

Міністерство освіти і науки України
Харківський національний університет радіоелектроніки

Факультет Автоматики і комп'ютеризованих технологій
(повна назва)

Кафедра Комп'ютерно-інтегрованих технологій, автоматизації та робототехніки
(повна назва)

КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА Пояснювальна записка

рівень вищої освіти перший (бакалаврський)
Розроблення механізму гібридного мобільного робота з можливістю
комплексної маніпуляції
(тема)

Виконав:
здобувач 4 року навчання,
групи АКТСІ-21-1
Михайло ТАРАКАНОВ
(власне ім'я, прізвище)

Спеціальність 151 Автоматизація та
комп'ютерно інтегровані технології
(код і повна назва спеціальності)

Тип програми освітньо-професійна

Освітня програма Системна інженерія
(повна назва освітньої програми)

Керівник доцент Наталія ДЕМСЬКА
(посада, власне ім'я, прізвище)

Допускається до захисту

Завідувач кафедри КІТАР _____
(підпис)

Ігор НЕВЛЮДОВ
(власне ім'я, прізвище)

2025 р.

Я, Тараканов Михайло Павлович, 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.

14.06.2025 р.



Михайло ТАРАКАНОВ

Харківський національний університет радіоелектроніки

Факультет Автоматики і комп'ютеризованих технологій

Кафедра Комп'ютерно-інтегрованих технологій, автоматизації та робототехніки

Рівень вищої освіти перший (бакалаврський)

Спеціальність 151 Автоматизація та комп'ютерно інтегровані технології

Тип програми освітньо-професійна

Освітня програма Системна інженерія

ЗАТВЕРДЖУЮ:

Зав. кафедри _____
(підпис)

« 28 » квітня 2025 р.

**ЗАВДАННЯ
НА КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ**

здобувачеві Тараканову Михайлу Павловичу

(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема роботи Розроблення механізму гібридного мобільного робота з можливістю комплексної маніпуляції

Затверджена наказом університету від 19.05.2025 р. № 391 Ст

2. Термін подання здобувачем роботи до екзаменаційної комісії 25.06.2025 р.

3. Вихідні дані до роботи 3.1 Дані про існуючі типи механічних частин роботів; дані про різні види гібридних роботів;

3.2 Середовище розробки Autodesk Fusion

4. Перелік питань, що потрібно опрацювати в роботі _____

4.1 Вступ; 4.2 Аналіз технічного завдання; 4.3 Розроблення концептуальної та структурної схеми гібридного робота; 4.4 Здійснення 3D-моделювання та симуляцію роботи; 4.5 Висновки

5. Перелік графічного матеріалу із зазначенням креслеників, схем, плакатів, комп'ютерних ілюстрацій (п.5 включається до завдання за рішенням випускової кафедри) Графічний матеріал у вигляді презентації формату *.ppt , 13 арк. ф. А 4

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	Строк / терміни виконання етапів роботи	Примітка
1	Вступ	28.04.2025	виконано
2	Аналіз технічного завдання	29.04-03.05.2025	виконано
3	Аналіз літературних джерел та існуючих конструкцій	04.05-15.05.2025	виконано
4	Розроблення концептуальної та структурної схеми гібридного робота	15.05-25.05.2025	виконано
5	Здійснення 3D-моделювання та симуляції роботи	25.05-10.06.2025	виконано
6	Висновки	11.06-13.06.2025	виконано
7	Оформлення пояснювальної записки	14.06-16.06.2025	виконано
8	Подання роботи на перевірку Інтернет-сервісом StrikePlagiarism	17.06-18.06.2025	
9	Подання роботи на рецензію	19.06-20.06.2025	
10	Подання роботи на підпис зав. кафедри	21.06-22.06.2025	
11	Подання кваліфікаційної роботи в ЕК	23.06.2025	

Дата видачі завдання 28.04.2025 р.

Здобувач _____
(підпис)

Керівник роботи _____
(підпис)

Михайло ТАРАКАНОВ
(власне ім'я, прізвище)

доц. Наталія ДЕМСЬКА
(посада, власне ім'я, прізвище)

РЕФЕРАТ

Пояснювальна записка: 61 с., 2 табл., 30 рис., 2 дод., 29 джерел.

МОБІЛЬНА ПЛАТФОРМА, МАНІПУЛЯТОР, КОНСТРУКЦІЯ З ІНТЕГРОВАНОЮ РУКОЮ, ГУСЕНИЧНА СИСТЕМА ПЕРЕСУВАННЯ.

Об'єкт розробки – є процес керування гібридним мобільним роботом.

Предмет розробки – віртуальна реалізація гібридного механізму.

Мета роботи полягає в розробці та аналізі гібридного механізму мобільного робота з можливістю комплексної маніпуляції, що поєднує переваги мобільних роботів та маніпуляційних систем.

В ході роботи було проаналізовано існуючі види роботів, основні публікації по темі; розроблено концептуальну та структурну схему гібридного робота; обрано середовище для реалізації віртуального макету робота; створено 3D-модель та проведено симуляцію роботи. Результатом роботи є 3D-модель, яку реалізовано у вигляді віртуального макету.

Також отримані результати відповідають переліку Цілей сталого розвитку, зокрема Цілі 9 «Промисловість, інновації та інфраструктура» (п. 9.1 та 9.4).

THE ABSTRACT

Explanatory note: 61 p., 2 tables, 30 Fig., 2 add., 29 sources.

MOBILE PLATFORM, MANIPULATOR, INTEGRATED ARM DESIGN,
TRACKED TRANSPORT SYSTEM.

The object of development is the process of controlling a hybrid mobile robot.

The subject of development is the virtual implementation of a hybrid mechanism.

The purpose of the work is to develop and analyze a hybrid mechanism of a mobile robot with the possibility of complex manipulation, combining the advantages of mobile robots and manipulation systems.

During the work, existing types of robots and the main publications on the topic were analyzed; a conceptual and structural diagram of a hybrid robot was developed; an environment for implementing a virtual robot model was selected; a 3D model was created and a simulation of the work was conducted. The result of the work is a 3D model, which is implemented in the form of a virtual model.

The results obtained also correspond to the list of Sustainable Development Goals, in particular Goal 9 "Industry, Innovation and Infrastructure" (paragraphs 9.1 and 9.4).

ЗМІСТ

Перелік умовних скорочень	7
Вступ.....	8
1 Аналіз предметної області та технічного завдання	10
1.1 Мобільні роботи	10
1.2 Наземні роботи	11
1.3 Мобільно-маніпуляційні роботи	11
1.4 Огляд гусеничних мобільних роботів	13
1.5 Аналіз технічного завдання.....	15
2 Проектування та аналіз конструкції РТС	17
2.1 Аналіз проблем існуючих конструкцій та запропоновані шляхи їх вирішення.....	17
2.2 Аналіз пропонованої конструкції	19
2.3 Ескізне проектування. Додаткові варіанти реалізації конструкції	19
2.4 Проектування конструкції	21
2.4.1 Мобільність.....	23
2.4.2 Маніпуляція	24
2.4.3 Зчеплення з поверхнею.....	26
3 Проектування системи управління.....	27
3.1 Керування бортовим бездротовим датчиком/виконавчим механізмом ..	27
3.2 Схема зв'язку.....	28
3.3 Радіочастотне обладнання для гібридного мобільного робота	30
3.4 Архітектура електричного обладнання.....	33
3.4.1 Компонування контролерів, драйверів, датчиків і камер	33
3.4.2 Проектування та реалізація системи живлення та потоку сигналів .	34
3.4.3 Плата розподілу живлення/сигналу	35
4 Моделювання роботизованої системи	37
4.1 Віртуальне прототипування та моделювання.....	37

4.2 Структура моделі.....	39
4.3 Аналіз характеристик рухливості.....	40
4.4 Аналіз натягу колії та механізму підвіски	45
4.5 Аналіз вимог до крутного моменту двигунів	47
4.6 Аналіз ємності корисного навантаження кінцевого ефектора.....	52
4.7 Забезпечення умов охорони праці при моделюванні робототехнічного засобу.....	55
4.7.1 Освітлення.....	56
4.7.2 Електробезпека.....	57
Висновки	58
Перелік джерел посилання	59
Додаток А Конструкторські документи.....	63
Додаток Б Демонстраційний матеріал	66

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ СКОРОЧЕНЬ

БКО – блок керування оператора;

РТС – робототехнічна система;

ЦВ – центр ваги;

COG – Center of Gravity;

OCU – Operator Control Unit.

ВСТУП

Використання мобільних роботів дуже швидко зростає в численних сферах застосування, таких як дослідження планет, поліцейські операції (наприклад, знешкодження вибухонебезпечних предметів), військові операції (наприклад, розвідувальні місії, спостереження та знешкодження саморобних вибухових пристроїв), дослідження небезпечних місць тощо. Використання безпілотних наземних транспортних засобів у міських пошуково-рятувальних операціях та військових операціях на урбанізованій місцевості набирає популярності, оскільки мобільних роботів можна відправляти вперед або замість людей, впливати на навколишнє середовище за допомогою маніпулятора або інших активних засобів, прикріплених до руки, збирати дані про навколишнє середовище, і відправити його назад в операцію без будь-яких ризиків для людей.

За останнє десятиліття з'явилися нові конструкції мобільних роботів, які були продемонстровані як науковими колами, так і промисловістю. Наша робота представляє новий підхід до проектування мобільних роботів для цілей пересування та маніпуляцій для широкого спектру застосувань та практичних ситуацій. Як правило, конструкція мобільного робота складається з мобільної платформи, яка приводиться в рух за допомогою пари гусениць, коліс або ніг, і маніпулятора, прикріпленого зверху мобільної платформи для забезпечення необхідної можливості маніпуляцій (знешкодження бомб або наземних мін, маніпуляції з небезпечними матеріалами тощо) [1].

Однак наявність маніпулятора обмежує рухливість. З іншого боку, існує кілька конструкцій мобільних роботів, включаючи можливість повертатися при перевертанні, але це може бути неможливо, якщо робот оснащений маніпулятором [1].

Конструкція, що розробляється в даній роботі, заснована на комбінованому пересуванні та маніпуляції. Підхід до проектування полягає в тому, що платформа та маніпулятор взаємозамінні у своїх ролях у тому сенсі, що

обидва можуть підтримувати пересування та маніпуляції в кількох режимах роботи. Крім того, конструкція дозволяє роботу перевернутися і продовжити роботу.

Таким чином, метою кваліфікаційної роботи є розробка гібридного механізму мобільного робота з можливістю комплексної маніпуляції, що поєднує переваги мобільних роботів та маніпуляційних систем.

Об'єктом розробки є процес керування гібридним мобільним роботом.

Предметом розробки є фізична та програмна реалізація гібридного механізму.

Задачі, які необхідно вирішити в рамках кваліфікаційної роботи:

- провести аналіз матеріальної бази, такої як існуючі роботи та основні публікації;
- розробити концептуальну та структурну схеми гібридного робота;
- здійснити 3D-моделювання та симуляцію роботи.

Кваліфікаційна робота виконана згідно [2-3]. Проведені дослідження відповідають цілям сталого розвитку (ЦСР) 9 так як наукові дослідження та інновації є важливими факторами, що сприяють сталому розвитку.

1 АНАЛІЗ ПРЕДМЕТНОЇ ОБЛАСТІ ТА ТЕХНІЧНОГО ЗАВДАННЯ

1.1 Мобільні роботи

Існують різні погляди на те, як класифікувати роботів. Розділяти їх на групи, в частині механіки, можна за різними ознаками: за призначенням, рухливістю, вантажопідйомністю, видом приводів. Розроблений класифікатор представлений на рис. 1.1 [1].



Рисунок 1.1 – Класифікація по типу механічної частини [1]

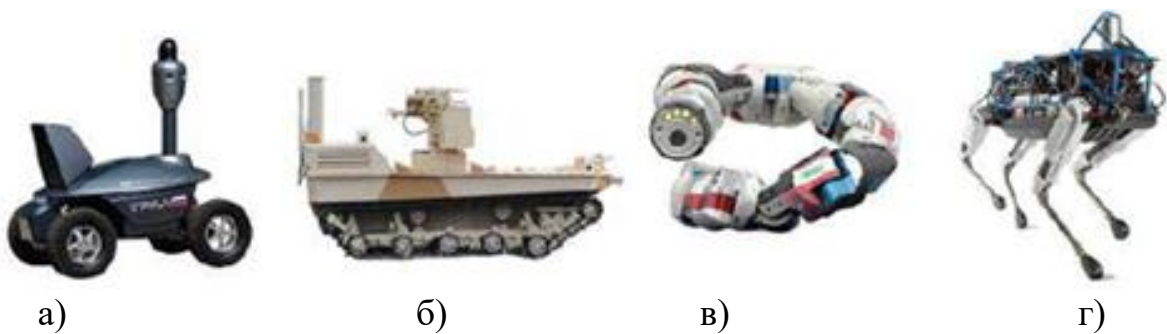
Це роботи, принцип дії яких нерозривно пов'язаний з переміщенням у просторі, тобто із рухом. Переміщатися і рухатися можуть у різних фізичних середовищах. Можливе створення робототехнічних машин для переміщення по землі чи будь-якій твердій поверхні. А можуть створюватись і роботи для польотів у повітряному просторі або плаваючі у водному середовищі [1].

Архітектури механічного проектування мобільних роботів можна класифікувати на кілька основних категорій, таких як гусеничні, колісні, ноги,

колісні, ноги, сегментовані. Десятки доступних мобільних роботів, що охоплюють вищезазначені категорії, становлять невелику частину існуючого обсягу досліджень у робототехніці. Таким чином, через відсутність узгоджених показників продуктивності, про які повідомляють дослідники, було б дуже складно проводити порівняння продуктивності між різними архітектурами роботів [1].

1.2 Наземні роботи

Такий вид роботів є найпопулярнішим. Це логічно, тому що на суші найбільше роботи, яку треба виконувати. І вона дуже різноманітна. А значить і машини, що її виконують, мають велику кількість різновидів. Вони можуть їздити за допомогою коліс, котитися на гусеницях, крокувати як тварини або люди, або навіть повзати як змії (рис. 1.2) [4].



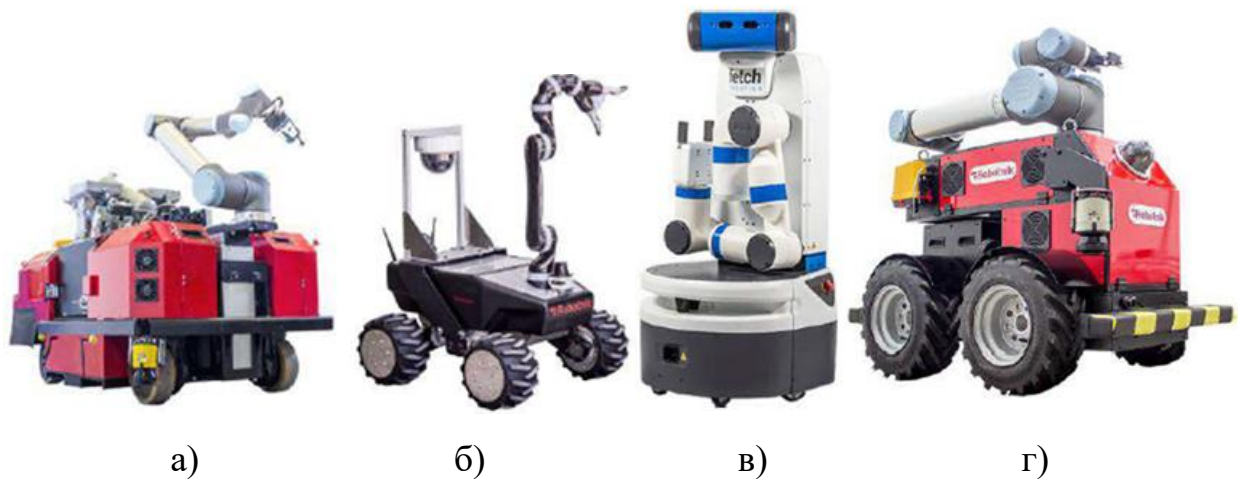
а) колісні; б) гусеничні; в) повзаючі; г) крокуючі

Рисунок 1.2 – Приклади наземних роботів [4]

1.3 Мобільно-маніпуляційні роботи

Ці роботи являють собою комбінацію маніпуляційних та мобільних роботів. Мобільна платформа пропонує необмежений робочий простір маніпулятора. Додаткові ступені свободи мобільної платформи надають користувачеві більше можливостей. Проте робота такої системи складна через багато ступенів свободи та неструктурованість середовища, в якому вона

працює. На даний момент мобільна маніпуляція є предметом серйозної уваги в галузі розробки та досліджень, а мобільні маніпулятори, автономні або дистанційні, використовуються в багатьох галузях, таких як космічні дослідження, військові операції, догляд та медичне обслуговування. Однак у промисловості впровадження мобільних маніпуляторів було обмежено, хоча потреби в інтелектуальній та гнучкій автоматизації присутні. Крім того, необхідні апаратні рішення (мобільні платформи, маніпулятори роботів, зір та інструменти) зараз доступні готовими компонентами для вирішення тих чи інших завдань. Приклад мобільно-маніпуляційних роботів наведено на рис. 1.3 [1].



а) мобільний маніпулятор RB-VULCANO; б) мобільний маніпулятор XL-GEN; в) мобільний маніпулятор FETCH; г) мобільний маніпулятор RB-EKEN

Рисунок 1.3 – Приклади мобільно-маніпуляційних роботів [1]

Деякі операції вимагають високих можливостей наземної мобільності для роботи мобільного робота на пересіченій місцевості, наприклад, у зруйнованих будівлях, зонах стихійного лиха та інших зовнішніх середовищах, а також у штучно створених урбанізованих приміщеннях і зовнішніх середовищах. У цих місцях маленькі безпілотні літальні апарати суворо обмежені геометрією, оскільки навіть найменша перешкода може перешкоджати рухливості просто за допомогою фізики. Наприклад, таке обмеження зустрічається з колісними мобільними роботами через колісну базу [5], а у роботів на ногах через висоту

кроку ноги та мінімальну площу контакту тощо. Ще одним фактором може бути результат потужності приводу в порівнянні з масою мобільного робота.

Серед широкого спектру доступних механізмів мобільних роботів колісні архітектури є найпоширенішими, і повсюдно визнані як найефективніші засоби пересування по гладкій місцевості. Недоліками деяких колісних роботів є їх обмежена здатність долати перешкоди, оскільки доступні ступені свободи руху вперед/назад і рульового управління обмежують їх здатність справлятися з недоліками рухливості, такими як високе центрування [5].

Максимальна швидкість колісних роботів обмежена нестійкістю перекидання, що є функцією кривизни керма та нерівності місцевості. Для вирішення проблем рухливості коліс часто використовуються гусениці.

1.4 Огляд гусеничних мобільних роботів

Існують численні конструкції гусеничних мобільних роботів. На рис.1.4 представлено роботів: PackBot від iRobot Corporation (1.4, а) [6]; МК8 Plus (1.4, б) [7], який оснащений системою гусениць, яка включає колеса та напрямні для забезпечення утримання колії; AZIMUT (1.4, в) [8], який має чотири незалежні шарніри, які можуть бути колесами, ногами або гусеницями, або їх комбінацією, змінюючи напрямок своїх зчленувань, він здатний рухатися у бік, не змінюючи своєї орієнтації; MURV-100 (1.4, г) [9] дозволяє оператору налаштовувати систему в автономному режимі вручну під конкретні потреби; NUGV (1.4, д) [10], у якого маневренність досягається за рахунок використання комбінації шести зон руху і різних датчиків. Така конструкція обмежена через існування віртуальної осі кочення, що може призвести до перекидання; Talon (1.4, е) [11], який оснащений фіксованою конфігурацією гусениці.

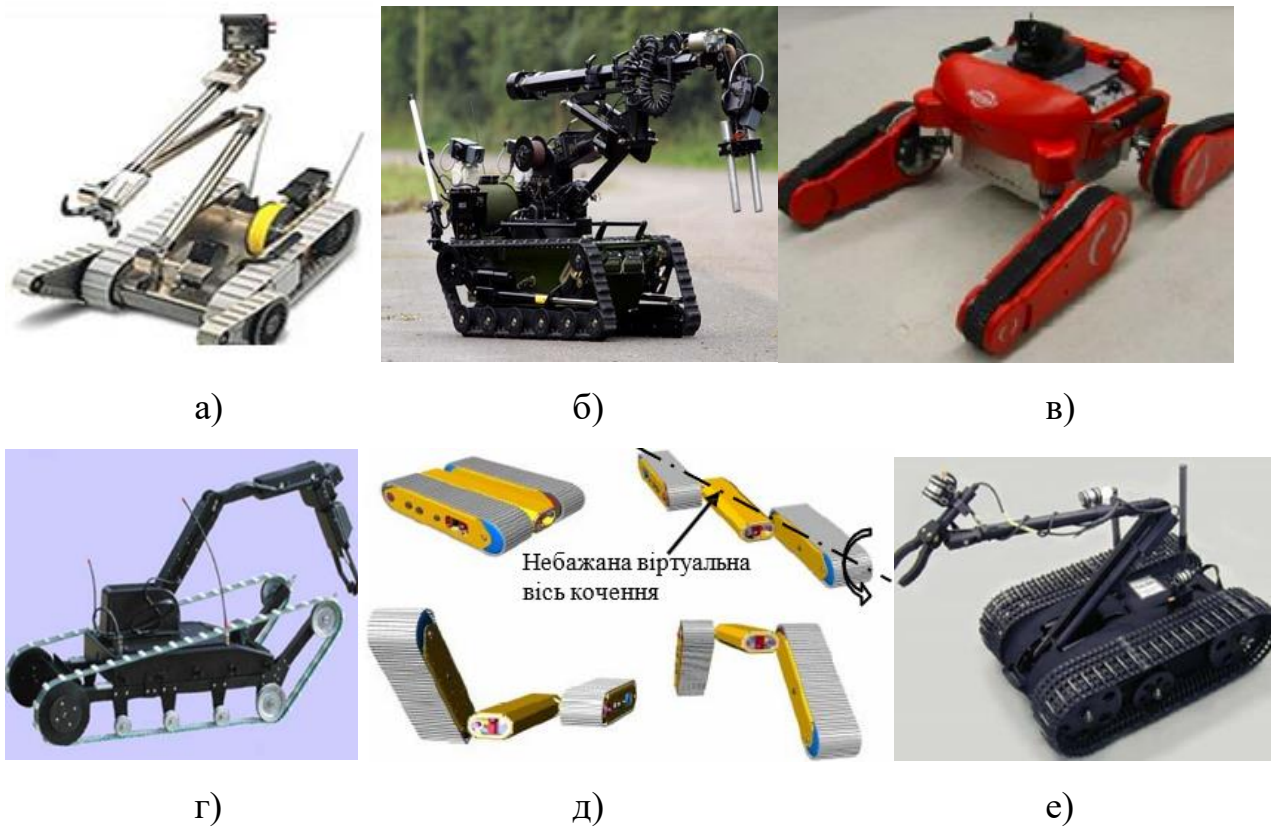


Рисунок 1.4 – Огляд гусеничних мобільних роботів

В якості корисного інструменту порівняння в таблиці 1.1 узагальнені всі питання, що стосуються мобільних роботів, про які говорилося вище. У таблиці порівнюються деякі роботи з рисунку 1.4 з безпосереднім зв'язком з вищезазначеними проблемами. В ідеалі, роботизована система, яка вирішує всі проблеми, як проаналізовано та описано вище, потенційно могла б дати систему з більшою мобільністю та можливостями маніпулювання [11].

Таблиця 1.1 – Порівняння характеристик гусеничних мобільних роботів

Параметри	Тип робота						
	PackBot	MK8 Plus	AZIMUT	MURV-100	Talon	NUGV	Запропонована ідея
1	2	3	4	5	6	7	8
Наявність маніпулятора	+	+	+	+	+	+	+
Запобігання пошкоджень маніпулятора							+

Продовження табл. 1.1

1	2	3	4	5	6	7	8
Можливість переналаштування платформи	+	-				+	+
Здатність до самовиправлення							+
Міцна/надійна конструкція (з кронштейном)							+
Симетричний дизайн (з кронштейном)							+
Можливості пересування по поверхні з перешкодами	+	-	-	-	-	+	+
Зчеплення з дорогою та регулювання маневреності	+					+	+
Центр маси переміщення для запобігання перекидання						-	+
Структурна стійкість							+
Низька складність				-			+
Низька вартість (виходячи зі складності)				-			+

1.5 Аналіз технічного завдання

В даній роботі увага зосереджена на гусеничних мобільних роботах, які здатні забезпечувати можливості пересування, а також маніпуляції.

Мета полягає в тому, щоб представити нові парадигми проектування та управління, виведені на основі функціонально-орієнтованого аналізу, з метою вирішення основних проблем проектування та експлуатації існуючих гусеничних мобільних роботів, які також забезпечують можливості маніпулювання. Розробку віртуального прототипу всієї роботизованої системи з використанням Fusion 360 [12] для виконання різних динамічних симуляцій. Моделювання було виконано з метою використання його як інструменту для вивчення робота, розробки конструкції, його оптимізації та визначення відповідних робочих параметрів на різних етапах проектування та інтеграції гібридного мобільного робота.

Ідея проєкту мобільної платформи, що буде розроблена, полягає в тому, що платформа пересування мобільного робота та рука маніпулятора розроблені як одне ціле, а не два окремих та прикріплених модуля. Зокрема, платформа для пересування може використовуватися як рука маніпулятора і навпаки.

Такий підхід до проектування призводить до гібридного механізму, який здатний забезпечувати можливість пересування та маніпуляції одночасно та взаємозамінно, використовуючи одні й ті самі приводи. Взаємозамінність ланок для забезпечення функцій мобільної платформи та маніпулятора призводить до зменшення кількості компонентів, тоді як міцність виконавчого механізму значно зростає завдяки гібридному характеру механічної структури.

Цей підхід призводить до простішої та надійнішої конструкції, значного зниження ваги, більшої вантажопідйомності кінцевого ефектора та потенційно нижчих витрат на виробництво.

Нові конструктивні особливості дозволяють:

- значно підвищити загальну функціональність мобільного робота та його роботу на пересіченій місцевості;
- можливість розгортання/розміщення руки маніпулятора з будь-якого боку платформи;
- інтеграція пасивних коліс у суглоби роботів для підтримки ланок робота при використанні для пересування/зчеплення;
- зв'язок з поворотними з'єднаннями, які здатні забезпечити безперервне обертання на 360° ;
- додавання радіочастотних антен, які не виступають з платформи.

2 АНАЛІЗ КОНСТРУКЦІЇ PTC ТА ПРОЕКТУВАННЯ У FUSION 360

В ідеалі, роботизована система, яка вирішує всі питання, як проаналізовано та описано далі, потенційно могла б дати систему з більшою мобільністю та можливостями маніпулювання. Як зазначалося вище, деякі роботи на ногах [13] також є частиною сценаріїв, що припускаються при цьому, але у цій роботі ця область не висвітлюється. Увага зосереджена на гусеничних мобільних роботах, які здатні забезпечувати можливості пересування, а також маніпуляції.

Мета полягає в тому, щоб представити нову конструкцію, яка розроблена на основі функціонально-орієнтованого аналізу, щоб вирішити основні питання проектування та експлуатації існуючих гусеничних мобільних роботів, які також забезпечують можливості маніпулювання [13-18].

2.1 Аналіз проблем існуючих конструкцій та запропоновані шляхи їх вирішення

Грунтовний огляд літератури допомогло визначити основні проблеми проектування мобільних роботів, що використовуються в польових операціях. Ці питання зосереджені на функціональності роботів, і вони привели до нової парадигми дизайну. Ці питання складають спільний знаменник при проектуванні існуючих мобільних роботизованих платформ. Нижче визначено проблематику та запропоновані підходи до їх вирішення.

2.1.1 У сучасних архітектурах мобільних роботів, оснащених можливостями маніпулювання, мобільна платформа та рука маніпулятора є двома окремими модулями, які прикріплюються один до одного та відокремлюються один від одного. Платформа і рука мають різні функції, які не можна міняти місцями. Тому кожен модуль окремо вносить свій вклад в складність конструкції, вагу і вартість. Також маса руки маніпулятора кріпиться

або складається зверху на мобільній платформі, яка обмежена вантажопідйомністю мобільної платформи.

Підхід до вирішення – маніпулятор і платформа мобільного робота (MP) розроблені та упаковані як одне ціле, а не два окремих модулі. Мобільна платформа є частиною маніпулятора, а рука є частиною платформи [13]. При цьому модулі бувають прикріпними і знімними. Взаємозамінність ланок робота для забезпечення функцій мобільної платформи та маніпулятора вимагає меншої кількості компонентів (приблизно на 50% менше кількості двигунів), тоді як міцність приводу для маніпуляцій зростає через гібридний характер механічної структури. Такий підхід може призвести до простішої та надійнішої конструкції, значного зниження ваги, більшої вантажопідйомності та нижчих витрат на виробництво.

2.1.2 У конструкціях, де мобільний робот включає в себе важіль маніпулятора, він встановлюється і складається зверху. Таким чином, рука піддається впливу навколишнього середовища і, отже, сприйнятлива до поломок і пошкоджень, особливо коли робот перевертається.

Підхід до вирішення – рука та платформа сконструйовані як єдине ціле, а рука є частиною платформи [13]. Архітектура з вбудованою в платформу рукою виключає вплив навколишнього середовища, коли рука складена під час руху мобільної платформи до цілі. Як тільки мета досягнута, рука розгортається для того, щоб виконати бажані завдання.

2.1.3 Працюючи на пересіченій місцевості, роботи часто досягають позицій, звідки їх не можна було б виправити або контролювати далі з певною метою. Для цього потрібні спеціальні цілі або активні засоби для самовиправлення, щоб знову запустити роботу роботи.

Підхід до вирішення – у новій архітектурі дизайну платформа повністю симетрична навіть з інтегрованою рукою маніпулятора, тому вона може рухатися

до цілі з будь-якого місця без потреби в додаткових активних засобах для самостійного виправлення при падінні або перекиданні [13].

2.2 Аналіз пропонованої конструкції

Проектування було введено з метою вирішення згаданих вище проблем проектування. Запропонований підхід є системним і практичним і враховує загальну продуктивність системи. Запропонована ідея має двоякий характер і описується наступним чином:

– мобільна платформа та маніпулятор – це одне ціле, а не два окремих та прикріплених модуля. Крім того, мобільна платформа може використовуватися як частина маніпулятора і навпаки. Таким чином, деякі з тих же з'єднань (двигунів), що забезпечують глибину маніпулятора, також забезпечують платформи, і навпаки;

– адаптивність робота підвищується за рахунок того, що ми «дозволяємо» йому перевернутися і продовжувати працювати, замість того, щоб намагатися запобігти перекиданню робота або спробам повернути його. Коли відбувається перекидання, через повністю симетричну конструкцію з інтегрованою рукою, потрібно лише дати команду роботу продовжити рух до місця призначення з поточного положення;

– небажані ефекти перекидання або вільного падіння компенсуються вбудованим подвійним підвісом і механізмом натягу, який також забезпечує ефективну адаптивність місцевості.

2.3 Ескізне проектування. Додаткові варіанти реалізації конструкції

Головною метою цього розділу є показати, що можуть існувати інші можливі варіанти реалізації концепції, а також проілюструвати інші засоби пересування, які можна було б використовувати. Тому деякі конфігурації конструкції, показані на рис. 2.1, можуть бути не зовсім реалізовані, як показано.

На рис. 2.1 показано перспективні схематичні вигляди альтернативних варіантів реалізації гібридного мобільного робота.

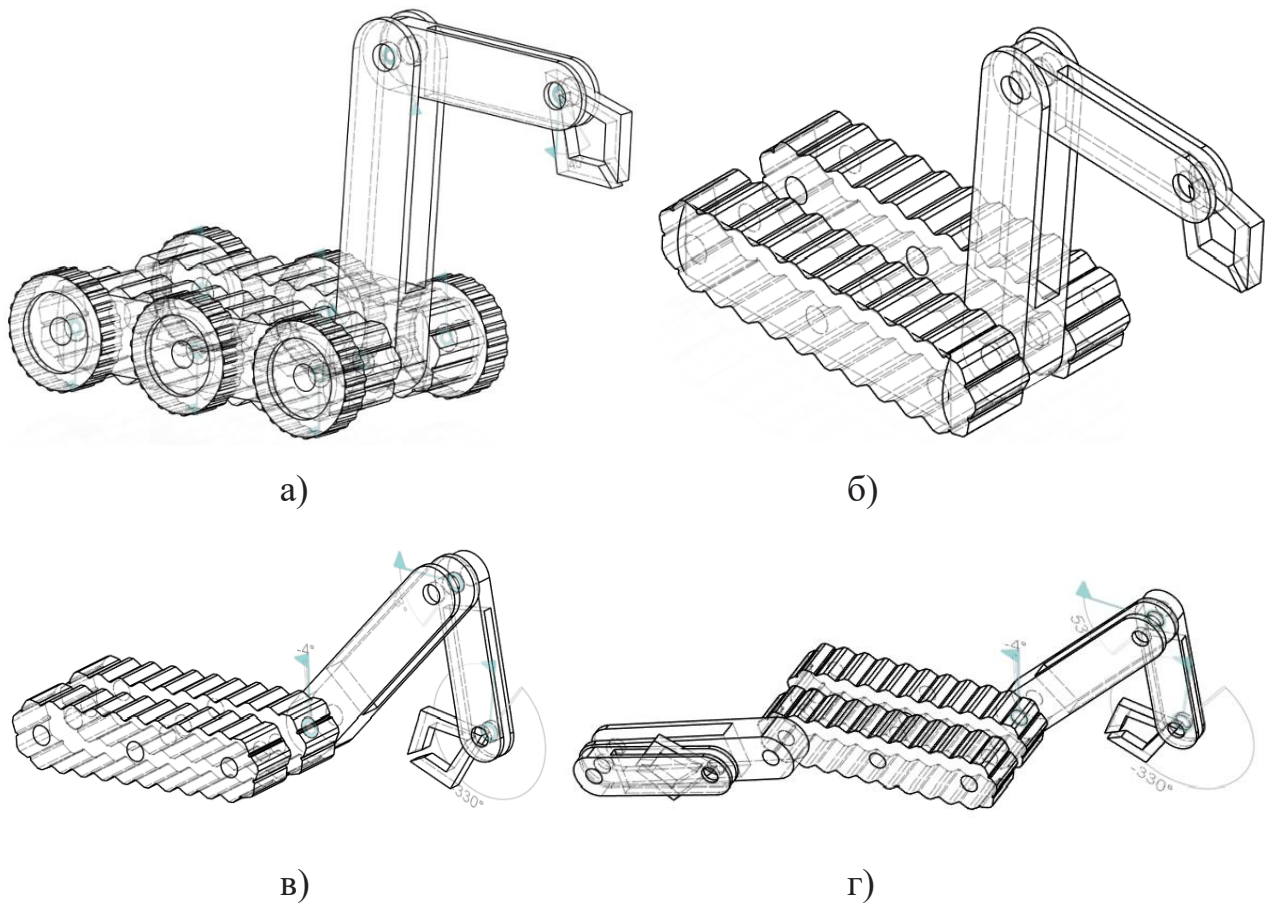


Рисунок 2.1 – Додаткові можливі варіанти реалізації концепції проектування

На рис. 2.1, а показано робота без гусениць, а також з колесами. На рис. 2.1, б показано перспективне схематичне зображення альтернативного гібридного мобільного робота з правою та лівою базовими ланками, вирівняними паралельно одна одній та з'єднаними спереду та ззаду, причому друга ланка складається збоку базових ланок, а третя ланка складається всередину другої ланки.

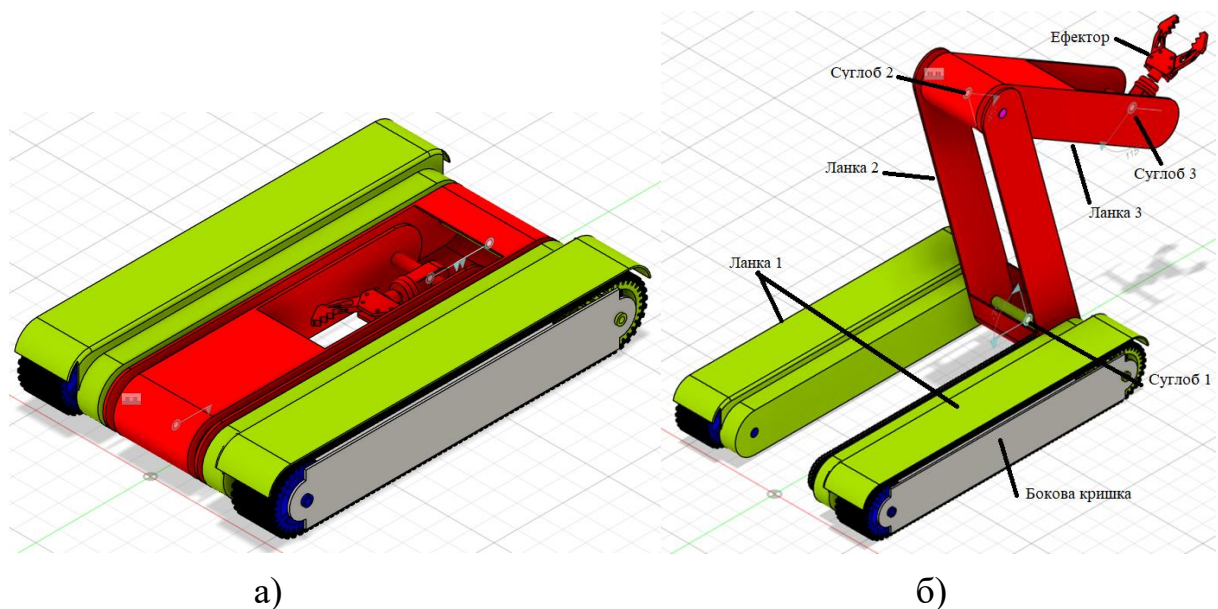
На рис. 2.1, в показано перспективне схематичне зображення ще одного альтернативного гібридного мобільного робота, подібного до рис. 2.1, б, за винятком того, що третя ланка складається збоку другої ланки; а на рис. 2.1, г

показано схематичне зображення ще одного альтернативного гібридного мобільного робота з правою та лівою базовими ланками, вирівняними паралельно одна одній та з'єднаними спереду та ззаду, причому друга ланка прикріплена до однієї з правої та лівої базових ланок, а третя ланка прикріплена до іншої з базових ланок.

Різні режими конфігурації мобільності, маніпулювання та тяги, також можуть бути продемонстровані альтернативними варіантами реалізації, описаними на рис. 2.1.

2.4 Проектування конструкції

Для демонстрації концепції на рис. 2.2 зображено можливе втілення запропонованої ідеї. Якщо форма планки перевернута за рахунок перекидання, симетричний характер геометричної форми конструкції (рис. 2.2, б) дозволяє платформі продовжувати рух до місця призначення з нового положення без необхідності самовипрямлення.



а) закрыта конфигурация; б) відкрита конфігурація

Рисунок 2.2 – Конфігурація робота

Крім того, він здатний розгортати / розміщувати руку маніпулятора з будь-якого боку платформи.

Платформа (рис. 2.2) включає в себе дві однакові базові ланки (ланка 1) з доріжками (ліва і права), ланка 2, ланка 3, кінцевий ефектор і пасивні колеса. Щоб підтримати симетричний характер дизайну, всі посилення вкладені одна в одну. ланка 2 з'єднана між двома доріжками базової ланки за допомогою суглоб 1 (рис. 2.2, б).

Пасивні колеса вставляються між ланками 2 і 3 і з'єднуються через суглоб 2, а інше пасивне колесо вставляється між ланкою 3 і кінцевим ефектором через суглоб 3.

Пасивні колеса використовуються для підтримки ланок 2 і 3 при використанні для пересування/зчеплення. Пасивні колеса можуть активно використовуватися для додаткової мобільності. Ланка 2, ланка 3 і кінцевий ефектор вкладені один в одного, щоб забезпечити повну симетрію геометричної форми платформи.

Вони з'єднані за допомогою обертових з'єднань і здатні забезпечити безперервне обертання на 360 градусів і можуть бути розгорнуті окремо або разом з обох боків платформи. Щоб запобігти знерухомленню платформи під час сценарію перекидання, з боків платформи прикріплені закруглені та податливі кришки, як показано на рисунку 2.2, б.

Структура робота дозволяє масштабувати його та налаштовувати відповідно до різних потреб застосування.

Платформа може використовуватись в трьох різних режимах. Всі ланки використовуються для пересування, щоб забезпечити додатковий рівень маневреності та зчеплення з дорогою. Пара базових ланок може забезпечити рух, еквівалентний з'єднанню башти важеля маніпулятора.

Комбінація режимів 1 і 2: У той час як деякі ланки використовуються для пересування, інші можуть бути використані для маніпуляцій одночасно, таким чином, гібридний характер архітектури дизайну.

Всі три режими роботи проілюстровані на рис. 2.3 – рис. 2.5.

У запропонованій конструкції двигун(и), який використовується для приводу платформи для мобільності, також використовується для того, щоб рука маніпулятора виконувала різні завдання, оскільки сама платформа є маніпулятором, і навпаки.

Іншими словами, платформу можна використовувати для мобільності, і в той же час її можна використовувати як руку маніпулятора для виконання різних завдань.

2.4.1 Мобільність

На рис. 2.3 показано використання ланка 2 для підтримки платформи з метою підвищеної мобільності, а також для цілей скелелазіння. Ланка 2 також допомагає запобігти знерухомленню робота через високе центрування, також дозволяє роботу підніматися на більш високі об'єкти (рис. 2.3, б) і може допомогти просунути робота вперед за допомогою безперервного обертання. Ланка 2 також використовується для підтримки всієї платформи під час руху в конфігурації штатива (рис. 2.3, в). Цього можна досягти, зберігаючи фіксований кут між ланками 2 і 1 під час руху доріжок у формі планки.

Конфігурації (рис. 2.3, а, рис. 2.3, б) показують дві різні можливості використання камери. Конфігурація на рис. 2.3, г показує використання ланки 3 для подолання об'єкта, тоді як ланка 2 використовується для підтримки платформи в конструкції штатива.

Положення конфігурації штатива, як показано на рис. 2.3, в, можна змінити шляхом обертання ланки 2 за годинниковою стрілкою, одночасно пропускаючи її між доріжками базової ланки 1. Ця функція ефективна, коли необхідно швидко змінити напрямок руху робота в конфігурації штатива.

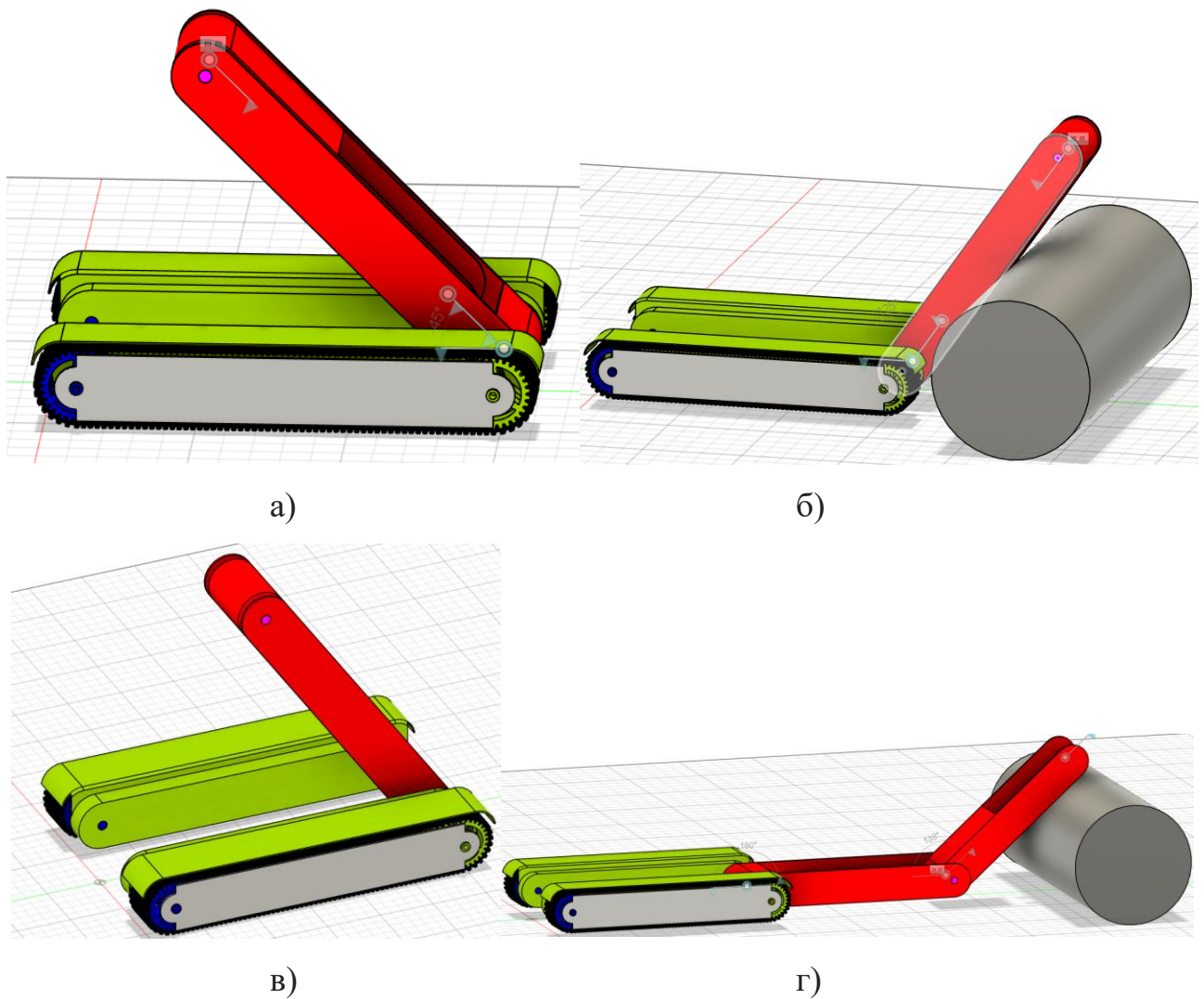


Рисунок 2.3 – Конфігурації мобільної платформи (мобільність)

2.4.2 Маніпуляція

На рис. 2.4 показані різні режими конфігурації платформи з метою маніпуляцій. У той час як деякі посилення використовуються як платформа для пересування, інші одночасно використовуються для маніпуляцій. Конфігурація (рис. 2.4, а) подібна до конфігурації (рис. 2.4, д) з точки зору можливостей маніпуляцій; однак конфігурація (рис. 2.4, б) є оптимальною для посилення зчеплення з поверхнею, оскільки площа контакту між платформою та землею максимізована. Конфігурація (рис. 2.4, в та рис. 2.4, г,) корисна для підвищення маневреності, оскільки площа контакту між платформою та землею зведена до мінімуму. У всіх режимах конфігурації для маніпуляцій, в той час як ланки 2 і 3 використовуються для маніпуляцій, пара базових ланок може забезпечувати рух

еквівалент револьверного з'єднання важеля маніпулятора. Подальший аналіз приросту стабільності кожної конфігурації для маніпуляцій, а також аналіз кінцевої ефективності вантажопідйомності кожної конфігурації обговорюються в результатах моделювання.

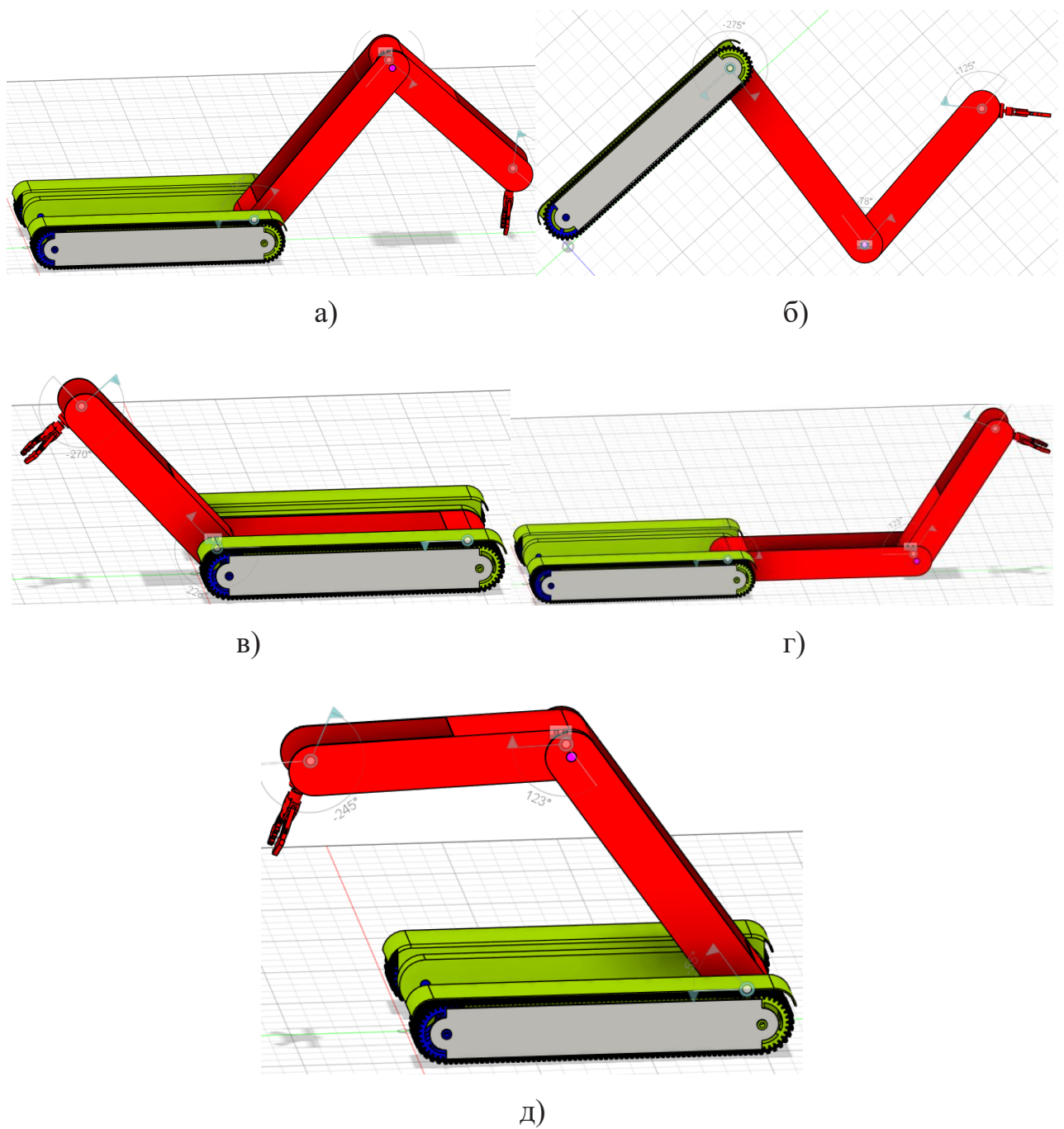
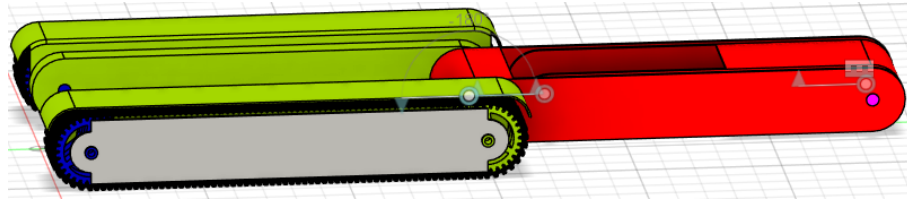


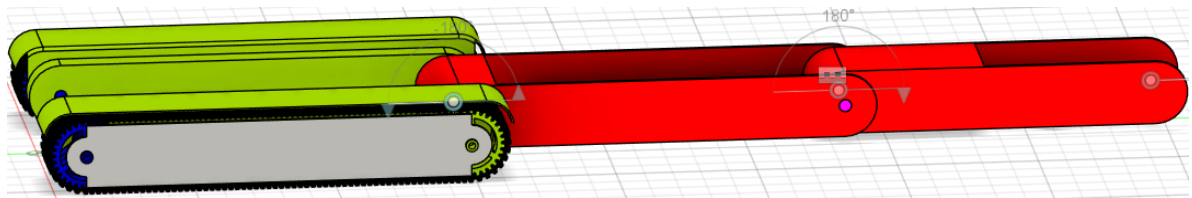
Рисунок 2.4 – Конфігурації мобільної платформи (маніпуляції)

2.4.3 Зчеплення з поверхнею

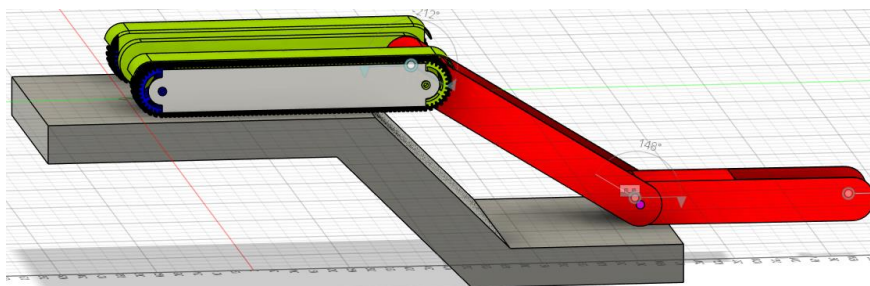
Для кращого зчеплення ланка 2, а при необхідності і ланка 3 можуть бути опущені на рівень землі, як показано на рис. 2.5, а і рис. 2.5, б. У той же час, як показано в конфігурації (рис. 2.5, в), шарнірний характер мобільної платформи дозволяє їй бути адаптованою до різних форм місцевості та умов ґрунту.



а)



б)



в)

Рисунок 2.5 – Конфігурації мобільної платформи (зчеплення)

3 ПРОЄКТУВАННЯ СИСТЕМИ УПРАВЛІННЯ

Питання архітектури управління є ключовими при проектуванні та конструюванні мобільних роботів, так само як і в будь-якій складній системі, керованій комп'ютером, яка схильна до жорстких часових обмежень. Мобільні роботи повинні постійно обробляти великі обсяги сенсорних даних, щоб виконувати необхідні контрольовані рухи на основі команд оператора або в автономних операціях, будувати уявлення про навколишнє середовище і визначати значущі дії. На те, наскільки архітектура управління може своєчасно підтримувати цю величезну задачу обробки, істотно впливає організація інформаційних шляхів в архітектурі. Потік інформації від зондування до дії повинен бути максимальним, щоб забезпечити мінімальну затримку в реагуванні на динамічно мінливу обстановку [19].

Архітектура розподіленої обробки пропонує ряд переваг для подолання значної складності проектування та реалізації, властивій складним роботам. По-перше, він часто дешевший і стійкіший, ніж альтернативні однопроцесорні конструкції. Що ще важливіше, кілька процесорів дають можливість скористатися перевагами паралелізму для покращення пропускної здатності та відмовостійкості [19].

У цій главі представлена розробка нового системного підходу для модульної архітектури управління, яка різко збільшує функціональність гібридного мобільного робота і забезпечує експлуатаційну відмовостійкість. Це робиться шляхом надання на-плата розподіленого радіочастотного зв'язку між підсистемами робота та модулями, такими як виконавчі механізми та датчики.

3.1 Керування бортовим бездротовим датчиком/виконавчим механізмом

Все електрообладнання (таке як двигуни, акумулятори, контролери, драйвери, електричні коробки, сенсорні блоки, аудіо/відео та дані радіочастотні

карти, головки передач тощо) розташоване на лівій та правій доріжках базової ланки. Інші двигуни і пов'язана з ними електроапаратура для захватного механізму (торцевий ефектор) розташовані в просторі, доступному в ланці 3 (рис. 3.1).

3.2 Схема зв'язку

Конструктивна архітектура гібридного мобільного робота вимагає, щоб електричне обладнання в кожному з сегментів, що складають робота – дві базові ланки, ланка 2 і ланка 3 (рис. 2.2, б), не було підключено дротами для цілей передачі даних.

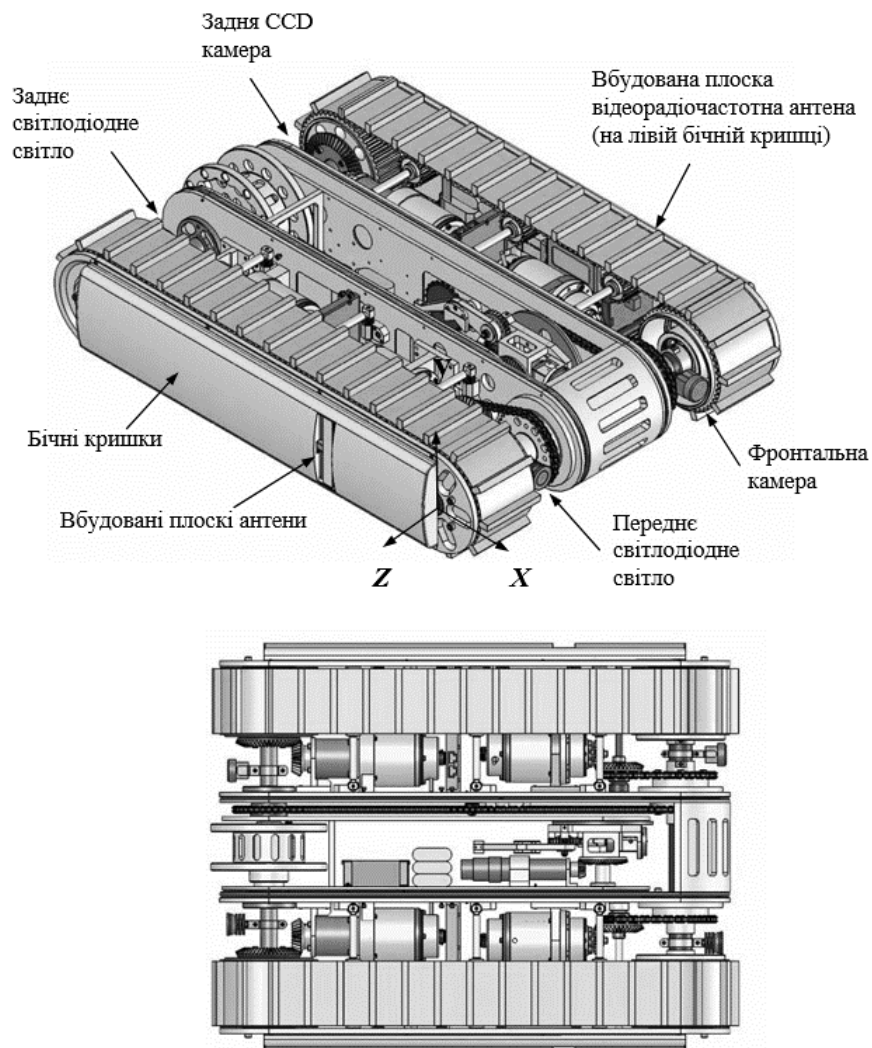


Рисунок 3.1 – Режим конфігурації мобільного робота зі складеними ланками (верхня/нижня кришки зняті) [13]

Електричне обладнання розташоване в трьох сегментах робота, а саме, у двох доріжках базової ланки та ланці 3. Електричне обладнання, пов'язане з механізмом захвату, яке розташоване в ланці 3, не підключено до жодної з доріжок базової ланки за допомогою проводів. Кожен із сегментів містить індивідуальне джерело живлення (літій-іонні акумулятори) та радіочастотні модулі для мережі радіочастотного зв'язку [20-26].

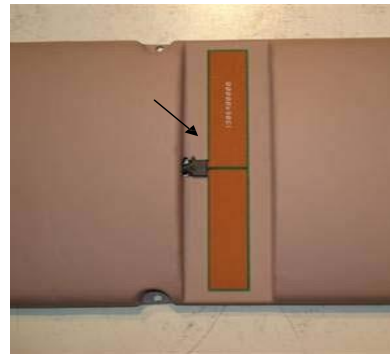
Вимога уникати прямого радіочастотного зв'язку між кожним з трьох сегментів робота і ПЦУ також допомогла в усуненні наступних серйозних проблем:

– це позбавляє від необхідності мати автономну вертикально стирчить антену для кожного з сегментів робота. Виступаючі антени не бажані через структурну симетрію робота, що дозволило б роботу перевертатися, коли це необхідно, і продовжувати працювати без необхідності саморегулювання. З цієї причини були розроблені спеціальні плоскі антени [26], які вбудовуються в бічні кришки робота для радіочастотного відеозв'язку і передачі даних, як показано на рис. 3.1 та рис. 3.2. Плоска форма антен і їх розташування в бічних кришках зберігає симетричний характер всієї гібридної платформи і зводить до мінімуму ймовірність втрати даних або поломки антени, якщо вона виступає вертикально вгору;

– якщо кожна з базових ланок отримує дані від блок керування оператора (БКО, OCU – Operator Control Unit) безпосередньо, втрата даних через фізичні перешкоди (стіни, дерева, будівлі тощо) між передавачем і приймачем може призвести до неузгодженого отримання даних кожною базовою ланкою, що може призвести до розсинхронізації між рухами треку. З іншого боку, якщо всі дані, що стосуються всіх сегментів робота, приймаються в одному місці на роботі, а потім передаються і розподіляються між іншими сегментами (сегменти відокремлені фіксованими відстанями один від одного без зовнішніх фізичних перешкод), то Дані, отримані кожним з треків базової ланки, будуть практично ідентичними, а будь-яка втрата даних, що сталася між БКО і роботом, буде послідовною.



а)



б)

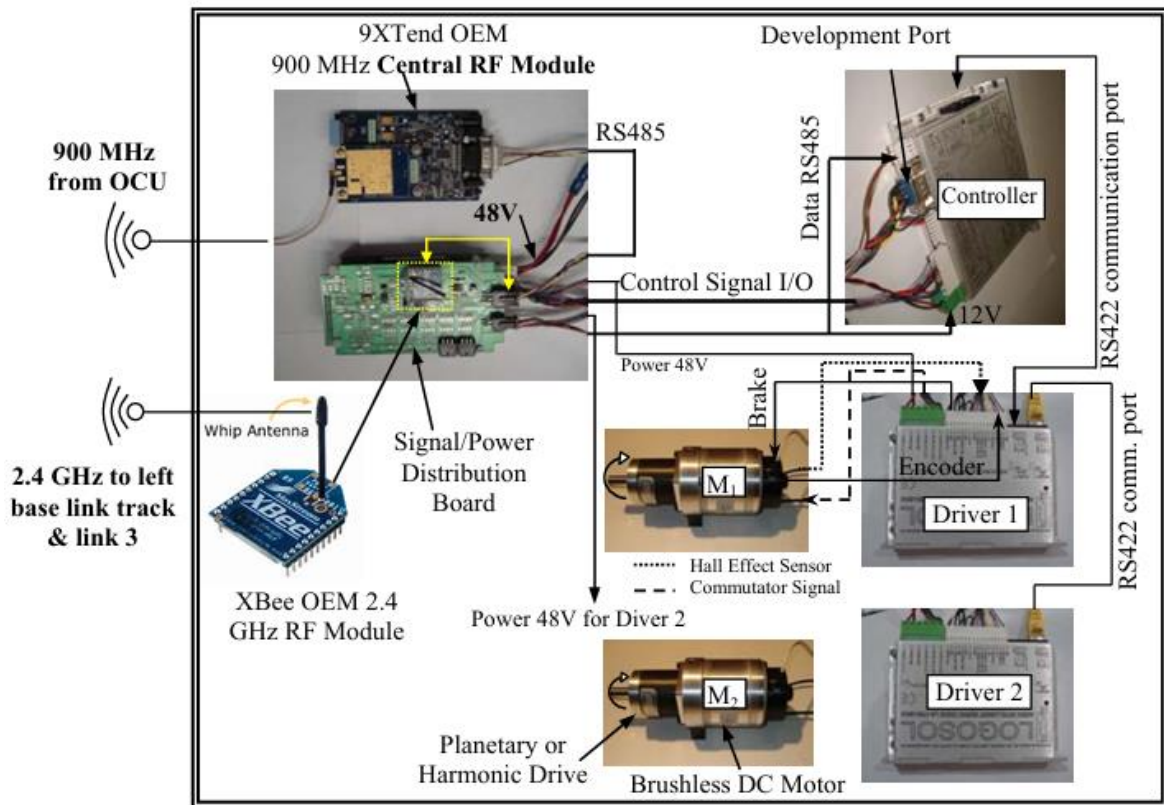
а) плоска антена 900 МГц, 130 мм x 20 мм; б) плоска антена (відео) 2,4 ГГц, 60 мм x 7 мм

Рисунок 3.2 – Вбудовані плоскі антени для радіочастотного зв'язку відео та даних

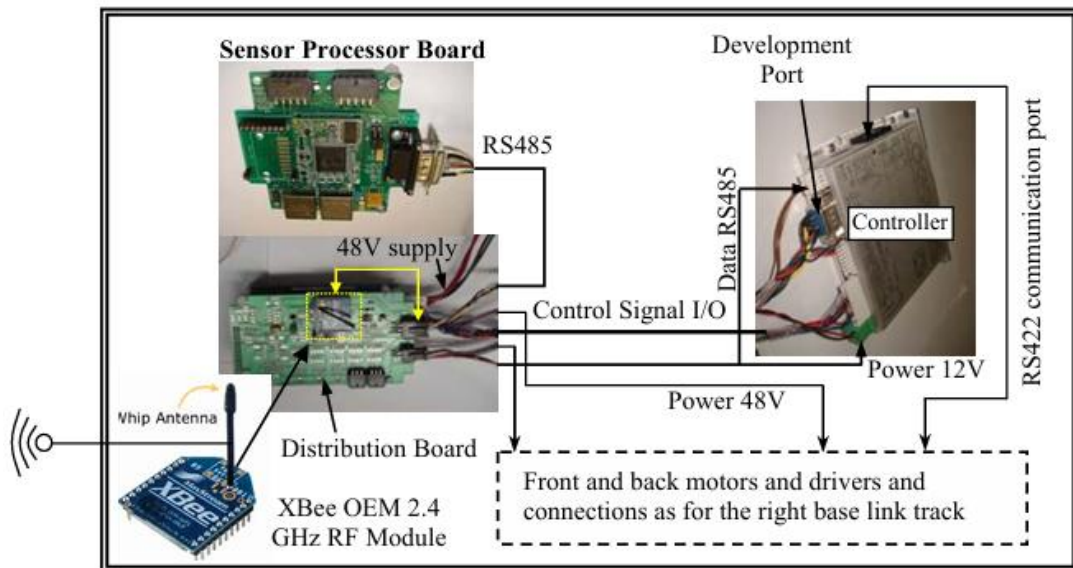
У зв'язку з короткими та фіксованими відстанями між сегментами/ланками робота вищезазначені проблеми можуть бути вирішені за допомогою малопотужного бортового радіочастотного зв'язку між лівою та правою доріжками базової ланки 1 та ланкою 3.

3.3 Радіочастотне обладнання для гібридного мобільного робота

Дані, що передаються автономним радіочастотним модемом, приймаються OEM-модулем 9XTend, який розташований на правій доріжці базової ланки, як показано на рис. 3.3, а. Модуль 9XTend зв'язується з контролером, який керує електроніки (двигуни та пов'язані з ними драйвери, датчики тощо) на правій доріжці базової ланки, водночас надсилаючи дані, що стосуються інших сегментів (ліва доріжка базової ланки та лінія 3) на радіочастотний модуль MaxStream XBee OEM 2.4 ГГц у дротовому з'єднанні (через розподільний щит). Потім ці дані передаються бездротовим способом на два інші радіочастотні модулі XBee OEM 2,4 ГГц – один для лівої доріжки базового каналу, а інший для лінії 3 (рис. 3.3, б), забезпечуючи таким чином бортовий бездротовий (РЧ) обмін даними між суглобами роботів.



а) права базова ланка



б) ліва базова ланка

Рисунок 3.3 – Компонування бортового бездротового зв'язку та деталі дизайну (всі кришки зняті)

Використання OEM-радіочастотного модуля XBee (рис. 3.4) є вигідним у кількох випадках:

– відпадає необхідність вертикального розміщення антени для кожного

сегмента ланки мобільного маніпулятора, так як ВЧ-модуль випускається з антеною з чіпом PCB або мініатюрною штирьовою антеною (рис. 3.4);

- його робоча частота становить 2,4 ГГц, а саме інша робоча частота, ніж у основного ВЧ-модуля 9Xtend;
- висока швидкість передачі радіочастот 250 кбіт/с;
- його малий форм-фактор (2,5 см x 3 см) економить цінний простір на дошці в компактній конструкції робота.

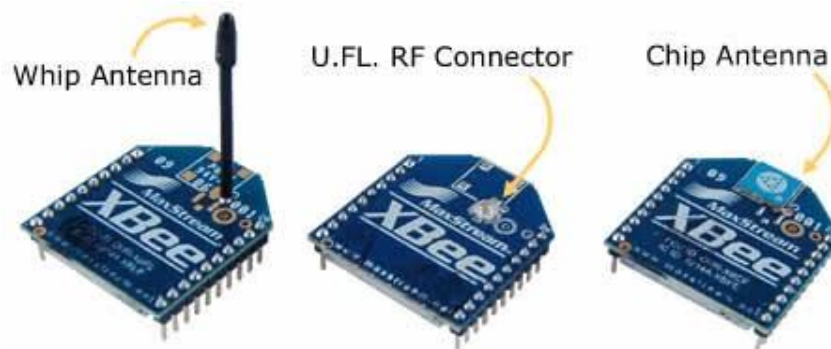


Рисунок 3.4 –Радіочастотний модуль Xbee OEM

Оскільки радіостанції не мають жодних проблем з випромінюванням через пластикові корпуси або корпуси, антени можуть бути повністю закриті в нашому додатку. Радіочастотний модуль Xbee з чіп-антеною має продуктивність бездротового зв'язку в приміщенні приблизно 24 м. У разі гібридної конструкції робота максимальна фіксована відстань між гусеницями базової ланки та ланкою 3 становить менше 0,5 м.

Ця апаратна архітектура забезпечує просте і дешеве рішення для вбудованого міжсегментного бездротового зв'язку та дозволяє уникнути будь-яких дротових і ковзних механічних з'єднань між різними частинами даної механічної системи.

Попередні експерименти були проведені з метою перевірки радіочастотного зв'язку між розподіленими модулями RF Xbee в системі. За допомогою джойстика ми відправили команди обертання двигуна через RF-модуль БКО 9XTend на бортовий радіочастотний модуль 9XTend, який розподіляв дані на локальний радіочастотний модуль Xbee у дротовому

з'єднанні. Бездротові дані, передані локальним модулем XBee, були успішно прийняті вбудованими модулями XBee по інших каналах зв'язку бездротовим способом без втрати даних, навіть якщо модулі XBee були частково/повністю закриті та відокремлені один від одного в роботизованій системі. Зокрема, рухи треків були стабільно синхронізовані (як зупинені, так і запуснені точно в один і той же час), незважаючи на те, що зв'язок між треками бездротовий.

3.4 Архітектура електричного обладнання

3.4.1 Компонування контролерів, драйверів, датчиків і камер

Мікроконтролер в кожній ланці є основним модулем на базі Rabbit. На модулі є кілька аналогових вхідних каналів, через які мікроконтролер приймає сигнали від датчиків. Кожен двигун у гусеницях базової ланки приводиться в рух драйвером Logosol (LS-173s), який діє як контролер двигуна для забезпечення контролю положення та швидкості. Сигнали від енкoderів, прикріплених до заднього валу кожного двигуна, надходять до водіїв у вигляді зворотного зв'язку. Датчики, якими оснащений робот: датчик нахилу; термометр, GPS, трьохосьовий компас (інклінометр) і монітор напруги батареї (рис. 3.5).

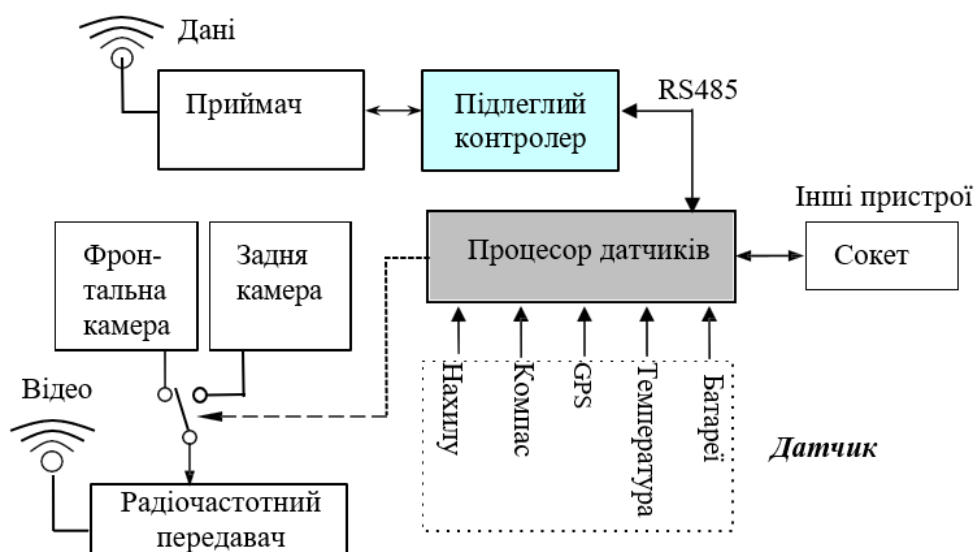


Рисунок 3.5– Компонування датчиків і камер

3.4.2 Проектування та реалізація системи живлення та потоку сигналів

Одним із стримуючих факторів для проектування невеликих мобільних роботів зазвичай є конструкція системи живлення. Для того, щоб генерувати необхідні високі крутні моменти для кожного з'єднання, були розроблені і використовуються акумуляторні літій-іонні акумулятори в спеціальній конструкції, про що буде сказано далі. Це джерело живлення, поряд з правильним вибором безщіткових двигунів постійного струму та гармонійних редукторних приводів, були інтегровані для створення необхідних високих крутних моментів.

Для гібридного робота була розроблена і впроваджена модульна і розширювана конструкція системи живлення. Він має два основні ключові елементи, які дозволяють легко змінювати конфігурацію та розширювати: літій-іонні акумулятори та плати розподілу живлення/сигналу.

Кожна гусенична ланка гібридного робота несе чотири 9-елементні літій-іонні акумулятори Panasonic CGR18650D послідовно з'єднані, як показано на рисунку 3.6.

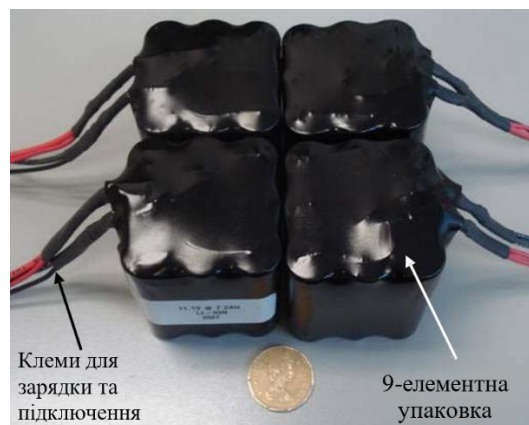


Рисунок 3.6 – Збірка літій-іонних акумуляторних блоків

Кожен елемент Li-Ion акумулятора номінально забезпечує напругу 3,7 В при 2,4 А год. Використовуємо менші Li-Ion елементи, такі як Panasonic CGR18650D, з перевагою збільшення ємності та безперервного розряду струму завдяки збільшенню кількості елементів, що використовуються в заданому обсязі. Комбінація числа осередків і схем захисту була розроблена для того, щоб

досягти заданого розряду струму до 15 Ампер. Такі електричні характеристики є вигідними, враховуючи дуже компактні розміри акумуляторної батареї (110 мм x 110 мм x 70 мм) і загальну вагу всього 1,6 кг.

3.4.3 Плата розподілу живлення/сигналу

Плата розподілу сигналів живлення і даних являє собою друковану плату власної [21] розробки, яка використовується в кожній з доріжок базової ланки в гібридному роботі (рис. 3.7). Розподільні щити для правої і лівої базових ланок ідентичні.

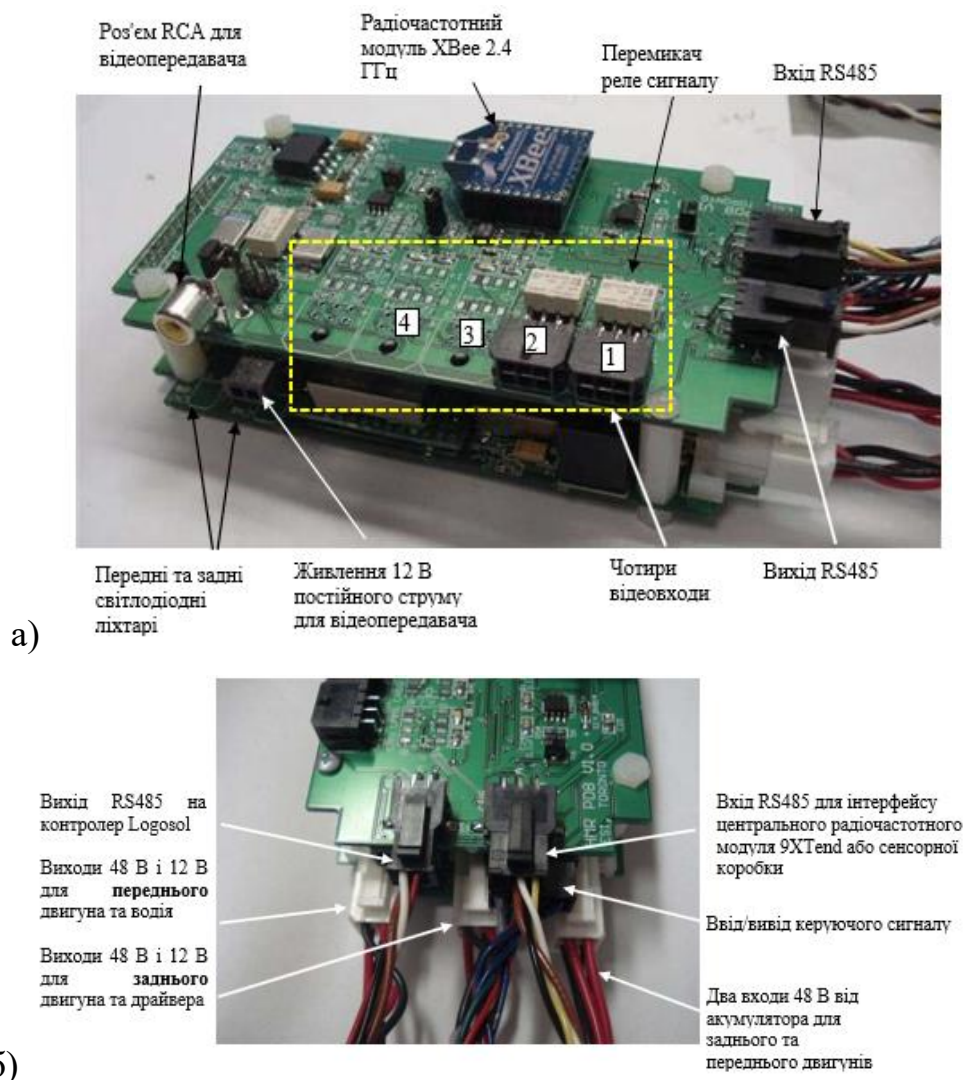


Рисунок 3.7 – Плата розподілу живлення/сигналу для доріжок базової ланки

Для того, щоб значно зменшити займану площу розподільного щита, він був спеціально розроблений і виготовлений пошарово, забезпечуючи при цьому достатні інтерфейси вводу/виводу для великої кількості бортових пристроїв, а також прикріплених пристроїв для мобільного робота, таких як світлодіодні ліхтарі (спереду та ззаду), камери (спереду та ззаду), різні датчики.

Одне з призначень плати полягало в тому, щоб взяти енергію, що надається платами для зарядки акумуляторів, і розподілити її між різними бортовими приладами. Від акумулятора до розподільного щита є два входи на 48 В, щоб забезпечити два незалежні виходи 48 В для живлення задньої панелі і водіїв передніх двигунів на кожній колії базової ланки. Гнучкість досягається за рахунок використання комерційних перетворювачів постійного струму.

Живлення від плати зарядки акумулятора спрямовується через кілька перетворювачів DC-DC, які регулюють напругу вгору або вниз за необхідності перед розподілом на бортові прилади, такі як 3,3 В для радіочастотного модуля XВee 2,4 ГГц, і кілька рівнів вихідної напруги постійного струму, таких як вихід 5 В для світлодіодних ліхтарів і відеоквадроциклів, 12 В для камер і контролера Logosol двигуна, 48 В для водіїв двигунів і 5 В для клем датчика Холла двигуна. Розподільний щит також включає в себе схеми перемикачів, які перемикаються між чотирма камерами і відеоквадроциклом.

Оскільки ці блоки доступні з багатьма різними вихідними напругами, було легко змішувати та поєднувати перетворювачі за потреби. Кожен розподільний щит можна розширити шляхом укладання дощок у міру необхідності для забезпечення додаткової вихідної напруги або більшої потужності на джерело напруги.

Вихідний термінал RS485 забезпечує інтерфейс з локальним контролером Logosol на кожній доріжці базової ланки, а також вихід 12 В для живлення контролера. При такому типі електричного підключення дані, що стосуються іншої доріжки базової ланки та механізму захвату, передаються на радіочастотний модуль XВee для бортової бездротової передачі даних.

4 МОДЕЛЮВАННЯ РОБОТИЗОВАНОЇ СИСТЕМИ

Динамічне моделювання повної роботизованої системи було проведено з метою вивчення її функціональності та демонстрації її очікуваної здатності для цілей оптимізації проектування. 3D-модель, розроблена за допомогою Fusion 360 [12], була експортована і змодельована у програмному забезпеченні ADAMS для виконання моделювання руху. Імітаційні експерименти враховують розподіл маси робота (включаючи акумулятори, двигуни, електроніку тощо), інерційні властивості та прискорення ланок, а також сили контакту та тертя між ланками та гусеницями та землею.

4.1 Віртуальне прототипування та моделювання

При проектуванні механічної системи, такої як цей гібридний робот, потрібно було розуміти, як взаємодіють різні компоненти, а також які сили ці компоненти генерують під час роботи. При виконанні дослідження використано ADAMS [272], комерційне програмне забезпечення для моделювання руху, щоб проаналізувати поведінку всієї роботизованої механічної системи. Це дозволило тестувати віртуальні прототипи та оптимізувати конструкції для продуктивності, без необхідності будувати та тестувати кілька фізичних прототипів. Це значно скоротило час і вартість розробки нашого прототипу.

Процес розробки віртуального продукту описаний на схемі на рис. 4.1. Після створення деталей проектування за допомогою програмного забезпечення CAD їх можна або імпортувати безпосередньо в ADAMS [27], або використовувати для створення спочатку цифрового макета (підгонка деталей шляхом складання), а потім імпортувати конструкторську збірку для створення віртуального прототипу для функціональних тестів.



Рисунок 4.1 – Схема розробки віртуального продукту [27]

Переваги моделювання роботизованої системи перелічені наступним чином:

- візуалізація та перевірка різних випадки мобільності робота (наземні сценарії), щоб вивчити його функціональність і, отже, оптимізувати конструкцію;

- варіація типів аналізу, що виконується, без необхідності модифікувати фізичні прилади, випробувальні прилади та процедури випробувань;

- використання як інструменту перевірки концепції для визначення, чи працює механізм, і перевірки, чи правильно підходять деталі конструкції та функціонують належним чином, наприклад, перевірка зазору під час руху в різних робочих умовах;

- аналіз змін в дизайні швидше та з меншими витратами, ніж фізичне тестування прототипу;

- покращення якості продукції, вивчаючи варіанти дизайну для оптимізації продуктивності всієї системи.

Оптимізація розподілу ваги була виконана шляхом визначення оптимальної ваги кожної ланки робота (базові ланки, ланка 2 і ланка 3) таким чином, щоб постава робота залишалася стабільною (стабільність перекидання) під час руху ланок робота під час виконання різних завдань з пересування та маніпуляцій.

4.2 Структура моделі

На додаток до моделювання всіх жорстких частин тіла робота, одним з основних завдань, з якими довелося зіткнутися, було зафіксувати гнучку поведінку гусеничної системи та її взаємодію зі шківками та землею. Іншими словами, ця система включає в себе як гнучку, так і жорстку динаміку тіла. Потреба в гнучких динамічних можливостях для гусеничної системи була вирішена за допомогою ADAMS Tracked Vehicle (ATV) Toolkit [28]. Способом дії з використанням ADAMS разом з його ATV Toolkit був використовується для будівництва доріжок [28]. У ньому описані кроки, необхідні в програмному забезпеченні для побудови доріжки з серії дискретних жорстких сегментів, з'єднаних разом. Різні деталі та вузли були імпортовані з програмного забезпечення CAD у ADAMS Software у форматі Parasolid. Цей формат зберігає всі інерційні та масові властивості твердих частин, що дозволяє точно відобразити деталі в моделі ADAMS, створеній для моделювання.

Структура моделі віртуального прототипу ADAMS описана на рис. 4.2.



Рисунок 4.2 – Структура моделі віртуального прототипу ADAMS

Прототип збірки робота в ADAMS складається з декількох підсистем. Підсистеми можуть дублюватися за допомогою одного і того ж шаблону так, що $M \leq N$. Кожен шаблон включає в себе визначення різних частин, стик між деталями, функції руху суглоба і зовнішні сили. Комунікатор – це засіб, за допомогою якого шаблони спілкуються з метою визначення зв'язків між різними частинами системи.

У випадку з гібридним роботом було створено 6 шаблонів для створення 10 підсистем (шаблон гусениці, шаблон переднього головного шківів, шаблон заднього головного шківів, шаблон нижнього планетарного шківів, шаблон верхнього планетарного шківів та шаблон кузова). Кожен з нижніх і верхніх планетарних шаблонів шківів становить 3 підсистеми, а решта кожного з шаблонів створює кожну з інших підсистем (всього 10 підсистем).

Шаблони були створені таким чином, щоб включати деталі, що виглядають симетрично по обидва боки робота. Наприклад, один і той же передній головний шків з'являється в кожній з базових ланок, тому вони складають єдиний шаблон. Після того, як остаточно збірка створена, геометрія місцевості та її властивості включаються для створення повної імітаційної моделі.

Віртуальна модель включає в себе 178 деталей, 888 DOF, 41 суглоб і рух суглобів, а також 1579 силових і контактних елементів. Велика кількість деталей, DOF і контактних елементів обумовлена сегментованим характером доріжок.

4.3 Аналіз характеристик рухливості

Для вивчення функціональних можливостей робота були проведені наступні симуляції: різні сценарії маніпуляцій (всі 3 режими роботи, як описано в підрозділах 2.4.1 – 2.4.3), випадкові обертання всіх ланок, обхід труб різного діаметру, підйом і спуск по прямокутних перешкодах з різною конфігурацією ланок, перетин канав з різними розмірами проміжку, підйом і спуск по сходах, перекидання через перешкоду пандуса, завдання з підйому та інше.

Для ілюстрації кілька з наведених вище симуляцій представлені на рис. 4.3 показано кілька можливих режимів конфігурації для маніпулювання.

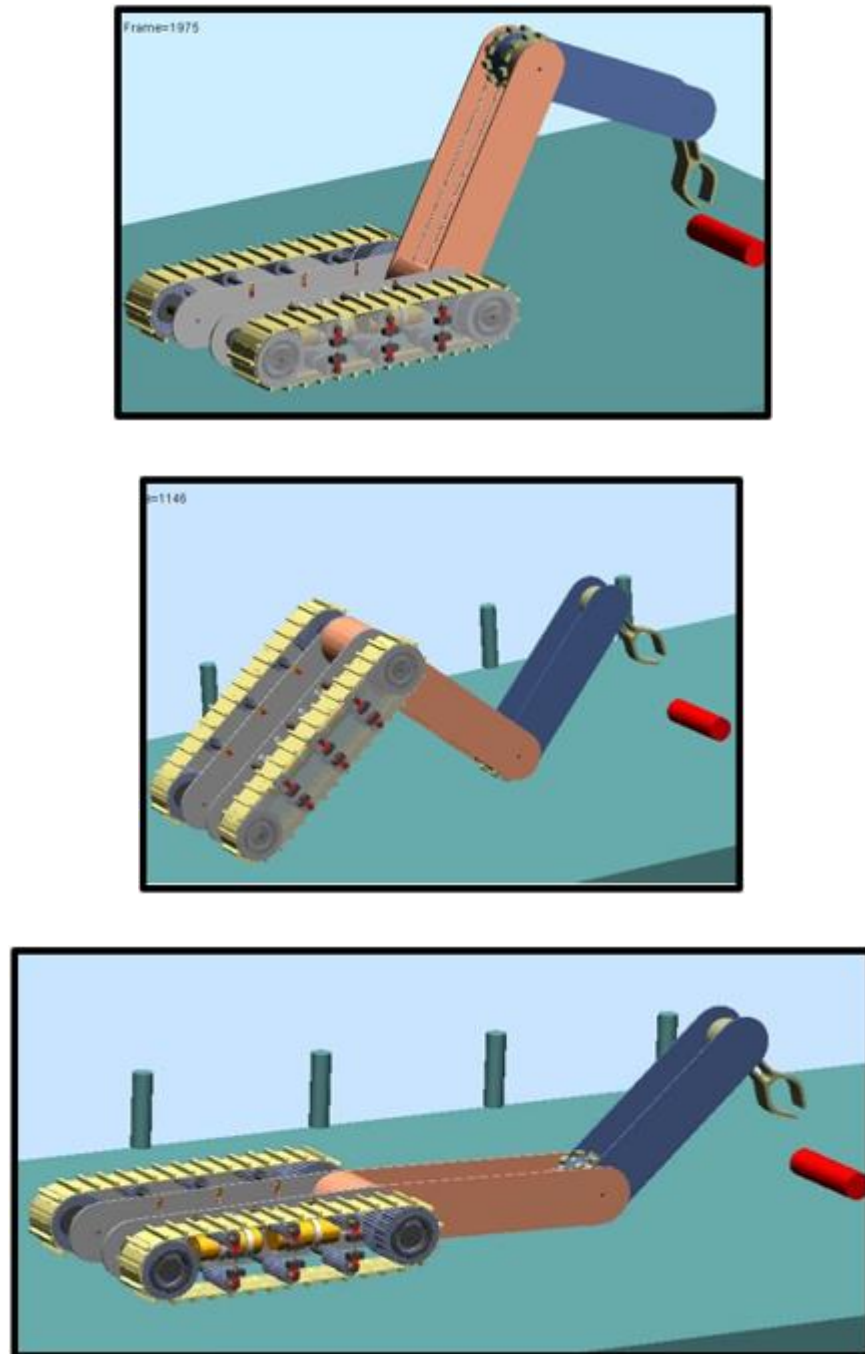


Рисунок 4.3 – Конфігурації для маніпуляцій

Сегментований характер конструкції робота дозволяє йому долати циліндричні перешкоди, такі як труби та колоди дерев (рис. 4.4) зображено кілька етапів конфігурації для виконання таких завдань наступним чином:

гусениці базової ланки розгортаються до тих пір, поки вони не торкнуться перешкоди. У цей момент гусениці починають рухати платформу, в той же час вони продовжують своє обертання приблизно на стику 1. Тільки комбінація цих одночасних рухів дозволяє роботу долати такі перешкоди.

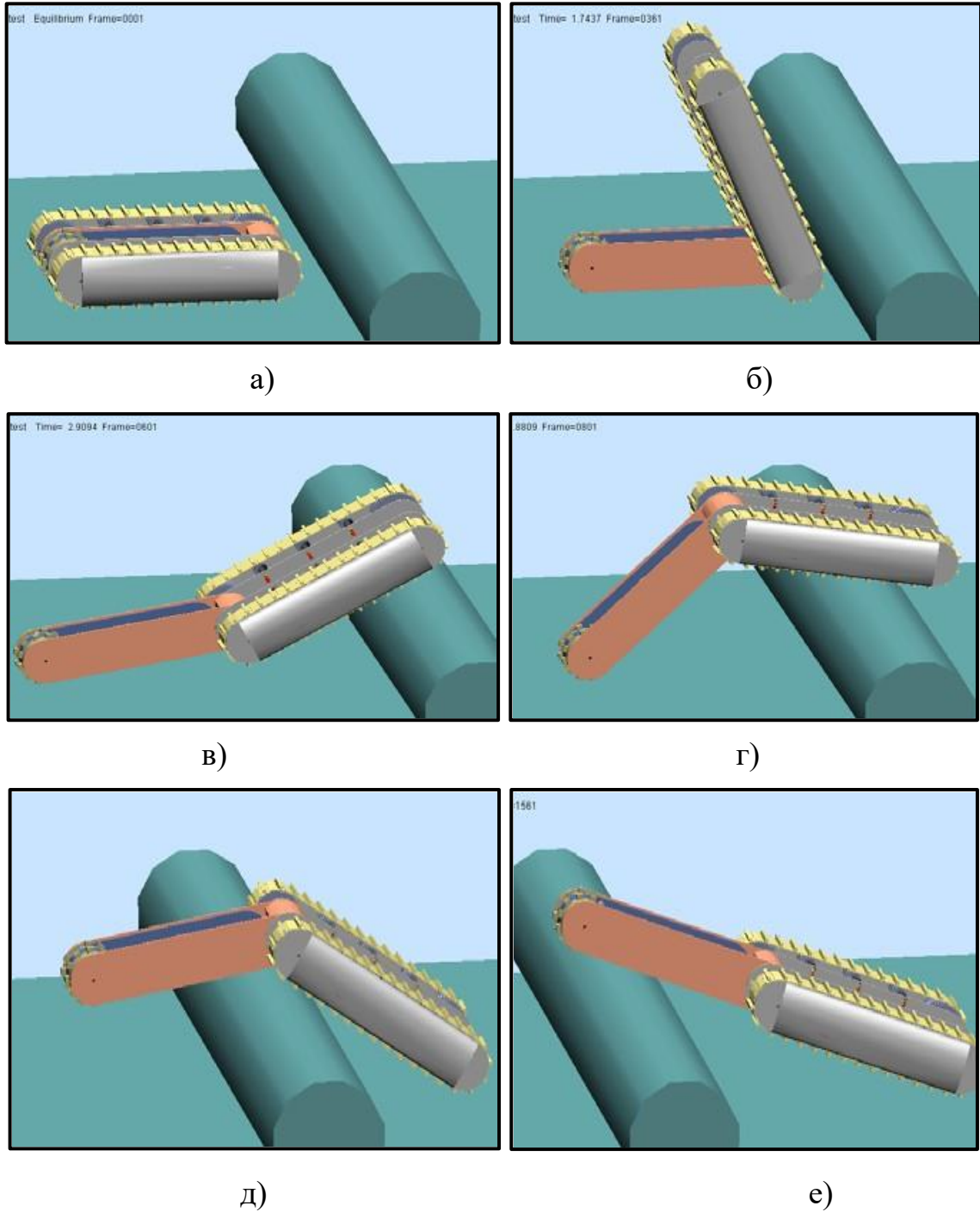


Рисунок 4.4 – Подолання кругових перешкод

На рисунку 4.5 показана серія рухів, які повинні пройти різні ланки разом з доріжками, щоб піднятися по сходах. Етапи такі: спочатку розгортаються доріжки базових ланок до тих пір, поки вони не торкнуться сходів (рис. 4.5, б); ланка 2 замикається і робот починає лазіння з гусеницями (рис. 4.5, в); в кінці сходів відкривається ланка 3 (рис. 4.5, г) для підтримки платформи під час руху робота до положення (рис. 4.5, д); ланка 3 обертається (до замикання), щоб опустити робота, поки гусениці не досягнуть повного контакту з землею (рис. 4.5, е).

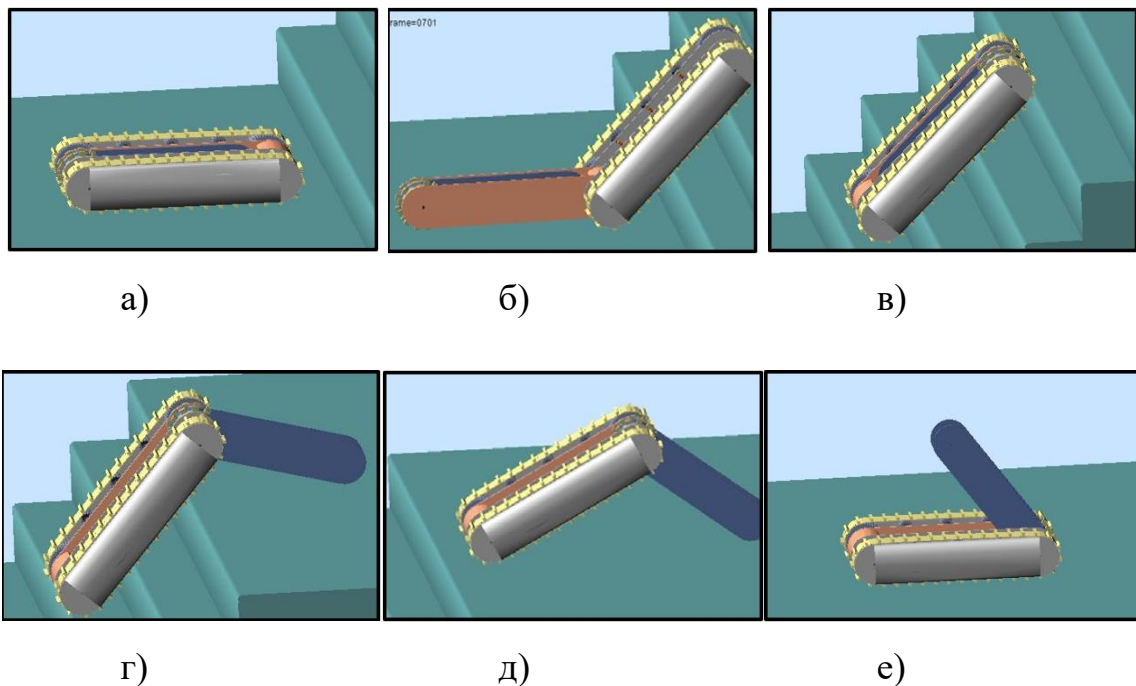


Рисунок 4.5 – Підйом по сходах

Етапи, які робот повинен пройти, щоб спуститися по сходах, як показано на рис. 4.6 такі: ланка 2 розгорнута до тих пір, поки вона не торкнеться сходів (рис. 4.6, а); робот просувається вперед до тих пір, поки вся платформа не опиниться на сходах (рис. 4.6, б); ланка 2 замикається (рис. 4.6, в) і платформа спускається по сходах (рис. 4.6, г).

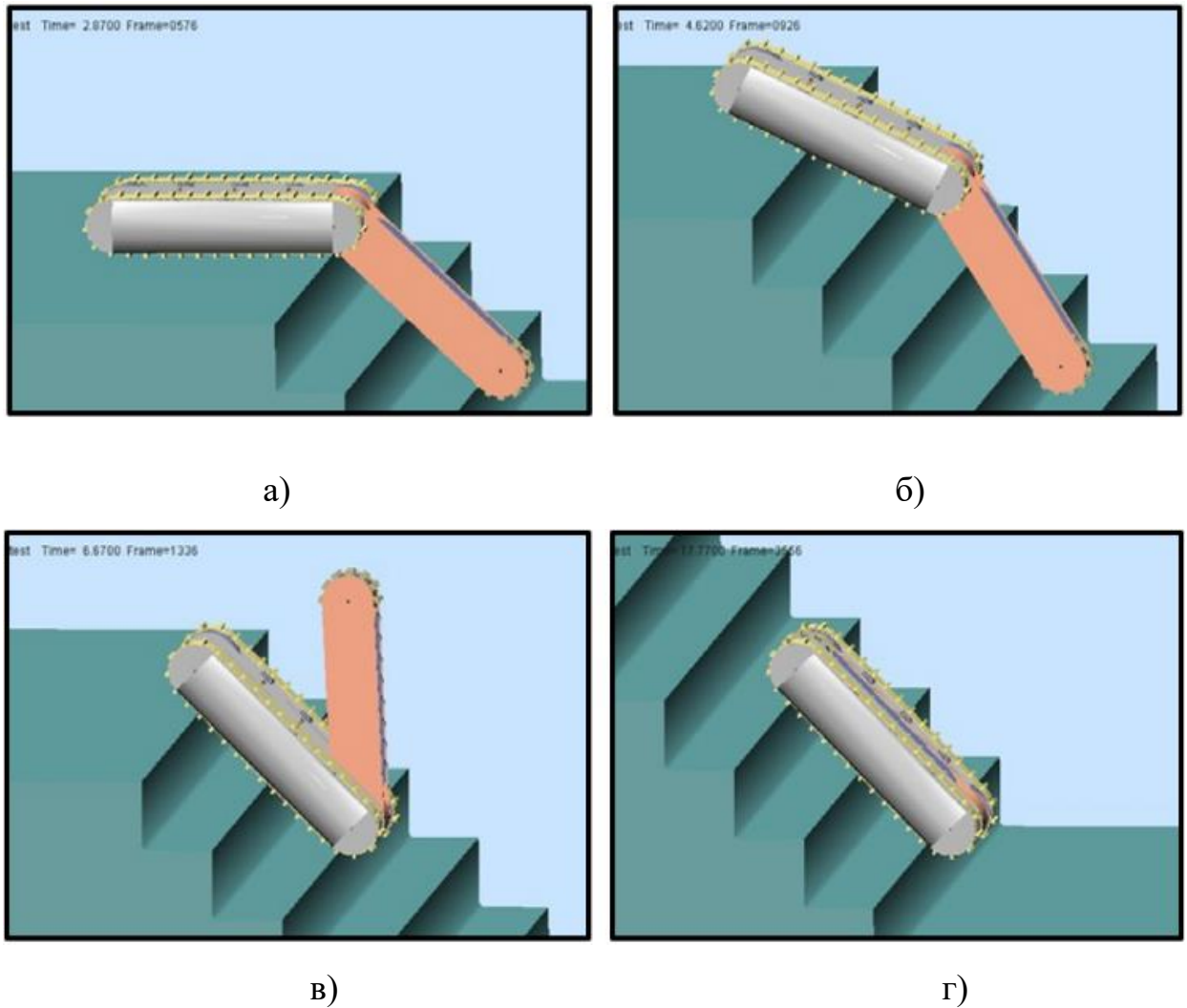


Рисунок 4.6 – Спуск по сходах

На рис. 4.7 показані серії рухів з метою подолання перешкоди з кроком 0,5 м з доріжками базової ланки. Етапи такі: спочатку на кроці (рис. 4.7, а) розгортаються доріжки базових ланок (рис. 4.7, б); ланка 2 продовжує обертатися до тих пір, поки гусениці базової ланки не адаптуються до профілю місцевості (рис. 4.7, в); платформа просувається вперед для завершення процесу підйому (рис. 4.7, г) і ланка 2 закривається.

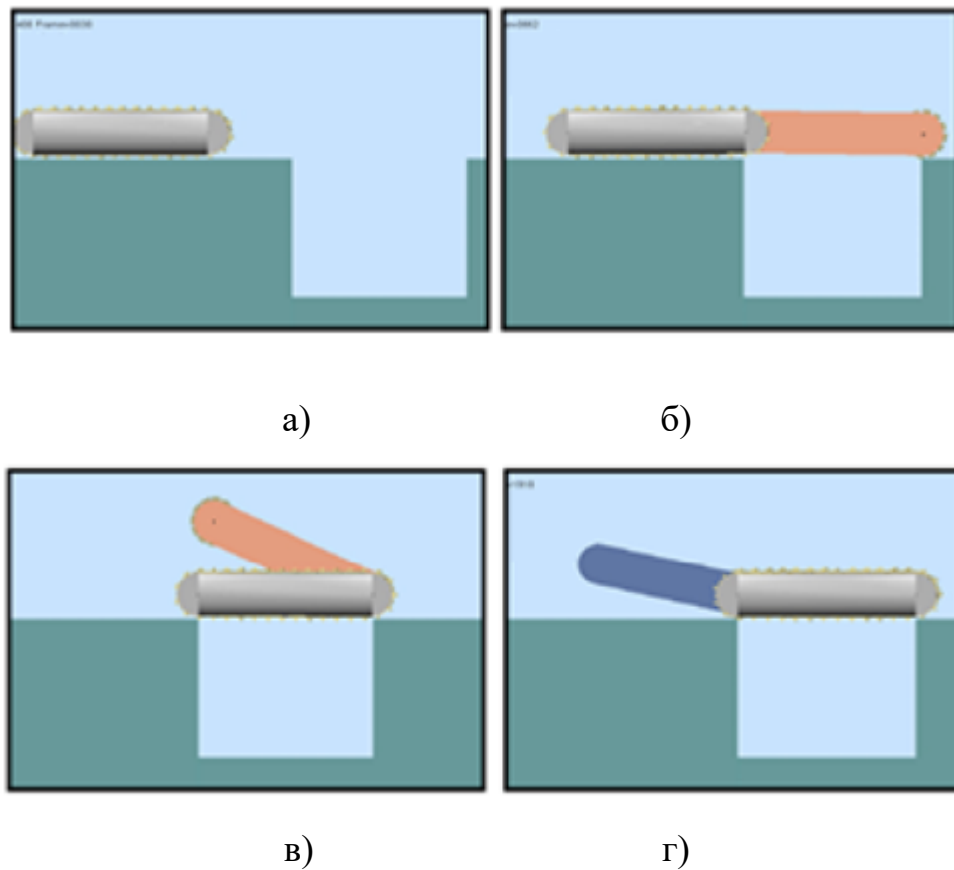


Рисунок 4.7 – Перехід через канаву

4.4 Аналіз натягу колії та механізму підвіски

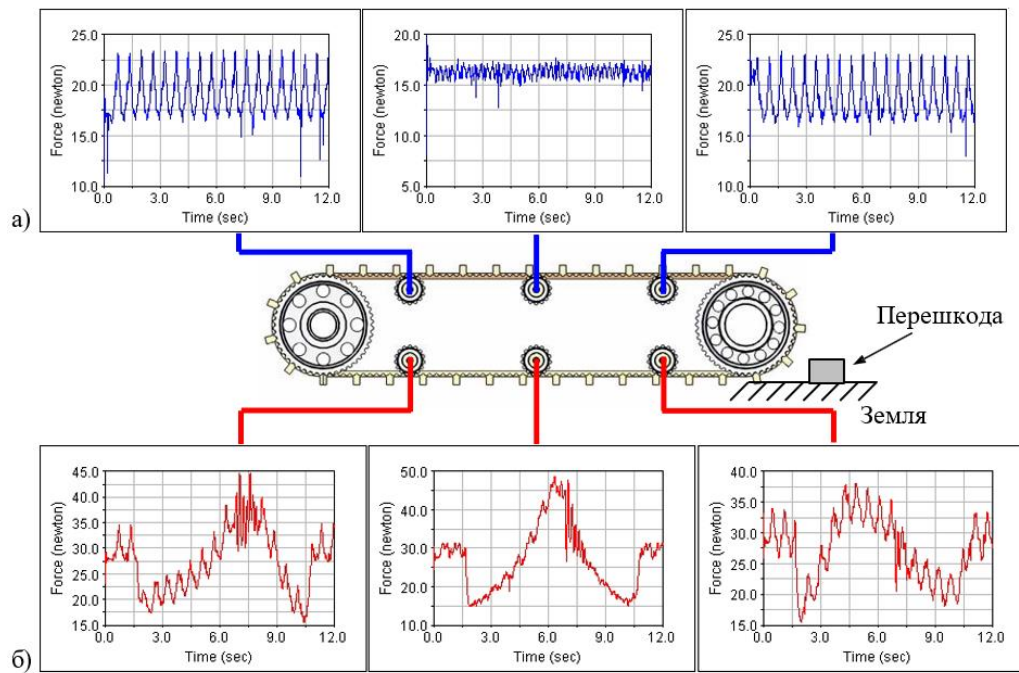
Ці аналізи допомогли знайти оптимальне значення жорсткості пружини для механізму подвійної натяжності-підвіски. Це було виконано шляхом візуалізації стиснення/розширення пружини (з різними значеннями жорсткості), щоб переконатися, що вона відповідає допустимим переміщенням для натягу колії та підвіски.

Графіки на рис. 4.8 представляють силу в кожній пружині у верхньому і нижньому масиві пружин з кожного боку платформи (через симетрію кожен графік представляє силу правої і лівої пружини в кожній базовій ланці). У той час як нижня опора пружинить U кожній колії вони стикаються з землею, вони виступають в якості підвісної системи для платформи. У той же час верхні опорні пружини діють з зусиллями вгору, щоб підтримувати заданий натяг в системі гусениць. Щоб ілюструвати це, на рисунку 4.8 представлені результати

моделювання, коли робот долає невелику перешкоду (3 см х 4 см), щоб спостерігати, як пружини реагують на перешкоди, розташовані між планетарними шківками.

З розподілу зусиль верхнього масиву пружин (рис. 4.8, а) бачимо, що середня сила в кожній пружині постійна, як і очікувалося, оскільки вони підтримують лише ту частину доріжки, яка не торкається землі. При цьому пружини діють на утримання напруги в гусениці. Крім того, сили в пружинах, що підтримують середній планетарний шків, як правило, менші, ніж ті, що розташовані поза центром, що узгоджується з характеристиками форми колії через її вигин. А саме, пружини в центрі стискаються менше, ніж ті, що знаходяться поза центром, і тому генерують менше зусилля. Зусилля знаходяться в діапазоні від 0 до 40 Н, оскільки монтажне стиснення кожної пружини становило 8 мм, а оптимальна постійна пружини була визнана 5,19 Н/мм.

Від розподілу зусиль нижньої пружини (рис. 4.8, б) сила в кожній пружині коливається як і очікувалося, оскільки вона підтримує ту частину доріжки, яка торкається землі і, отже, знаходиться в безпосередньому контакті з перешкодою. Сили у всіх нижніх пружинах, як правило, мають однакову величину, оскільки жодна з цих пружин не може вільно розширюватися тільки в залежності від податливості гусениць. При цьому зусилля перевищують 40 Н, так як пружини стискаються більше величини стиснення установки через нерівності форми ґрунту, які надають додаткові зовнішні зусилля на гусениці.



а) натяг гусениць; б) натяг підвіски

Рисунок 4.8 – Розподіл зусиль пружинного масиву

4.5 Аналіз вимог до крутного моменту двигунів

Наведемо результати додаткового динамічного моделювання, виконаного з метою оцінки та прогнозування крутного моменту, необхідного в з'єднаннях T_1 , T_2 і T_3 (рис. 4.9) для приведення в рух гусениць (базова ланка 1), ланка 2 і ланка 3 відповідно.

Після визначення максимального крутного моменту для кожного з'єднання можна вибрати відповідні передавальні числа та двигуни. Моделювання враховує вагу, інерційні властивості та прискорення ланок, а також сили контакту та тертя між ланками та гусеницями та землею. Потребу в крутному моменті кожного з'єднання можна передбачити для різних сценаріїв рухливості, щоб правильно вибрати двигун. Практично, найсуворіші умови експлуатації для кожного мотора будуть диктувати критерії вибору мотора. Проводиться аналіз кожного двигуна в системі.

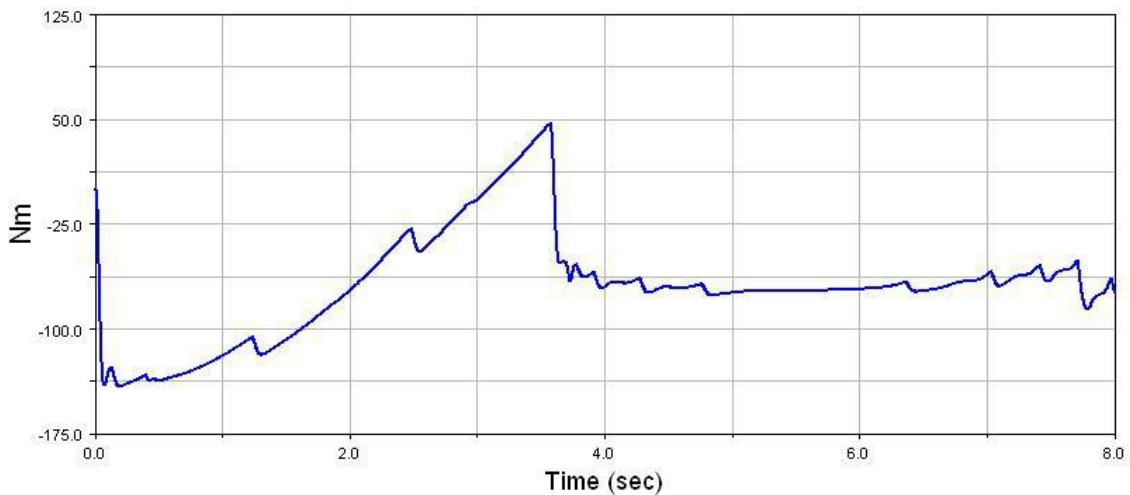
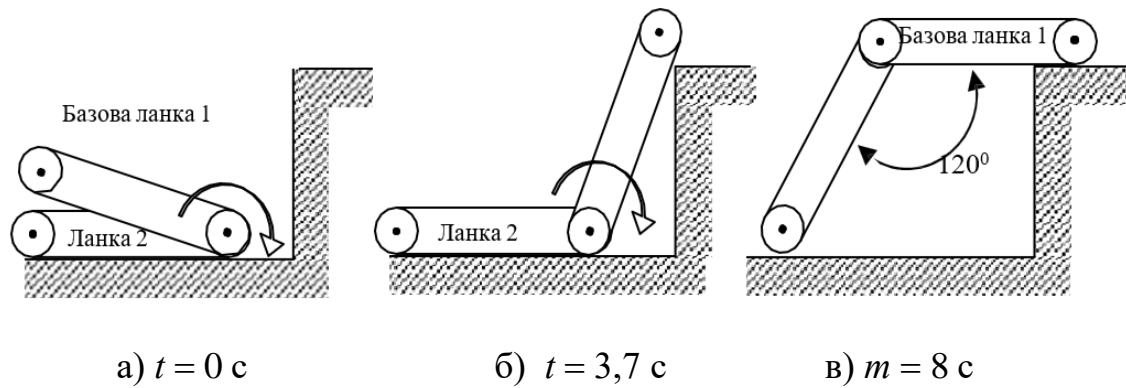


Рисунок 4.9 – Вимога до крутного моменту двигуна ланки 2 – підйом на ступінчасту перешкоду з гусеницями (через шарнір 1).

Щоб продемонструвати цю здатність, показані графіки крутного моменту для декількох сценаріїв рухливості, що вимагають найбільшої потужності крутного моменту. На підставі цих діаграм крутного моменту можна визначити максимальний піковий крутний момент і його виникнення в заданому діапазоні руху. Ці пікові значення крутного моменту визначають максимальну потужність крутного моменту, необхідну для кожного з'єднання.

На рис. 4.9 показана серія рухів, які повинні пройти різні ланки разом з доріжками, щоб піднятися на сходинку висотою 0,5 м з доріжками базової ланки і крутним моментом, необхідним на кожному кроці руху. Кутова швидкість ланки 2 (30 град/с) може бути використана для визначення крутного моменту на кожному кроці руху по відношенню до кута, пройденого ланкою. Величина крутного моменту змінює свій напрямок, коли доріжки базової ланки і

ланки 2 перпендикулярні (при $t = 3$ с доріжки базової ланки проїхали 90° відносно ланки 2), так як в цій точці базової ланки знаходиться вертикально над з'єднувальною ланкою 2 і доріжками базової ланки (з'єднання 1). Після цієї точки, коли гусениці базової ланки торкаються сходинок, для виконання завдання підйому потрібне більше значення крутного моменту. Згідно з графіком крутного моменту (рис. 4.10), пікове значення крутного моменту для цього випадку припадає на початок руху ($T_2 = 141,2 \text{ N} \cdot \text{m}$ при $t = 0$).

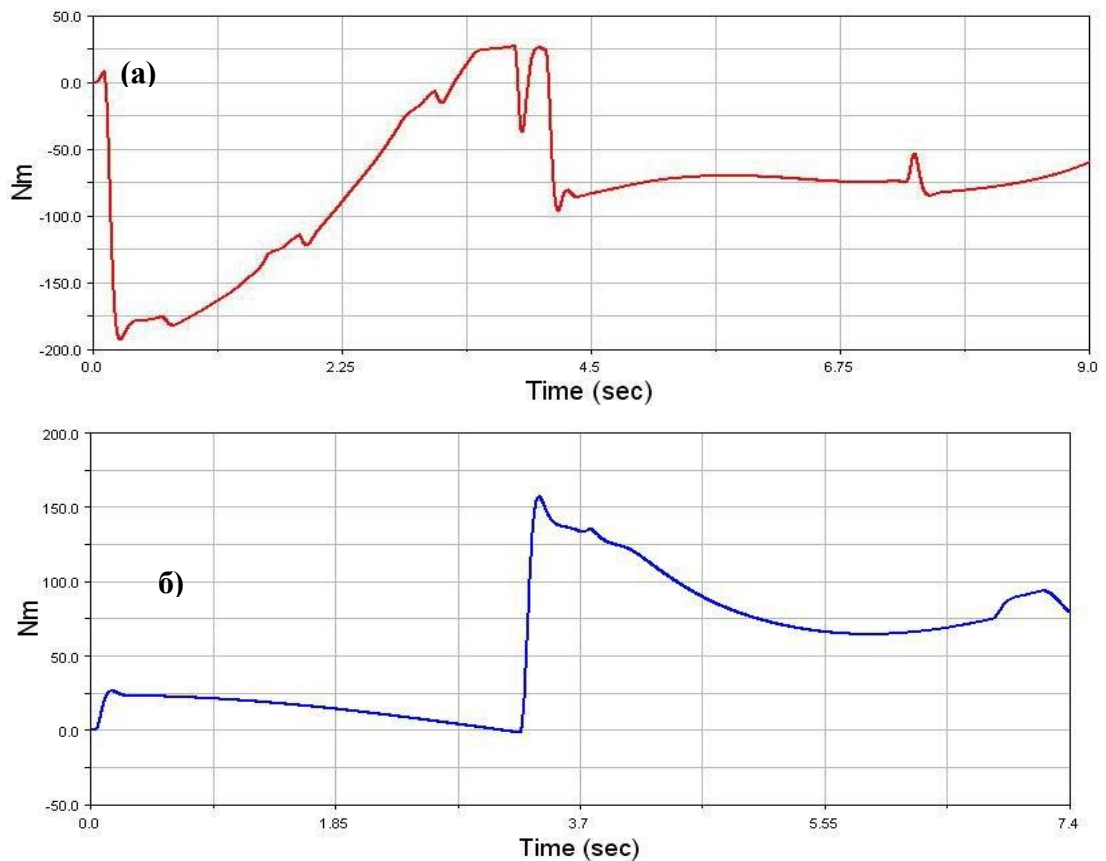
На рис. 4.10 показана серія рухів, які повинні пройти різні ланки разом з доріжками, щоб піднятися на сходинок висотою 0,5 м з ланкою 2. Коли ланка 2 торкається кроку (3,7 с), пікове значення крутного моменту становить $T_2 = 141,2 \text{ N} \cdot \text{m}$ необхідний для того, щоб почати підйом гусениць базової ланки над Землею. Миттєвий стрибок вимоги до крутного моменту на 3,7 с вказує на точку дотику з кроком.

Оскільки підйом по ступінчастих перешкодах, описаний на рис. 4.8 і 4.9, може бути досягнутий і за допомогою ланки 3, аналогічні аналізи були проведені для отримання вимог до крутного моменту двигуна ланки 3 (з'єднання 2).

Максимальний крутний момент, необхідний для приводу ланки 3, виникає при виконанні підйому за допомогою гусениць базової ланки. Цей корпус дає пікове значення крутного моменту $T_3 = 189 \text{ N} \cdot \text{m}$.

Однак впливають з цього випадку конфігурації для підйому на сходинок можуть бути виконані з ланкою 2 (як показано на рис 4.8), в цьому випадку потреба в крутному моменті менше ($T_2 = 141,2 \text{ N} \cdot \text{m}$). Тому, піднімаючи доріжки над землею для підйому по сходах або

Кроки будуть виконуватися з посиленням 2, а не з посиленням 3. Ланка 3 в основному використовується як опора (крім цілей маніпуляції) при підйомі або спуску по сходах. З міркувань симетрії при виборі двигунів ми визначимо $T_2 = T_3$.



а) подолання сходиноквої перешкоди за допомогою рейок (через ланку 2);

б) подолання сходиноквої перешкоди за допомогою ланки 3

Рисунок 4.11 – Вимога до крутного моменту двигуна ланки 3

При русі робота по рівній місцевості або схилу рушійний момент T_1 (рис. 4.12) для одиночної колії визначається виходячи з умови, що пробуксовки не відбувається. Тому для оцінки необхідної рушійної сили використовувалися статичні коефіцієнти тертя.

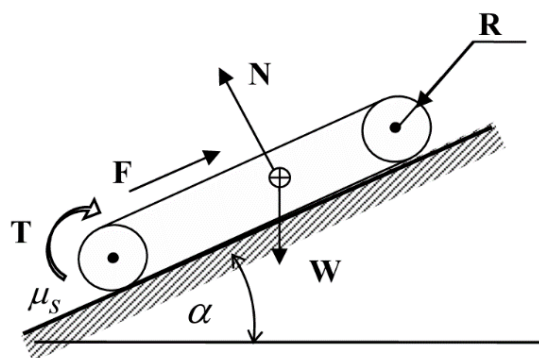


Рисунок 4.12 – Вимога до крутного моменту двигуна ведучого шківів – стан нахилу

Рівняння (4.1) використовується для того, щоб оцінити рушійну силу для окремої колії. Практично в системі водіння виникають вібрації та удари, а в значеннях F_D в реальному часі спостерігаються рандомі шуми.

$$F_D \geq \mu_S N + \frac{W}{2} \sin(\alpha) = \frac{W}{2} (\mu_S \cos \alpha + \sin \alpha) \quad (4.1)$$

Для забезпечення умов руху під нахилом вираз для оцінки крутного моменту можна записати так:

$$T_1 \geq \frac{WR}{2} \cdot (\mu_S \cos \alpha + \sin \alpha) \cdot \left(\frac{1}{\eta_{gear} \cdot k_{gear} \cdot \eta_{track}} \right) \quad (4.2)$$

де F_D – рушійна сила одиночної гусениці (сила тертя);

R – зовнішні радіуси колії;

W – загальна вага;

μ_S – коефіцієнт статичного тертя;

η_{gear} – ефективність передачі;

k_{gear} – передавальне число (швидкість обертання від вхідного до вихідного);

η_{track} – відстежуюча ефективність.

4.6 Аналіз ємності корисного навантаження кінцевого ефектора

Метою цього моделювання було визначити максимально допустиму вантажопідйомність платформи з кінцевим ефектором по відношенню до різних конфігурацій шляхом вивчення вертикального руху центру ваги (ЦВ, COG – Center of Gravity) по відношенню до землі, що вказує на стійкість до перекидання. Графіки, наведені на рис. 4.13, описують зміну положення ЦВ робота (у вертикальному напрямку) щодо лінійно зростаючого навантаження, прикладеного на кінцевий ефектор.

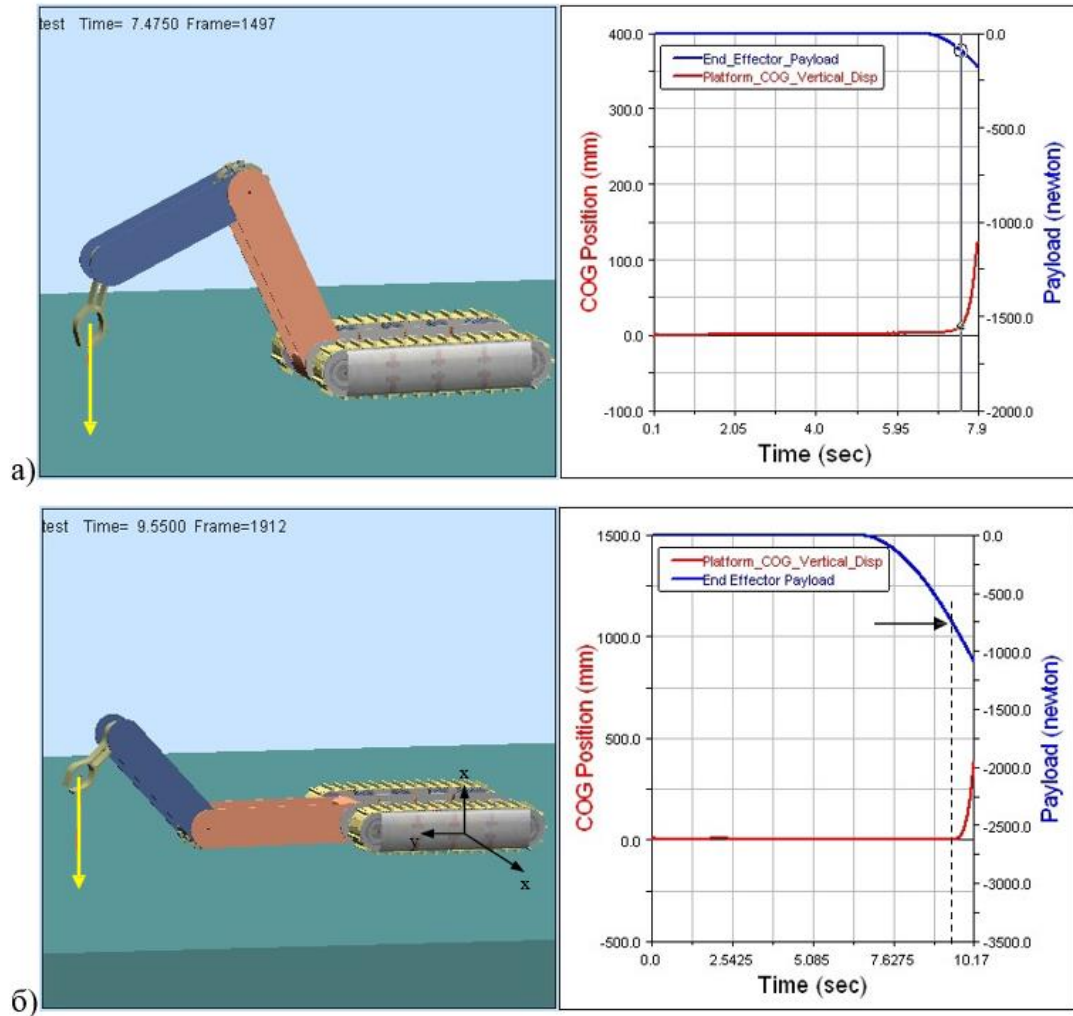


Рисунок 4.13 – ЦВ платформи в порівнянні з вантажопідйомністю

Зміна положення ЦВ має на увазі структурну стійкість робота при заданому навантаженні кінцевого ефектора. Очевидно, що конфігурація рис. 4.13, а як показано на рис. 4.13, є оптимальною для цієї мети.

Максимальну вантажопідйомність знаходять з графіка на рис. 4.13, б в момент, коли положення ЦВ більше нуля (пунктирна лінія). Це свідчить про те, що ЦВ робота починає переміщатися по вертикалі.

Згідно з графіком, статична вантажопідйомність з конфігурацією (рис. 4.13, б) становить приблизно 77 кг. З практичної точки зору, максимально допустима здатність крутного моменту з'єднань 1 і 2 обмежуватиме фактичну вантажопідйомність.

Деякі можливі конфігурації для маніпуляційних (або комбінованих

маніпуляцій і пересування) схематично представлені на рис. 4.14.

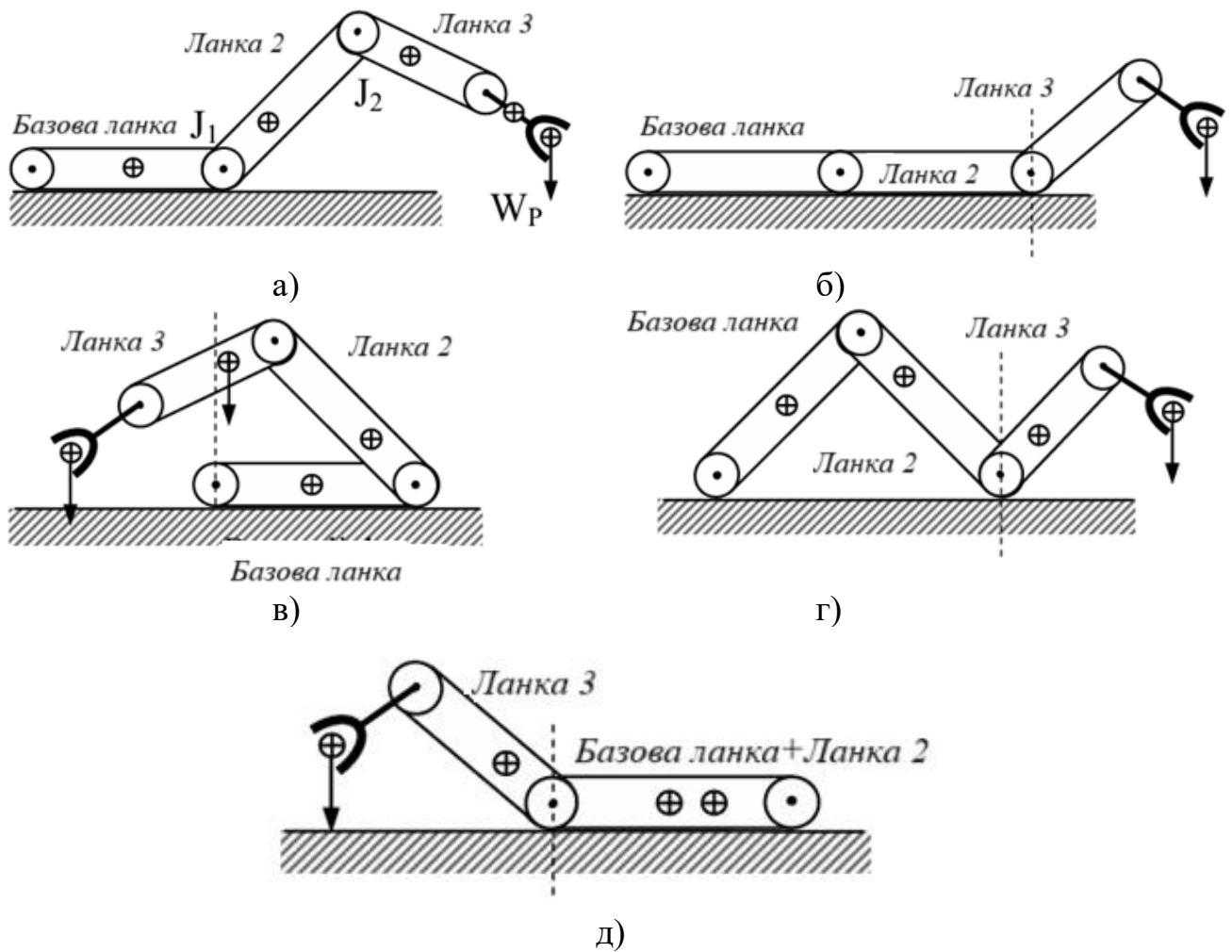


Рисунок 4.14 – Можливі конфігурації для маніпуляцій

Серед конфігурацій, показаних на рис. 4.14, деякі інші конфігурації можуть бути створені в діапазоні показаних конфігурацій, наприклад, вертикальний або горизонтальний захват. З конфігурацій рис. 4.14, а і рис. 4.14, в видно, що з'єднання ланки 2 (J_1) буде найслабшим у своїй здатності витримувати задане корисне навантаження в порівнянні з з'єднанням ланки 3 (J_2).

У деяких випадках обмежуючим фактором при аналізі вантажопідйомності кінцевого ефектора буде здатність робота підтримувати структурну стабільність (нахил через корисне навантаження на кінці-ефекторі) для даного корисного навантаження кінцевого ефектора, а не перевіряти, чи

відповідають спільні крутні моменти T_2 і T_3 вимогам до крутного моменту для підтримки заданого корисного навантаження на кінцевому ефекторі для заданої конфігурації з метою маніпуляцій.

Для заданої вантажопідйомності крутного моменту в з'єднанні 1 конфігурація рис. 4.14, в є оптимальною для максимальної вантажопідйомності W_p завдяки її значно більшій структурній стійкості. Ця вантажопідйомність може бути збільшена при збільшенні потужності крутного моменту з'єднання 1.

Для більших вимог до корисного навантаження, залежно від необхідного рівня мобільності, може бути використана будь-яка з конфігурацій рис. 4.14, б, рис. 4.14, г і рис. 4.14, д.

У кожній з цих конфігурацій (наприклад, з крутним моментом $157 \text{ Н} \cdot \text{м}$ у з'єднаннях 1 і 2) робот може маніпулювати корисним навантаженням $\sim 20 \text{ кг}$. Для цього розміру робота така вантажопідйомність і конфігурація не можуть бути досягнуті за допомогою жодного з існуючих мобільних роботів. Цей результат є прямим наслідком нової парадигми дизайну, а саме, гібридної природи платформи та маніпулятора та їхньої здатності бути взаємозамінними у своїх ролях.

4.7 Забезпечення умов охорони праці при моделюванні робототехнічного засобу

Охорона праці – це система законодавчих, організаційно-технічних, соціально-економічних, санітарно-гігієнічних і лікувально-профілактичних мір і засобів, спрямованих на збереження життя, здоров'я й працездатності людини в процесі праці. Завдання охорони праці полягає в тому, щоб звести до мінімуму ймовірність поразки працюючого під дією небезпечного виробничого фактора або захворювання під дією шкідливого виробничого фактора з одночасним забезпеченням комфортних умов при максимальній продуктивності праці. Закон України "Про охорону праці" визначає основні положення по реалізації конституційного права громадян на охорону їх життя і здоров'я в процесі

трудової діяльності; регулює взаємини між адміністрацією і працівником в незалежності від форм власності; встановлює єдиний порядок організації охорони праці в Україні [29].

Завданням законодавства про охорону навколишнього природного середовища є регулювання відносин у галузі охорони, використання і відтворення природних ресурсів, забезпечення екологічної безпеки, запобігання і ліквідації негативного впливу господарської та іншої діяльності на навколишнє природне середовище, збереження природних ресурсів, генетичного фонду живої природи, ландшафтів та інших природних комплексів, унікальних територій та природних об'єктів, пов'язаних з історико-культурною спадщиною [29]. Згідно закону України «Про підприємства в Україні» усі роботодавці повинні турбуватись про дотримання у своїй діяльності вимог законів України стосовно охорони праці та навколишнього природного середовища.

4.7.1 Освітлення

Особливістю роботи за дисплеєм ЕОМ є постійна й значна напруга функцій зорового аналізатора, обумовленою необхідністю розходження самосвітних об'єктів (символів, знаків і т.п.) при наявності відблисків на екрані, рядковій структурі екрана, мерехтіння зображення, недостатньою чіткістю об'єктів розходження.

Для забезпечення нормального освітлення застосовуються природне бокове одностороннє й штучне освітлення, які нормуються [29].

По характеру зорової роботи, робота відноситься до високої точності, розряд зорової роботи III, підрозряд г. Раціональне освітлення приміщення сприяє кращому виконанню виробничого завдання і забезпеченню комфорту при роботі. Для забезпечення нормального освітлення застосовуються природне, одnobічне, бічне і штучне освітлення, а також сполучене, які нормуються санітарними нормами й правилами ДБН В.2.5-28-2006 [29]. Дані по нормах освітлення наведені в табл. 4.1.

Таблиця 4.1 – Норми природнього й штучного освітлення

Мінімальний розмір об'єкта розрізнювання, мм	Фон	Контраст	Розряд, під розряд зорової праці	Нормоване значення		
				Природнє освітлення КПО, %	Штучне освітлення	
					Е _{мін} , лк	Тип ламп
Від 0,3 до 0,5	Світлий	Середній	3 г	1,5	300	Газорозрядні

Приміщення з постійним перебуванням людей повинно мати, як правило, природнє освітлення. При виконанні роботи використовувалося природнє одностороннє бокове й штучне освітлення. Нормативне значення КПО повинно бути не менш 1,5% при роботі з ПЕОМ, тому потрібно застосовувати штучне освітлення згідно [29].

4.7.2 Електробезпека

Для живлення устаткування (ПЕОМ, освітлювальні прилади) які є однофазними споживачами використовується трифазна мережа 380/220В частотою 50 Гц з глухо заземленої нейтралі. Із цієї причини при роботі з електроприладами існує потенційна небезпека ураження людини електричним струмом, тому в правилах устрою електроустановок згідно [29] передбачені наступні заходи електробезпеки: конструктивні, схемно-конструктивні й експлуатаційні. Конструктивні - вимоги що забезпечують захист від доторкання персоналу до струмоведучих частин. ПЕОМ мають ступінь захисту IP-44. Прилади освітлення IP-23.

Схемно-конструктивним заходом захисту є занулення електрообладнання у приміщенні. Для користувача ПЕОМ важливим є дотримання правил безпеки експлуатації електрообладнання. Так, заборонено доторкатися до дротів та з'єднань при наявності напруги в мережі, а також самостійно проводити ремонт електрообладнання. Усі питання щодо ремонту налагодження та інше, можуть виконувати тільки електрики та відповідні фахівці, які мають допуск до роботи із електрообладнанням певної категорії.

ВИСНОВКИ

Під час роботи над кваліфікаційною роботою був проведений аналіз матеріальної бази, такої як існуючі роботи та основні публікації.

За результатами аналізу можна зробити висновок, що використання гібридних мобільних роботів стрімко зростає в багатьох сферах, зокрема у дослідженні планетарних поверхонь, поліцейських операціях (наприклад, знешкодження вибухонебезпечних предметів), військових місіях (розвідка, спостереження, нейтралізація саморобних вибухових пристроїв), обстеженні небезпечних об'єктів тощо.

Нові конструктивні особливості дозволять:

- значно підвищити загальну функціональність мобільного робота та його роботу на пересіченій місцевості;
- можливість розгортання/розміщення руки маніпулятора з будь-якого боку платформи;
- інтеграція пасивних коліс у суглоби роботів для підтримки ланок робота при використанні для пересування/зчеплення;
- зв'язок з поворотними з'єднаннями, які здатні забезпечити безперервне обертання на 360° ;
- додавання радіочастотних антен, які не виступають з платформи.

Також під час роботи над кваліфікаційною роботою було створено 3D-модель та проведене динамічне моделювання цієї моделі з метою вивчення її функціональності та демонстрації її можливостей для цілей оптимізації дизайну за допомогою програмного забезпечення CAD та Fusion 360.

ПЕРЕЛІК ДЖЕРЕЛ ПОСИЛАННЯ

1. Невлюдов І. Ш., Андрусевич А. О., Євсєєв В. В., Новоселов С. П., Демська Н. П. Проектування мобільних маніпуляційних роботів: Монографія. Х. :, 2022. 420 с.
2. Методичні вказівки з підготовки кваліфікаційної роботи бакалавра для здобувачів першого (бакалаврського) рівня вищої освіти спеціальності 151 Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології освітньої програми «Системна інженерія» / Упоряд.: І. Ш. Невлюдов, О. М. Цимбал, О. В. Токарєва, А. І. Бронніков. Харків: ХНУРЕ, 2022. 66 с.
3. ДСТУ 3008-15. Документація. Звіти у сфері науки та техніки. структура та правила оформлення. К: Держстандарт України, 2017. 29 с.
4. 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).
5. Ghadi, Y. (2019). A novel hybrid locomotion mechanism for small mobile robot. *ICIC Express Letters, Part B: Applications*, 10(11), 1031-1036.
6. Jung, Y. H., Cho, D. H., Hong, J. W., Han, S. H., Cho, S. B., Shin, D. Y., ... & Kim, S. S. (2022). Development of multi-sensor module mounted mobile robot for disaster field investigation. *The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, 43, 1103-1108.
7. Yoshida, E., Murata, S., Kamimura, A., Tomita, K., Kurokawa, H., & Kokaji, S. (2002). A self-reconfigurable modular robot: Reconfiguration planning and experiments. *The International Journal of Robotics Research*, 21(10-11), 903-915.
8. Putra, B. T. P., & Prabowo, W. (2018). Rancang Bangun Robot Tempur Berbasis Arduino Atmega 2560 Pada Bagian Penggerak Elevasi Dan Azimut. *SinarFe7*, 1(1), 141-145.
9. Canaza Scari, L. F., Adrian Ali, R., Valdeiglesias Flores, E., Medina Chilo, N. O., Sulla Espinoza, E., Silva Vidal, Y., & Pari, L. (2024, July). JVC-02 Teleoperated

Robot: Design, Implementation, and Validation for Assistance in Real Explosive Ordnance Disposal Missions. In *Actuators* (Vol. 13, No. 7, p. 254). MDPI.

10. Chen, Z., & Zhao, C. (2024, May). FPGA-Based Adaptive Modeling Method for Modular Robots. In *China Intelligent Networked Things Conference* (pp. 249-261). Singapore: Springer Nature Singapore.

11. Nevliudov, I., Yanushkevych, D., & Ivanov, L. (2021). Analysis of the state of creation of robotic complexes for humanitarian demining. *Technology audit and production reserves*, 6(2 (62)), 47-52.

12. Конспект лекцій з дисципліни «Комп'ютерні системи інженерної графіки та 3D-моделювання» для здобувачів усіх форм навчання першого (бакалаврського) рівня вищої освіти спеціальності 174 Автоматизація, комп'ютерно-інтегровані технології та робототехніка освітніх програм: «Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології», «Системна інженерія» / [Електронний ресурс] Упоряд.: Н.П. Демська. Електронне видання. Харків: ХНУРЕ, 2024. 240 с. pdf 16,7 Mb.

13. Pinhas Ben-Tzvi, Andrew A. Goldenberg, Jean W. Zu. (2008). Design and Analysis of a Hybrid Mobile Robot Mechanism With Compounded Locomotion and Manipulation Capability. *Journal of Mechanical Design*.

14. 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.

15. Feng, Z., Hu, G., Sun, Y., & Soon, J. (2020). An overview of collaborative robotic manipulation in multi-robot systems. *Annual Reviews in Control*, 49, 113-127.

16. Sun, F., Chen, Y., Wu, Y., Li, L., & Ren, X. (2022). Motion planning and cooperative manipulation for mobile robots with dual arms. *IEEE Transactions on Emerging Topics in Computational Intelligence*, 6(6), 1345-1356.

17. Billard, A., & Kragic, D. (2019). Trends and challenges in robot manipulation. *Science*, 364(6446), eaat8414.

18. Alatis, M. B., & Hancke, G. P. (2020). A review on challenges of autonomous mobile robot and sensor fusion methods. *IEEE access*, 8, 39830-39846.

19. He, J., & Gao, F. (2020). Mechanism, actuation, perception, and control of highly dynamic multilegged robots: A review. *Chinese Journal of Mechanical Engineering*, 33, 1-30.
20. Kumar, S., Wöhrle, H., de Gea Fernández, J., Müller, A., & Kirchner, F. (2020). A survey on modularity and distributivity in series-parallel hybrid robots. *Mechatronics*, 68, 102367.
21. Rubio, F., Valero, F., & Llopis-Albert, C. (2019). A review of mobile robots: Concepts, methods, theoretical framework, and applications. *International Journal of Advanced Robotic Systems*, 16(2), 1729881419839596.
22. Kang, P., Han, L., Xu, W., Wang, P., & Yang, G. (2019, December). Mobile robot manipulation system with a reconfigurable robotic arm: Design and experiment. In *2019 IEEE International Conference on Robotics and Biomimetics (ROBIO)* (pp. 2378-2383). IEEE.
23. Bhatt, P. M., Malhan, R. K., Shembekar, A. V., Yoon, Y. J., & Gupta, S. K. (2020). Expanding capabilities of additive manufacturing through use of robotics technologies: A survey. *Additive manufacturing*, 31, 100933.
24. Antonyshyn, L., Silveira, J., Givigi, S., & Marshall, J. (2023). Multiple mobile robot task and motion planning: A survey. *ACM Computing Surveys*, 55(10), 1-35.
25. Chen, H., Zang, X., Zhu, Y., & Zhao, J. (2024). Hybrid Sampling-Based Path Planning for Mobile Manipulators Performing Pick and Place Tasks in Narrow Spaces. *Applied Sciences*, 14(22), 10313.
26. Loganathan, A., & Ahmad, N. S. (2023). A systematic review on recent advances in autonomous mobile robot navigation. *Engineering Science and Technology, an International Journal*, 40, 101343.
27. Grazioso, A., Ugenti, A., Galati, R., Mantriota, G., & Reina, G. (2023). Modeling and validation of a novel tracked robot via multibody dynamics. *Robotica*, 41(10), 3211-3232.
28. Kanchwala, H., & Chatterjee, A. (2019). ADAMS model validation for an all-terrain vehicle using test track data. *Advances in Mechanical Engineering*, 11(7), 1687814019859784.

29. Босов Є. П., Жесан Р. В., Каліч В. М., Голик О. П., Зубенко В. О.
Охорона праці при проектуванні систем автоматизації виробництва : навч. посіб.
2-е вид., перероб. і доп. Кропивницький : ЦНТУ, 2022. 208 с.