть наразі вільно описані як «можлива диференціальна зміна»  $u$  і часу  $t$ . Використання диференціальних мір дозволяє миттєві зміни в швидкості, які виникають при зіткненні БПРЗ з поверхнею землі. Системні рівняння для БПРЗ тепер можна записати як:

$$Mdu - hdt - dR = \tau C^{dt} \quad (3.8),$$

яке називається рівністю мір, де  $M \in \mathbb{R}^{6n \times 6n}$  – матриця мас,  $h \in \mathbb{R}^{6n}$  складається з плавних сил,  $\tau C \in \mathbb{R}^{6n}$  містить усі моменти шарнірного приводу, а  $dR \in \mathbb{R}^{6n}$  враховує нормальні контактні сили/імпульси від землі, сили/імпульси кулонівського тертя та двосторонні сили/імпульси обмеження в суглобах.

Модель БПРЗ складається з  $n$  циліндричних ланок, які з'єднані  $n - 1$  карданними шарнірами, кожне з яких має два ступені свободи. Відстань  $L_i$  між двома сусідніми карданними шарнірами дорівнює довжині ланки  $i$ , а радіус кожної ланки  $L_{SCi}$ . Кожна ланка моделюється як циліндр довжиною  $2L_{GSi}$  з двома сферами радіусом  $L_{SCi}$ , прикріпленими до кінців ланки.

Положення та орієнтація ланки  $i$  описуються немінімальними абсолютними координатами:

$$q1 = \left[ \frac{IrGi}{pi} \right] \in \mathbb{R}^7 \quad (3.9),$$

де  $I r_{Gi} = [x_i \ y_i \ z_i]^T \in R^3$  є положенням центру ваги ланки  $i$  та вектор  $p_i = [e_{i0} \ e^{t/i}]^T$ , де  $e^{t/I} = [e_{i1} \ e_{i2} \ e_{i3}]$ , містить чотири параметри Ейлера, які використовуються для опису обертання.

Параметри Ейлера утворюють одиничний кватерніонний вектор з обмеженням  $p^{T/i} p_i = 1$ . Координати є немінімальними, оскільки кожна ланка описується 6 координатами, і абсолютними, оскільки позиція та орієнтація ланки  $i$  задані безпосередньо відносно  $I$ . Швидкість ланки  $i$  визначається як

$$u_i = \left[ \frac{I v G_i}{B_i \omega I B_i} \right] \in R^6 \quad (3.10),$$

де  $I^v G_i$  - швидкість поступального руху  $CG$  ланки  $i$ , яка дорівнює

$I^v G_i = I^v G_i$ , коли вона існує (тобто для руху без удару);

$B_i \omega I B_i$  є кутовою швидкістю системи  $B_i$  відносно кадру  $I$ , поданого в кадрі  $B_i$ .

Перетворення  $I r = R I B r$  можна виконати за допомогою матриці обертання  $R B_i = N_i \bar{N}_i$  де

$$X_i = [-e_i \ \tilde{e}_i + e_{i0} \mathbf{I}], \quad \bar{N}_i = [-e_i \ -\tilde{e}_i + e_{i0} \mathbf{I}] \quad (3.11),$$

а верхній індекс  $\tilde{\sim}$  позначає косиметричну форму вектора, тобто

$$e^{\tilde{\sim}} = \begin{bmatrix} 0 & -e_{i3} & e_{i2} \\ e_{i3} & 0 & -e_{i1} \\ -e_{i2} & e_{i1} & 0 \end{bmatrix} \quad (3.12),$$

Похідна за часом матриці обертання знайдена

$$\dot{R}_{B_i}^I = \mathbf{R}_{B_i}^I \tilde{\omega}_{I B_i} = I \tilde{\omega}_{I B_i} \mathbf{R}_{B_i}^I \quad (3.13),$$

Координати  $= [q_1^T \ \dots \ q_n^T]$  (положення та орієнтація) і швидкості  
Т усі ланки зібрані у вектори  $q$  і

$$u = [u_1^T \ \dots \ u_n^T]^T \quad (3.14),$$

Кожен карданний шарнір має 2 DOF, які керуються двома шарнірними приводами. Приводи моделюються як керовані крутні моменти, прикладені навколо осей обертання для шарніра.

В  $i + 1$  швидкість обертання навколо  $e_x$  і додатний керуючий крутний момент  $\tau_{h_i}$  для надання додатної швидкості обертання навколо  $e_V$  у  $i$ , обидва відносно ланки  $i$ . Загальний крутний момент  $\tau_{C_i} \in \mathbb{R}^3$ , прикладений до ланки  $i$ , становить

$$\tau_{C_i} = \begin{bmatrix} 0 \\ \tau_{h_i} \\ 0 \end{bmatrix} - \mathbf{R}_{B_{i-1}}^{B_i} \begin{bmatrix} 0 \\ \tau_{h_{(i-1)}} \\ 0 \end{bmatrix} + \mathbf{R}_{B_{i+1}}^{B_i} \begin{bmatrix} \tau_{v_i} \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} \tau_{v_{(i-1)}} \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \quad (3.15),$$

для  $i = 1, \dots, n$ , де матриця відносного обертання

$$\mathbf{R}_{B_{i+1}}^{B_i} = (\mathbf{R}_{B_i}^I)^T \mathbf{R}_{B_{i+1}}^I, \quad (3.16),$$

$$i \tau_{h_0} = \tau_{v_0} = \tau_{h_n} = \tau_{v_n} = 0.$$

Вектор обертових моментів, прикладених до всіх ланок  $\tau_C \in \mathbb{R}^{6n}$  дорівнює

$$\tau_C = [0_{1 \times 3} \ \tau_{C_1}^T \ 0_{1 \times 3} \ \tau_{C_2}^T \ \dots \ 0_{1 \times 3} \ \tau_{C_n}^T]^T. \quad (3.17),$$

Кожне карданне з'єднання 2 DOF приводилося в дію двома двигунами постійного струму. Опорні кути з'єднання БПРЗ надсилалися з ПК через CAN-шину на мікроконтролери з частотою 10 Гц. Положення центру середньої ланки відстежується за допомогою системи захоплення руху Vicon MX з 4 камерами (MX3) разом із Matlab Simulink.

### *Динамічне моделювання модульних БПРЗ*

де функції  $x(s)$ ,  $y(s)$ ,  $z(s)$  є диференційованими функціями, а  $s$  є параметром кривої, який зазвичай вибирається як довжина дуги кривої. За визначенням, довжину дуги кривої від початкової точки  $s_0$  до довільної точки  $s$  можна обчислити як:

$$L(s) = \int |\alpha'(\sigma)| d\sigma, \quad (3.18),$$

де  $|\alpha'$

$$|\alpha'(s)| = \sqrt{\left(\frac{dx}{ds}\right)^2 + \left(\frac{dy}{ds}\right)^2 + \left(\frac{dz}{ds}\right)^2} \quad (3.19),$$

Вибір параметра кривої  $s$  як дуги довжина:

$$L(s) = s - s_0 \quad (3.20),$$

в результаті чого:

$$|\alpha'(s)| = 1 \quad (3.21),$$

Використовуючи цей метод параметризації, положення кожної точки на тілі змії відносно початку рамки, прикріпленої до хвоста змії, визначеної в декартовій координаті, можна отримати таким чином:

$$\vec{x}(s, t) = \int \vec{u}(\sigma, t) d\sigma \quad (3.21),$$

де  $t$  позначає час,  $\vec{u}(\sigma, t) = \partial \alpha(\sigma, t)$  і  $s \in I = (0, 1)$ , нормалізована довжина  $d\sigma$  змійка, яка не змінюватиметься з часом, оскільки модульні змійки вважаються нерозширюваними.

Незважаючи на те, що ця структура моделювання на основі кривої в основному пропонується для моделювання гіпернадлишкових та/або континуальних роботів, їх також можна адаптувати для моделювання модульних БПРЗ. Для модульних БПРЗ зі скінченною кількістю модулів такі методи стають обчислювально дорогими та теоретично складними, не маючи жодних значних переваг. Таким чином, для моделювання модульних БПРЗ сегментована модель є більш вигідною.

### **3.3 Створення моделі біоподібного робота**

В останні роки технологія 3D-друку забезпечила швидкий технологічний розвиток, особливо в галузі досліджень і розробок. Адитивне виробництво дає можливість верифікувати моделі за короткий час і з невеликими витратами. У робототехніці також можна використовувати 3D-друк для перевірки правильності роботи механізмів, з'єднань, допусків на розміри та посадок. Однак слід враховувати обмеження адитивної технології. Хоча деякі елементи можна виготовити швидко й дешево, їхня механічна міцність набагато нижча, ніж у випадку з металами чи композитами.

Механічна конструкція БПРЗ складається з модулів: голови, тулуба та хвоста. Елементи будови представлено на Рис.3.5. та Додатках В – Д.

Система управління складається з 3 основних частин: головної системи управління, підлеглих систем управління і системи моніторингу.

У голову БПРЗ інтегрована система, яка в основному бере на себе роль автоматичного виявлення зовнішнього середовища, і управляє веденою системою управління за допомогою команд.

Системи управління розподілені по тілу і хвосту, завершуючи специфічну регуляцію і контроль ходи.

Система моніторингу розміщена в додатку телефону, який реалізує функцію моніторингу та відображення вибіркової інформації.

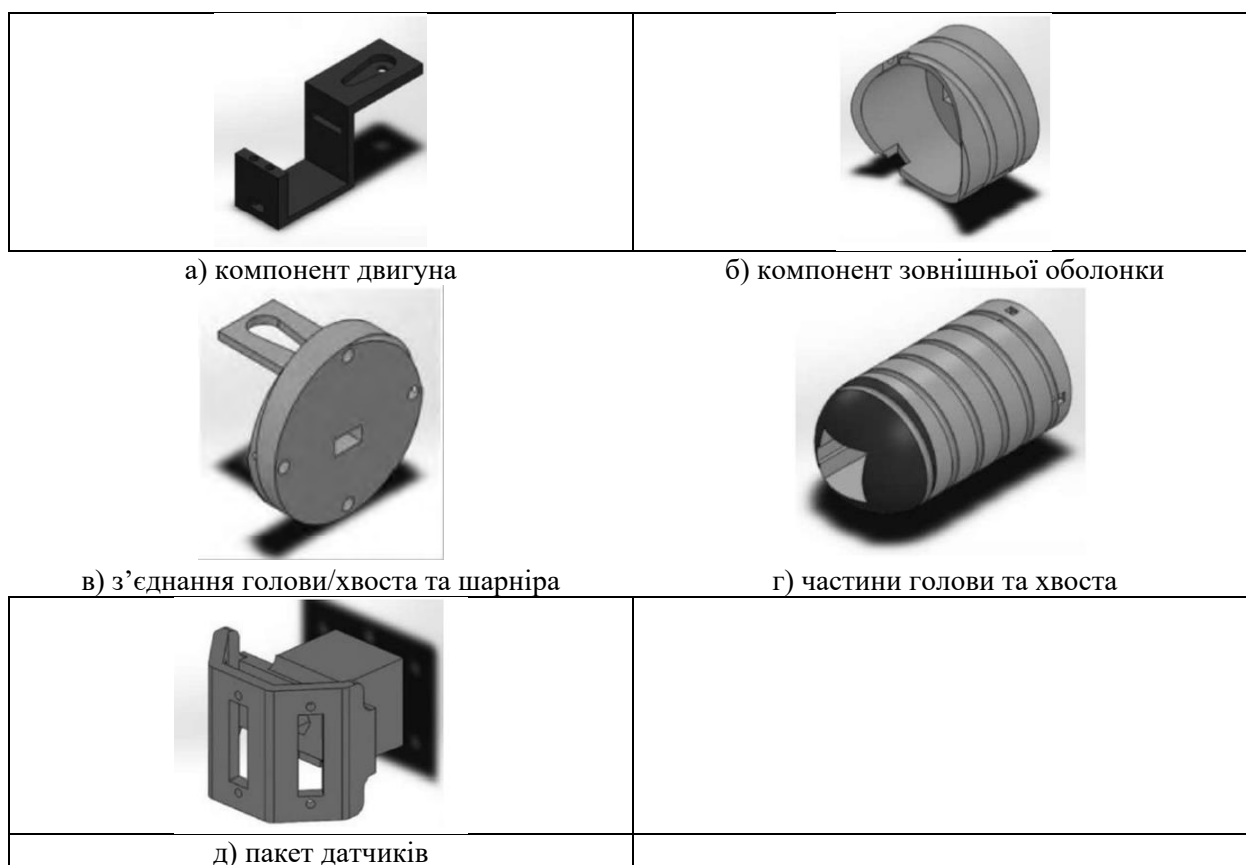


Рисунок 3.5. – Основні компоненти корпусу

Система живлення складається з модуля літєвої батареї, що перезаряджається, і модуля зі стабілізацією напруги, який відповідає енергетичним вимогам для всього змієподібного робота.

Кожен суглоб включає в себе силовий модуль в БПРЗ (Додаток Ж)

Solidworks використовується для оптимізації конструкції голови, тіла та хвоста суглобової структури змієподібного робота.

Спільні модулі моделюються таким чином, щоб задовольнити просторові вимоги до модулів літєвих акумуляторів, друкованих плат керування та двигунів.

Головна система управління складається з модуля камери, модуля лазерного далекоміра, датчика температури-вологості, датчика тиску повітря, тепловізійного датчика. Модуль камери та тепловізійний датчик збирають

інформацію про навколишнє середовище та людське сприйняття та відображають їх зображеннями. Підлеглі системи управління координуються з головною системою управління, щоб контролювати та регулювати рух БПРЗ за допомогою режиму бездротової передачі. Підлеглі системи управління генерують ШІМ-сигнали для приводу відповідних двигунів. Система моніторингу оснащена модулями WiFi і Bluetooth в якості каналів зв'язку з головною системою, яка утримує завдання управління і моніторингу в БПРЗ. Приципова схема системи управління БПРЗ наведена в Додатку К.

Структурну схему системної динаміки з'єднання БПРЗ наведено в Додатку Л.

Система моніторингу здійснюється на базі системи Android. Інтерфейс керування поділяється на два інтерфейси: захоплення камери в реальному часі в першому інтерфейсі; тепловізій, контроль ходи та виявлення датчиків у другому інтерфейсі. Контроль ходи складається з п'яти ходів: змієподібного пересування, повзучого, бічного зміщення, перекидання та лазіння.

Для БПРЗ є три режими керування: 1) режим на основі контролю ходи; 2) режим на основі функції керування серпеноїдами; 3) режим на основі СРG.

Для БПРЗ може бути використано багато різних типів приводів, таких як пневматика, електродвигуни, сервоприводи або ведучі колеса. В даному випадку пропонується рушійний механізм приводити в дію RC серводвигунами (наприклад серводвигун Dynamixel AX-12) (Рис.3.6). Цей серводвигун має вбудований мікропроцесор для забезпечення послідовного зв'язку TTL або RS-485 і швидкість послідовного з'єднання 1 Мбіт/с - 3 Мбіт/с. Він також має регульовану швидкість крутного моменту та чуйне керування з положенням, навантаженням, напругою, швидкістю та температурним зворотним зв'язком, що дозволяє відносно легко реалізувати систему керування. Серводвигуни існують вже давно і використовуються в багатьох сферах. Вони невеликі за розміром, але мають велику потужність і дуже енергоефективні. Ці особливості дозволяють використовувати їх для керування роботами та літаками з дистанційним керуванням або

радіокеруванням. Серводвигуни також використовуються в промисловому застосуванні, робототехніці, потоковому виробництві, фармацевтиці та громадському харчуванні.



Рисунок 3.6 – Серводвигун Dynamixel AX-12

Технічні характеристики: Вага: 52,9 г Розміри: 32 мм x 50 мм x 40 мм Передаточне число: 32:1 Робоча напруга: 9-12 В (рекомендована 11,1 В) Момент утримання: 0,2 Н\*м (12 В) Струм утримання: 1,4 А (12 В) Швидкість без навантаження: 470 об/хв (12 В) Мінімальний кут повороту: 0,29 градуса x 1,024 Кут повороту: в режимі актуатора – до 300 градусів, у режимі двигуна – без обмежень Управління: цифрове Протокол: напівдуплексний послідовний асинхронний (8N1) ID: 0...253 (за замовчуванням ID = 1) Швидкість інтерфейсу: 7843 бод/с... 1Мбод/с (за замовчуванням 1 Мб/с) Зворотній зв'язок: положення, температура, навантаження, напруга тощо. Матеріал: інженерний пластик Датчик положення: потенціометр

Сервоприводи керуються шляхом надсилання електричного імпульсу змінної ширини або широтно-імпульсної модуляції (ШІМ) через провід керування. Є мінімальний пульс, максимальний пульс і частота повторень. Серводвигун зазвичай може повертатися лише на 90° у будь-якому напрямку, що загалом становить 180°. Нейтральне положення двигуна визначається як положення, при якому сервопривід має однакову величину потенційного обертання як за годинниковою стрілкою, так і проти годинникової стрілки. ШІМ, що подається на двигун, визначає положення валу і на основі тривалості імпульсу, що посилається по керуючому дроту ротор повернеться в потрібне положення. Серводвигун очікує бачити імпульс кожні 20 мілісекунд (мс), а тривалість імпульсу визначатиме, як далеко обертається двигун. Наприклад, імпульс 1,5 мс змусить двигун повернутися в положення 90°. Коротший за 1,5



мс переміщує його проти годинникової стрілки до положення  $0^\circ$ , а будь-який довший за 1,5 мс повертає сервопривід за годинниковою стрілкою до положення  $180^\circ$ .

Для генерації електроенергії використовується джерело живлення 11,1 V. Для виявлення перешкод до переднього головного модуля підключені інфрачервоні датчики Sharp GP2Y0A21 (Рис.3.7). Діапазон вимірювання датчиків 10-80 см.



Рисунок 3.7 – Датчик дальності інфрачервоний Sharp GP2Y0A21

Для блоку управління встановлено 32-розрядний мікропроцесор ARM Cortex M4 . Він має 256 Кб оперативної пам'яті та 2 Мб флеш-пам'яті (Рис. 3.8)



Рисунок 3.8 – Мікропроцесор ARM Cortex-M4

Мікропроцесор ARM (Advance RISC Machine) це один з ліцензованих процесорних ядер. Перший процесор ARM був розроблений в 1978 році Кембриджським університетом, а перший ARM RISC процесор був випущений групою комп'ютерів Acorn Group в 1985 році. Ці процесори спеціально використовуються в портативних пристроях, таких як цифрові камери,

мобільні телефони, модулі домашньої мережі, технології бездротового зв'язку та інші вбудовані системи завдяки таким перевагам, як низьке енергоспоживання, розумна продуктивність тощо.

32-розрядне ядро процесора Arm® Cortex-M4 є першим ядром лінійки Cortex-M®, яке оснащено виділеними IP-блоками цифрової обробки сигналів (DSP), включаючи додатковий блок з плаваючою комою (FPU). Він розглядає цифрові програми керування сигналами, які вимагають ефективних, простих у використанні можливостей керування та обробки сигналів, таких як Інтернет речей, керування двигуном, керування живленням, вбудований аудіо, промислова та домашня автоматизація, охорона здоров'я та оздоровлення.

Мікроконтролери на базі Cortex-M4 покладаються на вбудовані вдосконалені апаратні прискорювачі DSP для обробки сигналів за допомогою математичних обчислень. Апаратний прискорювач DSP може обробляти будь-який аналоговий сигнал, наприклад, вихідний сигнал мікрофона, зворотний зв'язок від датчика, вбудованого в систему керування двигуном, або виходи від додатків злиття датчиків.

Завдяки цифровій обробці сигналів для запуску алгоритмів контуру керування потрібно менше циклів, що сприяє продуктивності та енергоефективності програми. Дійсно, коли алгоритми обробляються з використанням форматів даних Q1.15 або Float32, мікроконтролери, що працюють на Cortex-M4, пропонують набагато вищу продуктивність, ніж мікроконтролери на основі Cortex-M3.

Серводвигуни керуються сигналами ШІМ. Блок управління виконує ритмічні та одночасні рухи за алгоритмом керування та оцінює дані датчиків, отримані з входів АЦП.

Компонент двигуна призначений для монтажу як серводвигуна, так і вала двигуна. Електродвигуни та сервоприводи повинні відповідати ряду вимог, таких як розміри, крутний момент, обороти т.д. З огляду на зовнішні оболонки утворюються суглобові тіла.



Рисунок 3.9 – Деталізований вигляд сегмента - з'єднання частин БПРЗ

Головна і хвостова частини кріпляться до шарнірних з'єднань своїми частинами тіла. З'єднання двигунів проходять через кабельні канали, розташовані в зовнішніх оболонках (Рис. 3.10, Додатки М – Н).

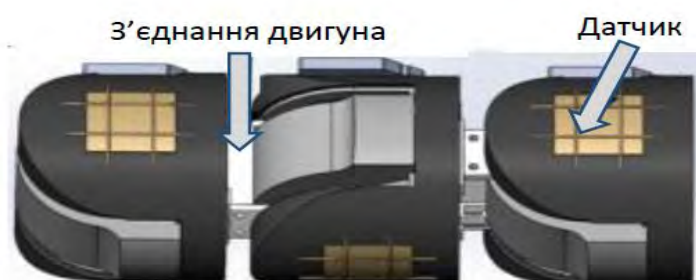


Рисунок 3.10 – З'єднання кількох сегментів тіла БПРЗ

Пакети датчиків встановлені на головній і хвостовій частинах. Ці частини призначені для трьох вертикально розташованих інфрачервоних датчиків. Кожне з'єднання з'єднане з наступною ланкою, і ця структура утворює послідовний ланковий механізм. Положення переднього датчика розміщується в тому самому напрямку на осі абсцис і ліворуч і праворуч  $\pm 45^\circ$  на інтервалах від переднього датчика. Відзначається, що сенсорний пакет монтується тільки на головний модуль. Блок керування та інші електронні частини розташовані по центру на жорсткій головці. Ширина внутрішньої головки розрахована відповідно до розміру цих частин.

Таблиця 3.1 – Робота сервоприводів у вертикальній осі

| Кут | Радіус повороту [м] | Адгезія |
|-----|---------------------|---------|
| 10° | $r = 1,78$          | добра   |
| 20° | $r = 0,89$          | добра   |
| 30° | $r = 0,6$           | добра   |

Правильно розроблена електроніка відіграє ключову роль у взаємодії біоміметичного PVDF-сенсора. Так як схема заміщення для п'єзоелектричної плівки на низьких частотах складається з послідовної ємності з джерелом напруги, то для сполучення запропонованого датчика необхідно використовувати високоомний вхідний каскад.

Слід уникати довгих з'єднувальних проводів від датчика до інтерфейсу, оскільки вони створюють ефекти ємності виток.

Адитивне виробництво полегшує створення прототипів. Однак процес проєктування повинен враховувати обмеження цього методу. Для деяких елементів, в т.ч. бампери, проставки, чохли 3D друк супер. Інші елементи, такі як шестерні, вали, колеса, не працювали так добре, особливо після тривалого використання.

### Висновки до розділу 3

Дослідження роботів-змій зростали протягом десятиліть, але залишається багато проблем, пов'язаних з моделюванням і управлінням роботами-зміями, перш ніж ці роботи зможуть адаптивно пересуватися по обмеженій місцевості. Модульні структури та алгоритми керування є двома ключовими елементами для роботів-змій, що працюють в обмеженому середовищі.

Математична модель мобільного робота, яка складається з кінематичної та динамічної частин. Кінематична модель мобільного робота служить для визначення координат поточного положення  $x$ ,  $y$  та кута  $\theta$ , який представляє поворот мобільного робота відносно обраної системи координат. Вхідними

даними в кінематичну модель є кутові швидкості  $\omega_L$ ,  $\omega_R$ , які генеруються динамічною моделлю. З рівнянь стану динамічної моделі мобільного робота можна отримати опис стану.

Результати моделювання показують, що модель заснована на законі сухого тертя Кулона, є розумною, оскільки БПРЗ рухається вперед. БПРЗ складається з трьох основних частин: жорсткої голови, включаючи інфрачервоні датчики, багатошарнірний руховий механізм тіла та пасивного хвоста, з'єднаного з останньою ланкою. Робот сконструйований як послідовний механізм зв'язку, а всі частини розроблені як модульна структура. Компоненти робота малюються в середовищі SolidWorks і виготовляються за допомогою технології 3D-друку.

Однак адаптивне керування БПРЗ в режимі реального часу на поверхнях із нерівностями потребує нових методів для боротьби із недостатньою дією, високою нелінійністю та невизначеністю моделей роботів. Включення сенсорної інформації в контролер БПРЗ для досягнення ефективного руху є ще одним важливим питанням, яке потрібно вирішити. Потрібна розробка, виробництво та валідація спеціального сенсорного механізму для БПРЗ для збору інформації та ефективного пересування на нерівних поверхнях.

Крім того, щоб підвищити ефективність хвильового руху педалі БПРЗ, також пропонується розширена стратегія контролю жорсткості, коли сигнал зворотного зв'язку з положенням поширюється вздовж тіла змії, дозволяючи роботу перелазити через численні перешкоди, не перекидаючись на одну сторону.

## РОЗДІЛ 4

### РОЗРОБКА СТАРТАП-ПРОЄКТУ

#### «Удосконалена система управління біоподібним роботом для цілей неруйнівного контролю»

##### 4.1 Опис ідеї проєкту

Ідея проєкту полягає в удосконаленні системи управління біоподібним роботом з врахуванням досягнень Індустрії 4.0. Оскільки НРК має важливе значення для визначення цілісності та управління ефективністю капітальних активів у критично важливих галузях, таких як аерокосмічна, нафтохімічна, енергетика, транспорт, трубопровідна. Включення робототехніки в сферу НРК стало поворотним моментом в еволюції цієї сфери. Сьогодні робототехніка використовується для кількох методів контролю, щоб отримати доступ до важкодоступних місць і вберегти інспекторів від небезпеки. Крім того, її використання дає можливість досліджувати конструкції зі складною геометрією. Також необхідно відмітити, що активізувалися дослідження щодо використання біологічних принципів в робототехніці для відтворення природної поведінки та вирішення складних проблем. Разом з тим Індустрія 4.0 вносить свої коригування в підходи використання різних систем та технологій, зокрема і в робототехніці. Це все підвищує ефективність функціонування системи управління біоподібним роботом та дасть можливість отримати якісний результат.

Основні методи контролю, що використовуються в робототехнічних рішеннях, включають вихрострумові, ультразвукові, візуальні/дистанційні та інші програми, які перевіряють наявність корозії, тріщин, пухирів та інших дефектів або проблем. Роботизовані механізми включають різноманітних роботів, зокрема гусеничних, колісних, змієподібних.

Ринок біоподібних роботів-змій (БПРЗ) охоплює зростаючий сектор робототехніки, присвячений розробці та розгортанню серпантинних роботизованих систем, які імітують пересування змій. Ці високошарнірні

роботи, часто оснащені численними шарнірами, датчиками та передовими механізмами керування, розроблені для навігації у складних та обмежених середовищах з безпрецедентною маневреністю. Використовуючи біомімікрію, БПРЗ досягають успіху в завданнях, де традиційні роботи на колесах або ногах стикаються з проблемами, такими як дослідження постраждалих від стихійних лих районів, перевірка трубопроводів або виконання делікатних медичних процедур. Їхня універсальна конструкція дозволяє їм долати нерівну місцевість, протискуватися крізь вузькі простори та ефективно маніпулювати навколишнім середовищем. Як технологічний рубіж, ринок БПРЗ демонструє значне зростання, оскільки галузі визнають потенціал цих змієподібних машин революціонізувати різні сфери, включаючи пошуково-рятувальні операції, промислові інспекції та застосування в охороні здоров'я.

Опис самої ідеї проєкту розкрито в табл.4.1

Таблиця 4.1 – Опис ідеї стартап-проєкту\*

| Зміст ідеї   | Напрями застосування   | Вигоди для користувача   |
|--|------------------------|--|
| Підвищення ефективності системи управління біоподібним роботом для цілей НРК | Промисловість          | Висока функціональність<br>Автоматизація виробництва,<br>Підвищення безпеки інспектора |
|  | Вищі навчальні заклади | При підготовці бакалаврів та магістрів   |

\* *Форми таблиць в розділі 4 використані на основі [1,3].*

Далі проводимо аналіз потенційних техніко-економічних переваг ідеї порівняно із пропозиціями конкурентів:

визначаємо перелік техніко-економічних властивостей та характеристик ідеї;

визначаємо попереднє коло конкурентів (проєктів-конкурентів) або товарів-замінників чи товарів-аналогів, що вже існують на ринку, та проводимо збір інформації щодо значень техніко-економічних показників для ідеї власного проєкту та проєктів-конкурентів відповідно до визначеного вище переліку;

До основних конкурентів можемо віднести Kawasaki Robotic, Medrobotic, Mitsubishi, OC Robotic, Sarcos Cor, FANUC.

Для аналізу взято продукт таких компаній:

К 1 – Sarcos Robotic, світовий технологічний лідер, який розробляє та виробляє спритні роботизовані системи, які запобігають травмам, рятують життя та створюють нові можливості. SARCOS Guardian-S провідний інструмент спостереження та перевірки, магнітний роботизований гусеничний сканер Guardian S має унікальні можливості, економічну ефективність і портативність. Робот може надійно долати складну місцевість і забезпечувати двосторонній відео-, голосовий зв'язок і передачу даних у реальному часі з безпечної відстані. У контексті інспектування операційних об'єктів та обладнання роботизовані технології можна розглядати як елемент цифрової трансформації процесу управління активами. Незважаючи на те, що існує багато технологій, які беруть участь у такій трансформації, робототехніка в процесі перевірки може забезпечити прямий цифровий зв'язок із фізичним активом.

К 2 – OC Robotics, світовий лідер у галузі роботизованих рішень для доступу до обмежених і небезпечних середовищ. Основна технологія – це роботи-змійні руки. З радіусом робочої зони понад 3 м і сукупним вигином до 180 градусів – ці дуже гнучкі роботи ідеально підходять для роботи в обмеженому та небезпечному просторі. Маючи до 20 ступенів свободи, роботи-змійні руки можуть зменшити проникнення людини в замкнутий простір, досягаючи закритих секцій літака.

К 3 – FANUC пропонує асортимент промислових роботів – понад 100 моделей. Роботами FANUC зручно керувати, і вони легко адаптуються до виробничих потреб завдяки спеціалізованим оснасткам.

Результати аналізу показників представлено в табл. 4.2.

Визначений перелік слабких, сильних та нейтральних характеристик та властивостей ідеї потенційного товару є підґрунтям для формування його конкурентоспроможності. За результатами аналізу таблиці 4.2 видно, що запропонована ідея за показниками надійності, функціональності,



екологічності та безпечності є не гіршою від товарів конкурентів, а ціна є сильною стороною.

Таблиця 4.2 – Визначення сильних, слабких та нейтральних характеристик ідеї проєкту

| № п/п | Техніко-економічні характеристики ідеї | Потенційні товари/концепції конкурентів (К) |     |    |    | W<br>(слабка сторона) | N<br>(нейтральна сторона) | S<br>(сильна сторона) |
|-------|--|---|-----|----|----|-----------------------|---------------------------|-----------------------|
|       |  | Мій проєкт                                  | К 1 | К2 | К3 |                       |                           |                       |
| 1     | Вартість розробки                      | Н   | В   | В  | С  |                       |                           | +                     |
| 2     | Вартість обслуговування                | Н   | В   | С  | Н  |                       |                           | +                     |
| 3     | Функціональність                       | В   | В   | Н  | С  |                       |                           | +                     |
| 4     | Надійність                             | В   | В   | С  | Н  |                       |                           |                       |
| 5     | Трудомісткість                         | С   | В   | В  | В  | +                     |                           |                       |
| 6     | Транспортабельність                    | В   | В   | С  | С  |                       | +                         |                       |
| 7     | Екологічність                          | В   | В   | В  | С  |                       |                           | +                     |
| 8     | Безпечність                            | В   | В   | В  | С  |                       |                           | +                     |

*В-висока; С- середня; Н- низька; н/д – немає даних*

Далі проводимо аудит технології, за допомогою якої можна реалізувати ідею проєкту (технології створення товару).

Визначення технологічної здійсненності ідеї проєкту передбачає аналіз таких складових (табл. 4.3).

Таблиця 4.3 – Технологічна здійсненність ідеї проєкту

| № п/п | Ідея проєкту   | Технології її реалізації   | Наявність технологій | Доступність технологій |
|-------|--|----------------------------|----------------------|------------------------|
| 1     | Підвищення ефективності системи управління біоподібним роботом для цілей НРК | Створення моделі           | Наявні               | Доступні               |
|       |  | Написання програми         | Наявні               | Доступні               |
|       |  | Друк моделі на 3D принтері | Наявні               | Доступні               |

На основі аналізу таблиці 4.3 можна зробити висновок, що запропонований проєкт може бути реалізований в рамках існуючих технологій.

## 4.2 Аналіз ринкових можливостей запуску стартап-проєкту

Визначаємо ринкові можливості, які можна використати під час впровадження проєкту, та ринкові загрози, які можуть перешкодити реалізації проєкту.

Такий аналіз дозволяє спланувати напрями розвитку проєкту із урахуванням стану ринкового середовища, потреб потенційних клієнтів та пропозицій проєктів-конкурентів.

Спочатку проводимо аналіз попиту: наявність попиту, обсяг, динаміку розвитку ринку (табл. 4.4).

Таблиця 4.4 – Попередня характеристика потенційного ринку  
стартап-проєкту

| № п/п | Показники стану ринку (найменування)                 | Характеристика                            |
|-------|--|---|
| 1     | Кількість головних гравців, од.                      | 2   |
| 2     | Загальний обсяг продаж, грн/ум. од.                  | 470 000                                   |
| 3     | Динаміка ринку (якісна оцінка)                       | Зростає                                   |
| 4     | Наявність обмежень для входу                         | Патент на проєкт                          |
| 5     | Специфічні вимоги до стандартизації та сертифікації  | Стандартизація та сертифікація обладнання |
| 6     | Середня норма рентабельності в галузі (або ринку), % | 50 - 70 %                                 |

Попереднє оцінювання потенційного ринку стартап-проєкту свідчить, що ринок є привабливим для входження та вкладення коштів в даний проєкт є рентабельним. Специфічні умови до стандартизації та сертифікації існують, але це дасть можливість закріпити винахід за автором проєкту та попередити копіювання товару.

Надалі визначаємо потенційні групи клієнтів, їх характеристики, та формуємо орієнтовний перелік вимог до товару для кожної групи (табл. 4.5).

Таблиця 4.5 – Характеристика потенційних клієнтів стартап-проєкту

| № п/п | Потреба, що формує ринок  | Цільова аудиторія (цільові сегменти ринку)  | Відмінності у поведінці різних цільових груп клієнтів                          | Вимоги споживачів до товару   |
|-------|---|---|--|---|
| 1     | Автоматизація виробництва та здійснення контролю виробів та інженерних споруд | Компанії будь-яких галузей промисловості . МП, СП , ФОП та інспектори, які проводять контроль на виїзді | Можливість автоматизації та контролю виробництва без участі людського фактору. | Простота експлуатації та сервісного обслуговування. Вартість експлуатації не висока |

Аналіз потенційних клієнтів стартап-проєкту свідчить, що продукт буде мати попит через простоту експлуатації та функціональність. Прості пульти дистанційного керування: дозволятимуть операторам швидко вводити курс справи та забезпечує безпечній контроль , особливо у важко доступних місцях.

На основі аналізу ринкового середовища розробляємо стратегію ринкового впровадження потенційного товару в межах проєкту.

Після визначення потенційних груп клієнтів проводимо аналіз ринкового середовища (табл. 4.6 та 4.7). Фактори в таблиці надано в порядку зменшення значущості.

Таблиця 4.6 – Фактори загроз

| № п/п | Фактор        | Зміст загрози  | Можлива реакція компанії                               |
|-------|---------------|--|--|
| 1     | Конкуренція   | Вихід конкурентів на ринок                                     | Прискорити реалізацію проєкту                          |
| 2     | Інфляція      | Зростання цін та зменшенні попиту                              | Розширити лінійку за рахунок бюджетних зразків         |
| 3     | Правовий      | Прийняття нових нпа щодо питань стандартизації чи сертифікації | Швидке реагування та залучення юридичних консультантів |
| 4     | Індустрія 5.0 | Швидкий розвиток інновацій та нових технологічних рішень       | Оптимізація моделі та відслідковування ринку інновацій |

Таблиця 4.7 – Фактори можливостей

| № п/п | Фактор                        | Зміст можливостей         | Можлива реакція компанії                         |
|-------|-------------------------------|---------------------------|--|
| 1     | Зростання економіки           | Зростання попиту на товар | Збільшення виробництва та розширення ринку збуту |
| 2     | Інтернаціоналізації економіки | Розширення ринку збуту    | Збільшення виробництва та відкриття філій        |
| 3     | Індустрія 5.0                 | Розширення лінійки товару | Використання нових технологій                    |
| 4     | Фіскальний                    | Зменшення оподаткування   | Розширення компанії                              |

Для успішного просування на ринку потрібно регулярно оцінювати фактори загроз та можливостей, щоб вчасно реагувати на позитивні та негативні виклики.

Надалі проводимо аналіз пропозиції, визначаємо загальні риси конкуренції на ринку (табл. 4.8).

Таблиця 4.8 – Ступеневий аналіз конкуренції на ринку

|   | Особливості конкурентного середовища                      | В чому проявляється дана характеристика        | Вплив на діяльність підприємства (можливі дії компанії, щоб бути конкурентоспроможною) |
|---|---|--|--|
| 1 | Тип конкуренції – олігополія                              | Невелика кількість компаній на ринку           | Підвищення якості та розширення лінійки  |
| 2 | За рівнем конкурентної боротьби міжнародна                | Представлені більшою мірою міжнародні компанії | Вихід на міжнародний ринок   |
| 3 | За галузевою ознакою міжгалузєва                          | Торкається багатьох галузей                    | Розширення функціоналу   |
| 4 | Конкуренція за видами товарів - товарно видова            | Пропонуються товари одного виду                | Проста в користуванні  |
| 5 | За характером конкурентних переваг цінова та технологічна | Вартість залежить від вхідних матеріалів       | Вибір найбільш оптимального варіанту щодо якості та ціни                               |
| 6 | За інтенсивністю інноваційна                              | Використання досягнень Індустрії 4.0           | Інвестування у розробку та дослідження   |

Після аналізу конкуренції проводимо більш детальний аналіз умов конкуренції в галузі за М.Портером (табл. 9). Ця модель дозволяє проаналізувати рівень конкуренції в конкретній галузі та тиск різних факторів на бізнес.

Структура аналізу складається з таких конкурентних складових:

1) галузева конкуренція (ступінь конкуренції між існуючими компаніями) — гостра конкуренція призводить до зниження потенціалу прибутку для компаній тієї ж галузі. В нашому випадку конкурентна боротьба відсутня, оскільки питанням використання біоподібних роботів в Україні не досить поширене серед фірм. Щодо міжнародного ринку, то світових лідерів використання біоподібних роботів в НРК не багато.

2) потенційні конкуренти це науково-дослідні лабораторії та центри великих компаній, які займаються інноваційними розробками та удосконаленням різних моделей біоподібних роботів. Звичайно вихідних їх на ринок може вплинути на цінову пропозицію та підвищити конкуренції між ключовими гравцями, які прагнуть покращити функціональність роботів. Компанії інвестують значні кошти в дослідження та розробки, щоб подолати технічні обмеження та розширити сферу застосування;

3) постачальники не мають суттєвого впливу, оскільки існує інтернет ринок та можливість придбання матеріалів за межами країни і відсутність цінової монополії на товари;

4) клієнти не мають потужного впливу через специфіку використання товару для потреб НРК;

5) товари замітники це можуть бути звичайні прилади для НРК, але їх функціональні можливості набагато нижчі від запропонованої моделі.

Таблиця 4.9 – Аналіз конкуренції в галузі за М. Портером

| Складові аналізу | Прямі конкуренти в галузі               | Потенційні конкуренти                | Постачальники                  | Клієнти                                   | Товари заміник                      |
|------------------|---|--------------------------------------|--------------------------------|---|-------------------------------------|
|                  | Міжнародні компанії, НДІ та лабораторії | Бар'єри входження на ринок відсутні  | Ринок постачальників достатній | Якість діагностики виробу                 | Інші прибори для НРК та роботи      |
| Висновок         | Конкурентна боротьба відсутня           | Вхід на ринок можливий в перспективі | Умови роботи не диктують       | Клієнти не диктують умови роботи на ринку | Обмежень для роботи на ринку не має |

За результатами аналізу таблиці можна зробити висновок що цілком реально зайняти достойну нішу. Міжнародні компанії наразі не досить присутні в Україні.

На основі аналізу конкуренції а також із урахуванням характеристик ідеї проєкту, вимог споживачів до товару та факторів маркетингового середовища визначаємо та обґрунтовуємо перелік факторів конкурентоспроможності. Аналіз оформлюємо в табл. 4.10

Таблиця 4.10 – Обґрунтування факторів конкурентоспроможності

| № п/п | Фактор конкурентоспроможності | Обґрунтування   |
|-------|-------------------------------|---|
| 1     | Якість продукту               | Належна якість дозволить закріпитися на ринку   |
| 2     | Ціна                          | Ціна доступна для споживача   |
| 3     | Обслуговування                | Простота керування та можливість обслуговування   |
| 4     | Патент                        | Наявність таких документів не дає можливості використання нашої технології конкурентами |

За визначеними факторами конкурентоспроможності проводимо аналіз сильних та слабких сторін стартап-проєкту (табл. 11).

Таблиця 4.11 – Порівняльний аналіз сильних та слабких сторін

| № п/п | Фактор конкурентоспроможності | Бали 1-20 | Рейтинг товарів-конкурентів |    |    |   |    |    |    |
|-------|-------------------------------|-----------|-----------------------------|----|----|---|----|----|----|
|       |                               |           | -3                          | -2 | -1 | 0 | +1 | +2 | +3 |
| 1     | Якість продукту               | 18        |                             |    |    |   |    |    |    |
| 2     | Ціна                          | 17        |                             |    |    |   |    |    |    |
| 3     | Функціональність              | 19        |                             |    |    |   |    |    |    |
| 4     | Обслуговування                | 17        |                             |    |    |   |    |    |    |
| 5     | Патент                        | 16        |                             |    |    |   |    |    |    |

Фінальним етапом ринкового аналізу можливостей впровадження проєкту є складання SWOT-аналізу (матриці аналізу сильних (Strength) та слабких (Weak) сторін, загроз (Troubles) та можливостей (Opportunities) (табл. 4.12) на основі виділених ринкових загроз та можливостей, та сильних і слабких сторін (табл.4. 11). SWOT-аналіз простий для розуміння і є чудовою відправною точкою для розгляду стратегічного вибору.

Перелік ринкових загроз та ринкових можливостей складається на основі аналізу факторів загроз та факторів можливостей маркетингового середовища. Ринкові загрози та ринкові можливості є наслідками (прогнозованими результатами) впливу факторів, і, на відміну від них, ще не є реалізованими на ринку та мають певну ймовірність здійснення.

Таблиця 4.12 – SWOT аналіз стартап-проєкту

| Сильні сторони  | Слабкі сторони   |
|---|--|
| Доступність.<br>Ергономічність.<br>Модульність.<br>Універсальність.<br>Функціональність         | Фінансових ресурси значні для розробки                                 |
| Можливості  | Загрози  |
| Підвищення якості виробів<br>Використання досягнень Індустрія 4.0<br>Вихід на міжнародний ринок | Сертифікація та стандартизація<br>Інфляція<br>Поява новіших технологій |

На основі SWOT-аналізу розробляємо альтернативи ринкової поведінки (перелік заходів) для виведення стартап-проекту на ринок та орієнтовний оптимальний час їх ринкової реалізації з огляду на потенційні проекти конкурентів, що можуть бути виведені на ринок .

До них можна віднести:

Поступальний прохід – перехід до іншого атрактора на основі поступового досягнення стратегічних цілей вздовж їхньої ієрархії

Модель забезпечення конкурентних переваг, яка базується на парадигмі стратегічного менеджменту. Її перевагою є те, що вона розглядає усі можливі варіанти формування конкурентних переваг на ринку: від розробки нового продукту і підвищення якості товару та послуг – до ефективного маркетингу, оптимальної цінової політики, зниження витрат, використання прогресивних технологій та інструментів.

Визначені альтернативи аналізуються з точки зору строків та ймовірності отримання ресурсів (табл. 4.13).

Таблиця 4.13 – Альтернативи ринкового впровадження стартап-проекту

| п/п | Альтернативна стратегія   | Ймовірність отримання ресурсів | Строки реалізації |
|-----|---|--------------------------------|-------------------|
| 1   | Стратегія нейтралізації ринкових загроз сильними сторонами стартапу           | Середня                        | Довгострокова     |
| 2   | Стратегія компенсації слабких сторін стартапу наявними ринковими можливостями | Висока                         | Короткострокова   |

Після аналізу зазначаємо обрану альтернативу. З означених альтернатив обирається та, для якої: а) отримання ресурсів є більш простим та ймовірним; б) строки реалізації – більш стислими. В нашому випадку це стратегія компенсації слабких сторін стартапу наявними ринковими можливостями.



### 4.3 Розроблення ринкової стратегії проєкту

При розробленні ринкової стратегії першим кроком передбачається визначення стратегії охоплення ринку: опис цільових груп потенційних споживачів (табл. 4.14).

Таблиця 4.14 – Вибір цільових груп потенційних споживачів

| № п п  | Опис профілю цільової групи потенційних клієнтів. | Готовність споживачів сприйняти продукт. | Орієнтований попит в межах цільової групи. | Інтенсивність конкуренції в сегменті. | Простота входу в сегмент. |
|--|---|--|--|---------------------------------------|---------------------------|
| 1  | ФОП   | Низька                                   | Низький                                    | Низька                                | Низька                    |
| 2  | Малі підприємства                                 | Середня                                  | Високий                                    | Низька                                | Висока                    |
| 3  | Середні підприємства                              | Середня                                  | Середній                                   | Середня                               | Середня                   |
| 4  | Великі компанії                                   | Висока                                   | Середній                                   | Висока                                | Низька                    |
| Які цільові групи обрано: великі компанії, за сприятливих обставин можна зайти у цільову групу середніх підприємств. |   |  |  |                                       |                           |

За результатами аналізу потенційних груп споживачів (сегментів) обираємо цільові групи та визначаємо стратегію охоплення ринку.

Для нашого проєкту зосереджуємося на одному сегменті і обираємо стратегію концентрованого маркетингу. Ця стратегія спрямована на задоволення потреб окремих фокус-груп споживачів. Її використання дає підприємству не лише можливість виокремити для себе цільовий сегмент, але й скоротити власні витрати за рахунок зменшення частки ринку, що обслуговується. Така стратегія вимагатиме безпосередньої близькості до споживача та наявності мережі власних представництв за кордоном. Спеціалізація на конкретному сегменті дозволяє отримати додатковий прибуток і створити імідж фірми, що дбає про смаки й вподобання конкретних споживачів, проте водночас така діяльність пов'язана з ризиком бути витісненим підприємствами, що застосовують стратегію диверсифікації. Тому потрібно вкладати кошти на інноваційні розробки.

Для роботи в обраному сегменту ринку формуємо базову стратегію розвитку (табл. 4.15).

Таблиця 4.15 – Визначення базової стратегії розвитку

|   | Обрана альтернатива розвитку проекту   | Стратегія охоплення ринку            | Ключові конкурентоспроможні стратегії відповідно до обраної альтернативи | Базова стратегія розвитку |
|---|--|--------------------------------------|--|---------------------------|
| 1 | Продаж концепції зацікавленим сторонам | Стратегія концентрованого маркетингу | Швидке отримання прибутку без витрат та ризиків.                         | Стратегія спеціалізації   |

Базовою стратегію розвитку вибираємо стратегію спеціалізації, яка передбачає концентрацію на потребах одного цільового сегменту, без прагнення охопити увесь ринок. Мета тут полягає в задоволенні потреб вибраного цільового сегменту краще, ніж конкуренти. Це пов'язано, перш за все зі специфікою продукту – біоподібними роботами для використання в НРК. Ринок роботів інколи стикається з помітними обмеженнями, пов'язаними з технологічними проблемами та фінансовими можливостями. Тому така стратегія може спиратися як на диференціацію, так і на лідерство по витратах, або і на те, і на інше, але тільки у рамках цільового сегменту. Слабкою стороною, є те, що низька ринкова доля у разі невдалої реалізації стратегії може істотно підірвати конкурентоспроможність компанії. Тому потрібно здійснювати постійний моніторинг ринку та приймати відповідні рішення. Крім того важливим є використання інноваційних продуктів та можливість співпраці з іншими партнерами для конкурентоздатності на ринку.

Наступним кроком вибираємо стратегію конкурентної поведінки (табл. 4.16).

Таблиця 4.16 – Визначення базової стратегії конкурентної поведінки.

| Чи є проєкт першопрохідцем на ринку? | Чи буде компанія шукати нових споживачів або забирати існуючих у конкурентів? | Чи буде компанія копіювати основні характеристики товару конкурента і як? | Стратегія конкурентної поведінки.    |
|--------------------------------------|---|---|--------------------------------------|
| Ні                                   | Так   | Ні  | Стратегія зайняття конкурентної ніші |

Щодо базової стратегії конкурентної поведінки, то обираємо стратегію заняття конкурентної ніші (стратегія фахівця або нішера), оскільки в якості цільового ринку вибираємо один або декілька ринкових сегментів. Безумовно, головним завданням буде постійна турбота про підтримку і розвиток своєї конкурентної переваги, формування лояльності і прихильності споживачів, підтримка вхідних бар'єрів.

На основі вимог споживачів з обраних сегментів до постачальника (стартап-компанії) та до продукту, а також в залежності від обраної базової стратегії розвитку (табл. 4.15) та стратегії конкурентної поведінки (табл. 4.16) розробляємо стратегію позиціонування (табл. 4.17), що полягає у формуванні ринкової позиції (комплексу асоціацій), за яким споживачі мають ідентифікувати торгівельну марку/проєкт.

Таблиця 4.17 – Визначення стратегії позиціонування.

| Вимоги до товару цільової аудиторії  | Базова стратегія розвитку | Ключові конкурентоспроможні позиції власного стартап проєкту | Вибір асоціацій, які мають сформувати комплексну позицію власного проєкту. |
|--|---------------------------|--|--|
| Можливість контролю виробів нестандартної, складної форми та внутрішньої структури.<br>Компактність та легкість.<br>Функціональність<br>Доступна ціна. | Стратегія спеціалізації   | Низька ціна.<br>Мобільність<br>Функціональність              | Надійно<br>Безпечно<br>Доступно  |

#### 4.4 Бізнес модель та розроблення маркетингової програми стартап-проєкту

Першим кроком при розробленні маркетингової програми проєкту є формування *маркетингової концепції товару*, який отримає споживач. Для цього у табл. 4.18 підсумовуємо результати попереднього аналізу конкурентоспроможності товару.

Таблиця 4.18 – Визначення ключових переваг потенційного товару.

| № п/п | Потреба   | Вигода, яку пропонує товар.                                      | Ключові переваги перед конкурентами (існуючі або такі, що потрібно створити).                |
|-------|---|--|--|
| 1     | Можливість контролю виробів нестандартної, складної форми та внутрішньої структури. | Доступність.<br>Мобільність.<br>Модульність.<br>Функціональність | Найдоступніша ціна на ринку<br>Інноваційний підхід.<br>Використання досягнень Індустрії 4.0. |

Надалі розробляємо трирівневу маркетингова модель товару: уточняємо ідея продукту та/або послуги, його фізичні складові, особливості процесу його надання (табл. 4.19).

Таблиця 4.19 – Опис трьох рівнів моделі товару

| Рівні товару  | Сутність та складові |   |      |               |
|---|----------------------|---|------|---------------|
| I.Товар задумом   | за                   | Можливість використовувати у важкодоступних та небезпечних місцях при НРК |      |               |
| II.Товар реадьному виконанні  | у                    | Властивості/<br>характеристики  | М/Нм | Вр/Тх/Тл/Е/Ор |
|   |                      | функціональність  | Нм   | Тх            |
|   |                      | доступність   | Нм   | Вр            |
|   |                      | якість  | Нм   | Е             |
|   |                      | Якість: розробляється на базі існуючих стандартів                         |      |               |
| Пакування: пакування та інструкція  |                      |   |      |               |
| III.Товар підкріпленням   | із                   | До продажу: доставка та гарантійний термін                                |      |               |
|   |                      | Після продажу: сервісне обслуговування на протязі 3 років                 |      |               |
| Товар буде захищено від копіювання за рахунок захисту інтелектуальної власності, патент, сертифікат |                      |   |      |               |

Необхідно відмітити, що проєкт буде захищено від копіювання. Захист може бути організовано за рахунок захисту ідеї товару (захист інтелектуальної власності), або ноу-хау, чи комплексне поєднання властивостей і характеристик, закладене на другому та третьому рівнях товару.

Наступним кроком є визначення цінових меж, якими необхідно керуватись при встановленні ціни на потенційний товар (остаточне визначення ціни відбувається під час фінансово-економічного аналізу проєкту), яке передбачає аналіз ціни на товари-аналоги або товари субститути, а також аналіз рівня доходів цільової групи споживачів (табл.4.20).

Аналіз проводиться експертним методом.

Таблиця 4.20 – Визначення меж встановлення ціни

| № п/п | Рівень цін на товарозамінники, тис. грн | Рівень цін на товари-аналоги, тис. грн | Рівень доходів цільової групи споживачів, тис. грн | Верхня та нижня межа встановлення ціни та товар/послугу, тис.грн |
|-------|---|--|--|--|
| 1     | 55 000 – 320 000                        | 2 480 – 3 700                          | Високий  | 1200 – 2000  |

Наступним кроком є визначення оптимальної системи збуту, в межах якого приймається рішення (табл. 4.21). На першому етапі реалізації проєкту збут буде проведено власними силами, далі після розширення ринку будуть залучатися посередники;

Таблиця 4.21 – Формування системи збуту

| № п/п | Специфіка закупівельної поведінки цільових клієнтів | Функції збуту, які має виконувати постачальник товару | Глибина каналу збуту | Оптимальна система збуту      |
|-------|---|---|----------------------|-------------------------------|
| 1     | Проведення попереднього тестування                  | Своєчасне надання продукту, надання гарантій          | Канал першого рівня  | Реклама вже готової продукції |

Останньою складовою маркетингової програми є розроблення концепції маркетингових комунікацій, що спирається на попередньо обрану основу для позиціонування, визначену специфіку поведінки клієнтів (табл. 4.22)

Таблиця 4.21 – Концепція маркетингових комунікацій

| № п/п | Специфіка поведінки цільових клієнтів | Канали комунікацій, якими користуються цільові клієнти | Ключові позиції, обрані для позиціонування | Завдання рекламного повідомлення                | Концепція рекламного звернення       |
|-------|---------------------------------------|--|--|---|--------------------------------------|
| 1     | Звичайна                              | Виставки, Інтернет                                     | Презентації                                | Розкрити функціональність та доступність виробу | Точність контролю в будь-якому місці |

В результаті проведено аналізу розроблено ринкову (маркетингову) програму, що включає в себе концепції товару, збуту, просування та попередній аналіз можливостей ціноутворення, спирається на цінності та потреби потенційних клієнтів, конкурентні переваги ідеї, стан та динаміку ринкового середовища, в межах якого буде впроваджено проєкт, та відповідну обрану альтернативу ринкової поведінки.

Проведений аналіз свідчить, що є можливість ринкової комерціалізації проєкту, попит на товар є, ринок динамічний залежатиме від інновацій та новітніх технологічних розробок. Ключовими перевагами є функціональність, мобільність та доступність продукту. Проєкт є перспективним з огляду на потенційні групи клієнтів та стан конкуренції. Цільова група – великі компанії, які проводять інспектування виробів в різних умовах, особливо для важкодоступних ба небезпечних місцях. Є можливість виходу на міжнародний ринок та кооперація з партнерами. Як альтернатива може бути запропонована концепція проєкту та створення спільного проєкту.

Головним завданням проєкту на початковому етапі його існування є перетворення ідеї проєкту у працюючу бізнес-модель, що починається із

формування концепції товару (послуги) для визначеної клієнтської групи за наявних ринкових умов.

Бізнес-модель — це план, який реалізується компанією для отримання доходу в результаті своєї діяльності. Бізнес-модель дозволяє трансформувати бачення ідеї та стає передумовою побудови оптимальної структури реалізації стартап-проєкту, яка включає в себе донесення цінності до споживчого сегменту, визначення необхідних для реалізації ідеї ресурсів, вибір ключових партнерів, передбачення ефективних каналів збуту, оптимізацію витрат при створенні продукту та доведенні його до клієнтів. Ефективна бізнес-модель може створювати конкурентні переваги, такі як ефективність виробництва, інновації, відмінне обслуговування клієнтів тощо. Допомогає використовувати людські, фінансові та матеріальні ресурси найбільш ефективно для досягнення мети компанії та допомагає розуміти, як можливі зміни вплинуть на фінансову стійкість та прибутковість компанії. Тому розробка та розуміння бізнес-моделі є ключовим етапом для успішного ведення бізнесу, оскільки вона визначає стратегію, яка дозволяє створювати цінність для клієнтів та отримувати прибуток для компанії (Табл. 4.22).

В межах цього етапу розробляємо календарний плани-графік реалізації стартап-проєкту (табл.4.23).

Календарний план-графік дозволяє передбачити усі необхідні роботи, без яких неможливо реалізувати проєкт, наочно відобразити черговість їх виконання; передбачити загальну вартість робіт та розбити необхідні капіталовкладення за етапами, дозволяє зручно відстежувати прогрес проєкту. Чіткі терміни та дедлайни допомагають уникнути затримок і планувати роботу відповідно до графіку. Це допомагає у плануванні бюджету, а також управлінні людськими та матеріальними ресурсами

Таблиця 4.22 – Бізнес-модель стартап-проекту

| Ключові партнери   | Ключові види діяльності  | Ціннісна пропозиція  | Відносини з клієнтами  | Сегменти користувачів   |
|--|--|--|--|---|
| <p>Компанії виробники обладнання та програмного забезпечення для робототехніки</p> <p><b>Мотивація для партнерства</b><br/>Розширення ринку;<br/>конкурентна перевага;<br/>зменшення витрат;<br/>конкурентна перевага</p>  | <p>Виробництво роботизованих систем для НРК та програмного забезпечення.</p> <p><b>Ключові ресурси</b><br/>Обладнання та програмне забезпечення;<br/>Відповідний персонал;<br/>Інвестиції</p> <p><b>Типи ресурсів</b><br/>Матеріальні, інтелектуальні, фінансові, персонал</p> | <p>Розширення функціональних можливостей приладів для НРК; точність вимірювання; простота та безпечність при використанні.</p> <p><b>Характеристики</b><br/>Доступність;<br/>функціональність, мобільність</p> | <p>Доставка, тестування та гарантійне обслуговування;</p> <p><b>Канали</b><br/>Прямий контакт з підприємствами, Інтернет мережа</p> <p><b>Контакти</b><br/>E-mail<br/>Месенджери<br/>Коментарі на сайті компанії</p> <p><b>Фази каналу</b><br/>Тестування<br/>Купівля.<br/>Доставка.<br/>Гарантійне обслуговування</p> | <p>Компаній, які здійснюють інспектування в сфері НРК – Представники великих та середніх компаній, Малий бізнес</p> <p><b>Ринок</b><br/>Нішевий</p> |
| <p><b>Структура витрат</b></p> <p>Витрати для функціонування компанії (закупка обладнання, заробітна плата, комунальні послуги) та проведення досліджень;</p> <p><b>Бізнес більше залежить від автоматизації процесу</b></p> <p><b>Характеристики</b><br/>Фіксовані витрати. Мінімізація витрат надає перевагу над конкурентами у вигляді доступного товару.</p> |  | <p><b>Джерела доходів</b></p> <p>Дохід від продажу; інвестиційні ресурси.</p> <p><b>Типи:</b> Продаж активів. Реклама</p> <p><b>Фіксована ціна:</b> залежить від моделі продукту</p>                           |  |   |



. Таблица 4.23 – Календарний план-графік реалізації стартап-проєкту;

| № п/п | Зміст етапу  | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 | 11 | 12 | Собівартість реалізації, грн |
|-------|--|---|---|---|---|---|---|---|---|---|----|----|----|------------------------------|
| 1.    | Оцінка ринкових умов   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |    |    |    | 5 800                        |
| 2.    | Вироблення ідеї проєкту та концептуалізація                      |   |   |   |   |   |   |   |   |   |    |    |    | 5 300                        |
| 3.    | Розробка ТЗ  |   |   |   |   |   |   |   |   |   |    |    |    | 7 100                        |
| 4.    | Оцінка витрат, фінансово-економічні розрахунки. Пошук інвесторів |   |   |   |   |   |   |   |   |   |    |    |    | 10 200                       |
| 5.    | Створення компанії та залучення персоналу                        |   |   |   |   |   |   |   |   |   |    |    |    | 210 000                      |
| 6.    | Створення моделі   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |    |    |    | 300 000                      |
| 7.    | Розробка програмного забезпечення                                |   |   |   |   |   |   |   |   |   |    |    |    | 200 000                      |
| 8.    | Тестування   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |    |    |    | 100 000                      |
| 9.    | Оптимізація та усунення недоліків                                |   |   |   |   |   |   |   |   |   |    |    |    | 30 000                       |
| 10    | Сертифікація та патентування                                     |   |   |   |   |   |   |   |   |   |    |    |    | 23 000                       |
| 11    | Випуск контрольного зразка                                       |   |   |   |   |   |   |   |   |   |    |    |    | 120 000                      |
| 12    | Рекламна компанія та вихід на ринок                              |   |   |   |   |   |   |   |   |   |    |    |    | 170 000                      |

Початковий етап аналізу ринку, планування та пошук інвесторів можна пройти без залучення сторонніх спеціалістів та спец обладнання, тому витрати на нього незначні. Значних ресурсів, як матеріальних так і фінансових потребує

створення моделі та тестування. Питання сертифікації та патенту не потребує значних витрат, тільки процедура здійснюється на протязі місяця. Звичайно певний час та кошти потребують рекламна компанія та вихід на ринок. Для залучення інвестицій рекомендується використовувати можливості IT виставок, де можна ефективно продемонструвати переваги проєкту та продемонструвати дослідні зразки.

#### **Висновки до розділу 4**

В ході розробки стартап- проєкту було здійснено маркетинговий аналіз, що включав, опис іде проєкту, технологічний аудит ідеї проєкту, аналіз ринкових можливостей запуску стартап-проєкту, зокрема SWOT-аналіз, розроблення ринкової та маркетингової програми стартап-проєкту та розкрито організаційні питання підготовки та запуску стартап-проєкту.

В цілому можна зробити висновок, що стартап-проєкт «Удосконалена система управління біоподібним роботом для цілей неруйнівного контролю» є перспективним, має цільову групу та може бути реалізований. Для мінімізації ризиків на першому етапі доцільно дотримуватися стратегії зайняття конкурентної ніші. Докладні ФЕР та оцінка ризиків будуть здійснені на етапі створення та реалізації проєкту із залученням відповідних фахівців.

## ВИСНОВКИ

1. Встановлено, що технології НРК важко реалізувати без автоматичного виявлення складних компонентів, особливо автоматичного високоточного неруйнівного виявлення компонентів криволінійної поверхні зі змінною кривизною, змінною товщиною та складним контуром. Роботизація НРК (РНРК) дозволяє розширити можливості контролю; доступ до важкодоступних місць; підвищити ефективність процесу, не зважаючи на те, що початкові інвестиції в роботизоване обладнання можуть бути значними, але це призводить до значної економії коштів у довгостроковій перспективі. Одним з напрямів РНРК набуло використання біологічних методів і структур для розробки інженерних рішень та технологічних методів, так звана біоніка, біоміметика або біомімікрія.

2. Запропоновано біоподібний робот розглядати як автоматичний пристрій чи систему, що використовується для виконання різних завдань та операцій та спроектований з врахуванням імітації структури або функції біологічно виробленої речовини або матеріалу. При проектуванні біоміметичних роботів головним є не копіювання природних матеріал та структур, а розуміння принципів проектування та фізико-хімічних механізмів, які визначають оптимізовану структурну та геометричну організацію біологічних систем, а також її зв'язок з багатьма функціями.

3. Визначено типи роботизованих систем, що використовується для цілей НРК та їх особливості, зокрема таких як дистанційно керовані транспортні засоби; безпілотні літальні апарати (БПЛА) або дрони; повзуни та альпіністи; крабові системи; магнітні гусеничні системи; автономні підводні апарати; роботизовані руки; колаборативні роботи; моделі штучного інтелекту.

4. Зазначено, що будова біоподібного робота буде залежати безумовно від типу та виконуваних функцій. Для функціонування робота та якісного отримання запланованого результату важливе значення має системи управління, яка повинна бути адаптована до реального середовища. До

основних вимог системи управління можна віднести такі параметри як здатність розуміти ключові параметри навколишнього середовища (висота перешкоди і відстань між роботом і перешкодою); можливість відстежувати стабільний стан робота в режимі реального часу та підтримувати стабільний стан робота

5. Індустрія 4.0 вносить свої коригування в підходи використання різних систем та технологій, зокрема і в робототехніці. Роботизований НРК повинен розвиватися з розробкою нових інструментів, включаючи автономну робототехніку, симуляцію віртуальних близнюків, Інтернет речей, кібербезпеку, хмарні обчислення.

6. Визначено принципові підходи до конструювання біоподібного робота на прикладі БПРЗ, який був вибраний для дослідження, враховуючи такі показники як функціональні можливості (використання на суші , так і воді); чудова прохідність; модульність; герметичність та надійність від проникання пилу та рідин; стійкість до механічних пошкоджень. Це універсальні механізми, що складаються з безлічі ланок і з'єднань, які дозволяють рухатися гнучко, повторюючи рухи справжньої змії та на відміну від колісних, гусеничних та ножних механізмів, забезпечують високу стабільність і, як правило, БПРЗ за своєю суттю є більш міцним, реалізуючи різні способи пересування.

7. Математична модель БПРЗ звичайно, залежить від його конструкції. Для класифікації різних конструкцій БПРЗ визначаємо основні властивості, такі як тип з'єднань; кількість ступенів свободи; з пасивними коліщатами або без них. Математична модель мобільного робота складається з кінематичної та динамічної частин. Кінематична модель мобільного робота служить для визначення координат поточного положення  $x$  ,  $y$  та кута  $\theta$  , який представляє поворот мобільного робота відносно обраної системи координат. Вхідними даними в кінематичну модель є кутові швидкості  $\omega_L$  ,  $\omega_R$  , які генеруються динамічною моделлю. З рівнянь стану динамічної моделі мобільного робота можна отримати опис стану .

8. Механічна конструкція БПРЗ складається з модулів: голови, тулуба та хвоста. Система управління складається з 3 основних частин: головної системи управління, підлеглих систем управління і системи моніторингу. У голову БПРЗ інтегрована система, яка в основному бере на себе роль автоматичного виявлення зовнішнього середовища, і управляє веденою системою управління за допомогою команд. Системи управління розподілені по тілу і хвосту, завершуючи специфічну регуляцію і контроль ходи. Спільні модулі моделюються таким чином, щоб задовольнити просторові вимоги до модулів акумуляторів, друкованих плат керування та двигунів.

9. Однак адаптивне керування БПРЗ в режимі реального часу на поверхнях із нерівностями потребує нових методів для боротьби із недостатньою дією, високою нелінійністю та невизначеністю моделей роботів. Включення сенсорної інформації в контролер БПРЗ для досягнення ефективного руху є ще одним важливим питанням, яке потрібно вирішити. Потрібна розробка, виробництво та валідація спеціального сенсорного механізму для БПРЗ для збору інформації про навколишнє середовище для ефективного пересування на нерівних поверхнях.

10. Розроблено стартап-проект, зокрема проведено маркетинговий аналіз, що включав, опис ідеї проекту, технологічний аудит ідеї проекту, аналіз ринкових можливостей запуску стартап-проекту, SWOT-аналіз, розроблення ринкової та маркетингової програми стартап-проекту, організаційні питання підготовки та запуску стартап-проекту.

## ПЕРЕЛІК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Менеджмент стартап-проектів [Електронний ресурс]: навчальний наочний посібник для студентів спеціальностей 051 «Економіка», 073 «Менеджмент», 075 «Маркетинг» / О. А. Гавриш, К. О. Бояринова, М. О. Кравченко, К. О. Копішинська ; КПІ ім. Ігоря Сікорського. – Київ : КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2021. 435 с.

2. Основні напрями удосконалення системи управління біоподібними роботами в неруйнівному контролі в умовах Індустрії 4.0» // Куранда А.В., Киричук Ю.В. – Збірник праць XIX Всеукраїнської науково-практичної конференції студентів, аспірантів та молодих вчених «Ефективність та автоматизація інженерних рішень у приладобудуванні», 20 – 21 грудня 2023 р. К.: ПБФ, КПІ ім. Ігоря Сікорського. 2023. 480 с. (С. 185 – 188)

3. Розроблення стартап-проекту [Електронний ресурс] : Методичні рекомендації до виконання розділу магістерських дисертацій для студентів інженерних спеціальностей / За заг. ред. О.А. Гавриша. Київ : НТУУ «КПІ», 2016. 28 с.

4. A Novel Modular Biomimetic LiveWorking Robot for Power Distribution Line // Jianbin Luo, Peng Guo and Yueke Lin. Machines 2022, 10(3), 195; <https://doi.org/10.3390/machines10030195>

5. Analysis of the Snake Robot Kinematics with Virtual Reality Visualisation // Anna Sibilska-Mroziewicz, Ayesha Hameed, Jakub Możaryn, Andrzej Ordys, Krzysztof Sibilski Sensors 2023, 23(6), 3262; <https://doi.org/10.3390/s23063262>

6. ARC-OPT - Softwaretools: Robotics Innovation Center - DFKI GmbH  
Режим доступу: [https:// github.com/ARC-OPT](https://github.com/ARC-OPT)

7. Avdelidis, N.P.; Tsourdos, A.; Lafiosca, P.; Plaster, R.; Plaster, A.; Droznika, M. Defects Recognition Algorithm Development from Visual UAV Inspections. Sensors 2022, 22.

8. Bagel - Softwaretools: Robotics Innovation Center - DFKI GmbH (dfki-bremen.de)                    Режим доступу:                    <https://robotik.dfki-bremen.de/en/research/softwaretools/bagel>

9. Berkshire Engineering | Guardian S – Remote Visual Inspection (berk-eng.com) Режим доступа: <https://www.berk-eng.com/sarcos-robotics/guardian-s/>

10. Biomimetic control system for a robot hand | Download Scientific Diagram (researchgate.net) Режим доступа: <https://www.researchgate.net/figure/Biomimetic-control-system-for-a-robot-hand>

11. Biomimetic Functional Structures – LAMBDA Режим доступа: <https://coefs.charlotte.edu/ejoyee/research/biomimetic-functional-structures/>

12. Biomimetic hexapod robot; Leg structure parameters; Control... | Download Scientific Diagram Режим доступа: [https://www.researchgate.net/figure/a-Biomimetic-hexapod-robot-b-Leg-structure-parameters-c-Control-diagram-d\\_fig2\\_321261856](https://www.researchgate.net/figure/a-Biomimetic-hexapod-robot-b-Leg-structure-parameters-c-Control-diagram-d_fig2_321261856)

13. Biomimetics | Free Full-Text | Research and Experiment on a Bionic Fish Based on High-Frequency Vibration Characteristics Режим доступа: <https://www.mdpi.com/2313-7673/8/2/253>

14. Biomimetics | Free Full-Text | Sensor Fusion-Based Teleoperation Control of Anthropomorphic Robotic Arm Режим доступа: <https://www.mdpi.com/2313-7673/8/2/169>

15. BiomiMETRIC Assistance Tool: A Quantitative Performance Tool for Biomimetic Design// Philippe Terrier, Mathias Glaus, Emmanuel Raufflet. Biomimetics 2019, 4(3), 49; <https://doi.org/10.3390/biomimetics4030049>

16. BOLeRo - Softwaretools: Robotics Innovation Center - DFKI GmbH (dfki-bremen.de) Режим доступа: <https://robotik.dfki-bremen.de/en/research/softwaretools/bolero>

17. CAD-2-SIM - Softwaretools: Robotics Innovation Center - DFKI GmbH Режим доступа: <https://robotik.dfki-bremen.de/en/research/softwaretools/cad-2-sim>

18. Chris Fonseca Robotics for NDT (Non-Destructive Testing) Режим доступа: <https://mfe-is.com/robotics-for-ndt-non-destructive-testing/>

19. Difference Between Bionics and Biomimetics Режим доступа: <https://www.differencebetween.com/difference-between-bionics-and-vs-biomimetics/>

20. Design and Construction of a Snake-Like Robot Implementing Rectilinear and Sidewinding Gait Motions// Jairo José Marín Arciniegas, Oscar Andrés Vivas Albán TecnoL. (Inst. Tecnol. Metrop.) 2023; 26 (56). 1-17.

21. Design and Implementation of a Snake-like Robot with Amplitude-Controlled Phase Oscillator-based Motion Control // Serkan Karaçöl, Deniz Korkmaz, Gonca Ozmen Koca. Conference: 1st International Conference on Computing and Machine Intelligence (ICMI 2021)

22. Design of a motion system for 3D printed snakebot // Krzysztof Mateja, Wawrzyniec Panfil. Technical Sciences. DOI:10.31648/ts.682

23. Digital Twins - Revolutionizing Inspection Reports | MFE Inspection Solutions– Режим доступа: <https://mfe-is.com/digital-twins-revolutionizing-inspection-reports> – 02.12.2023 р.

24. Environmental Adaptive Control of a Snake-like Robot With Variable Stiffness Actuators //Dong Zhang , Hao Yuan , Zhengcai Cao , doi: 10.1109/JAS.2020.1003144

25. HyRoDyn - Softwaretools: Robotics Innovation Center - DFKI GmbH Режим доступа: <https://robotik.dfki-bremen.de/en/research/softwaretools/hyrodyn>

26. Industry 4.0 technologies assessment: A sustainability perspective //Chunguang Bai, Patrick Dallasega, Guido Orzes, Joseph Sarkis. International Journal of Production Economics. Volume 229, November 2020, <https://doi.org/10.1016/j.ijpe.2020.107776>

A. J. Ijspeert, Central pattern generators for locomotion control in animals and robots: a review Neural networks, 21(4), 2008, pp.642-653.

27. MARS - Softwaretools: Robotics Innovation Center - DFKI GmbH Режим доступа: <https://robotik.dfki-bremen.de/en/research/softwaretools/mars>

28. Mineo, C.; Javadi, Y. Robotic Non-Destructive Testing. Sensors 2022, 22, 7654. <https://doi.org/10.3390/s22197654>



29. MMLF - Softwaretools: Robotics Innovation Center - DFKI GmbH  
Режим доступа: <https://robotik.dfki-bremen.de/en/research/softwaretools/mmlf>

30. N. M. Nor and S. Ma, A simplified CPGs network with phase oscillator model for locomotion control of a snake-like robot Journal of Intelligent and Robotic Systems, 75(1), 2014, pp.71-86. Режим доступа: <https://link.springer.com/article/10.1007/s10846-013-9868-9>

31. NDE 4.0: Digitale Transformation und ihre Auswirkungen auf die Zerstörungsfreie Prüfung Режим доступа: <https://vision.fraunhofer.de/de/technologien-anwendungen/technologien/zerstoerungsfreie>

32. NDE 4.0: Progress, promise, and its role to industry 4.0 // Norbert Meyendorf , Nathan Ida, Ripudaman Singh , Johannes Vrana NDT & E International Volume 140, December 2023, 102957 <https://doi.org/10.1016/j.ndteint.2023.102957>

33. NDLCOM - Softwaretools: Robotics Innovation Center - DFKI GmbH  
Режим доступа: <https://robotik.dfki-bremen.de/en/research/softwaretools/ndlcom>

34. Parameterized and Scripted Gaits for Modular Snake Robots// Matthew Tesch, Kevin Lipkin, Isaac Brown, Ross Hatton, Aaron Peck, Justine Rembisz & Howie Choset. Advanced Robotics Volume 23, 2009 - Issue 9: Disaster Response Robotics.

35. Ranjan Vepa Engineered Biomimicry Режим доступа: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/B9780124159952000040>

36. reSPACE - Softwaretools: Robotics Innovation Center - DFKI GmbH  
Режим доступа: <https://robotik.dfki-bremen.de/en/research/softwaretools/respace>

37. Robotic for Non-Destructive Inspection Режим доступа: <https://www.mfe-is.com/robotics-for-ndt-non-destructive-testing/>

38. Robotic path planning for non-destructive testing – A custom MATLAB toolbox approach — ScienceDirect Режим доступа: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0736584515000666#bib2>

39. Robotic Systems in NDT Applications — OnestopNDT Режим доступа: <https://www.onestopndt.com/ndt-articles/robotic-systems-in-ndt>

40. Rock - Softwaretools: Robotics Innovation Center - DFKI GmbH Режим доступа: <https://robotik.dfki-bremen.de/en/research/softwaretools/rock>

41. SenSnake: A snake robot with contact force sensing for studying locomotion in complex 3-D terrain // Divya Ramesh, Qiyuan Fu, Chen Li Conference: IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA) 2022 At: Philadelphia, Pennsylvania DOI:10.1109/ICRA46639.2022.9812159

42. Sensor Fusion-Based Teleoperation Control of Anthropomorphic Robotic Arm Biomimetics 2023, 8(2), 169; <https://doi.org/10.3390/biomimetics8020169>

43. Snake robots // Kristin Y. Pettersen Annual Reviews in Control Volume 44, 2017, Pages 19-44. <https://doi.org/10.1016/j.arcontrol.2017.09.006>.

44. Snake-Like Robot with Fusion Gait for High Environmental Adaptability: Design, Modeling, and Experiment // Softwaretools: Robotics Innovation Center - DFKI GmbH

45. Steering motion control of a snake robot via a biomimetic approach // Wenjuan Ouyang, Wenyu Liang, Chenzui Li, Hui Zheng, Qinyuan Ren & Ping Li . Frontiers of Information Technology & Electronic Engineering . Volume 20, pages 32–44, (2019)

46. Svinov A, Turygin YV, Sitar J. Remote control system and its development for linear asynchronous motor. In: *13th International symposium on mechatronics, mechatronika* 2010, Slovakia. ISBN: 978-808075461-7. 2–4 June 2010, Trencianske Teplice

47. Teoh, E. K., & Wong, C. Y. (1991). An expert system for real-time control of the sir-3 robotic system. in 1991, IEEE International Symposium on Circuits and Systems pp. 2709 – 2712. IEEE.

48. The Fourth Industrial Revolution, by Klaus Schwab | World Economic Forum – Режим доступа: <https://www.weforum.org/about/the-fourth-industrial-revolution-by-klaus-schwab> – 03.12.2023 p.

49. Trajectory tracking control law of multi-joint snake-like robot based on improved snake-like curve in flow field - Dongfang Li, Zhenhua Pan, Hongbin Deng, Teng Peng, 2019

50. Transeth A. A., Leine R. I., and Pettersen K. Y., “3-D snake robot motion: nonsmooth modeling, simulations, and experiments,” *IEEE Trans. Robotics*, vol. 24, no. 2, pp. 361–376, 2008. doi: 10.1109/TRO.2008.917003

51. Transforming Non-destructive Testing Procedures Through Robotics – Режим доступа: <https://www.onestopndt.com/ndt-articles/transforming-non-destructive-testing-procedures-through-robot> – 01.12.2023 г.

52. Turning and Radius Deviation Correction for a Hexapod Walking Robot Based on an Ant-Inspired Sensory Strategy // Yaguang Zhu, Tong Guo, Qiong Liu, Qianwei Zhu, Xiangmo Zhao and Bo Jin *Sensors* 2017, 17(12), 2710; <https://doi.org/10.3390/s17122710>

53. Types of Sensors in Robotics – Режим доступа: <https://www.wevolver.com/article/sensors-in-robotics-the-common-types> – 01.12.2023 г.

54. What Is a Robot? - ROBOTS: Your Guide to the World of Robotics Режим доступа: <https://robotsguide.com/learn/what-is-a-robot>

55. What is an automatic control system? - AutomationForum Режим доступа: <https://automationforum.co/what-is-an-automatic-control-system/>

56. Z. Bing, L. Cheng, K. Huang, M. Zhou, and A. Knoll, CPG-based control of smooth transition for body shape and locomotion speed of a snake-like robot In 2017 IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA), 2017, pp.4146-4153. [https:// dl.acm.org/doi/10.1109/ICRA.2017.7989476](https://dl.acm.org/doi/10.1109/ICRA.2017.7989476)

**ДОДАТКИ**