

Я, Хабаров Данило Сергійович, як здобувач вищої освіти ХНУРЕ, розумію і підтримую політику закладу із академічної доброчесності. Я не надавав і не одержував недозволену допомогу під час підготовки кваліфікаційної роботи. Я не використовував штучний інтелект для підготовки кваліфікаційної роботи. Використання ідей, результатів і текстів інших авторів мають посилання на відповідне джерело.

"01" червня 2025 р

Handwritten signature of Danilo Habarov in black ink.

Данило ХАБАРОВ

ХАРКІВСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ РАДІОЕЛЕКТРОНІКИ

Факультет _____ АКТ _____
Кафедра _____ КІТАР _____
Рівень вищої освіти _____ перший (бакалаврський) _____
Спеціальність 151 Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології
(код і повна назва)
Тип програми _____ Освітньо-професійна _____
Освітня програма Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології
(повна назва)

ЗАТВЕРДЖУЮ:
Зав. кафедри КІТАР _____
(підпис)
« 28 » квітня 2025 р.

**ЗАВДАННЯ
НА КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ**

Здобувачеві _____ Хабарову Данилу Сергійовичу
(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема роботи Розроблення гібридного механізму пересування для малого мобільного робота
затверджена наказом по університету від 19.05.2025 р. № 390 Ст
2. Термін подання здобувачем роботи до екзаменаційної комісії 15.06.2025 р.
3. Вихідні дані до роботи _____
Середовище моделювання Autodesk Fusion 360
Розміри робота: 973 мм × 310 мм × 133 мм,
Загальна вага робота: менше 10 кг.

4. Перелік питань, що потрібно опрацювати в роботі _____
Аналіз технічного завдання; Аналіз публікацій; Вибір типу конструкції, типу рушія та балансуєчих механізмів; Мехатронна система та система керування прототипом; Проектування балансуєчих пристроїв та гібридного рушія; Проведення досліджень конструкції

5. Перелік графічного матеріалу із зазначенням креслеників, схем, плакатів, комп'ютерних ілюстрацій (п.5 включається до завдання за рішенням випускової кафедри)

6. Консультанти розділів роботи (п.6 включається до завдання за наявності консультантів згідно з наказом, зазначеним у п.1)

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

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№	Назва етапів роботи	Термін виконання етапів роботи	Примітка
1	Аналіз технічного завдання. Аналіз публікацій	28.04-04.05.2025	виконано
2	Вибір типу конструкції, типу рушія та балансуєчих механізмів.	05.05-10.05.2025	виконано
3	Мехатронна система та система керування прототипом	11.05-17.05.2025	виконано
4	Проектування балансуєчих пристроїв та гібридного рушія	18.05-25.05.2025	виконано
5	Проведення досліджень конструкції	26.05-31.05.2025	виконано
6	Подання роботи на перевірку Інтернет-сервісом StrikePlagiarism	01.06-03.06.2025	виконано
7	Оформлення пояснювальної записки	04.06-08.06.2025	виконано
8	Подання роботи на рецензію	09.06-11.06.2025	виконано
9	Подання роботи на підпис зав. кафедри	12.06-14 .06.2025	виконано
11	Подання кваліфікаційної роботи в ЕК	15.06.2025	виконано

Дата видачі завдання 28 квітня 2025 р.

Здобувач _____ Данило ХАБАРОВ
(підпис) (власне ім'я, прізвище)

Керівник роботи _____ доц. Наталія ДЕМСЬКА
(підпис) (посада, власне ім'я, прізвище)

РЕФЕРАТ

Пояснювальна записка: 68 с., 4 табл., 29 рис., 3 додатків, 36 джерел.

МОБІЛЬНИЙ РОБОТ, ГІБРИДНИЙ МЕХАНІЗМ, КОЛЕСА, ПЕРЕСУВАННЯ, АДАПТАЦІЯ, РЕЛЬЄФ

Об'єкт розробки – розроблення конструкцій, які дозволяють переміщення малого мобільного робота в умовах складного рельєфу.

Предмет розробки – гібридний механізм пересування для мобільної платформи.

Мета роботи – розробка гібридного механізму пересування для малого мобільного робота, що поєднує переваги різних типів рушіїв і забезпечує адаптивний рух у змінному середовищі.

В роботі розроблено конструктивну схему шестиколісного мобільного робота, що має реконфігурований корпус і здатен переходити між трьома режимами пересування: плоским, V-подібним та складеним.

Спроектовано адаптивні підйомні гойдалки з інтегрованою трансмісією, що забезпечують автоматичне перемикання між режимами руху на колесах і пересування з опорою на гойдалки.

Розроблено та описано мехатронну систему, що включає у себе сенсорний блок, елементи керування, виконавчі пристрої та інтерфейс взаємодії з користувачем.

Було проведено аналіз параметрів умов запуску переходу колесо-ніжка та мінімальних вимог до крутного моменту двигуна.

Для повністю автономної роботи до робота можна додати додаткові датчики, такі як камера, для навігації в невідомому середовищі. Використовуючи вбудований IMU, інтегрований з входами камери, робот може автономно змінювати свій режим, щоб ефективно адаптувати конфігурацію коліс до умов навколишнього середовища.

ABSTRACT

Explanatory note: 68 p., 4 tables, 29 figures, 3 appendices, 36 sources.

MOBILE ROBOT, HYBRID MECHANISM, WHEELS, MOVEMENT, ADAPTATION, RELIEVE

The object of development is the process of moving a small mobile robot in conditions of variable relief.

The subject of development is the physical and software implementation of a hybrid movement mechanism for a mobile platform.

The purpose of the work is to develop a hybrid movement mechanism for a small mobile robot that combines the advantages of different types of engines and provides adaptive movement in a changing environment.

The work develops a structural scheme of a six-wheeled mobile robot that has a reconfigurable body and is able to switch between three movement modes: flat, V-shaped and folded.

An adaptive lifting swing with an integrated transmission is designed, providing automatic switching between wheeled and swing-supported modes.

A mechatronic system is designed and described, including a sensor unit, controls, actuators, and a user interface.

The parameters of the wheel-to-leg transition start-up conditions and the minimum motor torque requirements are analyzed.

For fully autonomous operation, additional sensors, such as a camera, can be added to the robot to navigate in an unknown environment. Using an integrated IMU integrated with camera inputs, the robot can autonomously change its mode to effectively adapt the wheel configuration to environmental conditions.

ЗМІСТ

Перелік скорочень	6
Вступ	7
1 Аналіз технічного завдання та літератури	9
1.1 Аналіз технічного завдання	9
1.2 Системи пересування мобільних роботів.....	10
1.3 Аналіз публікацій	13
1.4 Система керування роботом	16
2 Вибір типу конструкції, типу рушія та балансуєчих механізмів	19
2.1 Аналіз геометрії та положення шестиколісного робота.....	19
2.2 Вибір варіанта конструкції	24
2.3 Розробка конструкції балансуєчого пристрою	28
2.4 Вибір варіанту гібридного рушія.....	30
3 Мехатронна система та система керування прототипом	35
4 Проектування балансуєчих пристроїв та гібридного рушія	43
4.1 Механічна структура	43
4.2 Механізм варіанту Rob-ant.....	45
4.3 Підйомні гойдалки	47
4.4 Проектування гібридного колеса.....	50
4.5 Проведення досліджень конструкції	54
4.5.1 Перевірка трансформації.....	54
4.5.2 Здатність долати перешкоди	56
4.5.3 Швидкість пересування.....	57
4.6 Забезпечення безпечних умов праці при проектуванні конструкції ...	58
Висновки.....	63
Перелік джерел посилання	65
Додаток А Апробація результатів роботи	69
Додаток Б Конструкторські документи	71
Додаток В Демонстраційний матеріал	77

ПЕРЕЛІК СКОРОЧЕНЬ

ПК – персонального комп'ютера;

САПР – системи автоматизованого проектування;

CCW – Counterclock (пропелер, який обертається проти годинникової стрілки, також називається лівим пропелером);

CW – Clockwise, (пропелер, що обертається за годинниковою стрілкою, також відомий як правий пропелер);

DoF – ступені свободи;

ENR – екологічний гібридний робот;

IMU – інерційний вимірювальний блок.

ВСТУП

Часті природні та техногенні катастрофи, такі як землетруси, радіація та вибухи, серйозно загрожують безпеці та життю людського суспільства. Ситуація в катастрофічних сценаріях завжди складна та мінлива, що легко може призвести до вторинних травм рятувальників та людей, що опинилися в пастці. Щоб зменшити потенційний ризик, мобільні роботи розглядаються як ефективний метод у таких випадках для заміни рятувальників для виявлення життя в неструктурованих та складних середовищах [1].

Однак наразі застосування мобільних роботів у рятувальних операціях під час стихійних лих недостатньо розвинене, і все ще існують деякі технічні проблеми, які не вирішено, такі як низька робоча та енергоефективність, низька мобільність у складних умовах, великий обсяг, велика якість та незручності для транспортування. Складна та пересічена місцевість у катастрофічних сценаріях також вимагає від роботів відмінної адаптивності до місцевості та здатності долати перешкоди. Тому розробка наземного мобільного робота з простою структурою, низьким споживанням енергії та видатною здатністю долати перешкоди та адаптивністю до місцевості має велике значення [2].

Метою цієї роботи є розробка портативного робота з простою структурою та керуванням, що базується на біонічній системі пересування, для рятувальних робіт під час стихійних лих.

В роботі представлено шестиколісний мобільний робот, гібридного типу пересування, з реконфігурованим корпусом та самоадаптивними механізмами для подолання перешкод, який може переналаштовуватися у три стани пересування, щоб реалізувати переваги адаптивності до місцевості, здатності долати перешкоди та портативності.

В роботі було:

- представлено критерії проектування та механічну конструкцію

запропонованого мобільного робота, на основі яких змодельовано геометрію робота та сформульовано геометричні обмеження, статичні умови та умову стійкості руху для подолання перешкод роботом;

– проведено числове моделювання для перевірки геометричної здатності проходження, статичної здатності проходження та стійкості руху, а також для визначення можливих структурних параметрів робота під час подолання перешкод;

– проаналізовано можливості створення фізичного прототипу запропонованого мобільного робота та інтегровано його з мехатронними системами та дистанційним керуванням.

Робота виконано згідно [3-4]. Матеріали опубліковані в [1]. Проведені дослідження відповідають цілям сталого розвитку (ЦСР) 9, так як наукові дослідження та інновації є важливими факторами, що сприяють сталому розвитку.

1 АНАЛІЗ ТЕХНІЧНОГО ЗАВДАННЯ ТА ЛІТЕРАТУРИ

1.1 Аналіз технічного завдання

Метою роботи є розробка невеликого портативного самоадаптивного мобільного робота для подолання перешкод, який може виконувати різні завдання з виявлення рятувальних робіт у місцях стихійного лиха.

Розміри цього робота становлять приблизно 973 мм × 310 мм × 133 мм. Він має просту механічну структуру та систему керування для рятувальних цілей. Нижче наведено критерії проектування:

1) мала вага, загальна вага робота менше 10 кг, а деяка додаткова вага походить від типово пов'язаних пристроїв виявлення та рятування, таких як камери, мікрофони, пристрої бездротового зв'язку та додаткові датчики, орієнтовані на завдання;

2) висока маневреність, робот може маневрувати в неструктурованих середовищах та долати вертикальні перешкоди висотою близько 200 мм; робот може обертатися навколо вертикальної осі на рівній поверхні, щоб уникнути складних маневрів із рухом назад у вузькому просторі;

3) стабільний рух, робот має чудову адаптивність у неструктурованих середовищах, що характеризуються нерівною місцевістю та нерівними перешкодами, а також може підтримувати стабільність пов'язаних з ним елементів, таких як камери та пристрої виявлення;

4) портативність, робот є портативним і може складатися, щоб він був компактним і зручним для транспортування (наприклад, його може легко переносити користувач).

Відповідно до цих критеріїв, реконфігурований колісний мобільний робот повинен мати високу ступінь балансування платформ та коліс.

Загальна маса становить 9,9 кг, включаючи літієву батарею 24 В для живлення всього робота. Робот приводиться в рух чотирма двигунами

постійного струму та має систему керування положенням та швидкістю. Технічні характеристики розроблюємого малого мобільного робота наведено в табл. 1.1.

Таблиця 1.1 – Технічні характеристики платформи

Параметр	Значення
Максимальна швидкість	0,5 м/с
Максимальна висота подолання перешкоди	210 мм ($\mu = 0,4$)
Двигуни	4 двигуни постійного струму 1 кроковий двигун
Дальність зв'язку	200 м
Акумулятор	Літій
Вага акумулятора	910 г
Колесні контролери	Контролери керма
Керування швидкістю	Контроль положення
Камера	Так
GPS	Так

1.2 Системи пересування мобільних роботів

Робот визначається як автономний механічний пристрій, який виконує автоматизовані завдання або за попередньо визначеною програмою, або під керівництвом людини, використовуючи пристрої дистанційного керування.

Роботи в основному використовуються як альтернатива людям для виконання важких, брудних і небезпечних завдань. Сімейство перших комерційних роботів почалося в автомобільній промисловості Ford у 1961 році. Промислові роботи використовуються в широкому діапазоні застосувань; але їх використання обмежене, оскільки більшість роботів є стаціонарними та керуються зі стаціонарної бази [5-6].

Ці стаціонарні роботи ефективно виконують такі промислові завдання, як зварювання, фарбування, свердління, пакування, складання та транспортування. Завдяки взаємодії з датчиками та вдосконаленими інструментами мобільні роботи також можуть розвивати знання в промисловому середовищі замість виконання фіксованих завдань. Мобільні

роботи зазвичай пересуваються з місця на місце на землі для виконання різних завдань для різних застосувань.

Краща система пересування мобільного робота забезпечує високу гнучкість і хорошу маневреність робота для роботи в складних і складних умовах; їх мобільність класифікується за трьома основними типами, показаними на рисунку 1.1.

Мобільні роботи, що мають ефективну систему пересування, можуть працювати на більшості природних рельєфів, у яких не потрібно створювати таке спеціальне робоче середовище [7-8]. Такі мобільні роботи здатні працювати в координації з людиною та легко співпрацювати, ділячи з нею робочий простір.



Рисунок 1.1 – Системи пересування мобільних роботів [7]

Малі мобільні роботи, які можуть використовуватися для моніторингу, розвідки, наукових досліджень або в освітніх цілях, потребують компактних і надійних механізмів пересування. Розробка гібридного рушія саме для таких платформ дозволяє експериментально дослідити нові підходи до мобільності, що поєднують простоту конструкції з високою функціональністю та автономністю. Це відкриває можливості для побудови нових типів роботів,

здатних діяти в умовах обмеженого простору, на нерівностях або у складному міському середовищі [9-10].

Для робота необхідний ефективний механізм пересування, який допомагає йому працювати в різних середовищах. Для того, щоб мобільний робот отримав високу працездатність, дуже важливо побудувати відповідний та ефективний механізм руху, особливо для зовнішнього середовища. Існує багато можливих способів, які допомагають розробнику вибрати ефективний підхід до системи пересування для проектування мобільного робота, як показано на рисунку 1.2.

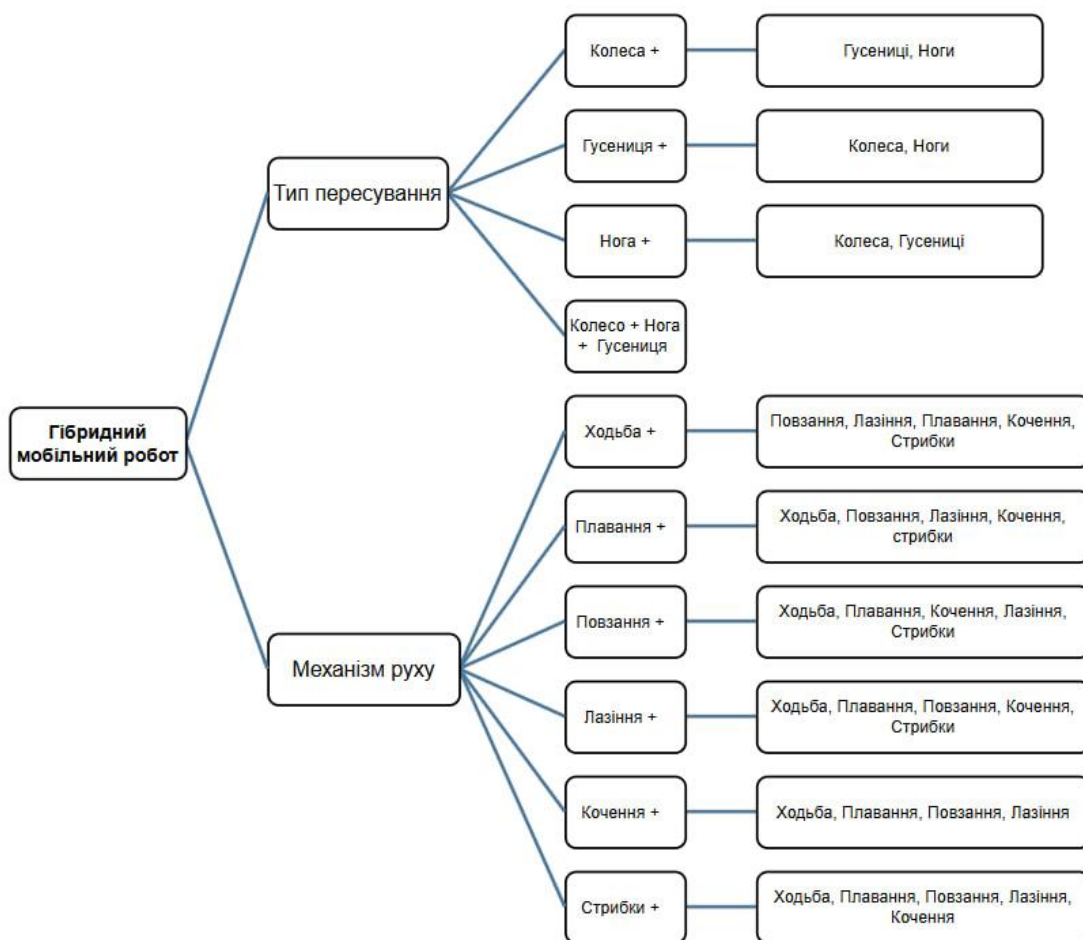


Рисунок 1.2 – Гібридний мобільний робот [10]

Ці типи пересування мають різні переваги та недоліки залежно від їх конструкції, робочого середовища та завдань. Таким чином, гібридний механізм пересування є найефективнішою, а також ефективною системою в

багатьох середовищах у порівнянні з індивідуальним типом пересування. Багатофункціональний тип пересування, який використовується в мобільних роботах, забезпечує найкращу роботу на всіх типах місцевості з різними перевагами кожного типу пересування [11].

У даній роботі аналізується нова конструкція багатокомпонентної системи пересування для мобільного робота, а обсягом цього дослідження є проектування та розробка гібридного механізму руху, який використовується в мобільних роботах.

Розробка ефективної системи мобільності для роботів пропонує інтелектуальне альтернативне вирішення багатьох проблем. Цей робот може працювати на ногах, колесах, а також поєднувати обидва механізми системи пересування. Ця система руху коліс і ніг працюватиме за допомогою феномена перемикання, коли робот може змінювати свій механізм з одного на інший [12-15].

1.3 Аналіз публікацій

Дослідники доклали зусиль для створення ефективного, універсального та висококомпактного мобільного робота для багатьох середовищ. Основні сфери застосування такого робота включають здебільшого порятунк, пошук у містах, військову службу, спостереження, обслуговування та промисловість. Щоб виконати будь-яке завдання, робот має бути достатньо хорошим у своєму підході до пересування, контролю та планування шляху. Правильний і ефективний механізм пересування може бути обраний через його високу маневреність, гнучкість і стабільність.

Одного типу пересування недостатньо, щоб бути хорошим для всіх типів місцевості; іноді робоче середовище дуже складне, включаючи не лише високі перешкоди та глибокі траншеї. Механізм на колесах хороший для швидкого та ефективного руху, але лише на гладкій поверхні, механізм на ніжках має високу адаптивність до складних середовищ, але дуже складний у механічній

конструкції, а також у керуванні. Тому цю проблему можна вирішити за допомогою впровадження гібридної системи пересування. Мобільні роботи з декількома системами пересування будуть більш гнучкими та ефективними у всіх видах застосувань.

Таблиця 1.2 показує деталі існуючого типу гібридних систем пересування, вона показує інтерес і увагу дослідників до розробки ідеального та відповідного механізму пересування.

Таблиця 1.2 – Зведення наявних розробок щодо гібридного мобільного робота

Джерело	Тип пересування (гібрид)	Особливості
1	2	3
[10]	колесо + нога	Він складається з 4 ніжок і 4 коліс на кінці кожної ноги. Робот може пересуватися на ногах по пересіченій місцевості та на колесах по гладкій поверхні, щоб отримати високу гнучкість і ефективну мобільність.
[11]	колесо + нога	2 ніжки з пневматичним приводом на передній стороні та 2 колеса з системою приводу на задній стороні робота. Передні ноги допомагають роботу лазити або пересуватися по пересіченій місцевості та перешкодам.
[12]	гусениця + опора + колесо	Він складається з трьох систем пересування: колеса, гусениці та ноги. Гусеничні ласти також працюють як ніжка. Це покращує мобільні можливості робота.
[13]	нога + колесо	Він складається з гібридної системи пересування ніг і коліс. Його здатність ходити по поверхні і може плавати під водою за допомогою колісного механізму.
[14]	плавання + повзання	Змієподібний робот працює на поверхні та під водою. Він має багато блоків, з'єднаних з пасивними колесами для приводу. Він може плавати і повзати швидше, ніж справжні риби та змії.

Продовження таблиці 1.1

1	2	3
[15]	доріжка + ніжка	Робот, що змінює форму, з 2 модульними мобільними блоками. Він заснований на доріжці та змієподібній структурі робота. Він здатний пересуватися по будь-якій місцевості, звужувати ями, змінюючи форму тіла.
[16]	гусениці + ноги	Система пересування робота заснована на гусеничній системі, а висувна рука використовується спереду для маніпулювання, та сама рука також використовується як нога. Це допомагає роботу пересуватися через високі сходи та перешкоди.
[17]	стрибки + рух	Мікророботи – це невеликі сферичні роботи, які використовуються для переміщення в глибоких і вузьких просторах для пошуку максимальної кількості тих, хто вижив, за допомогою активності, стрибків і катання. Він складається з мікропаливних елементів з високою щільністю енергії в поєднанні з легкими та недорогими комплектуючими.
[18]	повзання + лазіння	Це серпантинний робот, який складається з модулів пересування, що ковзають, і модулів керування. Модулі пересування шкарпеток допомагають роботі рухатися вперед, а модуль рульового управління допомагає роботу змійкою згинатися.
[19]	гусениця + колесо	Гібридна система з гусенично-колісним механізмом, її пересування може бути гусеничним, колісним або обома.
[20]	колесо + нога	Робот щурячого типу з 18 DOF, який використовується для взаємодії між справжніми щурами. Має 2 ніжки, 2 колеса. Колеса допомагають високій швидкості робота та ноги корисні під час взаємодії зі справжнім щуром.
[21]	гусениці + ноги	Робот із гібридними механізмами складається з механізму пересування та руки маніпулятора, які сконструйовані як одне ціле для роботи в обох взаємозамінних механізмах пересування та маніпуляції. Той самий двигун використовується для маніпуляції DOF і мобільної платформи DOF

Продовження таблиці 1.1

1	2	3
[22]	колесо + нога	4 колеса та ті самі колеса використовуються як ніжки, коли вони перетворюються на напівкруглу форму, кожна ніжка має 2 DOF. Коли точка стегна та центральна точка обода стають однаковими, колесо відкривається в повну круглу форму.
[23]	колесо + нога	4 колісних вузла пересування (кожний вузол містить 3 колісних елемента), тяга розвивається двома передніми колісними вузлами, а двома задніми — непрацюючими. Кожен блок приводиться в дію двигуном з епіциклічною системою передач
[24]	колесо + нога	4 колісний мобільний робот, при виявленні перешкоди висота робота збільшується від рівня землі за допомогою приводів. Ці ж колеса також працюють як ноги, якщо висота перешкоди більше радіуса колеса
[25]	ходьба + плавання)	6-ногий гібридний робот ЧЕРЕПАХА, може ходити по поверхні, плавати під водою та над водою. На нозі встановлені прямокутні поворотні плавники

1.4 Система керування роботом

Цим роботом керує бездротовий пристрій керування за допомогою дистанційного керування або сигналів комп'ютерного передавача для керування ним на відстані.

На рисунку 1.3 показана система керування цим роботом, де сигнали передаються від блоку керування та приймаються на приймач, встановлений у блоці робота [10].



Рисунок 1.3 – Система керування роботом

Потім відповідні команди передаються відповідному пристрою для відповіді. На задніх колесах робота два двигуни постійного струму, з'єднані для приводу силової установки робота та системи керування на передньому колесі, яка приводиться в рух одним кроковим двигуном.

Колісноножний механізм також приводиться в рух двома двигунами постійного струму, які безпосередньо з'єднані з валом ведучої шестерні на колесі [10].

Запуск і розтискання механізму руху здійснюється блоком перемикання, який з'єднується з рейковим механізмом.

Робота запропонованої конструкції мобільного робота залежить від його системи пересування, яка складається з 2 змінних систем пересування. У цій конструкції робот рухатиметься на колесах, які можуть трансформуватись у ноги.

Такі мультимобільні механізми допоможуть мобільним роботам працювати в різних типах середовищ із взаємозаміною механізмів.

Конструкція та керування механізмом руху коліс дуже прості порівняно з іншими механізмами системи пересування. Він простіший і невеликий за описом, але основним недоліком таких роботів є те, що їх функція обмежена лише рівною та гладкою поверхнею. Вони не можуть працювати або

пересуватися по неструктурованих або нерівних місцевостях. На гладкій поверхні він набирає високу швидкість, споживання енергії дуже низьке, висока маневреність на гладкій поверхні, а його механічна конструкція дуже проста. Робот буде рухатися гладкою траєкторією, як колісний робот, три колеса будуть у контакті з землею. Переднє колесо працює як рульове керування, а привід буде на два задні колеса [10].

Робот може рухатись по плоскій похилій поверхні за допомогою колісного механізму, але до обмеженої висоти. Механізм руху робота змінюється з колеса на рейковий механізм за допомогою модуля перемикачів. Стійка і шестерня використовується для керування увімкненням/вимкненням плаваючого блоку, що контактує з землею. Коли робот повинен бігти або рухатися нерівним, неструктурованим шляхом або кроками, його механізм буде відстежуватися системою.

2 ВИБІР ТИПУ КОНСТРУКЦІЇ, ТИПУ РУШІЯ ТА БАЛАНСУЮЧИХ МЕХАНІЗМІВ

2.1 Аналіз геометрії та положення шестиколісного робота

Для кращого аналізу продуктивності робота при подоланні перешкод у цьому розділі створюється його геометрична модель. Основні геометричні параметри робота показано на рис. 2.1.

У моделі система координат $O_0\{X_0, Y_0, Z_0\}$ є нерухомою інерційною системою, $O_1\{X_1, Y_1, Z_1\}$ – система координат тіла, розташована в точці перетину центральної лінії задньої частини корпусу робота та осей обертання коромисел з обох боків, $O_2\{X_2, Y_2, Z_2\}$ – система координат тіла, розташована в центральній точці лівої адаптивної коромисла для лазіння, $O_3\{X_3, Y_3, Z_3\}$ – система координат тіла, розташована в центральній точці правої адаптивної коромисла для лазіння, та $O_4\{X_4, Y_4, Z_4\}$ – система координат тіла, розташована в місці з'єднання передньої та задньої частин корпусу (вісь Y_4 збігається з центральною віссю задньої частини корпусу, а центральна вісь передньої частини корпусу завжди знаходиться в площині $X_4 - Y_4$).

Крім того, структура та геометричні параметри робота визначені, як показано на рисунку 2.1.

На рисунку 2.1 прийняті наступні позначення: B – довжина між двома колесами в напрямку ширини (яка приблизно дорівнює ширині переднього та заднього корпусів), l_b – довжина переднього та заднього корпусів, l_e – довжина адаптивного альпіністського коромисла, r – радіус коліс (усі колеса мають однаковий розмір), θ_l та θ_r – відповідно кути повороту лівого та правого адаптивних альпіністських коромисел. δ – кут повороту заднього корпусу відносно системи координат $O_1\{X_1, Y_1, Z_1\}$ у площині $X_1 - Y_1$, який розглядається як варіантний кут робота. θ_f – кут повороту системи координат $O_4\{X_4, Y_4, Z_4\}$ відносно системи координат $O_1\{X_1, Y_1, Z_1\}$ у площині $X_4 - Z_4$.

Параметри структури зібрані у вектор як $[r \ l_b \ l_e \ B]^T$, а геометричні змінні зібрані у вектор як $[\theta_l \ \theta_r \ \theta_f \ \delta]^T$.

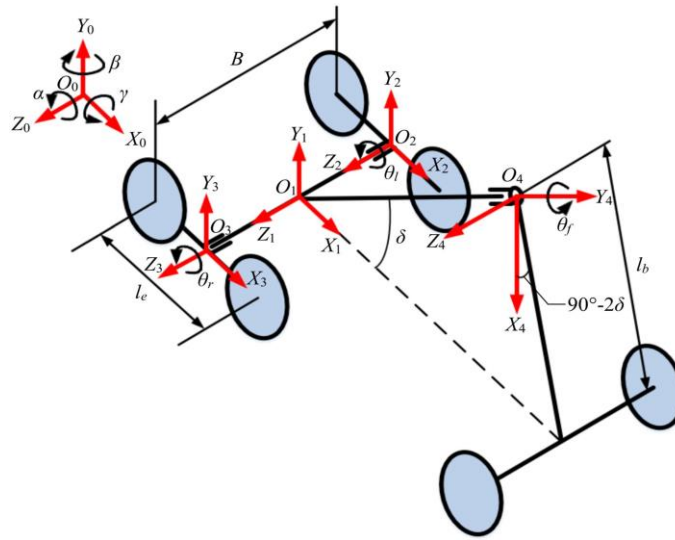


Рисунок 2.1 – Принципова схема та геометричні параметри робота [26]

Коли робот долає перешкоду, він налаштований таким чином, щоб уникнути контакту між корпусом робота та перешкодою до того, як задні колеса для подолання перешкоди торкнуться її. Навіть якщо контакт відбудеться, він повинен мати механізм відключення, щоб робот мав хорошу геометричну здатність проходження. Під час процесу подолання перешкоди робот, найімовірніше, зіткнеться з перешкодою на етапі подолання перешкоди, чого необхідно уникнути, і геометричне обмеження для подолання перешкоди на цьому етапі аналізується наступним чином [26].

На рисунку 2.2 показано конфігурацію подолання перешкод роботом у фазі (E) у критичному стані. На цьому етапі, після того, як передні колеса для подолання перешкод вдаряються об стінку перешкоди, адаптивні коромисла повертаються та приводять задні колеса для подолання перешкод у контакт з краєм перешкоди. Якщо не враховувати кут повороту колеса робота, кути повороту адаптивних коромисел з обох боків однакові, тобто $\theta_l = \theta_r = \theta$. У цій конфігурації як задні колеса для подолання перешкод, так і передні колеса для подолання перешкод контактують з перешкодою.

могли підніматися по верхній поверхні перешкоди, координата $0_{y_{C1}}$ точки C_1 повинна бути більшою за координату $0_{y_{C0}}$ точки C_0 , тобто

$$0_{y_{C1}} > 0_{y_{C0}} \quad (2.2)$$

Звідки

$$\begin{cases} 0_{y_{C1}} = r \sin \delta \cos \alpha + r \cos \delta \sin \alpha + h - 2l_b \cos \delta \sin \alpha + r \\ 0_{y_{C1}} = h \end{cases} \quad (2.3)$$

Підставляючи рівняння (2.3) у рівняння (2.4), геометричне обмеження для подолання перешкод запропонованим роботом можна виразити як:

$$r \sin \delta \cos \alpha + r \cos \delta \sin \alpha + h - 2l_b \cos \delta \sin \alpha + r > h \quad (2.4)$$

Рівняння (2.4) можна додатково виразити як функцію відносно δ як

$$G(\delta) = r \sin \delta \cos \alpha + r \cos \delta \sin \alpha - 2l_b \cos \delta \sin \alpha + r > 0 \quad (2.5)$$

де вона має

$$\sin \alpha = \frac{h - \frac{l_e}{2} \sin(A_1 + A_2)}{2l_b \cos \delta} \quad (2.6)$$

та

$$\cos \alpha = \sqrt{1 - (\sin \alpha)^2} \quad (2.7)$$

З наведеного вище виведення видно, що коли $G(\delta) > 0$, запропонований робот задовольняє геометричне обмеження для подолання перешкод, яке визначається як геометрична здатність проходження.

На додаток до геометричного обмеження, отриманого в попередньому розділі, робот також повинен відповідати певним статичним умовам. Звертаючись до процесу подолання перешкод, представленого на рис. 2.2, на

етапі (а) робот повинен бути здатним піднімати свою передню частину корпусу вздовж вертикальної поверхні перешкоди. На етапі (с) адаптивні ласти для підйому повинні бути здатними підтримувати задню частину корпусу шляхом перевертання. Отже, необхідно провести статичний аналіз, щоб знайти умови, які повинні бути виконані для подолання перешкод роботом.

На рисунку 2.3 показано геометричні та силові параметри робота на етапі подолання перешкоди (а).

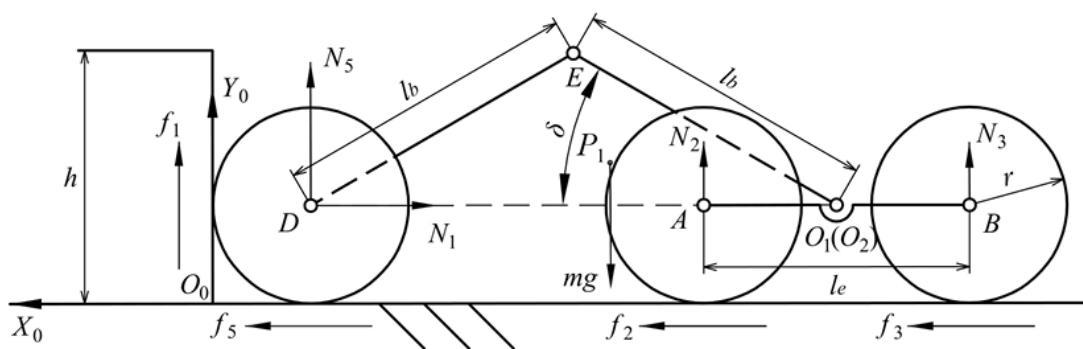


Рисунок 2.3 – Статичні сили робота на етапі подолання перешкоди (а) [26]

На цьому етапі передні крокуючі колеса контактують з перешкодою, сила тертя f_1 між колесами та перешкодою поступово піднімає передні крокуючі колеса. Чотири колеса для подолання перешкод продовжують рухатися вперед, з одного боку підтримуючи контакт між передніми крокуючими колесами та перешкодою, а з іншого боку, призводячи до створення крутного моменту T , який допомагає підйомній дії. Щоб подолати перешкоду, робот повинен бути в змозі завершити підйом передніх крокуючих коліс на вершині перешкоди, щоб перейти у фазу (с). Отже, на цій фазі має бути виконана статична умова для підйому передніх крокуючих коліс.

Після того, як передня частина робота подолає перешкоду, він продовжуватиме рухатися вперед, доки передні колеса для подолання перешкоди не торкнуться перешкоди та не перейдуть у фазу подолання

перешкоди (с). На рисунку 2.4 показано геометричні та силові параметри робота у фазі подолання перешкоди (с). У цій фазі передні крокуючі колеса рухаються вперед по вершині перешкоди та тягнуть робота вперед силою тертя f_1 .

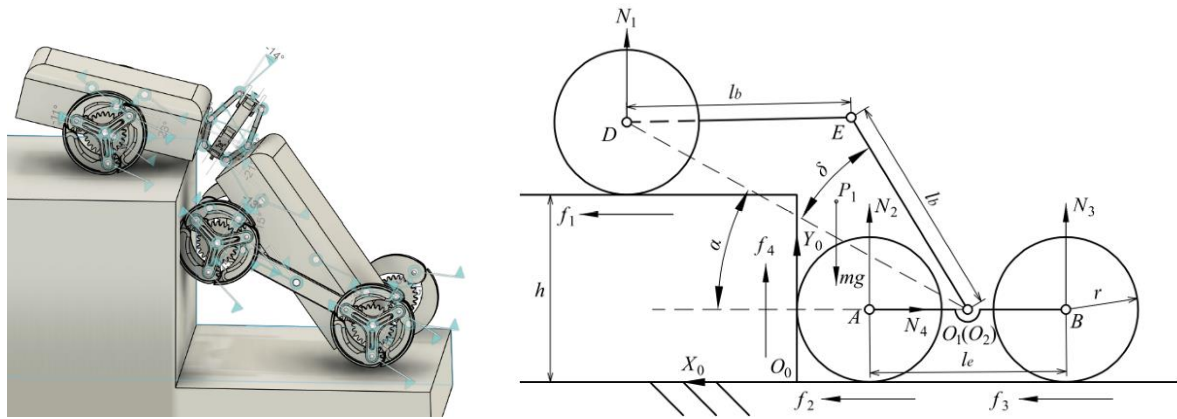


Рисунок 2.4 – Статичні сили робота на етапі подолання перешкоди (с) [26]

Передні колеса для подолання перешкоди контактують з вертикальною поверхнею перешкоди та фіксуються силами тертя f_2 та f_4 . Адаптивні лаштунки-гойдалки поступово повертаються та підтримують задню частину робота.

Щоб подолати перешкоду, робот повинен мати можливість підтримувати себе, повертаючи адаптивні лаштунки-гойдалки, щоб перейти у фазу (e). Отже, у цій фазі має бути виконана статична умова для підтримування задньої частини робота.

2.2 Вибір варіанта конструкції

Потенційними рішеннями можуть бути колісний робот [8], гусеничний робот [8], робот на ногах [12] та гібридні роботи [16]. Серед них колісні роботи є привабливим вибором завдяки своїй простій структурі та низькому споживанню енергії [10]. Однак колеса не підходять для подолання перешкод

та нерівностей, що обмежує застосування колісних роботів у неструктурованих середовищах [11]. Тому дослідники запропонували кілька методів вирішення вищезазначених проблем.

Перший – колісний робот з пасивною підвіскою. Шарнірна рама з пасивною підвіскою може покращити адаптивність колісних мобільних роботів для роботи в неструктурованих середовищах. Прикладами колісних роботів з шарнірними рамами з пасивною підвіскою є марсоходи типу «гойдалка-візок», розроблені для дослідження Марса, наприклад, марсіанський дослідницький робот Perseverance [12], місячний дослідницький робот Jade Rabbit 2 [13], а також Spirit and Sojourner [14]. Два механізми «гойдалка-візок» з кожного боку роботів утримують усі колеса в контакті з землею, забезпечуючи високу адаптивність до нерівної місцевості або невеликих перешкод для роботів без будь-якого керування внутрішньою конфігурацією локомоції. Тим не менш, шарнірні рами з пасивною підвіскою ускладнюють механічну структуру робота та мають обмеження в адаптації до складної місцевості з високими перешкодами та крутими схилами [15].

Другий – колісний робот з активним шасі. Мобільні роботи з активним шасі для контролю своєї постави продемонстрували свою потенційну здатність працювати на складній місцевості, такій як високі перешкоди та круті схили. До цих роботів належать SRR [16], Tri-star [20], Scarab [17] та пасивно-активно трансформований мобільний робот, запропонований Jian та ін. [18]. Такі роботи можуть активно змінювати свої конфігурації, регулюючи важелі та шарніри підвіски, тим самим покращуючи свою стійкість та зчеплення. Порівняно з пасивно підвішеною шарнірною рамою, цей тип системи пересування розширює мобільність робота завдяки простішій механічній структурі, але додає складності системі керування та вимагає додаткових енергоресурсів [19].

Вищезазначені методи покращують адаптивність роботів до нерівної місцевості, але роботи все ще погано справляються з високими, крутими та вертикальними перешкодами. Гібридні роботи з колесами викликали інтерес

дослідників, оскільки вони поєднують просту структуру та високу енергоефективність колісних роботів з адаптивністю та високою здатністю долати перешкоди роботів з колесами [20].

Третій, окремих робот з колесами. Такі роботи з колесами оснащені окремими ногами, з'єднаними з колісним роботом, який залежно від умов місцевості, ноги та колеса цих роботів можна використовувати по черзі, що спрощує концепції проектування цих роботів. Цей тип робота оснащений двома різними системами пересування, тому його маса велика, а система керування складна [21].

Четвертий, комбінований робот з колесами. Ці типи мобільних роботів на колесах мають колеса, прикріплені до їхніх ніг. Такі механізми дозволяють роботу активно контролювати положення центру ваги відносно точок контакту з землею [22]. Всі ці роботи мають багато ступенів свободи, що забезпечує високу адаптивність до нерівної місцевості та здатність долати перешкоди. Але велика кількість суглобів та коліс, які необхідно приводити в дію незалежно, робить системи керування та пересування дуже складними.

П'ятий, реконфігурований робот з колесами та ногами. Ці типи мобільних роботів з колесами та ногами використовують реконфігуровані модулі для досягнення колісних або ногових функцій. Порівняно з роботами з розділеними колесами та ногами, ця концепція конструкції зменшує об'єм та масу робота, але механічна конструкція реконфігурованих модулів є відносно складною. Такі мобільні роботи можуть мати обмежену вантажопідйомність та низьку надійність у забрудненому середовищі або у разі ударів, тому вони рідко використовуються на практиці [21].

Шостий, робот з обертовими колесами та ногами. Такі роботи-локомотиви оснащені обертовими ногами або важелями колісної форми, що є підходящим рішенням для роботів малого розміру, оскільки вони зменшують складність системи керування, зберігаючи при цьому хорошу здатність долати перешкоди [23]. Але роботи з обертовими ногами постійно піддаються ударам та вібраціям у процесі руху, що не сприяє перенесенню ними обладнання,

такого як камери. Зокрема, робот EPI.Q поєднує в собі характеристики обертових ніг та коліс, прикріплених до ніг. Він має чотири одиниці локомоції, кожна з яких містить три колісні ноги, рівномірно розподілені навколо носія. Використовуючи планетарні зубчасті передачі з одним вхідним ступенем свободи та двома вихідними ступенями свободи, роботи можуть перемикатися з руху коліс на рух ногами залежно від динамічних умов. Ноги можуть обертатися незалежно для підйому на перешкоди, тоді як на рівній поверхні активними є лише колеса, що спрощує систему керування та сенсорного сприйняття роботів.

На основі аналізу вищезгаданих досліджень, пропонується розробити портативний шестиколісний робот з двома адаптивними лапами-гойдалками для лазіння та реконфігурованим корпусом, який може переналаштовуватися у три різні режими, що забезпечує адаптивність до місцевості, здатність долати перешкоди та портативність. Як показано на рис. 2.5, порівняно з попередніми роботами, запропонований робот має три переваги.

По-перше, він має просту та компактну конструкцію з двома лапами-гойдалками, що дозволяє роботу адаптуватися до нерівностей місцевості та забезпечує стабільну платформу для робочого обладнання.

По-друге, повертаючи адаптивні лапки-гойдалки для лазіння, він має можливість адаптивного подолання перешкод, яке не залежить від складного сприйняття та керування.

І по-третє, завдяки балансуєчому механізму (далі – Rob-ant), запропонований робот може складатися для транспортування та портативності. Цей робот поєднує переваги вищезгаданих роботів та долає їх недоліки, що має широкі перспективи застосування не лише у виявленні рятувальних робіт під час стихійних лих, але й у розмінуванні та виявленні вибухових речовин.

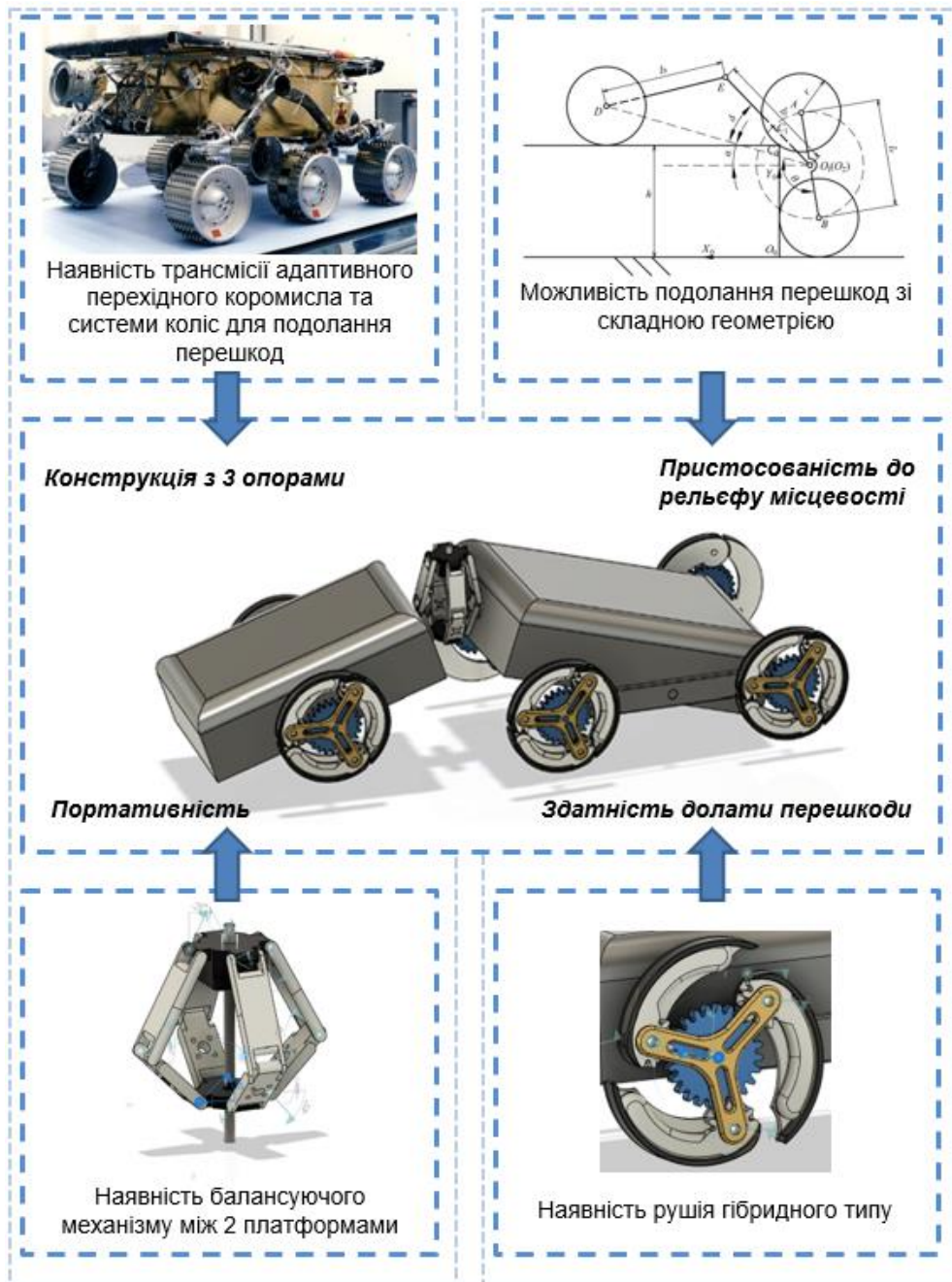


Рисунок 2.5 – Переваги запропонованого робота

2.3 Розробка конструкції балансуєчого пристрою

Завдяки балансуєчому механізму та гойдалкам робот може долати перешкоди різної висоти. Процес подолання перешкод роботом показано на рис. 2.2 – 2.4 Зазвичай він складається з шести кроків. Після виявлення перешкоди робот спочатку перетворюється на V-подібну конфігурацію та стикається з перешкодою (рис. 2.6, а). Потім, використовуючи тертя між

перешкодою та колесами, передні крокуючі колеса тягнуть передню частину робота, щоб він переліз через перешкоду (рис. 2.6, б). Після цього робот продовжує рух вперед (рис. 2.6, в), доки передні крокуючі колеса не торкнуться перешкоди. Згодом, коли крокуючі колеса рухаються вперед, адаптивні лаштунки-гойдалки з обох боків робота повертаються, піднімаючи задню частину робота (рис. 2.6, г). Коли задні крокуючі колеса торкаються краю перешкоди (рис. 2.6, д), робот перелазить перешкоду всіма шістьма колесами, що призводить до того, що весь робот перетинає перешкоду (рис. 2.6, е).

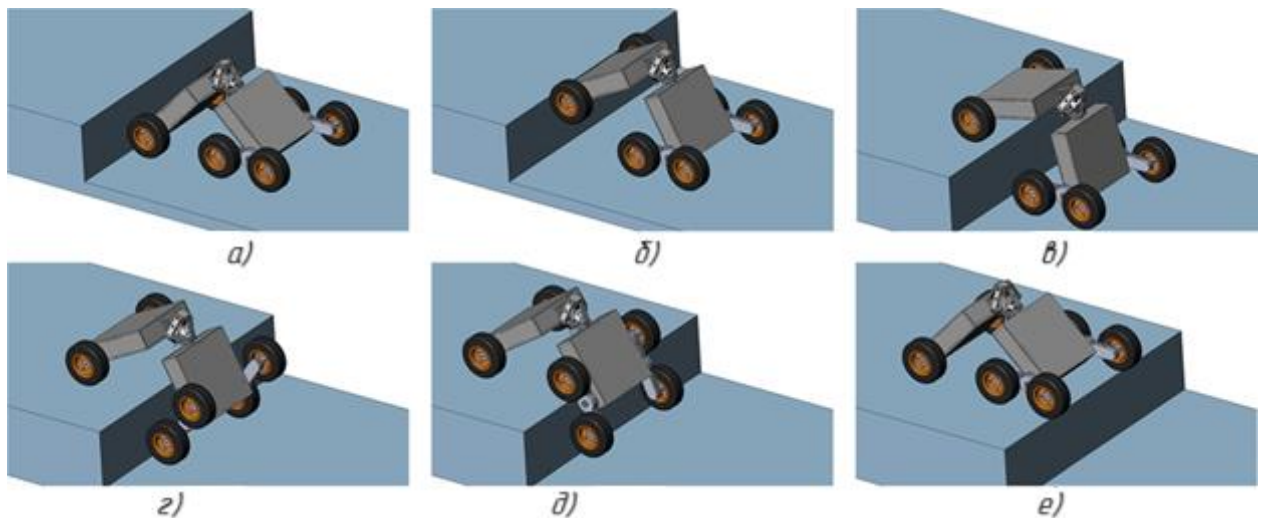


Рисунок 2.6 – Процес подолання перешкоди роботом

На рисунку 2.6 прийняті наступні позначення:

- а) робот спочатку трансформується у V-подібну конфігурацію та після виявлення перешкоди контактує з нею;
- б) передні крокуючі колеса тягнуть передню частину робота, щоб він подолав перешкоду, використовуючи тертя між перешкодою та колесами;
- в) робот продовжує рухатися вперед, доки передні крокуючі колеса не торкнуться перешкоди;
- г) коромисла для підйому з обох боків повертаються та піднімають задню частину робота, рухаючи крокуючі колеса вперед;
- д) задні крокуючі колеса торкаються краю перешкоди;

е) робот піднімається на перешкоду всіма шістьма колесами.

Виходячи з механічної конструкції робота, представленої в розділі 3, та процесу подолання перешкод, описаного вище, можна виявити, що здатність робота підніматися та перетинати перешкоду пов'язана з конфігурацією між передньою та задньою частинами, яка визначається механізмом варіанта Rob-ant. Щоб підніматися на перешкоди, робот повинен одночасно задовольняти умови геометричної здатності проходження, статичної здатності проходження та стійкості руху.

Для геометричної здатності проходження робот не може заважати або стикатися з перешкодами в процесі подолання перешкод. Для статичної здатності проходження передні крокуючі колеса повинні бути здатні тягнути передню частину тіла вздовж вертикальної поверхні перешкоди, а лаштунки-гойдалки повинні бути здатні підтримувати задню частину тіла під час перекидання. З точки зору стійкості руху, потрібно, щоб робот підтримував рівновагу протягом усього процесу подолання перешкод.

Щоб знайти зв'язок між конфігураціями механізму варіанта Rob-ant та здатністю запропонованого робота долати перешкоди, у цьому розділі сформульовано та проаналізовано геометрію та положення робота, а також геометричні обмеження, статичні умови та умову стійкості руху для подолання перешкод.

2.4 Вибір варіанту гібридного рушія

Пересування на колесах – це найпростіша, але найефективніша стратегія пересування по рівній та гладкій поверхні землі.

Найбільш незвичайним аспектом мобільних роботів є триколісний механізм пересування з епіциклічною передачею. На рисунку 2.7 показано схему епіциклічної передачі; основними частинами є: водило сателітів А, сонячна шестерня В, три перші сателітні шестерні С, три другі сателітні шестерні D та три колеса Е; водило сателітів з'єднане з шасі робота F за

допомогою обертового шарніра з віссю, паралельною осям шестерень та коліс [27].

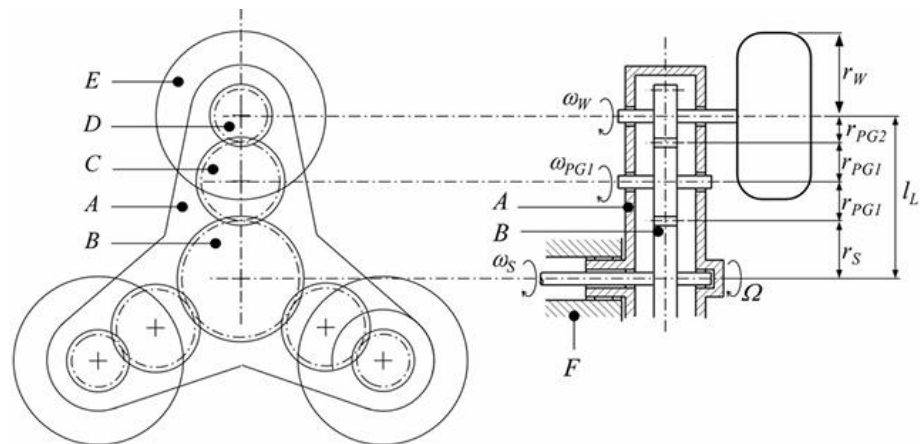


Рисунок 2.7 – Функціональна схема триколісний механізм пересування з епіциклічною передачею

Геометрія штатива блоку пересування дозволяє перемикатися між пересуванням на колесах (рис. 2.8, а) і пересуванням на ногах (рис. 2.8, б).

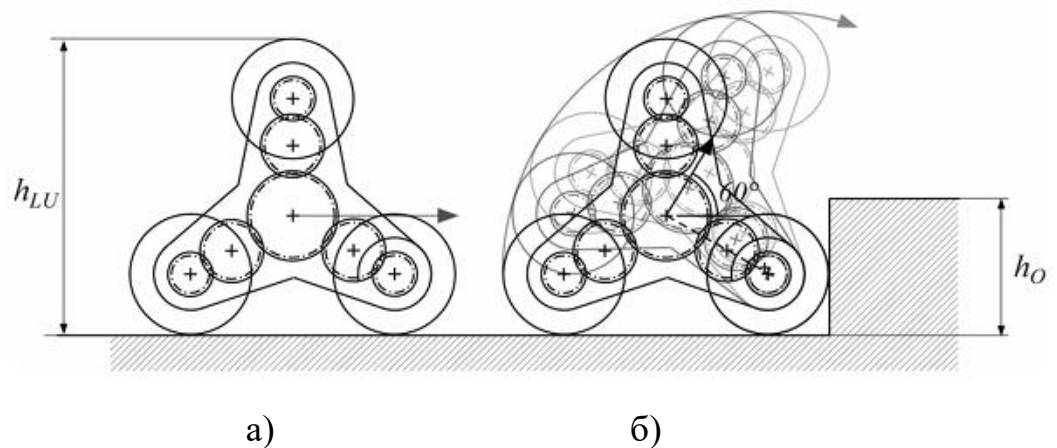


Рисунок 2.8 – Режим просування вперед та режим автоматичного підйому [27]

У нормальних умовах робот рухається в режимі просування, і це забезпечує високу швидкість та дальність. Коли відбувається контакт між переднім колесом та перешкодою, переднє колесо зупиняється, а водило планети починає обертатися навколо переднього колеса, дозволяючи роботу

подолати сходинку в режимі автоматичного підйому.

Вчені Університету Осаки запропонували вдосконалену гібридну платформу з колісними ногами за допомогою висувної конструкції, натхненної бронетранспортером [28]. Робот являє собою кватропед з чотирма висувними ногами, які можна трансформувати в колеса.

Запропонований висувний механізм має колесо великого діаметра для реалізації високої здатності долати перешкоди.

Ідея висувного модуля з колісними ногами проілюстрована на рис. 2.9. Колесо містить усі суглоби ноги; отже, воно здатне досягти більшого діаметра для подолання перешкод.

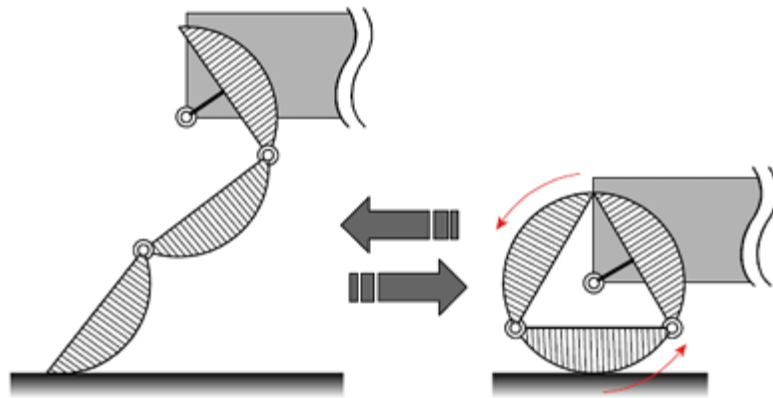


Рисунок 2.9 – Висувний модуль колеса-ніжки [28]

Пересування на ногах, як це виявлено в більшості біологічних систем, генерує більш ефективні рухи на нерівній місцевості, динамічно пристосовуючись до різних схилів, умов поверхні та перешкод. Механізми-трансформери на колісних ногах мають на меті скористатися унікальними перевагами кожного з двох типів пересування шляхом активної або пасивної трансформації між ними. «Активний» механізм використовує як мінімум один виконавчий механізм для запуску переходу між двома режимами. З іншого боку, «пасивний» механізм трансформується без використання додаткового приводу [29].

Далі аналізуємо сімейство транспортних засобів, що називається

Екологічний гібридний робот (EHR), які можуть пересуватися річками, їздити по суші та болотах. Сімейство EHR наразі складається з трьох моделей транспортних засобів, кожна з яких приблизно вдвічі більша за попередню (рис. 2.10).

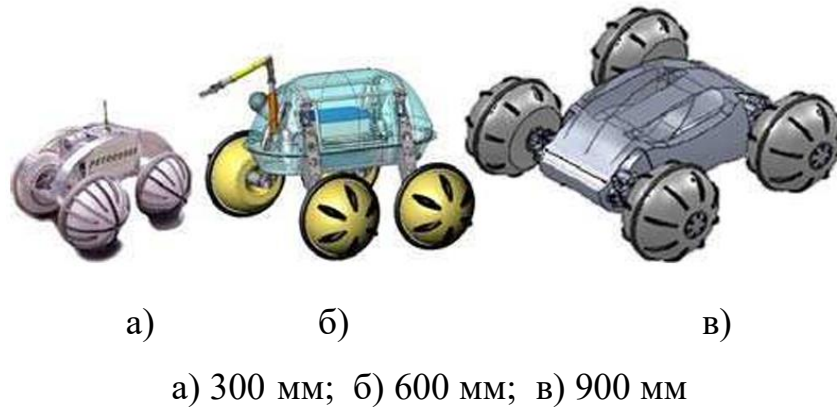


Рисунок 2.10 – Сімейство EnvironmentalHybridRobot [29]

Різні моделі використовуються відповідно до конкретних характеристик місії, зони операції та вимог до датчиків. Наприклад, малий транспортний засіб призначений для коротких операцій у лісистих районах, де його великий аналог не може маневрувати, тоді як великий використовується для тривалих місій на відкритих місцевостях. Усі транспортні засоби можуть бути телекерованими, причому великий також здатний перевозити людину, яка доставить транспортний засіб до регіонів, що цікавлять.

Аналогічний механізм WheelLeR (рис. 2.11), обраний за результатами аналізу, простий і легко налаштовується, що гарантує широкий спектр потенційних застосувань у мобільних роботах різного масштабу та автономних транспортних засобах. Без використання додаткового приводу трансформація колісної ноги може бути або активно залежати від напрямку руху колеса, або пасивно ініціюватися зовнішніми факторами, наприклад, перешкодами або пересіченою місцевістю, шляхом вибору правильних параметрів конструкції [27].

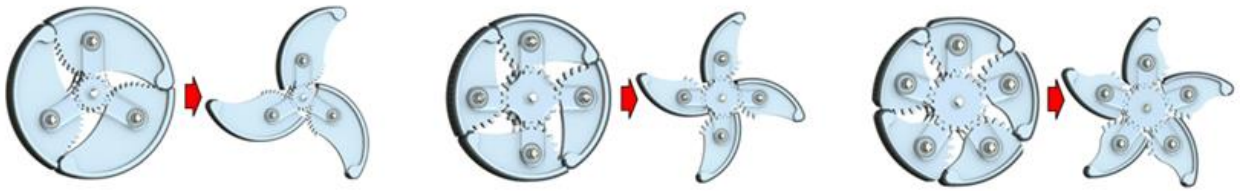


Рисунок 2.11 – Варіанти трансформованих колес в режимі ноги для подолання перешкоди [27]

Протягом останніх кількох десятиліть було розроблено широкий спектр активних конструкцій. Одним із поширених варіантів є використання кількох сегментів ніжок, рівномірно розташованих навколо диска, який з'єднаний з осьовим валом. Потягуючи та штовхаючи диск, сегменти ніжок можуть відповідно відкриватися та закриватися [27].

Іншим типом конструкції є повноцінне колесо, що складається з двох напівколіс, які можуть приводитися в дію для трансформації в ноги. При специфічному розташуванні двигуна і редуктора два напівколеса можуть бути або складені в одну напівкруглу ніжку, або відхилитися радіально і утворювати дві ніжки. Крім зубчастої передачі, дротяні та пружинні пари також можуть використовуватися для створення трансформаційних рухів [27].

Замість механічної провідності для передачі сигналів потужності та керування може використовуватися пристрій ковзаючого кільця, що дозволяє помістити кілька сервоприводів в одне колесо та надає колесу більше ступенів свободи [27]. Однак додаткові виконавчі механізми вимагають підвищеного енергоспоживання, складної механічної конструкції та складного керування.

У порівнянні з активними механізмами, пасивних механізмів існує відносно небагато. Кожне колесо складається з двох «нормальних» ніжок, однієї «тригерної» ніжки, передавального диска та спицевої рами.

3 МЕХАТРОННА СИСТЕМА ТА СИСТЕМА КЕРУВАННЯ ПРОТОТИПОМ

Як показано на рис. 3.1, мехатронна система робота складається з шести частин: системи керування, сенсорної системи, рушійних компонентів, системи живлення, виконавчих компонентів та механічного корпусу робота.

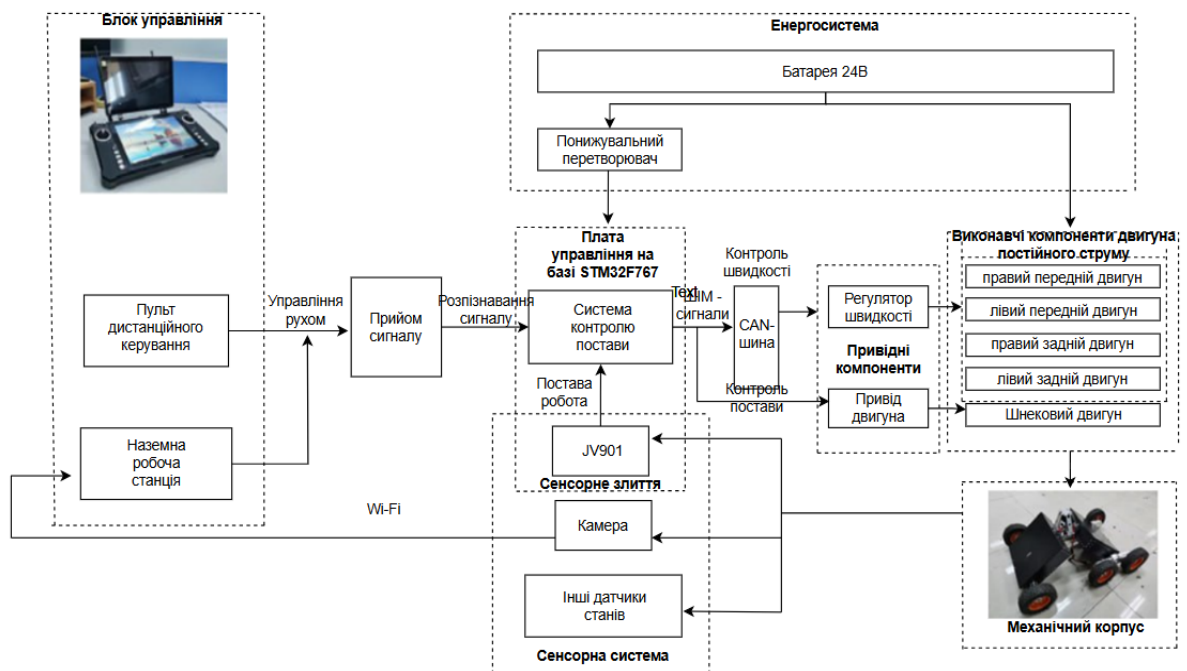
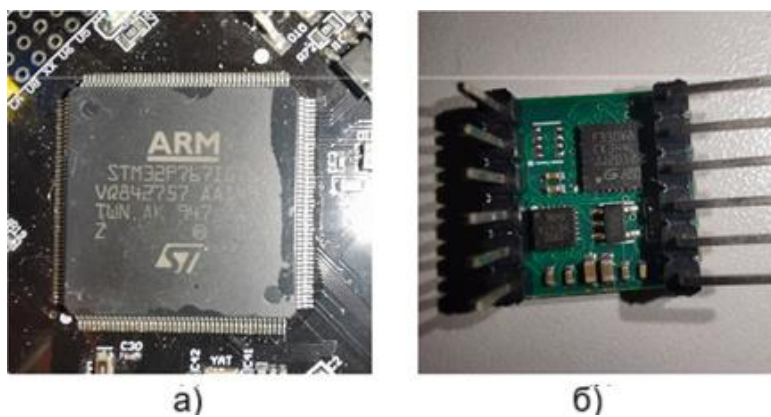


Рисунок 3.1 – Структура мехатронної системи робота [22]

Система керування роботом складається з двох контролерів, один з яких є низькорівневим контролером, що являє собою плату керування на базі мікросхеми STM32F767 (STMicro, Італія та Франція, рис. 3.2, а), а верхній – це пульт дистанційного керування або наземна робоча станція. Команди руху, що надсилаються верхнім контролером, декодуються приймачем сигналів, а потім передаються до системи керування положенням робота. Після отримання сигналу, поєднаного з положенням робота, виміряним дев'ятиосьовим датчиком JY901 (WitMotion, Китай, рис. 3.2, б), система керування положенням надсилає ШІМ-сигнали та керує п'ятьма двигунами робота через

рушійні компоненти. Керований виконуючими компонентами, робот рухається, а потім передає інформацію про свій стан (положення, залишок заряду батареї, GPS тощо) та зображення з камери на робочу станцію. Вся мехатронна система живиться від літієвої батареї 24 В.



а) STM32F767; б) JY901

Рисунок 3.2 – Апаратна частина запропонованого мобільного робота [22]

Верхнім контролером робота може бути портативна наземна робоча станція (Zhongju Century, Китай, рис. 3.3, а) або просто пульт дистанційного керування (RadioLink, Китай). Наземна робоча станція базується на операційній системі Windows (Microsoft, США).

Вона може отримувати інформацію про стан робота, завантажену сенсорною системою, та робити її видимою для оператора, як показано на рис. 3.3, б (це програмне забезпечення розроблено нами незалежно та також застосовне до інших роботів у нашій лабораторії). Згідно з інформацією, оператор може керувати рухом робота, потягнувши за гойдалки.

Низькорівневий контролер робота одночасно виконував п'ять завдань для реалізації функцій сприйняття, прийняття рішень, керування та зв'язку робота. Усі завдання виконуються на вбудованій платі розробки на базі мікросхеми STM32F767 одночасно через операційну систему $\mu\text{C}/\text{OS-III}$ (Micrium, США). Робочий процес низькорівневого контролера показано на рис. 3.4, а.



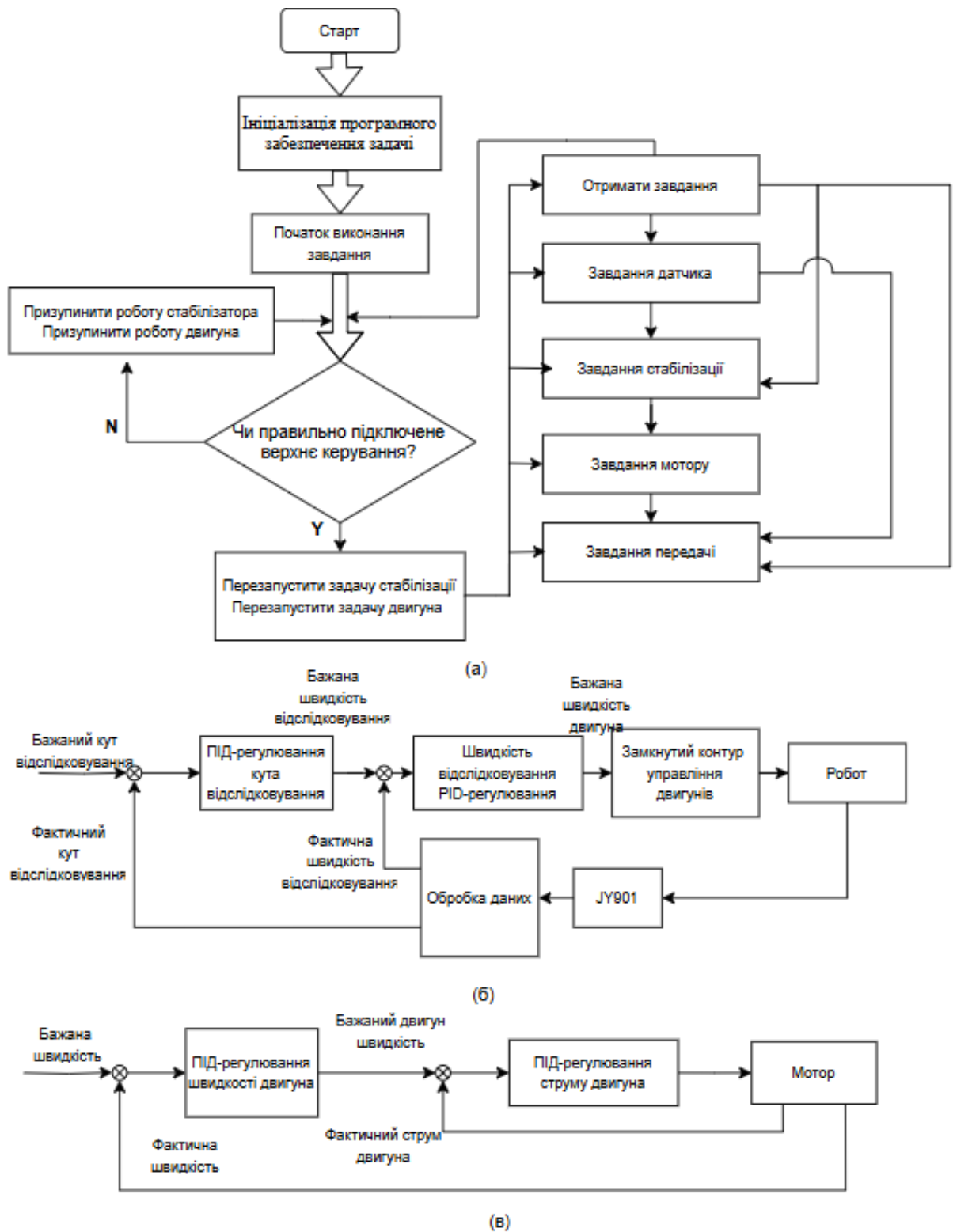
а) зовнішній вигляд робочої станції; б) інтерфейс моніторингу стану робота

Рисунок 3.3 – Портативна наземна робоча станція [22]

Після запуску робота спочатку ініціалізуються всі види програмного забезпечення. Потім робот активує всі завдання лише після того, як виявить, що з'єднання з верхнім контролером є нормальним. Завдання отримання відповідає за отримання сигналів від верхнього контролера, зчитування значень сигналів кожного каналу та перетворення їх на команди керування, такі як швидкість та положення. Завдання датчиків відповідає за зчитування необроблених даних датчиків, таких як гіроскоп та акселерометр, та передачу їх до завдання стабілізації після обробки даних. Завдання стабілізації є основним завданням керування системи. Він отримує керуючі дані від завдання отримання та дані датчиків від завдання датчика. Як показано на рис. 3.4, б, за допомогою замкнутого ПД-регулювання кута відслідковування та швидкості відслідковування робота, він розподіляє та виводить бажану швидкість двигунів, щоб контролювати швидкість та напрямок руху робота.

Як показано на рис. 3.4, в, завдання двигуна в основному виконує замкнуте ПД-регулювання швидкості двигуна. Його вхідними параметрами є керуючі значення бажаної швидкості двигуна, розраховані завданням стабілізації, і він контролює швидкість двигуна, змінюючи струм двигуна.

Завдання передачі відповідає за завантаження інформації про положення робота, напругу, струм та навколишнє середовище до верхнього контролера, а також за отримання інструкцій щодо оновлення, зміни параметрів та інших інструкцій від верхнього контролера.



а) робочий процес низькорівневого контролера; б) замкнутий ПІД-регулятор кута та швидкості відслідковування; в) замкнутий ПІД-регулятор швидкості двигуна

Рисунок 3.4 – Склад низькорівневого контролера робота

Двигун постійного струму використовується для перетворення електричної енергії (постійного струму) в механічну енергію (обертальний рух). Крутний момент двигуна, наведений у рівнянні (3.1) [30], є результатом постійного струму збудження, що встановлюється в обмотці збудження. Хоча співвідношення між вхідною напругою якоря та струмом якоря показано в рівнянні (3.2) [30], також співвідношення між зворотною електрорушійною напругою та швидкістю двигуна пояснюється в рівнянні (3.3) [31]. Рівняння (3.5) показує співвідношення між крутним моментом двигуна та як крутним моментом навантаження, так і крутним моментом збурення [30].

$$T_m(S) = K_T I_a(S) \quad (3.1)$$

$$V_a(S) = (R_a + L_a S) I_a(S) + V_b(S) \quad (3.2)$$

$$V_b(S) = K_b \omega(S) \quad (3.3)$$

$$I_a(S) = \frac{V_a(S) - K_b \omega(S)}{R_a + L_a S} \quad (3.4)$$

$$T_L(S) = J s \omega(S) + b \omega(S) = T_m(S) - T_d(S) \quad (3.5)$$

$$(J s + b) \omega(S) = K_T \frac{V_a(S) - K_b \omega(S)}{(R_a + L_a S)} \quad (3.6)$$

де T_m – крутний момент двигуна;

K_T – постійна крутного моменту;

I_a – струм якоря;

V_a – вхідна напруга;

R_a – опір якоря;

L_a – індуктивність якоря;

V_b – зворотна електрорушійна сила (ЕРС);

K_b – постійна ЕРС;

ω – кутова швидкість ротора;

T_L – крутний момент навантаження;

J – вимірювання інерційності обертання підшипника двигуна;

b – постійна дробу.

Рівняння (3.6) можна реалізувати за допомогою блок-схеми, як показано на рисунку 3.5, яка описує модель системи керування швидкістю двигуна постійного струму [32].

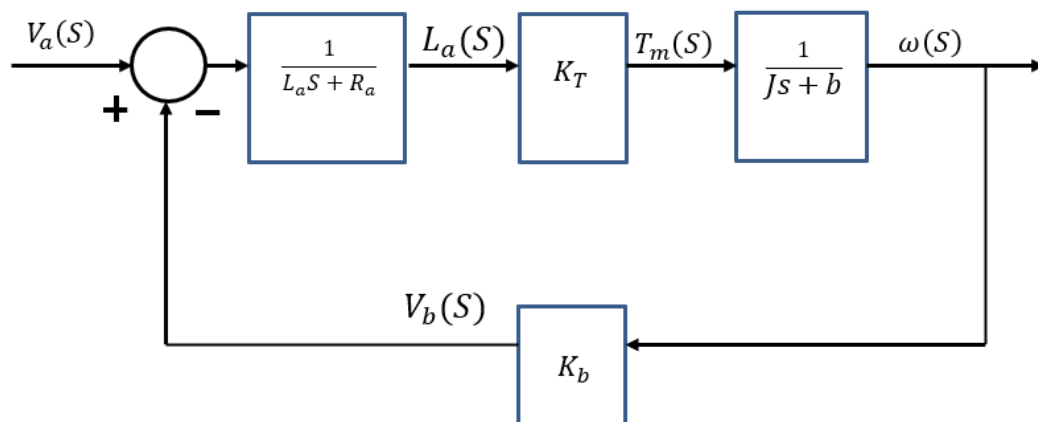


Рисунок 3.5 – Блок-схема двигуна постійного струму (регулювання швидкості)

Рівняння (3.7) [33] представляє передавальну функцію замкнутого циклу керування швидкістю двигуна постійного струму відносно вхідної напруги [34].

$$\frac{\omega(s)}{V_a(s)} = \frac{K_T}{(R_a + L_a s)(J s + b) + K_b K_T} = \frac{K_T}{L_a J s^2 (R_a J + L_a b) s + (R_a b + K_b K_T)} \quad (3.7)$$

ПІД-регулятор — це тричленний регулятор і одна з найдавніших стратегій керування, що використовується з початку минулого століття [35].

Простота та відмінна, якщо не оптимальна, ефективність ПД-регулятора, а також здатність обробляти широкий спектр процесів, роблять його ефективним у багатьох застосуваннях і є стандартним регулятором у промислових умовах. Формула постійної часу ПД-регулятора наведена в рівнянні (3.8) [35].

$$G_c = K_p \left(1 + \frac{1}{T_i S} + T_d S \right) \quad (3.8)$$

Де пропорційне підсилення використовується для збільшення швидкості реакції системи та зменшення похибки усталеного стану [34], а інтегральне підсилення використовується для повного усунення похибки усталеного стану, але призводить до небажаного збільшення перерегулювання реакції [34], тоді як диференціальне підсилення використовується для зменшення перерегулювання реакції системи [34]. На рисунку 3.6 показано блок-схему системи керування двигуном постійного струму.

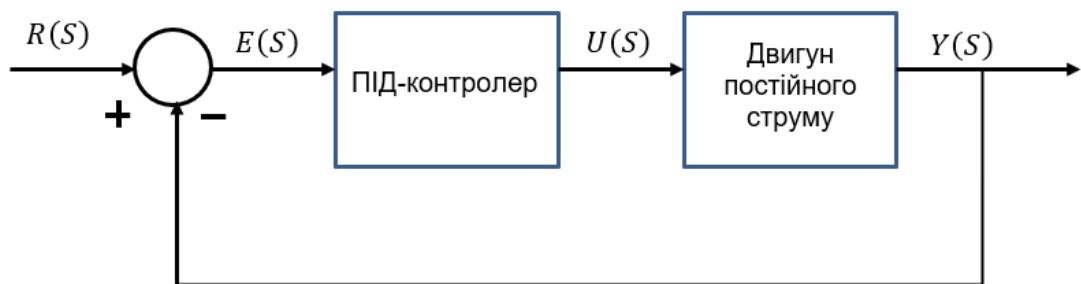


Рисунок 3.6 – Блок-схема системи керування двигуном постійного струму

Швидкість двигуна постійного струму можна контролювати за допомогою різних методів налаштування. Розглянемо методи Циглера-Ніколса як основний метод налаштування, та метод налаштування Чіена-Хронеса-Ресвіка, який є модифікацією методу перехідної характеристики Циглера-Ніколса.

Ці методи налаштування керування були використані для отримання параметрів ПІД-регулятора, які гарантують, що отримана система керування відповідатиме заданим цілям.

Загалом, обидва методи налаштування, запропоновані в цій статті, вимагають стабільної системи з S-подібною кривою для перехідного входу. Ці методи базуються на реєстрації перехідної характеристики системи у відкритому контурі, яка характеризується багатьма параметрами (L , T , K та a). Ці параметри визначаються з одиничної перехідної характеристики процесу, як показано на рисунку 3.7.

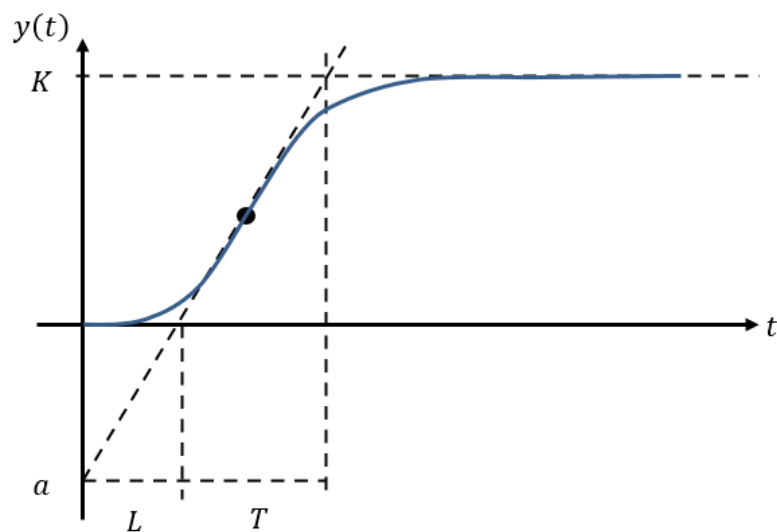


Рисунок 3.7 – Відгук на крок системи з розімкнутим контуром

Спочатку визначається точка, де нахил перехідної характеристики має максимум, а дотична та осі координат дають параметри a та L [32]. У той час як перетини дотичної з віссю часу та лінією $y(t)=k$ дають постійну часу T [33].

4 ПРОЕКТУВАННЯ БАЛАНСУЮЧИХ ПРИСТРОЇВ ТА ГІБРИДНОГО РУШІЯ

4.1 Механічна структура

Виходячи з критеріїв проектування, механічна структура реконфігурованого шестиколісного робота та три конфігурації пересування проілюстровані на рис. 4.1.

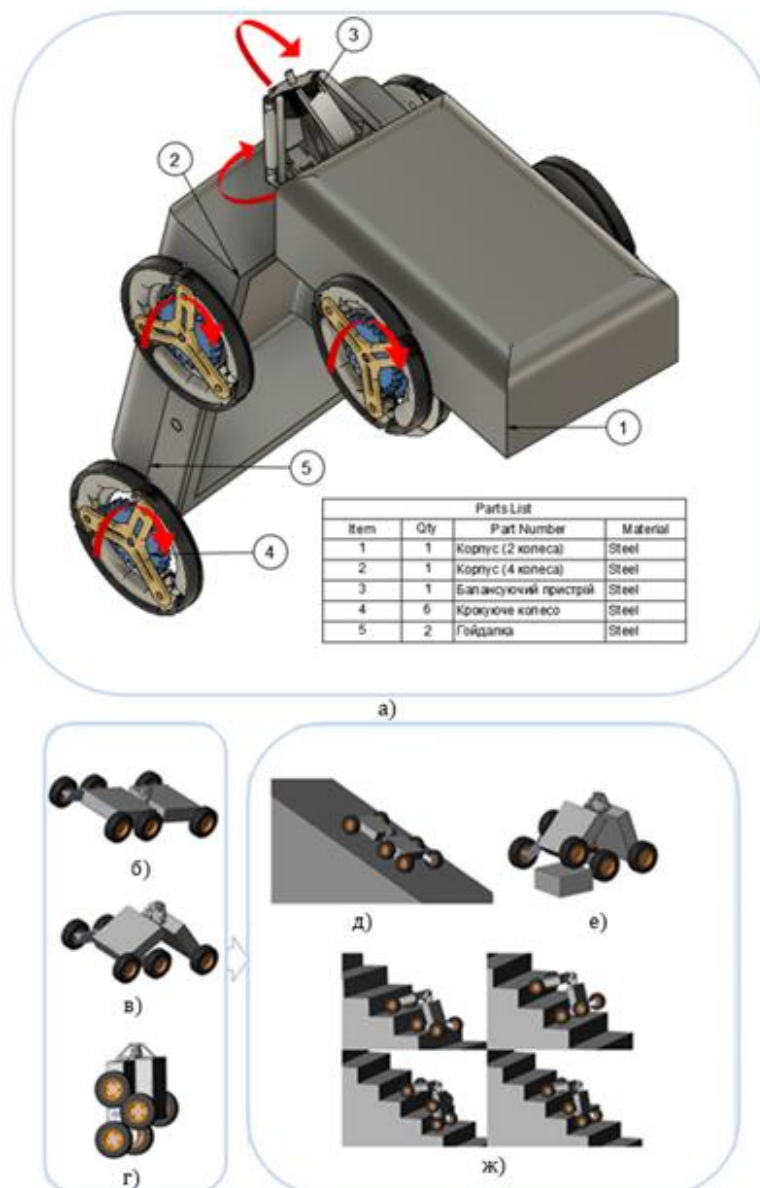


Рисунок 4.1 – Механічна структура реконфігурованого шестиколісного робота та три конфігурації пересування

Як показано на рис. 4.1, а, робот складається з двоколісного переднього корпусу, механізму Rob-ant та чотиріколісного заднього корпусу з двома адаптивними лазальними гойдалками.

Передній корпус має два ходові колеса, що приводяться в рух двома двигунами незалежно ліворуч та праворуч.

Задній корпус має два адаптивні лазальні гойдалки, симетрично встановлені одна до одної, а на обох кінцях кожної гойдалки є колесо для подолання перешкод.

Дві адаптивні лазальні гойдалки можуть пасивно обертатися відносно заднього корпусу, а два колеса для подолання перешкод, встановлені на гойдалці, приводяться в рух одним двигуном постійного струму через серію шестерень. Передній та задній корпуси з'єднані шарнірно за допомогою механізму Rob-ant-варіанту, і між ними відбувається активний рух по тангажу (досягається за допомогою приводного механізму Rob-ant-варіанту) та пасивний рух по качання.

На рис. 4.1 прийняті такі позначення:

- а) механічна структура реконфігурованого шестиколісного робота;
- б) плоска конфігурація;
- в) V-подібна конфігурація;
- г) складена конфігурація;
- д) робот працює в плоскій конфігурації для підйому на схил;
- е) три коромисла робота адаптують свої конфігурації відносно задньої частини корпусу відповідно до форми пересіченої місцевості, щоб підтримувати контакт шести коліс із землею та покращувати стійкість робота;
- ж) робот трансформується у V-подібну конфігурацію, щоб підняти свій центр ваги та запобігти контакту шасі з краєм сходинки та підніматися сходами, постійно перевертаючи коромисла.

Запропонований мобільний робот може трансформуватися, за допомогою механізму Rob-ant-варіанту, у три конфігурації пересування: плоску конфігурацію (рис. 4.1, б), V-подібну конфігурацію (рис. 4.1, в) та

складену конфігурацію (рис. 4.1, г), що забезпечує адаптивність до місцевості, здатність долати перешкоди та портативність.

Під час руху по рівній місцевості або схилу (рис. 4.1, д) робот працює в плоскій конфігурації, щоб знизити свій центр ваги; під час роботи по пересіченій місцевості (рис. 4.1, е) передня частина корпусу та дві адаптивні лазаючі опори з обох боків утворюють три опори робота, які можуть адаптувати свою конфігурацію відносно задньої частини корпусу відповідно до форми пересіченої місцевості, щоб підтримувати контакт шести коліс із землею та покращувати стійкість робота.

Зустрічаючи сходи (рис. 4.1, ж), робот трансформується у V-подібну конфігурацію, щоб підняти свій центр ваги та запобігти контакту шасі з краєм сходинки, він піднімається сходами, постійно перевертаючи гойдалки; коли робота потрібно переносити або транспортувати, він складається, щоб зменшити його розмір, як показано на рис. 4.1, в.

4.2 Механізм варіанту Rob-ant

Реконфігурація станів руху робота реалізується механізмом Rob-ant. Як показано на рис. 4.2, а – рис. 4.2, в, механізм Rob-ant з одним ступенем свободи може перетворювати обмежений лінійний рух на круговий і навпаки [54].

Механізм Rob-ant складається з верхньої пластини, верхньої з'єднувальної групи з 4 стрижнів, нижньої з'єднувальної групи з 4 стрижнів, нижньої пластини, крокового двигуна, гвинтового стрижня, гвинтової гайки та з'єднувального вала (рис. 4.2, б). Верхня пластина, верхня та нижня з'єднувальні групи, а також нижня пластина послідовно з'єднані трьома наборами паралельних обертових шарнірів. Завдяки кроковому двигуну на верхній пластині, який приводить у рух нижню пластину через гвинтовий стрижень та гайку, весь механізм може досягати лінійного зворотно-поступального руху розтягування та стиснення (рис. 4.2, а – рис. 4.2, б). Як видно на рис. 4.1, а, передній та задній корпуси з'єднані механізмом варіанту

Rob-ant. Передній корпус закріплений на одному нижньому з'єднувальному стрижні механізму за допомогою болтів, а на симетричному боці задній корпус зібраний з механізмом через з'єднувальний вал. Таким чином, передній та задній корпуси можуть реалізувати активний рух відносного тангажу, керований кроковим двигуном, для реконфігурації робота (рис. 4.2, в, та пасивний рух відносного крену, щоб робот краще адаптувався до коливань рельєфу місцевості (рис. 4.2, г).

Механізм Rob-ant має дві переваги в цій конструкції:

1) самоблокування, механізм може реалізувати самоблокування за допомогою гайки та гвинта. Таким чином, робот може підтримувати відносну конфігурацію передньої та задньої частин без безперервного живлення;

2) стабільність, верхня пластина механізму Rob-ant завжди паралельна площині, утвореній точками контакту коліс із землею, що забезпечує стабільну платформу для розміщення певного обладнання.

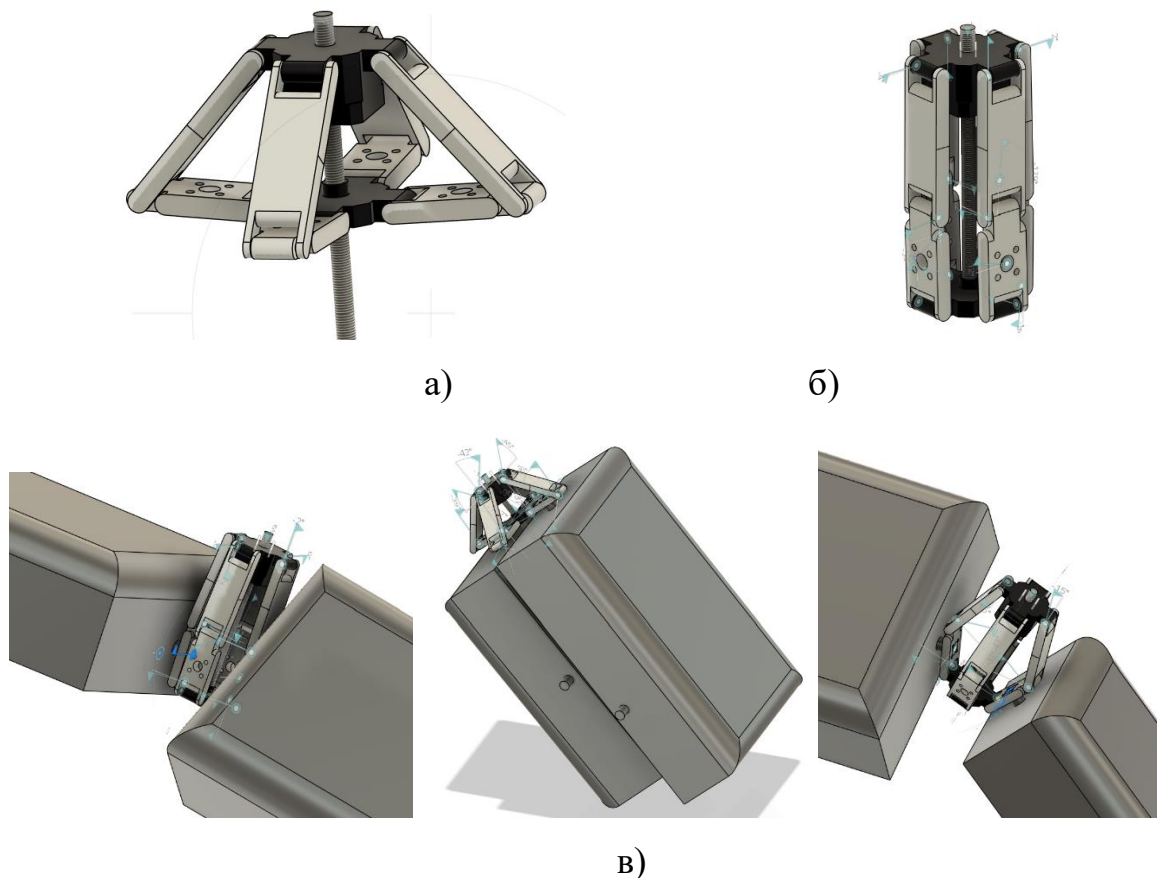
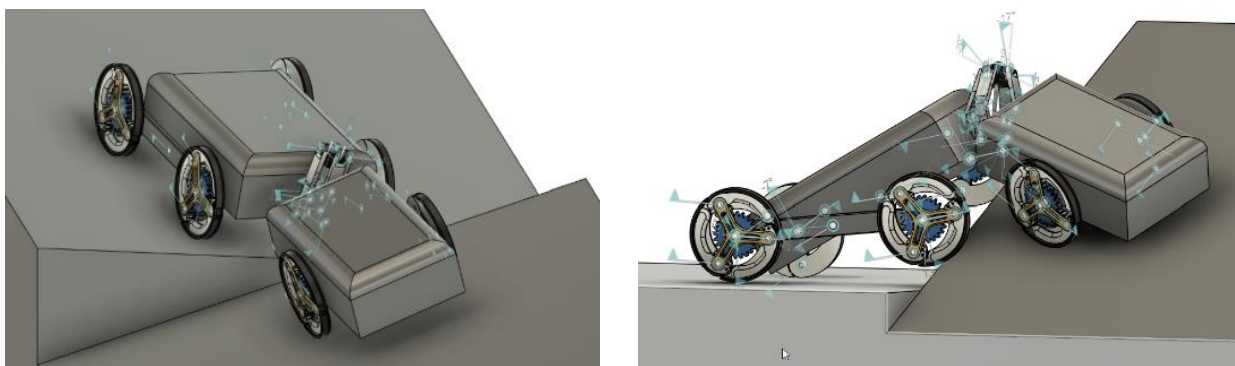
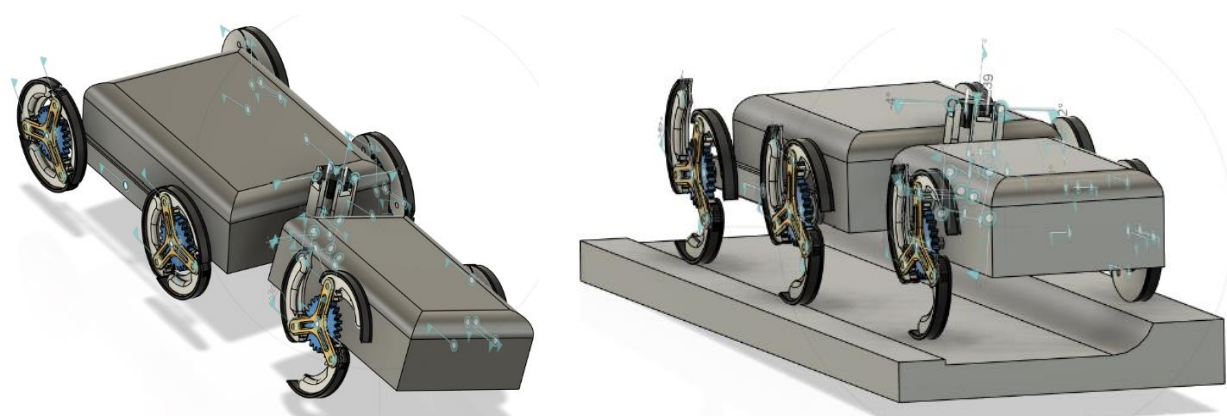


Рисунок 4.2 – Механічна структура та кінематика механізму Rob-ant



г)



д)

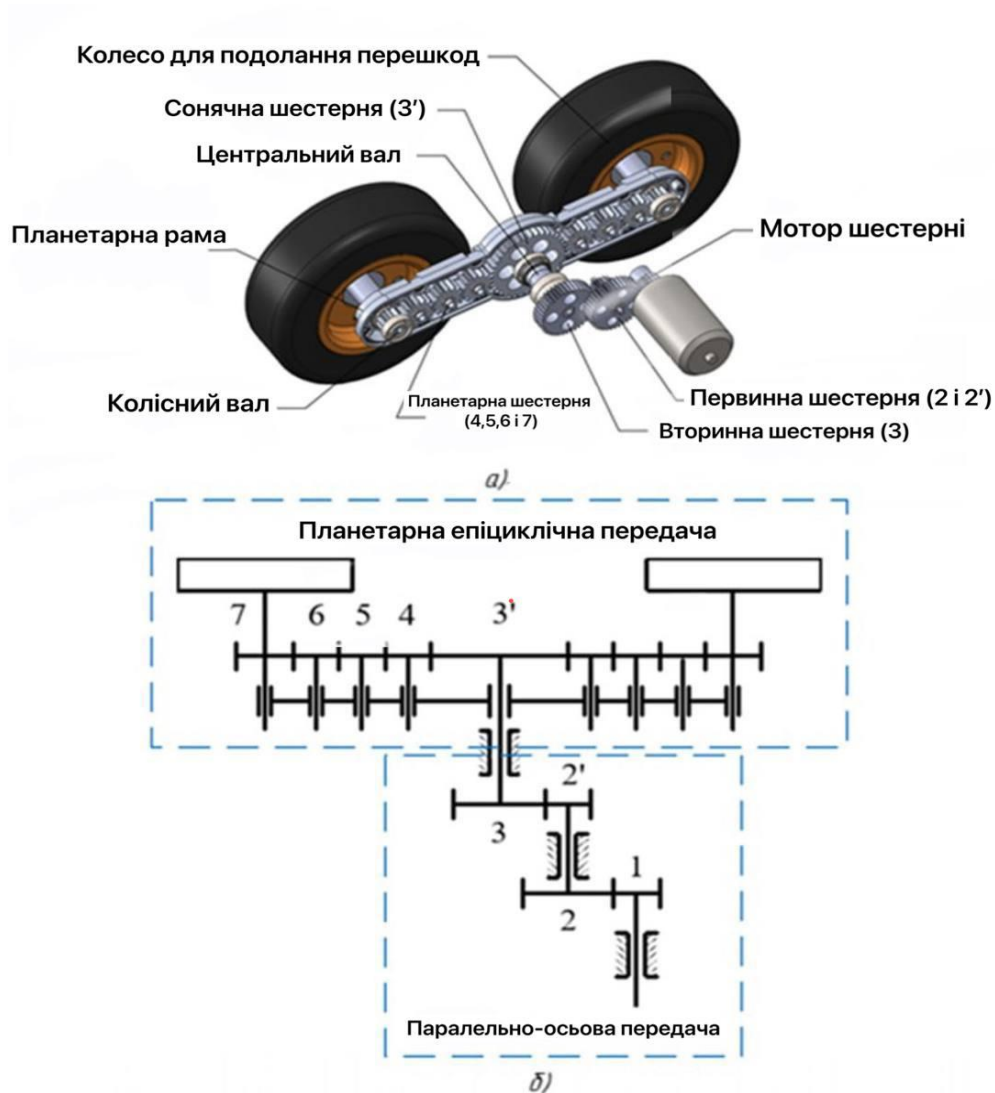
а) структура механізму Rob-ant знаходиться в розгорнутому стані;
 б) механізм Rob-ant знаходиться в стиснутому стані; в) стани руху робота регулюються за допомогою механізму Rob-ant-варіант; г) передня частина корпусу повертається, щоб адаптуватися до коливань рельєфу місцевості; д) варіанти використання гібридних коліс

Рисунок 4.2, аркуш 2

4.3 Підйомні гойдалки

Як показано на рис. 4.3, а та рис. 4.3, б, адаптивна система підйомних гойдалок та коліс для подолання перешкод утворена паралельно-осьовою зубчастою передачею, з'єднаною з двигуном постійного струму, планетарною зубчастою передачею, розміщеною в гойдалці (рамі планетарної передачі), та двома колесами для подолання перешкод, закріпленими на валах коліс на обох кінцях гойдалки. Паралельно-осьова зубчаста передача складається з шестерні

двигуна (шестерня 1 на рис. 4.3, б), первинної шестерні (подвійна шестерня 2 та 2 на рис. 4.3, б) та вторинної шестерні (шестерня 3 на рис. 4.3, б).



а) склад адаптивної альпіністської гойдалки; б) схема передачі зубчастої передачі в альпіністській гойдалці

Рисунок 4.3 – Структура та передача адаптивної альпіністської гойдалки та системи колеса для подолання перешкод

Функція паралельно-осьової зубчастої передачі полягає у збільшенні вихідного крутного моменту двигуна, забезпечуючи достатню потужність для адаптивного підйомного коромисла для перекидання та подолання перешкод. Тому передавальне відношення між шестернею двигуна та вторинною шестернею, позначене як i_{13} , встановлено на рівні 5,5.

Планетарна шестерня складається з сонячної шестерні, планетарної рами, чотирьох планетарних шестерень та колісного вала з кожного боку.

Сонячна шестерня 3 у планетарній шестерні та вторинна шестерня 3 у паралельно-осьовій шестерні обертаються синхронно та мають спільний центральний передавальний вал, передаючи посилений вихідний крутний момент двигуна на коромисло.

Коли робот рухається по гладкій та рівній поверхні, зубчаста передача з паралельними осями підтримується як зубчаста передача з фіксованою віссю, і альпіністська гойдалка не перевертається. Функція планетарної передачі полягає у збільшенні швидкості колеса для подолання перешкод, а передавальне відношення між валом колеса та сонячною шестернею, позначене як i_{73} , встановлюється на 3,8.

Як тільки колеса для подолання перешкод блокуються перешкодою, планетарна передача перетворюється на епіциклічну передачу. Підсилений вихідний крутний момент двигуна буде використаний для приведення в дію адаптивної альпіністської гойдалки для повороту навколо валу колеса та підтримки робота.

Кількість планетарних передач має бути парною, щоб гарантувати, що напрямок обертання двигуна відповідає напрямку обертання коліс, коли коромисла заблоковані, та напрямку обертання коромисел, коли колеса заблоковані, що необхідно для того, щоб робот міг перемикатися між рухом на колесах та рухом на ногах без втручання керування. Крім того, три планетарні передачі (шестерні 4, 5 та 6 на рис. 4.3, б) мають однаковий розмір і розроблені якомога меншими, щоб зменшити ширину адаптивного коромисла та уникнути контакту між коромислом та перешкодами.

Оскільки гойдалки, що мають три гілки, ускладнюють складання робота та його розміщення в рюкзаку, що незручно для користувача. У цій конструкції гойдалка у формі бруска використовується для покращення компактності та портативності робота, навіть якщо це частково жертвує його здатністю долати перешкоди.

4.4 Проектування гібридного колеса

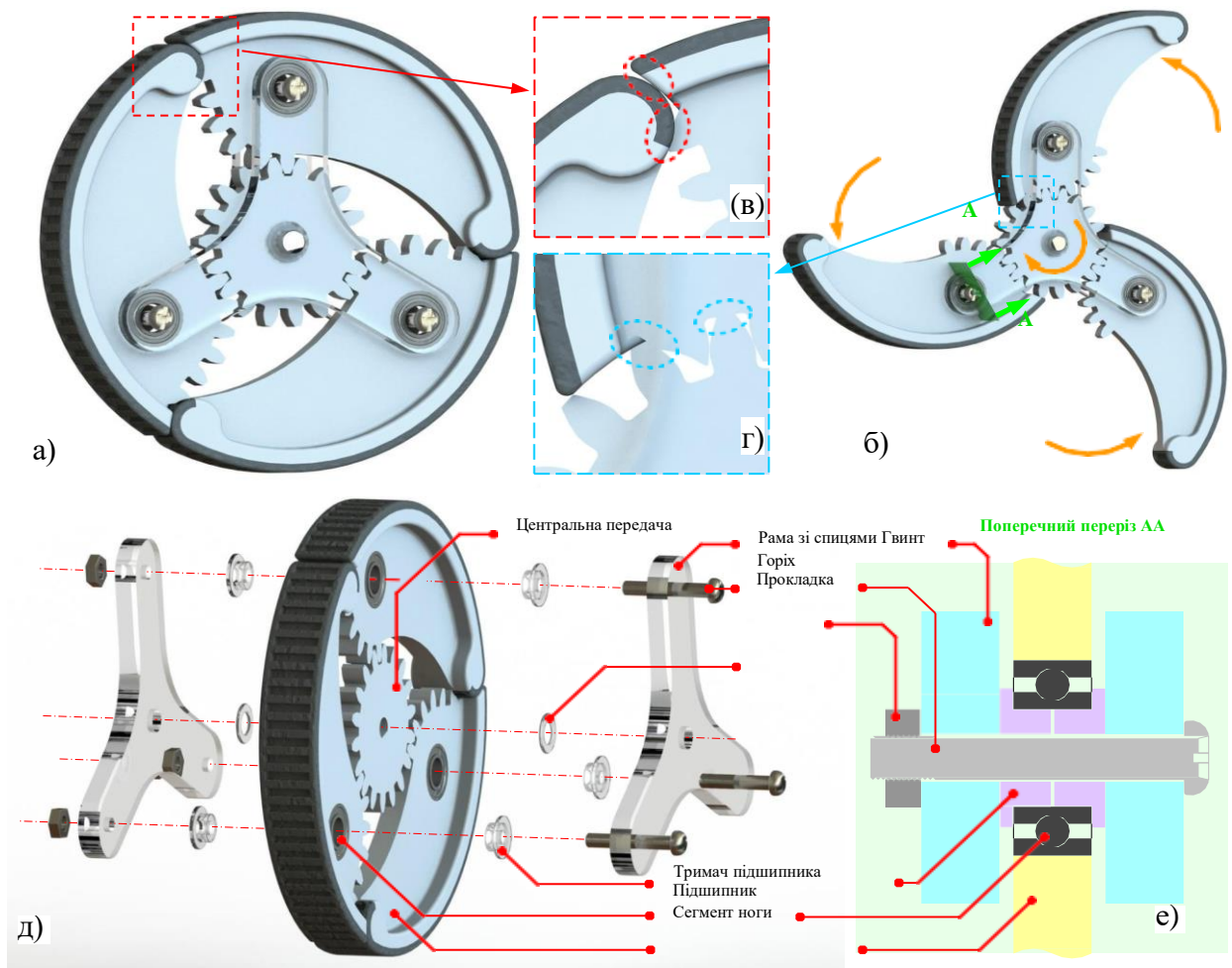
У цьому розділі представлено дизайн, аналіз крутного моменту та відповідні параметри конструкції для нового механізму трансформації зубчастих коліс.

Ці три ноги можуть пасивно відкриватися при дії зовнішньої сили тертя на ногу, що спрацьовує, тобто при зіткненні з перешкодою. Перетворення між цими двома модусами визначається зовнішніми умовами і тому пов'язане з невизначеністю. Швидкість в режимі колеса також може постраждати при спрацьовуванні несподіваної трансформації. Конструкція, має дещо схожий зовнішній вигляд з колісним трансформатором (рис. 2.11), однак механічна конструкція, тип трансмісії, механізм трансформації коліс і механізми спрацьовування значно відрізняються.

Під час руху по гладкій поверхні вся конструкція утримує своє положення, при цьому два з трьох коліс залишаються в контакті з землею. Коли провідне колесо зустрічає перешкоду, спицеподібна рама пасивно перекочується через перешкоду, одночасно перемикаючи контактуючі колеса.

Представлена конструкція базується на зубчастій конструкції, показаній на рис. 4.4. Центральна шестерня об'єднує три сегментовані ніжки на двох спицевих рамах, де кожна ніжка має набір зубців шестерні з механічним фіксатором на кінці.

Коли центральна шестерня обертається за годинниковою стрілкою (CW) (рис. 4.4, б), ніжки відкриваються вгору до тих пір, поки центральна шестерня не досягне замків. Оскільки центральна шестерня продовжує обертатися в тому ж напрямку, все колесо обертається в напрямку CW, рухаючись вправо в русі ногами. Коли центральна шестерня обертається проти годинникової стрілки (CCW), ніжки закриваються і утворюють безшовне кругове колесо. Продовжуючи обертатися в тому ж напрямку, весь механізм обертається в напрямку CCW, в результаті чого колесо рухається вліво. Колесо залишається закритим, якщо напрямок руху не змінено.



а) повністю закрита в колісній конфігурації; б) повністю відкриті в конфігурації ніжки; в) механічний замок для закритого колеса; г) механічний замок для відкритого колеса; д) вибух -схема конструкції; е) вигляд у поперечному перерізі AA

Рисунок 4.4 – Конструкція колеса

Механічна конструкція проста і тому легка у виготовленні. Як показано на рисунку 4.4, е, механізм складається з трьох відмінних компонентів: центральної шестерні, ніжок і набору з двох спицевих рам. Для конструкції з трьома ніжками потрібно всього шість механічних компонентів разом з декількома прокладками і гвинтами для повністю зібраної конструкції.

Механізм працює в двох режимах: поворот в напрямку CCW в конфігурації кругового колеса (режим I) і поворот в напрямку CW, що дозволяє відкритися сегментам ніг (режим II).

У режимі II, в залежності від конструктивних параметрів і зовнішніх

умов, механізм може утримувати ніжки відкритими або динамічно перемикається між конфігураціями колеса і ніжок. На рис. 4.5 показані крутні моменти і сили, прикладені до конструкції при закритих (рис. 4.5, а) і відкритих ніжках (рис. 4.5, б).

При обертанні в напрямку CCW при зімкнутих ногах значна нога, що стикається з землею, піддається трьом силам: N – реактивна сила від землі для підтримки колеса; f – сила тертя від землі; і F_{gear} – рушійна сила від центральної передачі. Точка «А» – це вал, навколо якого нога може вільно обертатися.

У цьому випадку прикладений крутний момент τA навколо осі A має бути більшим за нуль, таким чином, щоб:

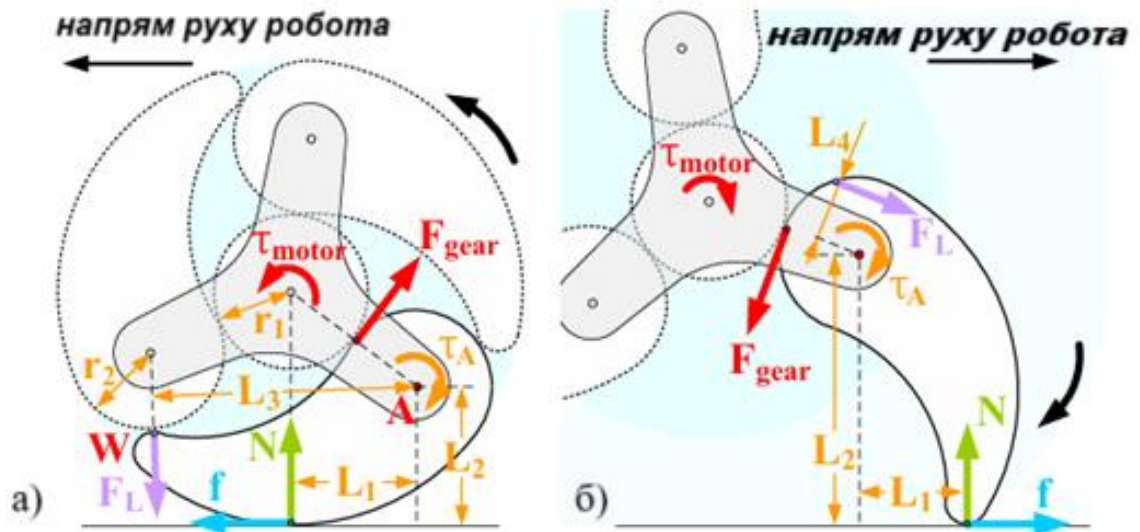
$$\tau A = F_{gear} r_2 + NL_1 + fL_2 > 0$$

горизонтальні та вертикальні відстані між A та точкою контакту з землею C відповідно. У режимі I кожна ніжка контактує з іншою ніжкою в точці W , що призводить до реактивної сили F_L , такої, що $\tau A = F_{gear} r_2 + NL_1 + fL_2 - F_L = 0$

Коли ніжки повністю відкриті (рис. 4.6), а центральна шестерня обертається за годинниковою стрілкою (рис. 4.5, б), τA представляється як:

$$\tau A = -F_{gear} r_2 - NL_1 - fL_2 < 0$$

Негативне значення τA призводить до розгортання ноги. Механічний замок на кінці шестерні на носі утримує ногу в повністю відкритому положенні, в результаті чого $\tau A = -F_{gear} r_2 - NL_1 - F'_L = 0$.



а) кругова конфігурація колеса в режимі I, що обертається в напрямку CCW;

б) конфігурація ніг у режимі II

Рисунок 4.5 – Схема вільного тіла колеса в двох конфігураціях

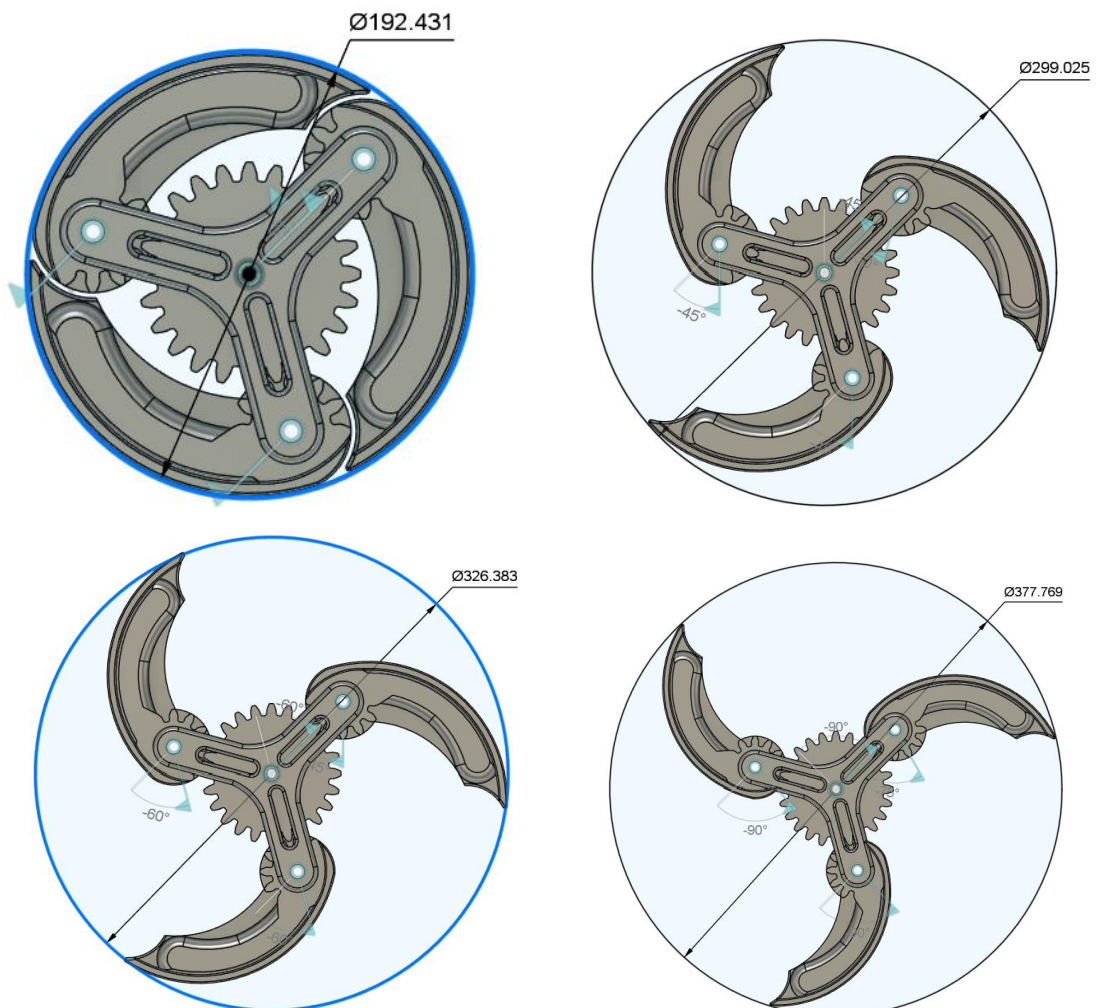


Рисунок 4.6 – Розміри конструкції у закритому і відкритому (45° , 60° , 90°) станах

4.5 Проведення досліджень конструкції

Повністю зібраний робот складається з основного шасі, двох платформ та 6 трансформованих коліс. Шасі являє собою прямокутний короб, виготовлений з акрилової основи та оболонки з ABS-пластику, надрукованої на 3D-принтері. Під основою було встановлено два редукторні двигуни, вали яких витягнуті вбік.

Для трансформованих коліс рами спиць були виготовлені з акрилу, а шестерні та ніжки надруковані на 3D-принтері Polyjet Object350 Connex3. Кожна нога була надрукована з використанням двох різних матеріалів: жорсткого матеріалу (тобто VeroWhite) для основної конструкції ноги та м'якого матеріалу (тобто AgilusBlack) вздовж зовнішньої поверхні для збільшення тертя між ногою та землею.

Робот також був оснащений інерційним вимірювальним блоком (IMU), що складається з тривісного акселерометра і тривісного гіроскопа. IMU може бути використаний для визначення перетворення між двома режимами. Наприклад, якщо робот стикається з шорсткою поверхнею або застрягає, як це визначено IMU під час руху в режимі колеса, він розвертається і продовжує режим ніг. Вбудована друкована плата була побудована з розривними майданчиками для подовження. Можуть бути додані різні типи датчиків для конкретного застосування.

Щоб перевірити умови трансформації коліс і здатність робота до пересування, було проведено серію експериментів. Вимірювалася успішність трансформації на різних місцевостях, максимальна висота перешкоди для різних радіусів колеса, швидкість роботи в кожному режимі.

4.5.1 Перевірка трансформації

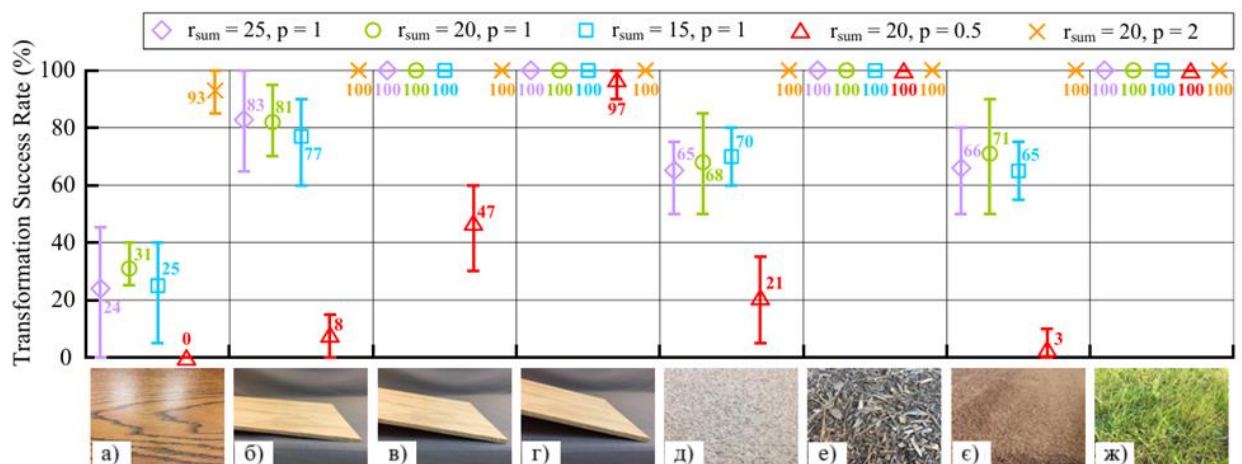
У той час як напрямок руху визначає режим (тобто Режим-I або Режим-II), поведінка робота у Режимі-II відрізняється залежно від параметрів конструкції та умов навколишнього середовища. Іншими словами, при низькій

тенденції до трансформації колеса можуть залишатися закритими до тих пір, поки не зіткнуться з перешкодою, в той час як при високій тенденції трансформації вони відразу ж перетворюються в ноги навіть на гладкій плоскій поверхні.

Перший випадок буде корисним, коли поверхневі умови невідомі і динамічно змінюються, тоді як поведінка, що викликає спрацьовування, буде пов'язана з більшою невизначеністю.

Останній випадок буде більш підходящим, коли потрібне точне керування між двома режимами. У такій ситуації напрямок руху робота визначає режим роботи коліс і запускає трансформацію.

Щоб оцінити тенденцію переходу коліс-нога, було побудовано і випробувано на восьми типах місцевості, як показано на рисунку 4.7.



а) рівна поверхня; б) нахил 5 градусів; в) нахил 10 градусів; г) нахил 15 градусів; д) асфальт (жорсткий 3 мм); е) міцна поверхня (жорсткість 10 мм);
 є) ковrolін (гнучкий 8 мм); ж) трава (гнучка 80 мм)

Рисунок 4.7 – Графіки успішності трансформації коліс у порівнянні з різними типами місцевості

Для кожної комбінації експеримент проводився п'ять разів, кожен з яких містив по двадцять проб. Щоб перевірити вплив розміру колеса, потрібно використовувати три різні значення $r_{sum} = 25/20/15$ мм (тобто $R = 37.5/30/22.5$)

враховувалися при дотриманні $p = 1$. Результати показали, що розмір коліс не має значного впливу на успішність перетворень. З іншого боку, показник успішності сильно корелював з p . Порівнюючи три комплекти коліс з $p = 0.5$, 1 та 2 ($r_{sum} = 20$), колеса з $p = 0.5$ показали найнижчий показник успішності перетворень, тоді як ті, що з $p = 2$, могли успішно трансформуватися на більшості обраних типів місцевості. Ці експериментальні результати також узгоджуються з чисельним аналізом, наведеним на рис. 2.2 – рис.2.4 показують різну поведінку коліс з двома різними значеннями p .

Оскільки ці колеса мають дуже високу тенденцію до трансформації, колеса трансформуються відразу після того, як робот змінює напрямок руху, ще до того, як досягне перешкоди. Однак при $p = 1$ колеса залишаються закритими до досягнення перешкоди. У цій ситуації перешкода надає додаткове тертя на колесо і запускає трансформацію.

4.5.2 Здатність долати перешкоди

Три комплекти коліс ($R = 37.5/30/22.5$ мм з $p = 1$ і $N_{leg} = 3$) були обрані для перевірки здатності лазити по перешкодах з різною висотою. Для кожної висоти обчислювався показник успішності з 50 спроб. Експериментальний результат у таблиці 4.1 показує, що робот здатний перелізти через перешкоду, висота якої в 2,4 рази перевищує висоту радіуса колеса (R).

Таблиця 4.1 – Показник успішності (%) подолання перешкоди.

Висота перешкоди (мм)	$P = 37.5$	$P = 30$	$P = 22.5$
30	100	100	100
40	100	100	100
50	100	100	90
60	100	100	48
70	100	96	-
80	100	68	-
90	82	-	-
100	56	-	-

Для перешкоди, що перевищує діаметр колеса приблизно в 2,67 рази, спостерігалось близько 50% від показника успіху. У таблиці 4.1 показано, як визначити розмір коліс для передбачуваної висоти перешкод.

4.5.3 Швидкість пересування

Три пари коліс ($R = 37.5/30/22.5$ мм з $p = 1$ і $N_{leg} = 3$) знову використовувалися для оцінки швидкості пересування робота в двох режимах. На рівній асфальтованій поверхні в режимі коліс швидкість вимірювалася на рівні 0,30, 0,26 і 0,19 м/сек відповідно.

При цьому швидкість була приблизно пропорційна R . При русі по одній поверхні з відкритими ногами швидкість вимірювалася на рівні 0,24, 0,25 і 0,21 м/сек відповідно. Ходьба з найбільшими колесами ($R = 37.5$) При відкритих ніжках необхідний високий крутний момент, в результаті чого двигун працює на більш повільних обертах, ніж номінальне значення. Це призвело до того, що швидкість лінії була ще повільнішою, ніж при використанні коліс з меншим радіусом $R = 30$. Щоб вирішити цю проблему, передавальне число двигуна можна збільшити або використовувати більш потужні двигуни.

Було проведено аналіз параметрів умов запуску переходу колесо-ніжка та мінімальних вимог до крутного моменту двигуна. Результат показує, що процес запуску, швидше за все, ініціюється в положенні $\theta = 0$. Крім того, збільшення p або зменшення r_{sum} може призвести до більшої тенденції до трансформації. Для фізичної демонстрації та оцінки було побудовано робота разом з п'ятьма комплектами коліс. Експериментальні результати підтвердили, що вище значення p має вищий коефіцієнт успішності трансформації, тоді як r_{sum} показав лише незначний ефект. Випробування на подолання перешкод показали, що колеса можуть легко долати перешкоди, висота яких до 2,4 рази перевищує висоту радіуса колеса. За відповідної конфігурації коліс швидкість може досягати 0,30 м/с з колесами та 0,25 з ногами.

Для повністю автономної роботи до робота можна додати додаткові

датчики, такі як камера, для навігації в невідомому середовищі. Використовуючи вбудований ІМУ, інтегрований з входами камери, робот може автономно змінювати свій режим, щоб ефективно адаптувати конфігурацію коліс до умов навколишнього середовища.

4.6 Забезпечення безпечних умов праці при проектуванні конструкції

Під час вибору приміщення для розміщення робочих місць необхідно враховувати, що вікна можуть давати блиск на екранах дисплеїв і викликати значне осліплення в тих, хто сидить перед ними, особливо влітку та в сонячні дні. Приміщення повинні мати природне і штучне освітлення. При незадовільному освітленні знижується продуктивність праці оператора персонального комп'ютера (ПК), можливі короткозорість, швидка втомленість. Не допускається розташування робочих місць з ПК в підвальних приміщеннях і цокольних поверхах.

Площа, на якій розташовується одне робоче місце з ПК, повинна становити не менше як $6,0 \text{ м}^2$, об'єм приміщення не менше як 20 м^3 .

Вимоги до освітлення для візуального сприймання операторами інформації з двох різних носіїв (з екрана ПК та паперового носія) різні. Надто низький рівень освітленості погіршує сприймання інформації при читанні документів, а надто високий призводить до зменшення контрасту зображення знаків на екрані. Тому відношення яскравості екрана ПК до яскравості оточуючих його робочих поверхонь не повинно перевищувати у робочій зоні 3:1, а робочих поверхонь і навколишніх предметів (стіни, обладнання) – 5:1.

Штучне освітлення у приміщеннях з ПК треба здійснювати у вигляді комбінованої системи освітлення з використанням люмінесцентних джерел світла у світильниках загального освітлення, які слід розташовувати над робочими поверхнями у рівномірно-прямокутному порядку.

Для запобігання засвітлювання екранів ПК прямими світловими потоками, лінії світильників повинні бути розташовані з достатнім бічним

зміщенням відносно рядів робочих місць або зон, а також паралельно до світлових отворів. Бажане розміщення вікон з одного боку робочих приміщень.

При розташуванні елементів робочого місця (рис. 4.8) слід враховувати:

- робочу позу оператора;
- простір для розміщення оператора;
- можливість огляду елементів робочого місця;
- можливість огляду простору за межами робочого місця;
- можливість робити записи, розміщення документації і матеріалів, які використовує оператор (користувач).

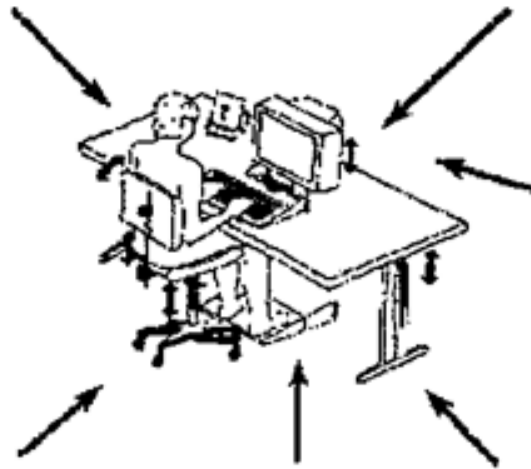


Рисунок 4.8 – Розташування елементів робочого місця

Взаємне розташування елементів робочого місця не повинно заважати виконанню всіх необхідних рухів та переміщень для експлуатації ПК; сприяти оптимальному режиму праці і відпочинку, зниженню втоми оператора (користувача).

Розташовувати монітор ПК на робочому місці необхідно так, щоб поверхня екрана знаходилась на відстані 500-600 мм від очей оператора (користувача), в залежності від розміру екрана.

Необхідно розташовувати клавіатуру на робочому столі, не допускаючи її хитання, або на окремому столі на відстані 100-300 мм від краю ближче до

працюючого. Положення клавіатури та кут її нахилу повинен відповідати побажанням оператора (користувача) кут нахилу в межах 5°–15°.

Конструкція робочого столу повинна забезпечувати можливість оптимального розміщення на робочій поверхні обладнання, що використовується, з урахуванням його кількості, розмірів, конструктивних особливостей (розмір монітора, клавіатури, принтера, ПК та інше) та характеру його роботи.

Висота робочої поверхні столу повинна регулюватися у межах 680-800 мм; у середньому вона повинна становити 725 мм.

Ширина і глибина робочої поверхні повинні забезпечувати можливість виконання трудових операцій в межах моторного поля, межа якого визначається зоною в межах видимості приладів і досяжності органів керування. Перевагу слід віддавати модульним розмірам столу, на основі яких розраховуються конструктивні розміри; ширину слід вважати: 600, 800, 1000, 1200, 1400; глибину 800, 1000 мм, при нерегульованій його висоті – 725 мм.

Крісло повинно забезпечувати підтримування раціональної робочої пози під час виконання основних виробничих операцій, створювати умови для зміни пози. З метою попередження втоми крісло повинно забезпечувати зниження статичного напруження м'язів шийно-плечової ділянки та спини.

Тип робочого крісла повинен обиратися залежно від характеру та тривалості роботи. Воно має бути підйомно-поворотним і регулюватися по висоті та кутах нахилу сидіння і спинки, а також відстані спинки від переднього краю сидіння. Регулювання кожного параметра має бути незалежним і мати надійну фіксацію. Всі важелі та ручки пристосування (для регулювання) мають бути зручними в управлінні.

Висота поверхні сидіння повинна регулюватись у межах 400-550 мм. Ширина та глибина його поверхні має бути не менше як 400 мм. Поверхня сидіння має бути плоскою, передні краї закругленими.

Сидіння та спинка крісла мають бути напівм'яким, такими, що не електризуються та з повітронепроникним покриттям, матеріал якого

забезпечує можливість легкого очищення від забруднення.

Працівник зобов'язаний дбати про особисту безпеку і здоров'я, а також про безпеку і здоров'я оточуючих людей в процесі виконання будь-яких робіт чи під час перебування на території підприємства, знати і виконувати вимоги нормативно-правових актів з охорони праці, правила поведінки з машинами, механізмами, устаткуванням та іншими засобами виробництва, користуватися засобами колективного та індивідуального захисту.

При роботі забороняється:

- експлуатація кабелів та проводів з пошкодженою або такою, що втратила захисні властивості за час експлуатації, ізоляцією;
- залишення під напругою кабелів та проводів з неізольованими провідниками;
- застосування саморобних подовжувачів, які не відповідають вимогам Правил будови електроустановок до переносних електропроводок;
- застосування для опалення приміщення нестандартного (саморобного) електронагрівального обладнання або ламп розжарювання;
- користування пошкодженими розетками, з'єднувальними коробками, вимикачами, а також лампами, скло яких має сліди затемнення або випинання;
- підвішування світильників безпосередньо на струмопровідних проводах, обгортання електроламп і світильників папером, тканиною та іншими горючими матеріалами, експлуатація їх зі знятими ковпаками (розсіювачами);
- використання електроапаратури та приладів в умовах, що не відповідають вказівкам (рекомендаціям) підприємств-виготовлювачів.

У випадку виникнення у працюючих за ПК зорового дискомфорту та інших несприятливих суб'єктивних відчуттів, що настають, незважаючи на дотримання санітарно-гігієнічних і ергономічних вимог, режимів праці та відпочинку, слід застосовувати індивідуальний підхід у обмеженні часу робіт за ПК та корекцію тривалості перерв для відпочинку або проводити заміну іншими видами робіт (не пов'язаних з використанням ПК).

При виявленні ознак горіння (дим, запах гару), вимкнути апаратуру, знайти джерело займання і вжити заходів щодо його ліквідації, повідомити керівника робіт, не допускати в небезпечну зону сторонніх осіб.

Надання першої медичної допомоги при ураженні електричним струмом. У разі ураження електричним струмом необхідно негайно звільнити потерпілого від дії електричного струму, відключивши електроустановку від джерела живлення, а при неможливості відключення відтягнути його від струмоведучих частин за одяг або застосувавши підручний ізоляційний матеріал. У разі відсутності у потерпілого дихання і пульсу необхідно робити йому штучне дихання і непрямий (зовнішній) масаж серця, звернувши увагу на зіниці. Розширені зіниці свідчать про різке погіршення кровообігу мозку. При такому стані необхідно негайно приступити до оживлення потерпілого і викликати швидку медичну допомогу.

ВИСНОВКИ

За результатами аналізу можна зробити висновок, що ця конструкція мобільного робота з гібридною системою пересування буде високоефективною в різних видах застосувань. Основними перевагами цього робота є механізм системи пересування колісного типу, оскільки цей тип робота буде досить хорошим у динаміці, а також добре працюватиме на високій швидкості на гладкій поверхні.

Система пересування колісного типу легша в проектуванні, керуванні та маневреності, але вона обмежена лише рівнинними та гладкими місцевостями.

У результаті виконаної роботи було спроектовано й частково реалізовано інноваційний мобільний робот з гібридним механізмом пересування, що поєднує переваги колісного і крокуючого руху, а також здатен трансформуватись відповідно до умов місцевості. Основною метою розробки стало створення компактного, енергоефективного та високоманеврового робота, здатного виконувати завдання в умовах стихійних лих та техногенних катастроф, де традиційні засоби не можуть забезпечити належну прохідність і безпеку.

У ході роботи було:

- розроблено конструктивну схему шестиколісного мобільного робота, що має реконфігурований корпус і здатен переходити між трьома режимами пересування: плоским, V-подібним та складеним. Це дозволяє роботу адаптуватися до умов місцевості, ефективно долати перешкоди та залишатися зручним для транспортування;

- впроваджено механізм Rob-ant, який забезпечує не лише стабільне з'єднання корпусних частин, а й можливість самоблокування без споживання енергії. Це забезпечує високу енергоефективність конструкції, а також стабільність платформи при встановленні на ній обладнання, наприклад камер;

– спроектовано адаптивні підйомні гойдалки з інтегрованою трансмісією, що забезпечують автоматичне перемикання між режимами руху на колесах і пересування з опорою на гойдалки. Вони ефективно працюють за допомогою планетарних та паралельно-осьових передач, забезпечуючи достатній момент для подолання перешкод;

– розроблено та описано мехатронну систему, що включає у себе сенсорний блок, елементи керування, виконавчі пристрої та інтерфейс взаємодії з користувачем. Контроль усіх елементів реалізовано через вбудовану платформу на базі мікроконтролера STM32F767 із застосуванням операційної системи реального часу $\mu\text{C}/\text{OS-III}$;

– реалізовано алгоритм розподіленого керування, що виконує обробку сенсорних даних, стабілізацію руху та керування швидкістю за допомогою ПІД-регуляторів. Це забезпечує точну відповідь на зміну умов навколишнього середовища, зокрема під час виявлення перешкод і трансформації положення корпусу робота.

Узагальнюючи результати, можна стверджувати, що розроблений мобільний робот поєднує в собі конструктивну простоту, високу функціональність і практичну адаптивність, що робить його перспективним кандидатом для застосування у сфері рятувальних місій, пошукових операцій, а також для дослідження небезпечних або важкодоступних середовищ. Його здатність самостійно змінювати конфігурацію, підтримувати стабільну платформу та адаптуватися до перешкод без необхідності складного сенсорного аналізу забезпечує суттєву перевагу над традиційними рішеннями.

ПЕРЕЛІК ДЖЕРЕЛ ПОСИЛАННЯ

1. Хабаров Д.С. Розроблення гібридного механізму пересування для малого мобільного робота / Д. С. Хабаров // Автоматизація та приладобудування («Automation and Development of Electronic Devices» ADED-2025) : збірник студентських наукових статей. Харків : ХНУРЕ, 2025. Вип. 1. С. 253–257.
2. Yevsieiev, V., & Demska, N. (2023). *Application of Generative Design Methods for Improving Manipulator Designs for Mobile Robots* (Doctoral dissertation, Черкаського національного університету імені Богдана Хмельницького).
3. Методичні вказівки з підготовки кваліфікаційної роботи для здобувачів першого (бакалаврського) рівня вищої освіти денної і заочної форми навчання спеціальності 151 – Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології освітньої [Електронний ресурс] / упоряд.: І. Ш. Невлюдов, О. І. Филипенко, О. В. Токарева, С. П. Новоселов, О.В Сичова ; М-во освіти і науки України, Харків. нац. ун-т радіоелектроніки. – електрон. вид. – Харків : ХНУРЕ, 2023. – 760
4. ДСТУ 3008-15. Документація. Звіти у сфері науки та техніки. структура та правила оформлення. Введ. 2015-06-22. К. Держстандарт України, 2017. 29 с.
5. Maksymova S. 3D Robot Model Development / S. Maksymova, V. Yevsieiev, N. Demska // Technical science research in Uzbekistan. – 2023. – Vol. 1(4). – P. 255–267.
6. Невлюдов І. Ш., Андрусевич А. О., Євсєєв В. В., Новоселов С. П., Демська Н. П. Проектування мобільних маніпуляційних роботів: Монографія. – Х. ;, 2022. – 427 с.
7. Робототехнічні системи: проектування і моделювання /М. М. Поліщук, М.М. Ткач; КПІ ім. Ігоря Сікорського. Київ: КПІ 2021. 112 с.

8. Струтинський В.Б., Гуржій А.М. Наземні робототехнічні комплекси: Монографія. Житомир: ПП «Рута», 2023 . 524 с
9. Ghadi, Y. (2019). A novel hybrid locomotion mechanism for small mobile robot. *ICIC Express Letters, Part B: Applications*, 10(11), 1031-1036.
10. Ghadi, Y. (2019). A novel hybrid locomotion mechanism for small mobile robot. *ICIC Express Letters, Part B: Applications*, 10(11), 1031-1036.
11. Li, H., Xie, Z., Cao, Y., Zhang, R., & Qin, J. (2025). Design and analysis of a mobile robot with transformable wheel-legged mechanism. *Journal of Mechanisms and Robotics*, 17(6).
12. Bruzzone, L., Baggetta, M., Nodehi, S. E., Bilancia, P., & Fanghella, P. (2021). Functional design of a hybrid leg-wheel-track ground mobile robot. *Machines*, 9(1), 10.
13. Bak, A. S., Durkin, P., Saenz, M. J., Brodie, K. L., Bruder, B. L., & Forte, M. F. (2022, October). Evaluating autonomous system performance in the surfzone. In *OCEANS 2022, Hampton Roads* (pp. 1-8). IEEE..
14. Bianchi, G., Mudiyansele, K. P. H. H., & Cinquemani, S. (2022, April). Design of a swimming snake robot. In *Bioinspiration, Biomimetics, and Bioreplication XII* (Vol. 12041, pp. 75-81). SPIE..
15. Sihite, E., Kalantari, A., Nemovi, R., Ramezani, A., & Gharib, M. (2023). Multi-Modal Mobility Morphobot (M4) with appendage repurposing for locomotion plasticity enhancement. *Nature communications*, 14(1), 3323..
16. Gan, D., Fu, J., Lin, H., Yang, H., Rastgaar, M., Min, B. C., & Voyles, R. (2022). Actuation-coordinated mobile parallel robots with hybrid mobile and manipulation functions. *Journal of Mechanisms and Robotics*, 14(4), 041005..
17. Lai, Y., Zang, C., Luo, G., Xu, S., Bo, R., Zhao, J., ... & Zhang, Y. (2024). An agile multimodal microrobot with architected passively morphing wheels. *Science Advances*, 10(51), eadp1176..
18. Zheng, Z., Wang, C., Hu, X., Zhang, L., Zhang, W., Xu, Y., ... & Ding, N. (2025). Developing a Climbing Robot for Stay Cable Maintenance With Security and Rescue Mechanisms. *Journal of Field Robotics*..

19. Ugenti, A., Galati, R., Mantriota, G., & Reina, G. (2023). Analysis of an all-terrain tracked robot with innovative suspension system. *Mechanism and Machine Theory*, 182, 105237..
20. Zhu, Q., Guan, X., Yu, B., Zhang, J., Ba, K., Li, X., ... & Kong, X. (2024). Overview of structure and drive for wheel-legged robots. *Robotics and Autonomous Systems*, 181, 104777.
21. Botta, A., Cavallone, P., Carbonari, L., Tagliavini, L., & Quaglia, G. (2021). Modelling and experimental validation of articulated mobile robots with hybrid locomotion system. In *Advances in Italian Mechanism Science: Proceedings of the 3rd International Conference of IFToMM Italy 3* (pp. 758-767). Springer International Publishing..
22. Chen, H. Y., Wang, T. H., Ho, K. C., Ko, C. Y., Lin, P. C., & Lin, P. C. (2021). Development of a novel leg-wheel module with fast transformation and leaping capability. *Mechanism and Machine Theory*, 163, 104348..
23. Hafezi, A., Zibran, M., & Deemyad, T. (2024, May). Autonomous surveillance breakthrough by implementing facial recognition in dog robots. In *2024 Intermountain Engineering, Technology and Computing (IETC)* (pp. 221-226).
24. Li, J., Liu, Y., Yu, Z., Guan, Y., Zhao, Y., Zhuang, Z., & Sun, T. (2023). Design, analysis, and experiment of a wheel-legged mobile robot. *Applied Sciences*, 13(17), 9936.
25. Tan, Y. H., & Chen, B. M. (2021). Survey on the development of aerial-aquatic hybrid vehicles. *Unmanned Systems*, 9(03), 263-282.
26. Song, Z., Luo, Z., Wei, G., & Shang, J. (2022). A portable six-wheeled mobile robot with reconfigurable body and self-adaptable obstacle-climbing mechanisms. *Journal of Mechanisms and Robotics*, 14(5), 051010.
27. Zheng, C., & Lee, K. (2019, May). Wheeler: Wheel-leg reconfigurable mechanism with passive gears for mobile robot applications. In *2019 International Conference on Robotics and Automation (ICRA)* (pp. 9292-9298). IEEE.
28. Gyarmati, m., Kadar, F., & Tătar, M. O. (2022). Contributions to the search and rescue robots' development with tristar and whegs units. *Acta Technica*

Napocensis-Series: Applied Mathematics, Mechanics, and Engineering, 65(2).

29. Mi, J., Wang, Y., & Li, C. (2022, May). Omni-Roach: A legged robot capable of traversing multiple types of large obstacles and self-righting. In *2022 International Conference on Robotics and Automation (ICRA)* (pp. 235-242). IEEE.

30. Purnama, H. S., Sutikno, T., Alavandar, S., & Subrata, A. C. (2019, October). Intelligent control strategies for tuning PID of speed control of DC motor-a review. In *2019 IEEE Conference on Energy Conversion (CENCON)* (pp. 24-30). IEEE.

31. Freitas, J. B. S., Marquezan, L., de Oliveira Evald, P. J. D., Peñaloza, E. A. G., & Cely, M. M. H. (2024). A fuzzy-based predictive PID for DC motor speed control. *International Journal of Dynamics and Control*, 12(7), 2511-2521.

32. Abd-Elhaleem, S., Shoeib, W., & Sobaih, A. A. (2023). Improved power management under uncertain driving conditions for plug-in hybrid electric vehicles via intelligent controller. *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, 24(12), 13698-13712.

33. Santos, M., André, J., Mendes, R., & Ribeiro, J. B. (2025). Optimization of ORC-Based Micro-CHP Systems: An Experimental and Control-Oriented Study. *Processes*, 13(4), 1104.

34. Теорія автоматичного управління (збірник задач): навчальний посібник / І. Ш. Невлюдов, О. В. Токарева. Харків: ХНУРЕ, 2020. 240 с.

35. Perišić, N., & Jovanović, R. (2023). Control of direct current motor by using artificial neural networks in Internal model control scheme. *FME Transactions*, 51(1), 109-116.

36. Ivanov, V., Ivanova, S., Tonkov, G., & Urum, G. (2022). Perspective directions of mechanical power transmission research. In *MATEC Web of Conferences* (Vol. 366, p. 01005). EDP Sciences.