

Міністерство освіти і науки України
Луцький національний технічний університет

Факультет транспорту та механічної інженерії

Кафедра прикладної механіки та мехатроніки

КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА
ЗА СТУПЕНЕМ ВИЩОЇ ОСВІТИ «БАКАЛАВР»
РОЗРОБКА МЕХАНІЗМУ ПЕРЕМІЩЕННЯ
РОБОТОТЕХНІЧНОЇ СИСТЕМИ

спеціальність 131 Прикладна механіка
(шифр і назва спеціальності)

освітня програма «Металообробне обладнання та роботизовані виробничі системи»
(назва освітньої програми)

Виконав: здобувач вищої освіти
групи ІМ(МОРВС)-42
Циммербаум Олександр Сергійович

(підпис)

Керівник: к.т.н., доцент
Валецький Богдан Петрович

(підпис)

Кваліфікаційну роботу
допущено до захисту
«__» _____ 2025 р.
к.т.н., доцент
Гарант освітньої програми:
Придальний Борис Іванович

(підпис)

Луцьк - 2025 року

ЛУЦЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ

Факультет транспорту та механічної інженерії

Кафедра прикладної механіки та мехатроніки

Перший (бакалаврський) рівень

Освітня програма: «Металообробне обладнання та роботизовані виробничі системи»

Спеціальність: 131 Прикладна механіка

ЗАТВЕРДЖУЮ

Завідувач кафедри ПМіМ

_____ Р. РЕДЬКО

«__» _____ 2025 року

ЗАВДАННЯ НА КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ ЗДОБУВАЧУ ВИЩОЇ ОСВІТИ

ЦИММЕРБАУМ Олександра Сергійовича

(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема *кваліфікаційної роботи бакалавра*: «Розробка механізму переміщення робототехнічної системи», керівник роботи Валецький Богдан Петрович доцент, к.т.н. затверджені наказом вищого навчального закладу від «31» грудня 2024 р. № 910/01-07.

2. Строк подання здобувачем вищої освіти кваліфікаційної роботи 01.06.2025 р

3. Вихідні дані до роботи: звіт з переддипломної практики, технічна документація по спеціальних верстатах, креслення вузлів верстатів-аналогів, конструкторська документація, нормативні дані.

4. Зміст розрахунково-пояснювальної записки (перелік питань, які потрібно розробити) Вступ. 1. Огляд конструкцій та типові механізми крокування, 2. Розробка принципової схеми рушія. 3. Розрахунок механізму крокування. 4. Охорона праці. Загальні висновки. Список посилань. Додатки

5. Перелік графічного матеріалу (з точним зазначенням обов'язкових креслень)

Складальне креслення механізму крокування – 3 л, Кінематична схема механізму крокування – 1 л., Креслення шатуна – 1л

АНОТАЦІЯ

ЦИММЕРБАУМ О.С. Розробка механізму переміщення робототехнічної системи. Рукопис.

Кваліфікаційна робота бакалавра ОП «Металообробне обладнання та роботизовані виробничі системи» спеціальності 131 Прикладна механіка. Луцький національний технічний університет. Луцьк, 2025.

У цій роботі розглянуто процес аналізу та проектування конструкції рухового механізму робота, призначеного для переміщення пересіченою поверхнею. Під час дослідження були вирішені ключові задачі: аналіз типів рушіїв, опис принципу руху шляхом крокування, створення математичної моделі цього процесу, геометричний і силовий аналіз механізму з подальшим вибором приводу, а також розробка конструкції рухового механізму.

У дослідженні проведено аналіз реальних механізмів і машин, що використовуються в робототехніці. Запропоновано принципову схему колісно-крокового рушія, а також кінематичну схему рухомих елементів із підвіскою. Було спроектовано модульний рушій, оптимізовано послідовність його руху з детальним описом критичних випадків. Окремо були розглянуті найважливіші аспекти крокування нерівною та непідготовленою поверхнею.

Результатом роботи стала конструкція рушія, яку можна використовувати у роботизованих платформах різної конфігурації.

РУШІЙ, МЕХАНІЗМ КРОКУВАННЯ, ПЕРЕШКОДИ, МЕХАТРОНІКА.

					<i>041Б-25.00.00.00.000.ПЗ</i>			
<i>Зм</i>	<i>Арк</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Підпис</i>	<i>Дата</i>	<i>Розробка механізму переміщення робототехнічної системи Пояснювальна записка</i>	<i>Літ.</i>	<i>Аркуш</i>	<i>Аркушів</i>
<i>Розробив</i>	<i>Циммербаум О.С.</i>					<i>д</i>	<i>3</i>	<i>66</i>
<i>Перевірив</i>	<i>Валецький Б.П.</i>							
<i>Н.контр.</i>	<i>Валецький Б.</i>							
<i>Затв.</i>	<i>Редько Р.Г.</i>							
						<i>ЛНТУ, ФТІМІ, КАФ. ПМІМ, ГР. ІМ(МОРВС)-42</i>		

ABSTRACT

TSYMMERBAUM O.S. Development of a mechanism for moving a robotic system. Manuscript.

Bachelor's qualification work OP «Metalworking equipment and robotic production systems» specialty 131 Applied mechanics. Lutsk National Technical University. Lutsk, 2025.

This work considers the process of analyzing and designing the design of a robot's propulsion mechanism designed for moving along a rough surface. During the study, the following key tasks were solved: analysis of types of engines, description of the principle of movement by stepping, creation of a mathematical model of this process, geometric and force analysis of the mechanism with subsequent selection of the drive, as well as development of the design of the propulsion mechanism.

The study analyzed real mechanisms and machines used in robotics. A schematic diagram of a wheel-stepping engine, as well as a kinematic diagram of moving elements with a suspension, are proposed. A modular drive was designed, the sequence of its movement was optimized with a detailed description of critical cases. The most important aspects of walking on uneven and unprepared surfaces were separately considered.

The result of the work was a drive design that can be used in robotic platforms of various configurations.

MOTION, GEAR MECHANISM, OBSTACLES, MECHATRONICS.

ЗМІСТ

АНОТАЦІЯ	4
ЗМІСТ	6
ВСТУП	7
РОЗДІЛ 1 ОГЛЯД КОНСТРУКЦІЙ ТА ТИПОВІ МЕХАНІЗМИ КРОКУВАННЯ.....	8
1.1 Послідовність переміщення мобільної платформи	9
1.2 Модель поверхні та основні перешкоди.....	12
1.3 Огляд та вибір механізму крокування	15
1.4 Підвіска мобільної платформи	18
РОЗДІЛ 2 РОЗРОБКА ПРИНЦИПОВОЇ СХЕМИ РУШІЯ.....	22
2.1 Модернізація способу пересування транспортного засобу колісно- кроковим рушієм (ККР).....	23
2.2 Розробка та опис кінематичної схеми колісно-крокуючого рушія....	32
2.3 Опис конструкції механізму крокування	36
2.4 Організація керування рушієм.....	40
РОЗДІЛ 3 РОЗРАХУНОК МЕХАНІЗМУ КРОКУВАННЯ.....	43
3.1 Випадки для розрахунку.....	43
3.2 Геометричний розрахунок та оптимізація траєкторії крокування....	49
РОЗДІЛ 4 ОХОРОНА ПРАЦІ	59
4.1 Аналіз виробництва, безпеки праці та навколишнього середовища	59
4.2 План локалізації та ліквідації аварійних ситуацій в цеху.....	60
4.3 Засоби захисту від ураження електричним струмом	62
ВИСНОВКИ ТА РЕКОМЕНДАЦІЇ	63
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ	64

									Арк.
									6
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата	04.1.Б-25.00.00.00.000.ПЗ				

ВСТУП

Промислові маніпулятори відіграють ключову роль у виробничій автоматизації, забезпечуючи точне та ефективне переміщення об'єктів у просторі. Вони широко застосовуються в різних галузях, де важливими є швидкість, надійність і безпека виконуваних операцій. Ці механізми інтегруються у виробничі лінії, робочі клітки та монтажні станції, сприяючи підвищенню продуктивності. Зокрема, вони використовуються в автомобільній, електронній, харчовій, фармацевтичній, машинобудівній та інших галузях промисловості.

Різноманіття науково-технічного обладнання та рухових механізмів роботів відкриває широкі можливості для дослідження пересічених поверхонь. У цьому випадку основний акцент зроблено на виборі типу рухової системи, що забезпечує ефективне переміщення у рівнинних зонах пересіченої місцевості. Таке рішення пов'язане зі складністю доступу до гористих районів, де рельєф ускладнює переміщення через масивні гірські утворення.

Платформа робота призначена для дослідження поверхні. Лабораторії для вивчення зразків можуть бути розташовані як окремо, так і в межах самої платформи.

Конструктивно вона складається з каркасу або контейнера, до якого приєднуються всі необхідні підсистеми. Система управління має ієрархічну структуру з двома рівнями: автономне керування та команди, що надходять із Землі через телеметрію. Автономний режим забезпечує швидку реакцію, але всі дії виконуються за заздалегідь визначеними алгоритмами, що робить його менш гнучким у порівнянні з безпроводним керуванням. У критичних ситуаціях пріоритетні команди надсилаються безпосередньо, а рівні управління узгоджуються для визначення оптимального алгоритму дій.

Переміщення платформи здійснюється спеціальними руховими механізмами, що включають приводи, системи оцінки положення та підвіску. Аналіз оточення виконується за допомогою сенсорних систем та телеметрії.

					041.Б-25.00.00.00.000.ПЗ	Арк.
						7
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

РОЗДІЛ 1

ОГЛЯД КОНСТРУКЦІЙ ТА ТИПОВІ МЕХАНІЗМИ КРОКУВАННЯ

Різноманітність науково-технічного обладнання роботів і їх рухових механізмів відкриває широкі можливості для дослідження поверхонь. Однак у цьому випадку основний акцент зроблено на виборі типу рухового механізму для вивчення рівнинних зон пересіченої місцевості. Таке рішення зумовлене тим, що гористі (материкові) райони є значно менш доступними для дослідження через складний рельєф та наявність масивних гірських утворень.

Далі буде розглянуто функціональну схему платформи робота, що зображена на рисунку 1, яка демонструє основні принципи вибраної конструкції та її здатність до переміщення у пересіченому середовищі.

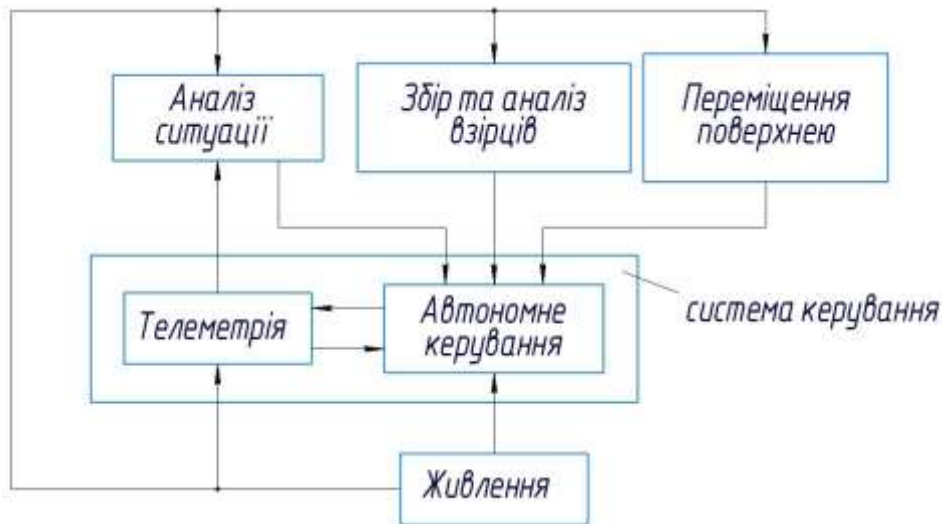


Рисунок 1.1 – Функціональна схема платформи робота

Основне призначення платформи робота – дослідження поверхні, що здійснюється за допомогою маніпуляційних систем, пенетраторів та аналізаторів складу ґрунту. Лабораторії для вивчення зразків можуть розташовуватися як окремо, так і всередині самої платформи.

Конструктивно платформа робота складається з каркасу або контейнера, до якого приєднуються всі інші підсистеми. Її система управління має ієрархічну структуру та включає два рівні: автономне управління та команди із Землі, що передаються через телеметрію. Автономний режим забезпечує високу

					04.1.Б-25.00.00.00.000.ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		8

швидкість реакції, проте всі дії визначені програмно й, незалежно від якості алгоритмів, вони поступаються безпроводному керуванню. Тому в критичних ситуаціях пріоритетні команди надсилаються безпосередньо, а рівні управління узгоджуються між собою для визначення оптимального алгоритму дій.

Переміщення платформи робота поверхнею здійснюється спеціальними руховими механізмами, що включають приводи руху, системи оцінки положення та підвіску. Аналіз оточення проводиться за допомогою сенсорних систем та телеметрії.

Енергозабезпечення всіх підсистем здійснюється вбудованими джерелами живлення. Функцію основного генератора виконує радіоізотопний термоелектричний генератор (РІТЕГ), який, окрім електроенергії, виділяє значну кількість тепла, що може бути використане для обігріву критично важливих компонентів апарата. Як додаткові накопичувачі енергії можуть застосовуватися сонячні панелі.

Детальний опис усіх підсистем виходить за межі дослідження, тому основний аналіз буде зосереджений на конструкції рухових механізмів, а інші підсистеми будуть представлені схематично.

Ключовим інженерним завданням при проектуванні платформ є розробка ефективних методів переміщення дослідницького обладнання поверхнею невідомої ділянки. Оскільки платформи робота працюють на непідготовлених та мало досліджених поверхнях, їх рухові механізми мають відповідати високим вимогам до прохідності та стійкості. Це пояснюється тим, що на нинішньому етапі розвитку космічних технологій ремонт апаратів під час їхньої роботи є неможливим.

1.1 Послідовність переміщення мобільної платформи

У ходовій діяльності ссавців виявлено кілька послідовностей руху їхніх кінцівок, які визначають алор та локомоцію. Важливими параметрами цього

					041.Б-25.00.00.00.000.ПЗ	Арк.
						9
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

процесу є ритм локомоції, коефіцієнт ефективності крокування та порядок переміщення опорних точок, що дає змогу описати будь-яку схему руху.

На відміну від кінематики бігу ссавців, рух мобільної платформи по поверхні може здійснюватися не лише рівномірним поступальним переміщенням корпусу, а й фазовою ходою. У такому режимі приводи крокування активуються по черзі, що забезпечує надійність руху. При кожному новому кроці один привод заноситься вперед, у той час як решта залишаються опорами, що зменшує навантаження на привідну систему та мінімізує ризик перекидання.

На рис.1.2 спрощено відображено платформа із позиціями коліс, що дає загальне уявлення про розташування рушіїв та їхню взаємодію під час руху.

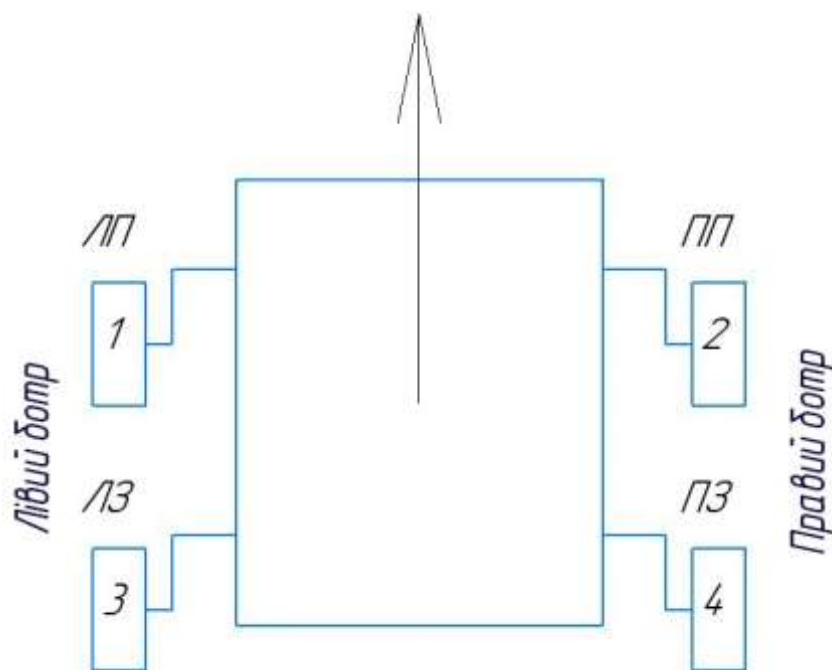


Рисунок 1.2 – Позиції коліс щодо корпусу мобільної платформи, напрямок руху вказано стрілкою

Для зручності позначення положення коліс на планетоході вводяться такі умовні позначення: Л (лівий борт), П (правий борт), П (переднє колесо), З (заднє колесо).

Таким чином, схема коліс має такі позначення:

					041.Б-25.00.00.00.000.ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		10

ЛП – ліве переднє колесо

ПП – праве переднє колесо

ЛЗ – ліве заднє колесо

ПЗ – праве заднє колесо

Особливий інтерес представляють діагональні та латеральні алюрні схеми, де переміщення опорних точок відбувається у певній послідовності. Це дозволяє більш ефективно адаптувати рух мобільної платформи до нерівностей рельєфу та забезпечити стабільність переміщення. На рис. 1.3 зображено характерні схеми цих алюрів, що демонструють логіку руху опорних точок у процесі крокування.

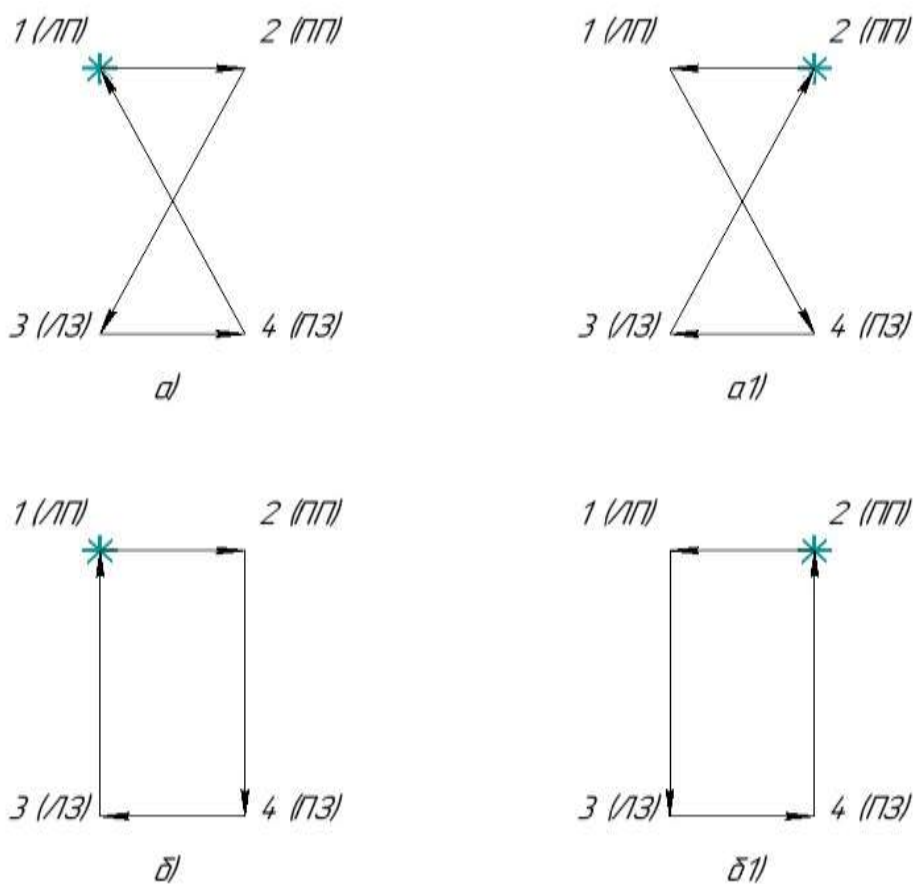


Рисунок 1.3 – Послідовності руху кінцівок:

а) асиметрична діагональна пряма (1-2-3-4); а1) асиметрична діагональна зворотна (2-1-4-3); б) асиметрична латеральна пряма (1-2-4-3); б1) асиметрична латеральна зворотна (2-1-3-4); * – початок траєкторії

Діагональний алюр передбачає послідовне крокування передніх коліс, а потім задніх, чергуючи їхній рух у встановленому порядку. При зміні черговості передніх і задніх коліс відбувається перемикання борту – з лівого на правий і навпаки. Такий підхід покращує прохідність при крокуванні, дозволяючи платформи ефективно адаптуватися до складного рельєфу.

Латеральний алюр, на відміну від діагонального, реалізує почергове переміщення коліс між передньою та задньою частинами, проте без зміни борту. Це знижує загальну прохідність, але збільшує швидкість пересування, що робить його оптимальним для рівних ділянок. Як приклад, у бігу коней галопом використовується саме латеральний алюр.

На рис.1.3 зображено чотири основні алюрні схеми, що демонструють описані вище механізми руху. Початок руху для зручності позначено зірочкою, щоб чітко визначити стартову позицію.

Активация крокуючого привода відбувається тільки після контакту попередньої опори з ґрунтом, забезпечуючи постійну мінімальну підтримку на трьох опорах, що підвищує стабільність руху.

Варто зазначити, що необхідно враховувати зміну послідовності крокування залежно від умов. Застрявання колеса в ґрунті чи погіршена прохідність з одного боку борту можуть призвести до необхідності адаптивної корекції послідовності ходи. Це дозволяє системі обирати оптимальний режим руху залежно від рельєфу та навантаження.

1.2 Модель поверхні та основні перешкоди

Пересічена поверхня вкрита численними ударними кратерами. У їхніх околицях міститься значна кількість деформованого ґрунту – реголіту, який є ключовим об'єктом досліджень для вивчення його фізичних та хімічних властивостей.

Найбільший інтерес становлять рівнинні місячні території, так звані моря, де реголіт формує зовнішні шари ґрунту. Аналіз його геолого-фізичних

					041.Б-25.00.00.00.000.ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		12

характеристик дозволяє розширити уявлення про склад та історію формування Місяця, що має важливе значення для планетології та майбутніх місій.

На рис. 1.4 представлено типове місячне море, яке є прикладом таких рівнинних структур.

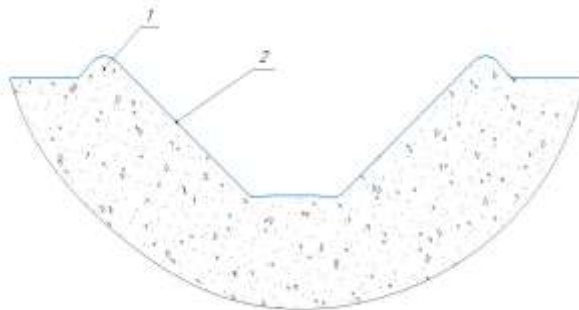


Рисунок 1.4 – Поперечний переріз ділянки ґрунту з кратером:

1 – вал кратера; 2 – ухил кратера

За своїми фізико-механічними властивостями реголіт нагадує сухий кварцовий пісок, тому всі подальші розрахунки, пов'язані з прохідністю колісно-крокуючого рушія (ККР), будуть виконані на основі моделі цього аналога.

Для математичного представлення рельєфу небесного тіла застосовуються детерміновані та стохастичні моделі.

Стохастичні моделі описують рельєф як ймовірнісне розподілення перешкод, визначаючи середні енергозатрати, ресурсні вимоги машини тощо. У цій роботі цей підхід не розглядається, а його параметри усереднені для механізму крокування.

Детерміновані моделі є математичним описом нерівностей рельєфу. Найбільший інтерес становлять типові неровності, які найчастіше зустрічаються на досліджуваній поверхні.

Для спрощення моделі в роботі розглядається найскладніший тип рельєфу – кратери. Їх класифікація здійснюється за допомогою буквених позначень, де найпоширеніші варіанти позначаються від А до С. Основними параметрами кратера є: відносна глибина кратера; кут нахилу стінки; кут нахилу валика кратера (за його наявності).

					041.Б-25.00.00.00.000.ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		13

Відносна глибина ξ визначається як співвідношення глибини кратера до його діаметра. Для кратерів типів А – С цей параметр лежить у діапазоні $\xi = 1/4 \dots 1/14$, тобто на кожен одиницю глибини кратера припадає від 4 до 14 одиниць його діаметра.

Кратери типу «А» є найскладнішими для подолання, оскільки мають нахил до $35 - 40^\circ$ відносно горизонту, що значно ускладнює пересування платформи. У рамках дослідження всі подальші розрахунки будуть виконані з урахуванням найекстремальнішого випадку – застрявання у кратері з максимальним нахилом.

Визначення цього кута проводиться експериментально на спеціальних випробувальних стендах, що імітують тягово-зчіпні властивості рухомих механізмів. Такі установки використовують моделі місячного ґрунту, найпоширенішим аналогом якого є кварцовий пісок, оскільки його коефіцієнт ковзання є найбільш схожим з реголітом.

У цій роботі для подальшого аналізу пропонується застосувати аналітичне значення нахилу, визначене через кут тертя у вузлах механізмів і машин. Такий підхід дозволяє спростити моделювання та забезпечити точність розрахунків для прогнозування поведінки рухової системи платформи.

Основними видами перешкод для платформи є камені призматичної або циліндричної форми, кратери кругової форми, горби з аналогічною геометрією, а також валик кратера, ступінчаста нерівність та рів з необмеженою довжиною.

Оскільки подолання скруглених і похилих перешкод більше залежить від тягових характеристик колісної бази, у цьому дослідженні розглядається найскладніший тип перешкод для колісно-крокуючого рушія (ККР) – ступінчаста нерівність.

Для забезпечення ефективного проходження такої перешкоди необхідно максимально збільшити висоту траєкторії крокування, якщо це не погіршує габаритні характеристики рухового механізму. Таким чином, висота перешкоди, яку може подолати платформа, визначається після вибору оптимальної траєкторії руху відповідно до її довжини.

					041.Б-25.00.00.00.000.ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		14

На рис. 1.5 зображено ступінчасту перешкоду, яка моделюється як базовий випадок для аналізу прохідності ККР.

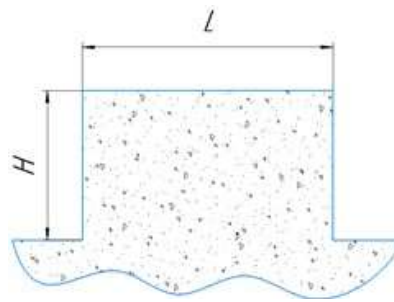


Рисунок 1.5 – Ступінчаста перешкода:

L – протяжність перешкоди; H – висота перешкоди

1.3 Огляд та вибір механізму крокування

Щоб визначити форму та принцип роботи механізму крокування, необхідно провести аналіз реальних механізмів і машин, які вже застосовувалися у складних умовах пересування.

На рис. 1.6 представлено багатoprивідного робота «ATHLETE», розробленого NASA. Цей робот створений як високоманеврова мобільна платформа, що здатна пересуватися по складному рельєфу завдяки крокуючій системі та колісному приводу. Його модульний дизайн та адаптивні рушії роблять його ідеальним для дослідження поверхонь небесних тіл.



Рисунок 1.6 – Колісно-крокуючий моноприводний робот «ATHLETE»

					041.Б-25.00.00.00.000.ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		15

Для спрощення приводної частини пропонується реалізувати крокуючий механізм у вигляді однопривідного важільного механізму, що суттєво спрощує конструкцію рушія та зменшує його масу.

Одним із найпростіших механізмів крокування є механізм Чебишева, який являє собою чотиришарнірний механізм з винесеним шатуном. Така конструкція дозволяє перетворювати обертальний рух у траєкторію крокування, при цьому забезпечуючи стійкість та мінімізацію навантажень на привод.

На рис. 1.7 зображено прототип транспортного пристрою, що використовує механізми крокування Чебишева.

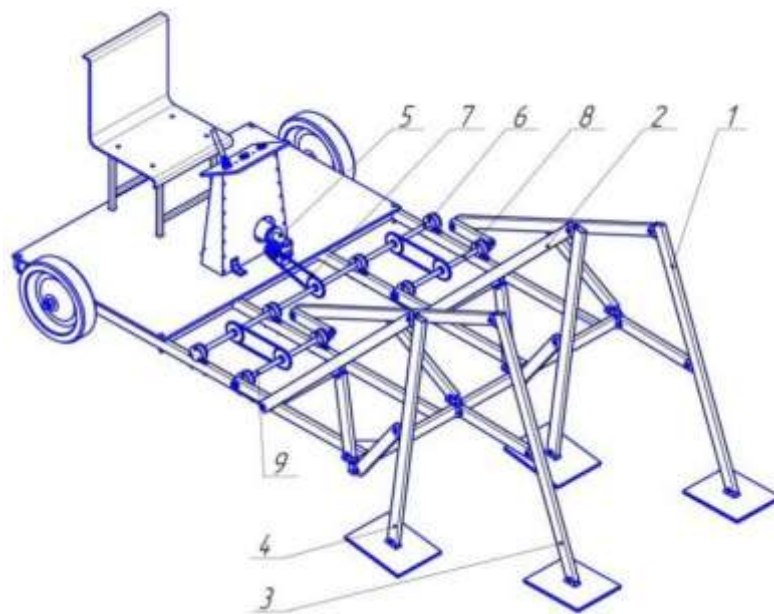


Рисунок 1.7 – Конструкція транспортного пристрою Чебишева:

1, 2, 3, 4 – механізми крокування; 5 – мотор-редуктор;

7 – ланцюгова передача; 6, 8, 9 – вали

Інший варіант механізму крокування - механізм Кланна, зображений на рис.1.8. Цей механізм складається з ланки, що обертається, кривошипа, двох шатунів і двох зчіпок з'єднані плоскими шарнірами [5].

Наприкінці минулого століття скульптор Тео Янсен розробив свій механізм крокування (рис. 1.9), привідна частина якого працює від прибережного вітру. [6]

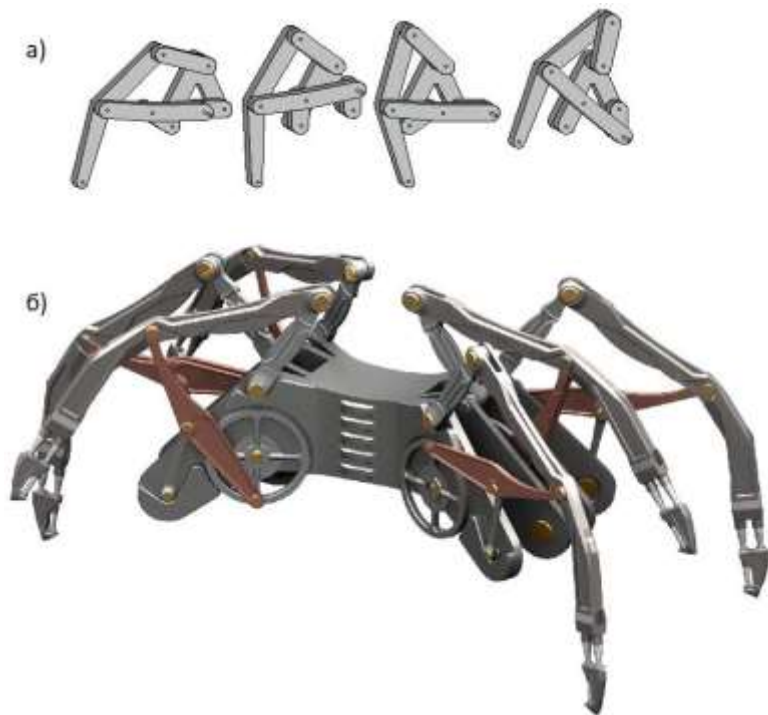


Рисунок 1.8 – Виконання механізму Кланна: а) Механізм Кланна при чотирьох різних положеннях кривошипу; б) Приклад застосування механізму на мобільному роботі з шістьма кінцівками [14]



Рисунок 1.9 – Кінематична скульптура Тео Янсена, що крокує, – «Strandbeest»[7]

					04.1.Б-25.00.00.00.000.ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		17

Конструктивні рішення підвіски значною мірою залежать від фізико-механічних властивостей реголіту, ландшафту, гравітації та інших умов. Тому підвіска місяцехода може суттєво відрізнятися від підвіски апаратів, призначених для інших небесних тіл, наприклад, Марса. Однак аналіз успішних технічних рішень для інших платформ важливий для визначення основних принципів їхньої роботи.

Однією з найбільш ефективних підвісок стала система Rocker-Bogie, яка використовується в чотирьох реальних американських марсоходах, а також у конструкції китайського місяцехода. Її ключова особливість – висока адаптивність до нерівного рельєфу та мінімізація нахилу корпусу під час руху.

На рис. 1.10 наведено структурно-кінематичну схему Rocker-Bogie, що демонструє механізм її роботи. Передача руху між правим і лівим бортами здійснюється через коромисло або диференціал, що забезпечує контакт коліс на обох сторонах апарата. Основним недоліком такої конструкції є необхідність виділення додаткового простору у верхній частині корпусу для міжбортового з'єднання.

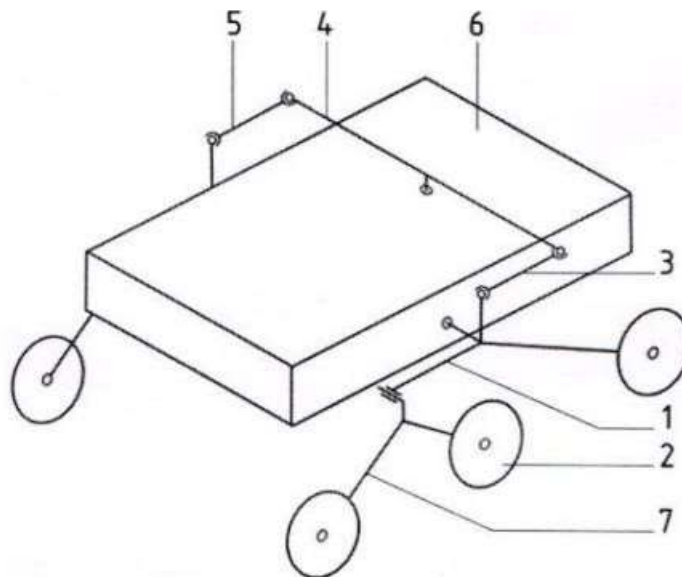


Рисунок 1.10 – Структурно-кінематична схема підвіски Rocker-Bogie

1 - балансир візка (rocker); 2 – колесо; 3, 5 – ліва та праві тяги відповідно;
4 – коромисло; 6 – рама шасі; 7 – візок (bogie)

						041.Б-25.00.00.00.000.ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата			19

Оскільки підвіска платформи в цьому дослідженні повинна мати модульну конструкцію, використання міжбортового з'єднання є неприйнятним. Це означає, що необхідно переглянути структурно-кінематичну схему підвіски, адаптуючи її для чотириколісного платформи.

Для таких апаратів паралелограмні механізми є найбільш поширеними, оскільки вони забезпечують мінімальні продольні зміщення коліс при вертикальних рухах підвіски. Це дозволяє знизити енергетичні втрати, які виникають через непотрібні коливання платформи на нерівному рельєфі.

На рис. 1.11 представлено приклад підвіски з паралелограмним механізмом, що дозволяє забезпечити плавність ходу та стабільність контакту рушія з поверхнею

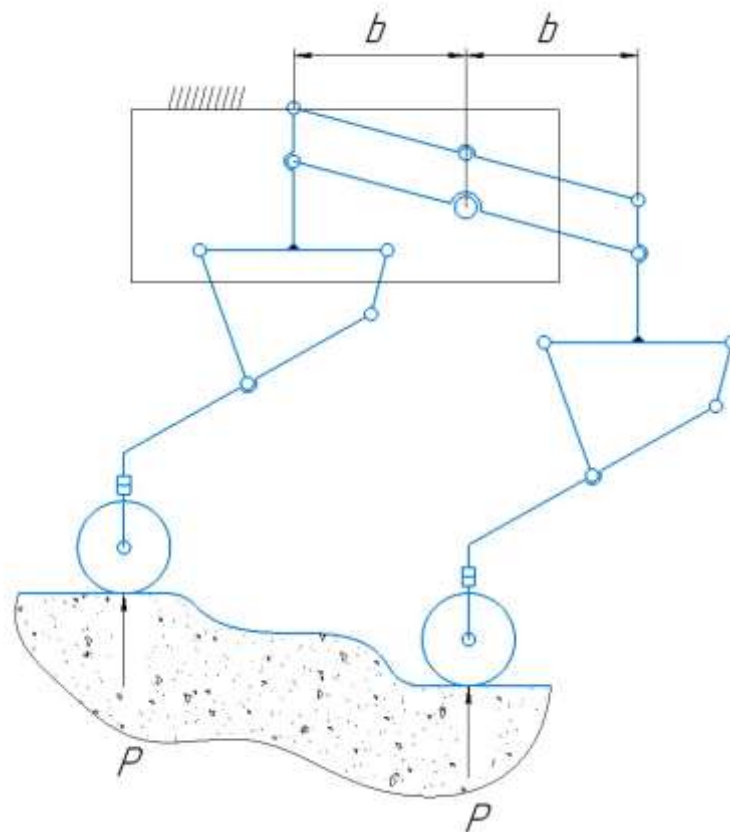


Рисунок 1.11 – Паралелограмний механізм підвіски коліс

b - плечі балансиру; P – нормальні реакції ґрунту

Застосування паралелограмного механізму є виправданим у разі його фіксації на торсіонах, оскільки це дозволяє замкнути реактивні крутні моменти

мотор-коліс на корпус, запобігаючи їхньому неконтрольованому розподілу. У разі незамкненого механізму торсіон в зоні фіксації додатково навантажується, що може призводити до підвищеного зношення та зміни динамічних характеристик.

Такий варіант підвіски може бути ефективно застосований у розроблюваному механізмі крокування, забезпечуючи стабільність та точність руху. Для фіксації коромисла пропонується встановити пружину кручення замість торсіона, оскільки навантаження на коромисло є незначним, і така конфігурація дозволяє зменшити вагу механізму без втрати ефективності.

					041.Б-25.00.00.00.000.ПЗ	Арк.
						21
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

РОЗДІЛ 2

РОЗРОБКА ПРИНЦИПОВОЇ СХЕМИ РУШІЯ

Щоб визначити основні критерії проектування крокуючого механізму лунохода, необхідно спочатку розібратися з кінематикою процесу крокування та його функціональними можливостями.

Оскільки механізми крокування для кожного колеса платформи є ідентичними, доцільно розглянути кінематичну схему для одного колісно-крокуючого рушія (ККР), що дасть змогу детально проаналізувати принцип його роботи.

Поверхня Місяця складається з шару пухкого реголіту, де деформація під навантаженням пропорційна глибині незв'язного шару. Це означає, що рухомий ґрунт може бути нерівномірним, а в певних зонах деформації можуть бути значними, що робить їх важкопрохідними для платформи.

Класичний колісний рушій у випадку застрявання в реголіті може не вивести апарат із небезпечної зони, що вимагає альтернативного рішення для переміщення. Запропонований колісно-крокуючий рушій (ККР) реалізує концепцію перешагування небезпечних зон за допомогою фазної ходи, де кожна опора активується по чергово.

Передні колеса завершують фазу крокування у режимі провідного руху, переміщуючись на відстань, кратну довжині колісної бази платформи. Це забезпечує надійний опорний слід, який потім використовується задніми колесами. У роботі пропонується визначити крок механізму відповідно до довжини колісної бази лунохода.

Фазний режим переміщення забезпечує стабільність машини та максимальну кількість опор у процесі крокування. Важливо зазначити, що всі колеса під час крокування залишаються заблокованими, щоб гарантувати рух слід у слід та зменшити ризик нестабільності.

					041.Б-25.00.00.00.000.ПЗ	Арк.
						22
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

2.1 Модернізація способу пересування транспортного засобу колісно-кроковим рушієм (ККР)

При застряванні коліс у зоні пухкого реголіту місяцеход використовує механізм крокування, щоб покинути область з низькою несучою здатністю ґрунту. Для спрощення схематичного представлення у цьому аналізі розглядається багатопривідний механізм, який за своєю кінематикою є двоступеневим маніпулятором, закріпленим на корпусі платформи.

У реальній моделі використовується однопривідний важільний механізм, що забезпечує простоту конструкції та оптимізацію ресурсів.

На рис. 2.1 зображена структурна схема платформи в початковій позиції, перед активацією механізму крокування.

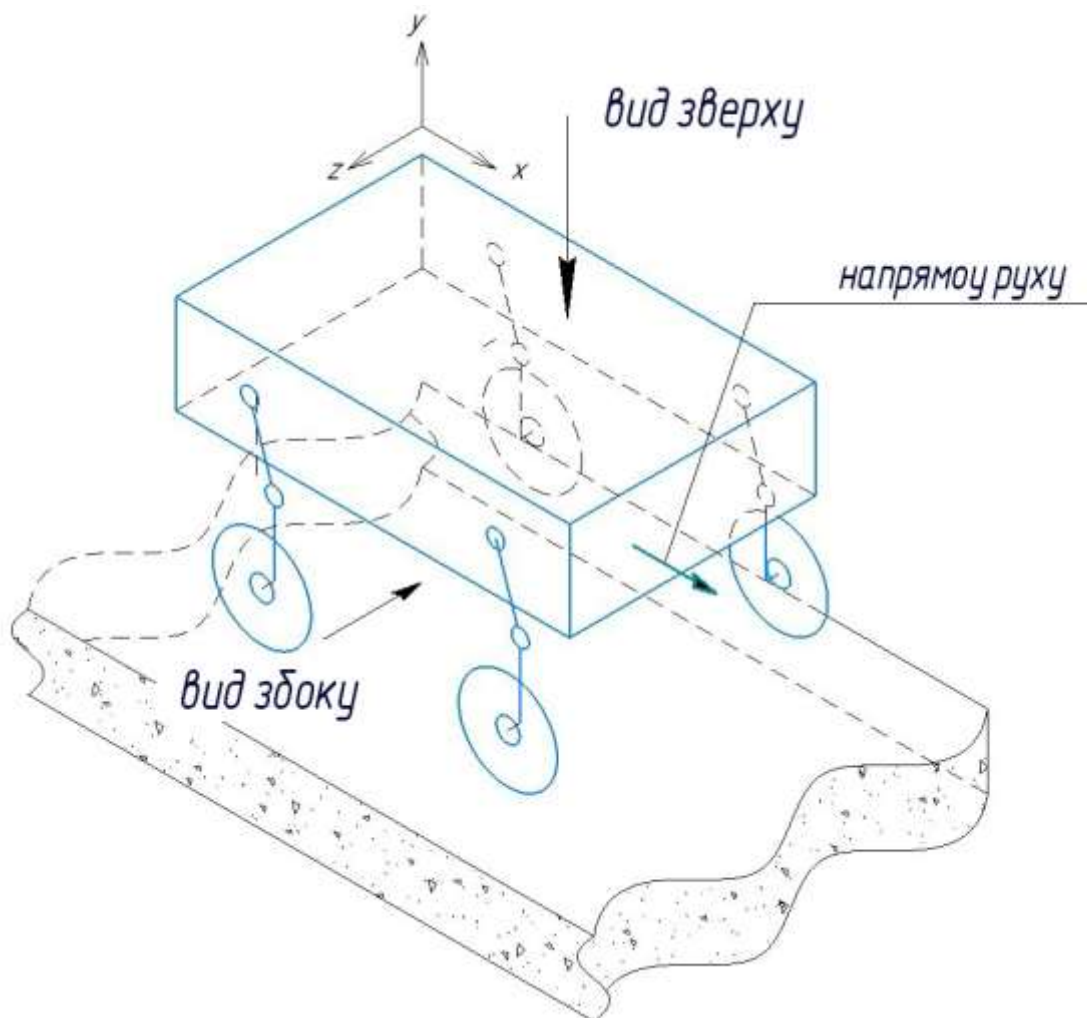


Рисунок 2.1 – Структурна схема платформи у вихідному положенні перед початком циклу крокування, вид у ізометрії

					041.Б-25.00.00.00.000.ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		23

Узгоджене крокування "слід у слід" ґрунтується на методах, розроблених у наукових роботах минулого століття. У рамках цього дослідження пропонується доповнити послідовності крокування циклограмами, які визначають різні алюрні схеми руху. Застосування тієї чи іншої послідовності крокування може варіюватися залежно від умов поверхні Місяця, хоча у цій роботі ці фактори детально не розглядаються.

Для аналізу пропонується розглянути один приклад — діагональний алюр, що зображений на рис. 2.2, в. Якщо потрібно розширити аналіз або порівняти його з іншими варіантами алюрів, зображеними в пункті 1.2 (рис. 5),

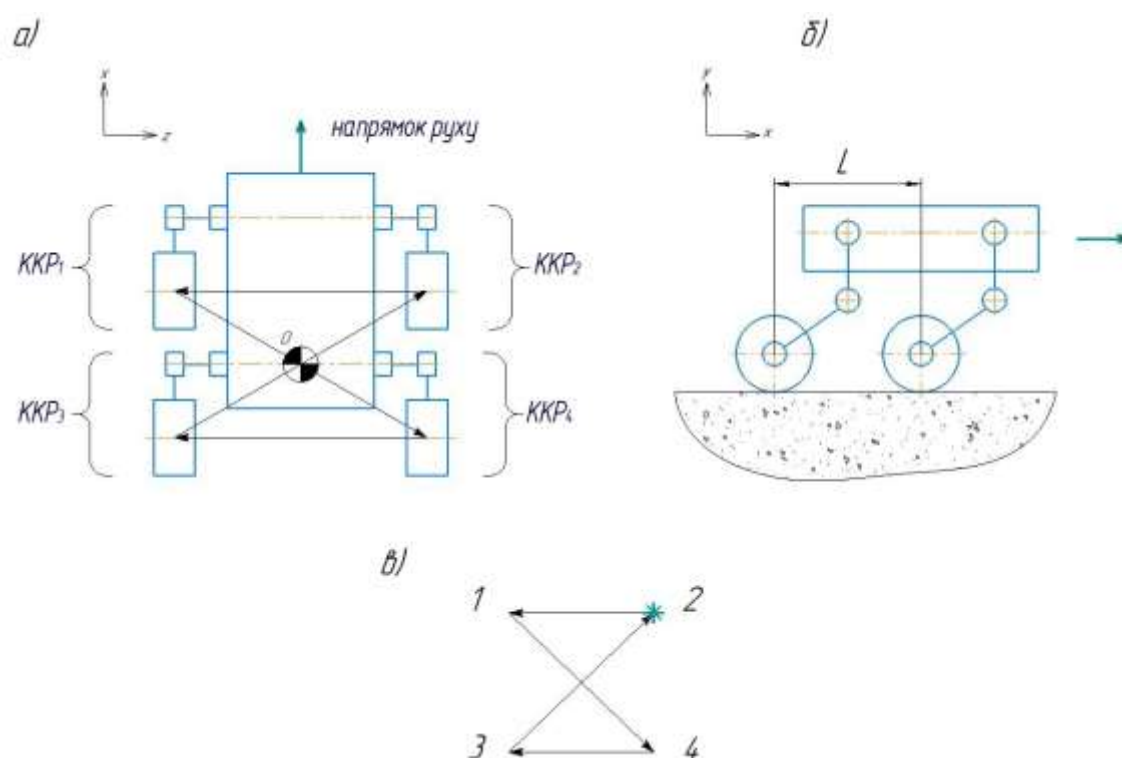


Рисунок 2.2 – Початкове становище платформи та одна з послідовностей крокування: а) Вид платформи зверху; б) Вид платформи збоку; в) Послідовність крокування (алюр)

L – колісна база; ККР1..4 - колісно-крокуючі рушії 1-4; 0 – центр мас у початковому положенні; * – початок послідовності крокування

Згідно з алюром, зображеним на рис.2.2, можна скласти циклограму з послідовністю крокування 2-1-4-3. Циклограма зображено рис.2.3

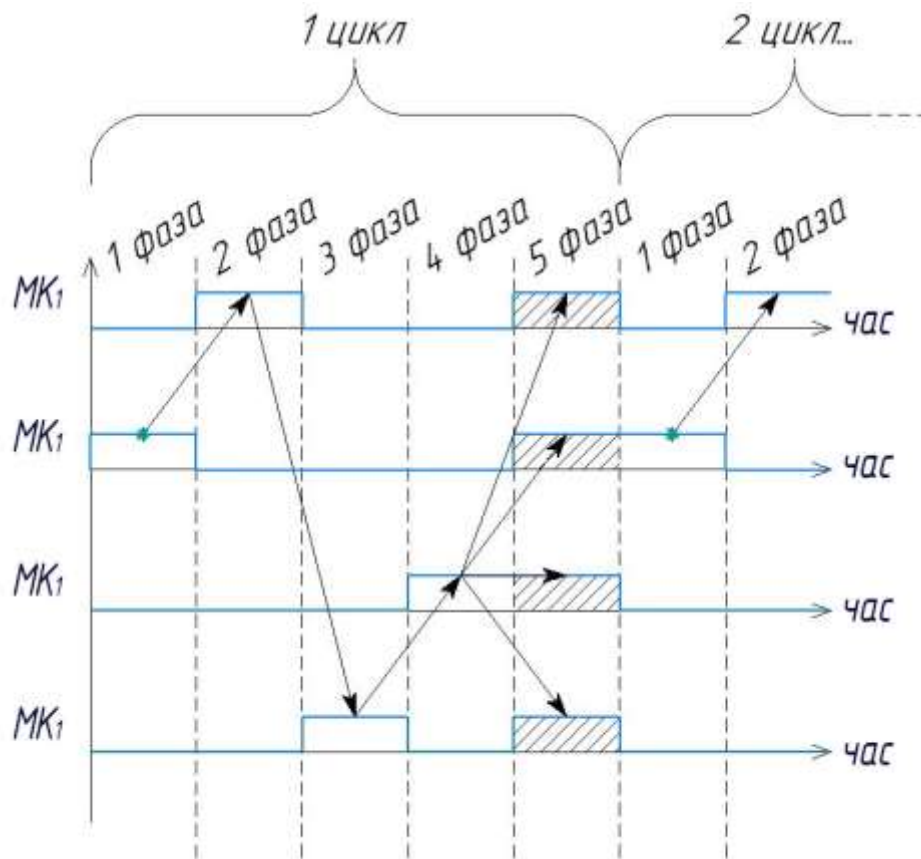


Рисунок 2.3 – Циклограма для механізмів крокування:

МК_{1..4} - механізми крокування 1-4

На останній фазі циклу крокування активні всі колісно-крокуючі рушії (ККР), що позначені заштрихованими зонами. Ця фаза необхідна для повернення корпусу платформи в початкове положення щодо його рушійної системи.

Процес крокування є критично важливим у ситуаціях, коли рушії знаходяться на дуже пухкому реголіті і класичне колісне пересування втрачає ефективність. Щоб забезпечити додаткову стабільність у таких умовах, пропонується формування опорних слідів – зон з ущільненим ґрунтом, які створюються кожним колесом платформи.

Ці опорні сліди формуються під час обертання заблокованого колеса, коли платформа залишається нерухомим. У результаті буксування колеса утворюється заглиблення, що слугує стійкою опорою для подальшого руху.

Додана циклограма включає послідовність активації мотор-коліс (МК), що дозволяє відобразити всю динаміку руху платформи у межах одного циклу крокування.

На рис. 2.4 наведено циклограму, яка показує всі активні етапи роботи крокуючих механізмів та мотор-коліс.

Усього цикл містить 5 фаз крокування, де:

- У кожній фазі вказані активовані приводи,
- Представлена траєкторія переміщення центру мас,
- Відображено узгоджені дії рушійної системи для забезпечення стабільності руху.

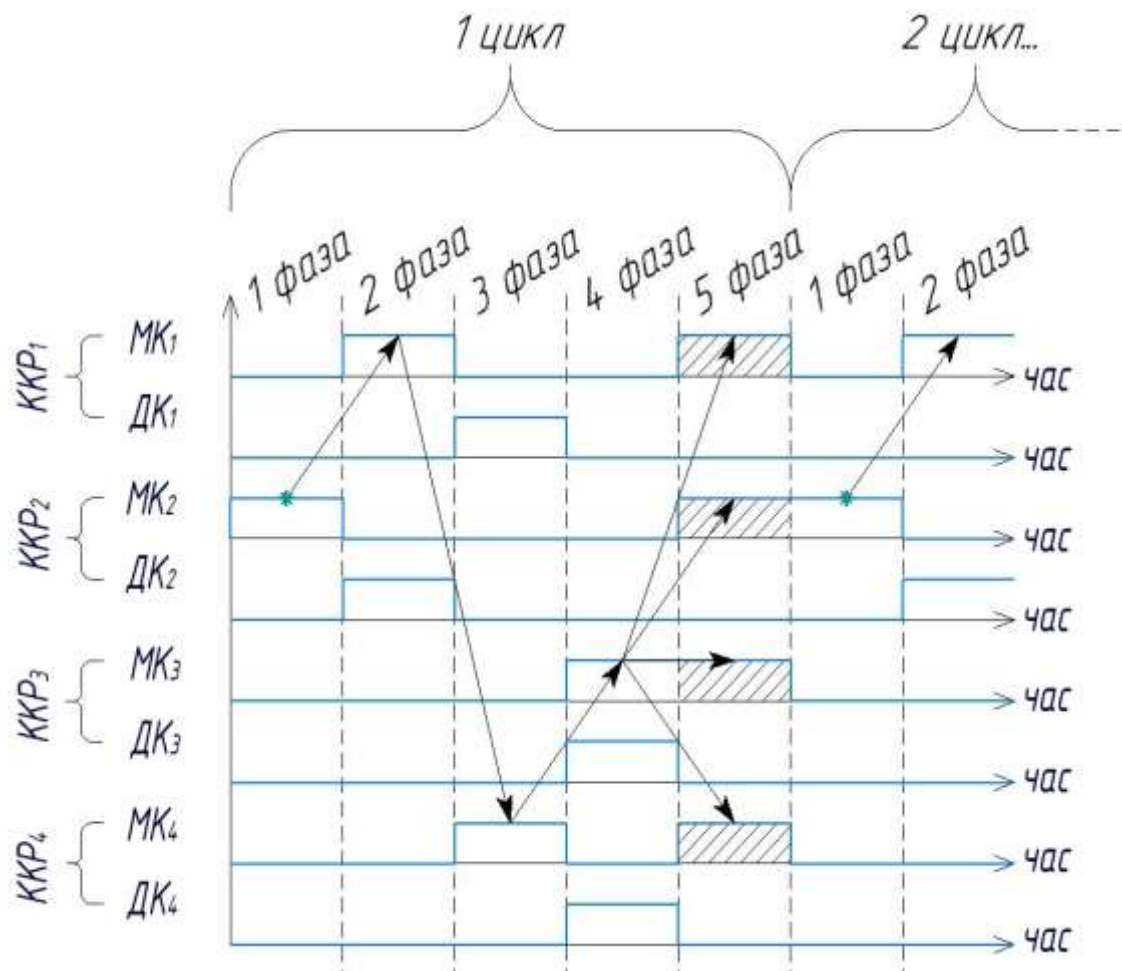


Рисунок 2.4 – циклограма для механізмів крокування:

МК_{1..4} - механізми крокування 1-4; ДК_{1..4} - двигун-колеса 1-4; ККР_{1..4} - колісно-крокуючі рушії 1-4;

Ця фаза продовжує стабільне пересування з урахуванням фазної ходи, яка дозволяє оптимально розподілити навантаження на всі рушії.

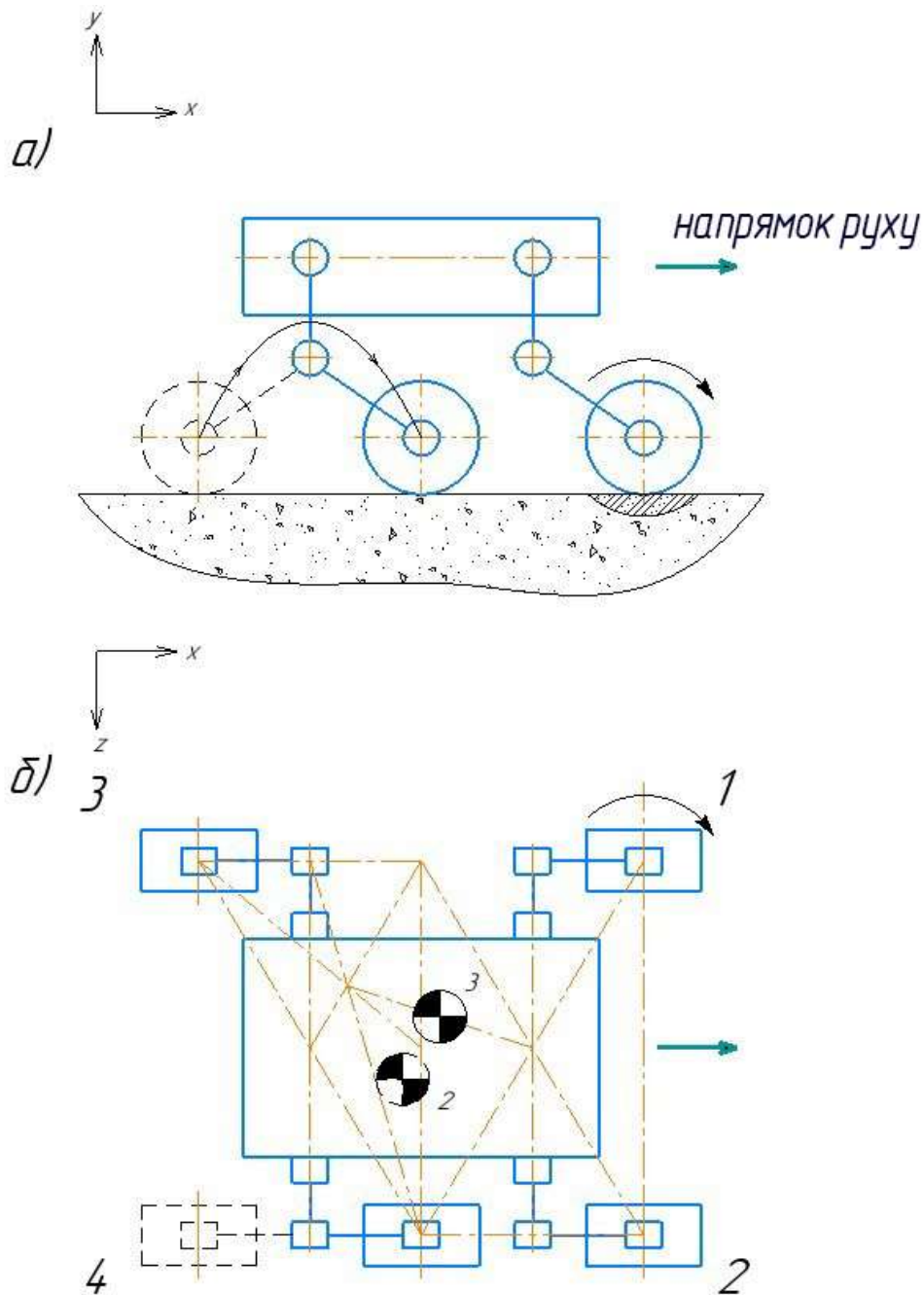


Рисунок 2.7 - Цикл крокування платформи, 3 фаза:

а) вид зверху; б) вид збоку

4 фаза. Активний привід механізму крокування МШЗ та мотор-колеса МК₃, МК₄ (рис. 2.8). Центр мас зміщується з точки 3 до 4.

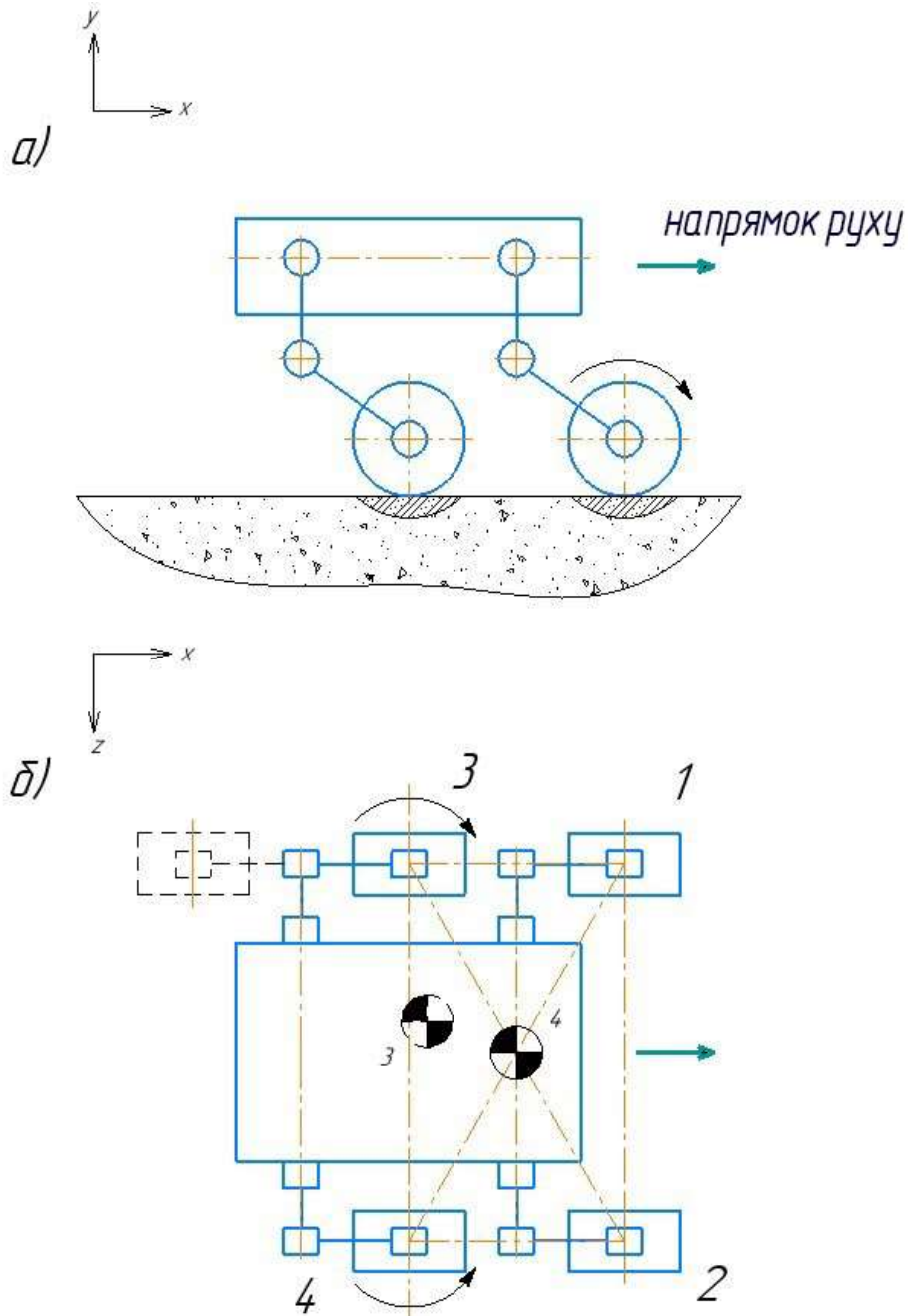


Рисунок 2.8 – Цикл крокування платформи, 4 фази:

а) вид зверху; б) вид збоку

5 фаза. Активними є приводи механізмів крокування МШ1, МШ2, МШ3, МШ4 (рис. 2.9). У цій заключній фазі активні всі 4 приводи крокування, які переміщують платформу вперед у напрямку руху. Центр мас зміщується до задньої частини машини (з струму 4 до 0). На малюнку відображено опорний слід при наступній фазі крокування (початок нового циклу).

Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата

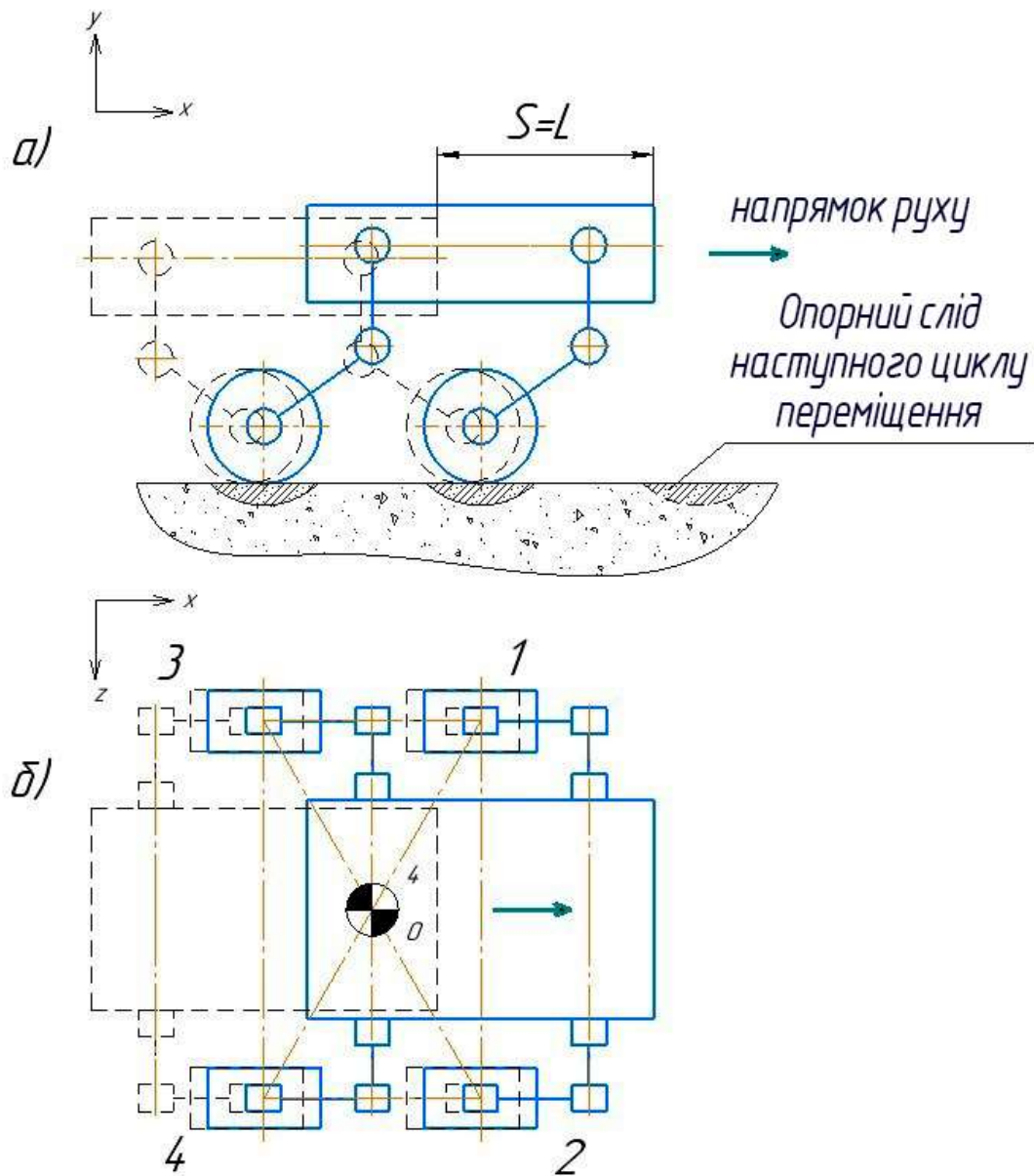


Рисунок 2.9 - Цикл крокування платформи, 1 фаза:

а) вид зверху; б) вид збоку

Варто зазначити, що в процесі крокування в кожній із фаз відбувається зміна положення центру мас (рис. 2.10), з цієї причини слід передбачати деякий пристрій, що балансує, компенсує це зміщення. Завдання проектування такого пристрою виходить за межі даної роботи і далі не розглядається. Для спрощення пропонується розглядати платформу у процесі крокування як абсолютно стійкий.

Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата

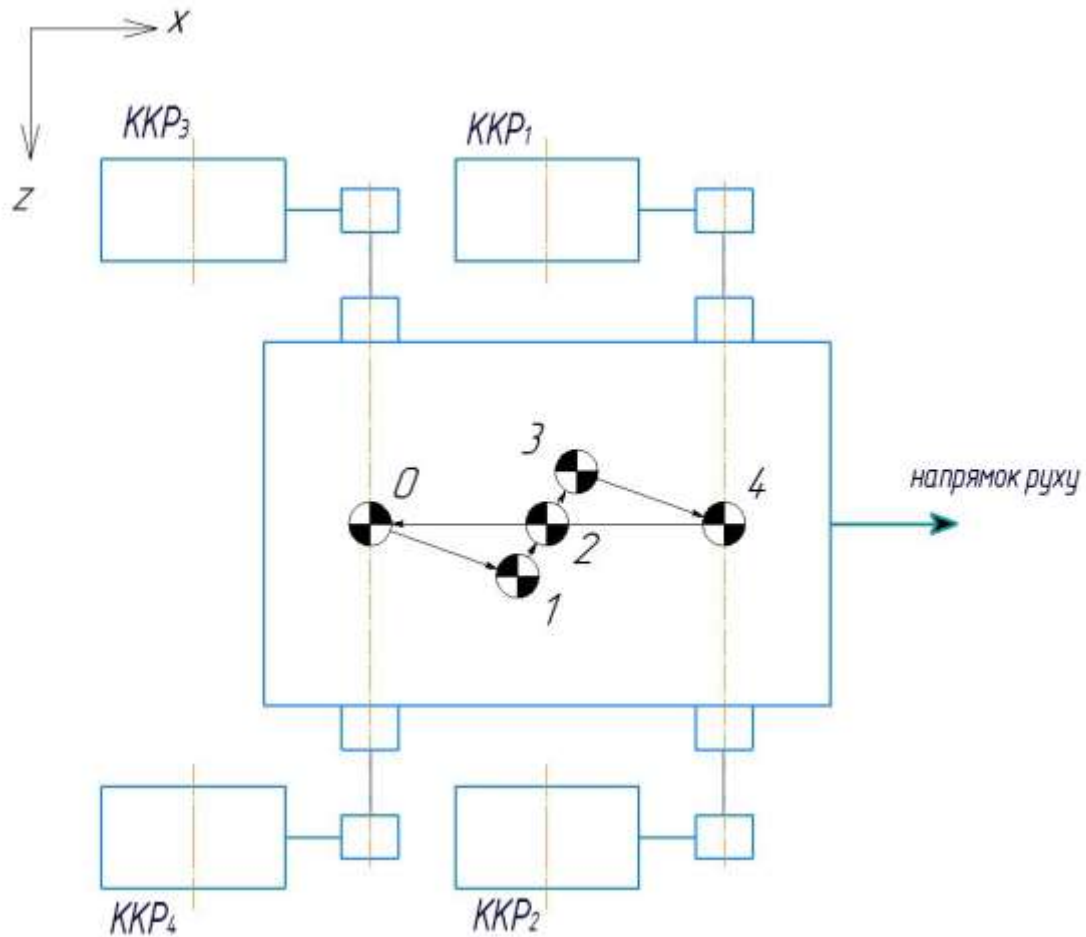


Рисунок 2.10 – Дрейф центру мас при різних фазах крокування платформи, вид зверху

На рисунку вище зображено переміщення центру мас за різних фаз крокування. Зміщення по точках 0-1 відповідає 1 фазі, зміщення по точках 1-2 - 2 фазі і т.д.

Описаний вище п'ятифазний цикл крокування може повторюватися кілька разів, поки платформу не виявиться більш стійкою поверхні з менш пухким ґрунтом.

2.2 Розробка та опис кінематичної схеми колісно-крокуючого рушія

Компоновка основних елементів лунохода є ключовим етапом перед розробкою математичної моделі та виконанням розрахунків динамічних процесів.

На рис. 2.11 представлено структурно-кінематичну схему платформи, що містить його основні рушії та інші важливі механізми. Ця схема дозволяє:

Визначити співвідношення між приводами;

Оцінити геометричні параметри рухової системи;

Аналізувати кінематику рушіїв та механізмів управління.

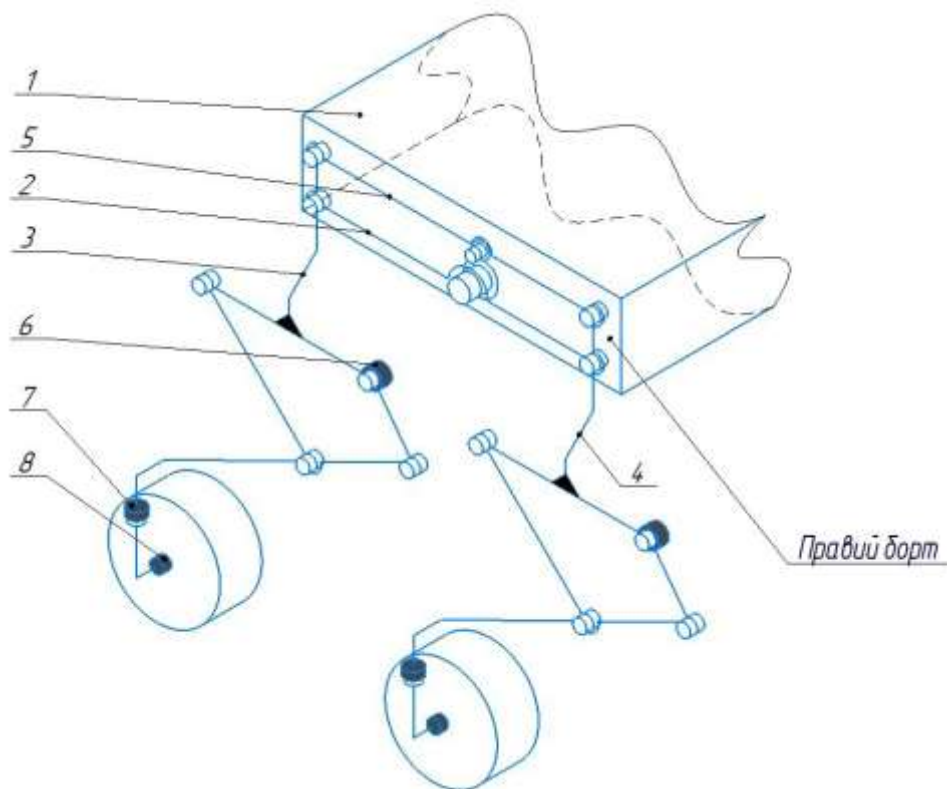


Рисунок 2.11 – Структурно-кінематична схема місяцеходу

1 – корпус; 2 - коромисло, що горизонтально гойдається; 3, 4 - коромисла, що вертикально гойдаються; 5 – допоміжний шатун; 6 – привід механізму крокування; 7 – привід повороту колеса; 8 – привід мотор-колеса

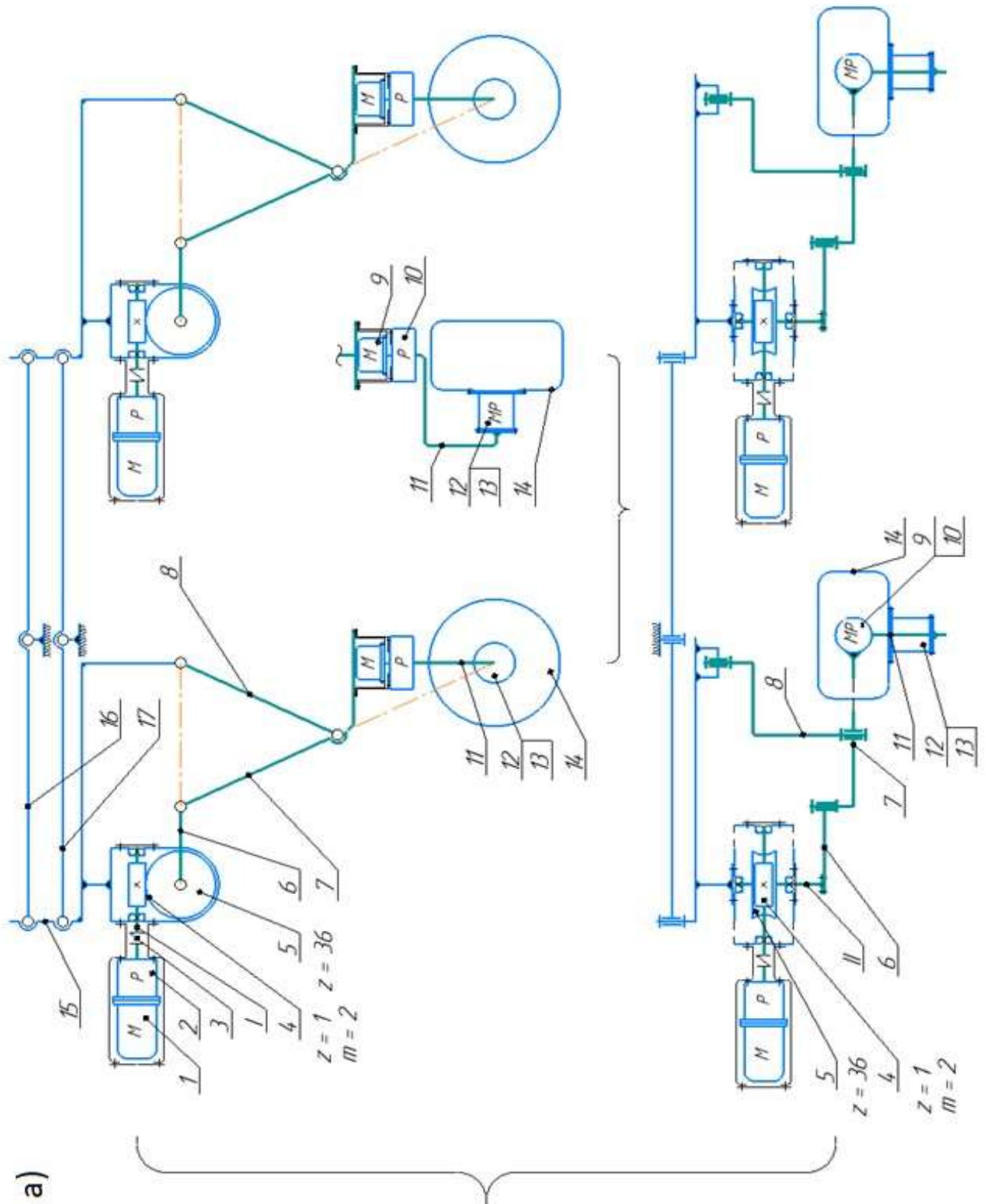
Паралелограмні механізми закріплені на корпусі з обох бортів, хоча лівий борт на схемі не показаний. Ці механізми включають хитне коромисло, закріплене в корпусі, допоміжний шатун і вертикально рухомі коромисла, до яких приєднані механізми крокування. Поворотний привід забезпечує управління мотор-колесом.

Оскільки основною метою є розробка механізму крокування для мобільної робототехнічної системи, підвіска відображена у вигляді схеми. На ілюстрації представлена кінематична схема колісно-крокуючого рухомого пристрою, що включає механізм крокування для переднього лівого колеса. Двигун приводить у дію планетарний редуктор і через компенсаційну муфту обертає вал із закріпленим на ньому черв'яком, який передає рух на черв'ячне колесо, встановлене на другому валу. Через фланцеве з'єднання цей вал обертає кривошип, з'єднаний з шатуном через плоскі шарніри.

На іншому кінці коромисла розташований привід повороту, що складається з двигуна та хвильового редуктора. Його робота викликає обертання рульового важеля з прикріпленим мотор-колесом, яке включає двигун та планетарний редуктор, а на виході встановлено колесо.

Рухомий пристрій монтується на підвіску з вертикально рухомими коромислами, які підтримуються основним і допоміжним коромислами. Таким чином, він складається з трьох приводів: мотор-колеса для швидкого переміщення, механізму крокування для подолання складних ділянок та поворотного приводу для коригування курсу. Далі розглянемо конструктивні особливості вибору його вузлів.

					04.1.Б-25.00.00.00.000.ПЗ	Арк.
						34
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		



a)

Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата

041.5-25.00.00.00.000.П3

Арк.

35

навантаження на механізм крокування порівняно невеликі, а отже, і необхідний момент на кривошипі теж незначний. Забезпечити його можна за допомогою правильної компоновки двигуна та редуктора, оскільки використання безредукторного приводу збільшує масу майже в 50 разів.

Для реалізації мотор-редуктора можливі два варіанти: двигун із високим крутним моментом і редуктор з малим передавальним числом; двигун із малим крутним моментом і редуктор із великим передавальним числом.

Перший варіант енергоефективніший, але поступається за масо-габаритними показниками. Враховуючи, що для механізму крокування вимоги до енергоефективності невисокі, доцільніше використовувати привід із малим моментом і значним передавальним числом. Щоб зменшити габарити, краще розподілити високе передавальне число між двома послідовно з'єднаними редукторами – планетарним і черв'ячним.

Застосування неметалевих елементів, таких як ущільнення й манжети, у космічній техніці проблематичне, оскільки гумові матеріали не витримують вакууму та екстремальних температур. Тому традиційні вузли машин потребують перегляду. Двигун і планетарний редуктор вирішено вибрати з каталогу, а конструкцію черв'ячного редуктора розробити самостійно, щоб відповідати умовам космічного середовища.

Для з'єднання планетарного й черв'ячного редукторів необхідно встановити муфту, що компенсує неточності монтажу. Одним із відповідних варіантів є пружинна муфта, схема якої наведена на відповідному кресленні



Рисунок 2.13 – Пружинная муфта

					04.1.Б-25.00.00.00.000.ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		37

Між валом 1 і відповідною частиною 3 передбачений зазор у осьових канавках, заповнений твердим мастильним матеріалом, який складається з дисульфиду молібдену та ферромагнетика. У якості ферромагнетика використовується нікель, який, не погіршуючи мастильні властивості суміші, надає їй необхідні магнітні характеристики. У відповідну частину 3 вклеєні магнітні кільця 2, що утримують порошок всередині зазору завдяки постійному магнітному полю, не допускаючи його витікання. Таке конструктивне рішення виступає альтернативою лабіринтному ущільненню з манжетою та забезпечує герметичність механізму. Тривимірною моделлю цього шарніра представлена на рис.2.17.

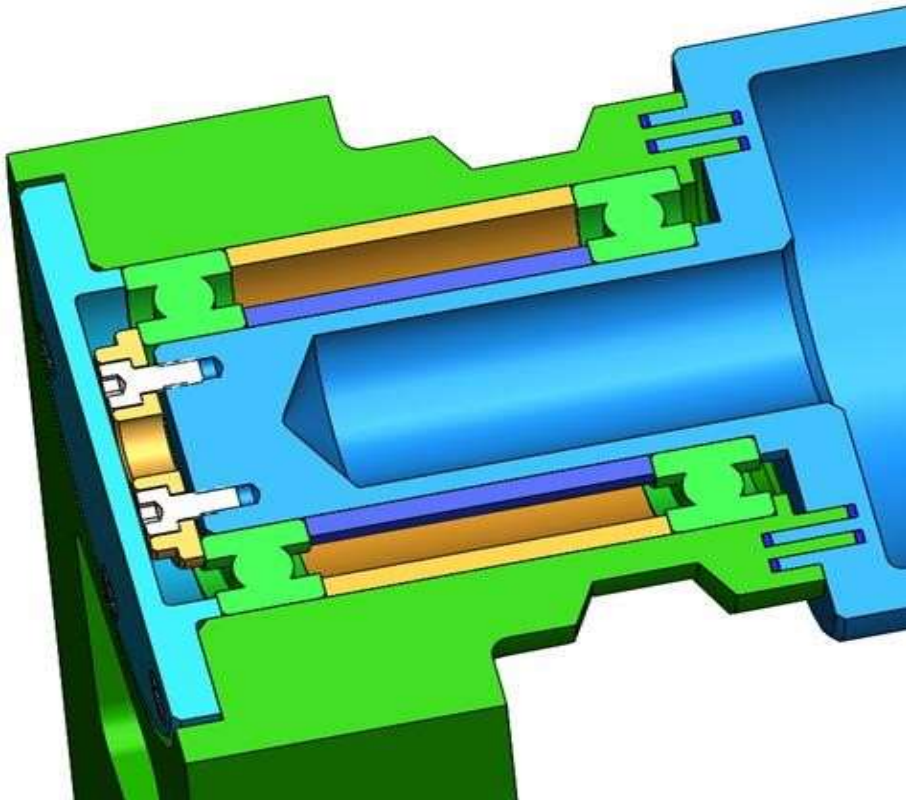


Рисунок 2.17 – Складання плоского шарніра у 3д моделі

2.4 Організація керування рушієм

Для забезпечення роботи мобільної робототехнічної системи необхідно організувати її живлення. Окрім джерела живлення, слід встановити слідкуючі системи, які контролюють приводну частину рухомого пристрою. Цю роль

					041.Б-25.00.00.00.000.ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		40

вихідному валу черв'ячного редуктора. Використання двох датчиків обумовлене кількома факторами.

По-перше, через значні енергетичні втрати приводу, спричинені великим передавальним числом редукторів, визначити положення механізму лише за одним датчиком, розташованим на валу мотор-редуктора, складно. Виникають похибки через невисоку жорсткість компенсаційної муфти на виході мотор-редуктора. Тому доцільно розділити функції позиціонування механізму та вимірювання кутової швидкості двигуна між двома окремими датчиками.

По-друге, якщо один із датчиків виходить з ладу під час роботи, можна використовувати другий. Обидва датчики дозволяють отримувати значення швидкості обертання та положення за допомогою інтегро-диференціальних перетворень.

					041.Б-25.00.00.00.000.ПЗ	Арк.
						42
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

РОЗДІЛ 3

РОЗРАХУНОК МЕХАНІЗМУ КРОКУВАННЯ

Щоб визначити оптимальну траєкторію крокування, габарити механізму та відповідний типорозмір приводу, необхідно розглянути розрахункові випадки руху, а потім побудувати математичну модель, яка враховує ключові аспекти цих умов.

Математична модель описує кінематику та динаміку механізму, даючи змогу визначити положення ланок, їхні швидкості та прискорення. На основі проведеного аналізу робляться висновки та надаються рекомендації щодо вибору приводної частини.

Розрахунковими випадками слугуватимуть ситуації, що передбачають найбільш складні та потенційно критичні умови для механізму крокування. На цьому етапі формується модель поведінки навантажень на систему, що дозволяє здійснити пошук значень навантажень на привід механізму.

3.1 Випадки для розрахунку

Спершу варто розглянути номінальний режим роботи механізмів крокування, коли платформа рухається слід у слід.

У критичних ситуаціях, коли апарат застрягає в ґрунті, не всі приводи крокування можуть функціонувати. В таких умовах необхідно оцінити випадок, коли один механізм крокування здійснює протягування всього платформи.

Для розширення можливостей крокуючого механізму та підвищення маневреності можна розглянути ситуацію, коли механізм перешагує ступінчасту перешкоду висотою, більшою за радіус колеса. Однак цей режим може не бути реалізованим, оскільки висота траєкторії крокування не є ключовим критерієм при її оптимізації.

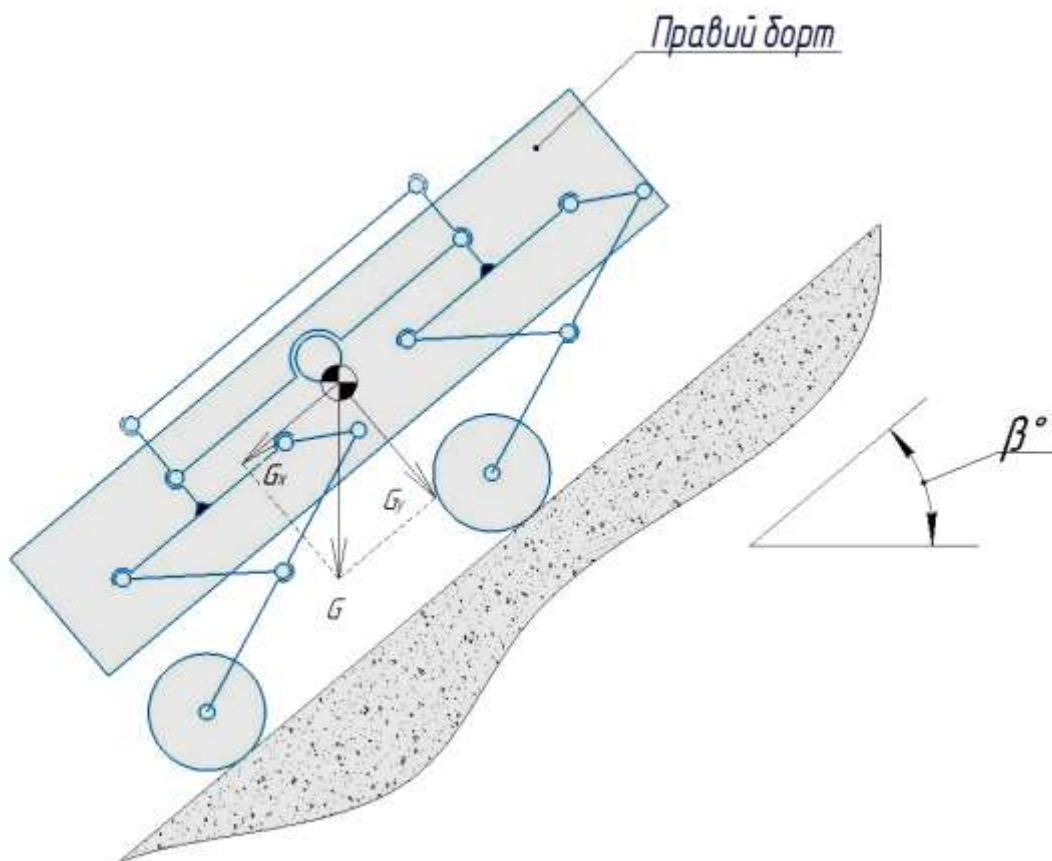
Наведені випадки є критичними, оскільки вони створюють навантаження на привід механізму крокування. Інші ситуації, коли привід не задіяний, не становлять інженерного інтересу.

					041.Б-25.00.00.00.000.ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		43

Розрахунковий випадок 1

Розглянемо ситуацію, коли платформа застрягає в ґрунті на схилі кратера. У такому випадку найкращим варіантом є рух механізмів крокування слід у слід, що забезпечує високу прохідність.

За цим методом крокування було проведено розрахункові дослідження та експерименти. Виявлено, що макет із крокуючим приводом, рухаючись слід у слід, здатен долати підйоми з сипучим ґрунтом аж до кута природного укосу цього ґрунту. В таких умовах жоден з традиційних приводів руху вже не забезпечує ефективного пересування.



G_x, G_y – складові сили тяжіння G ; β – кут нахилу стінки кратера, градус

Рисунок 3.1 – Розрахунковий випадок із застряглим колесом на ґрунті під нахилом, вид збоку

					041.Б-25.00.00.00.000.ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		44

Розглянемо алгоритм крокування в аварійній ситуації, що представлений на відповідній ілюстрації. У випадку застрягання коліс найбільш ненавантажене колесо виконує протягування платформи доти, доки решта коліс не буде звільнена від шару ґрунту. Перевірка працездатності механізмів крокування здійснюється після кожного циклу переміщення та протягування.

Для ефективнішого просування апарата від одного тягового механізму колеса на застряглих рухомих пристроях вільно обертаються, зменшуючи опір під час витягування з зони буксування. Опір може бути ще нижчим, якщо забезпечити обертання коліс у напрямку крокування, проте розрахунок тягових характеристик колісної бази не входить до цього дослідження і надалі не розглядається.

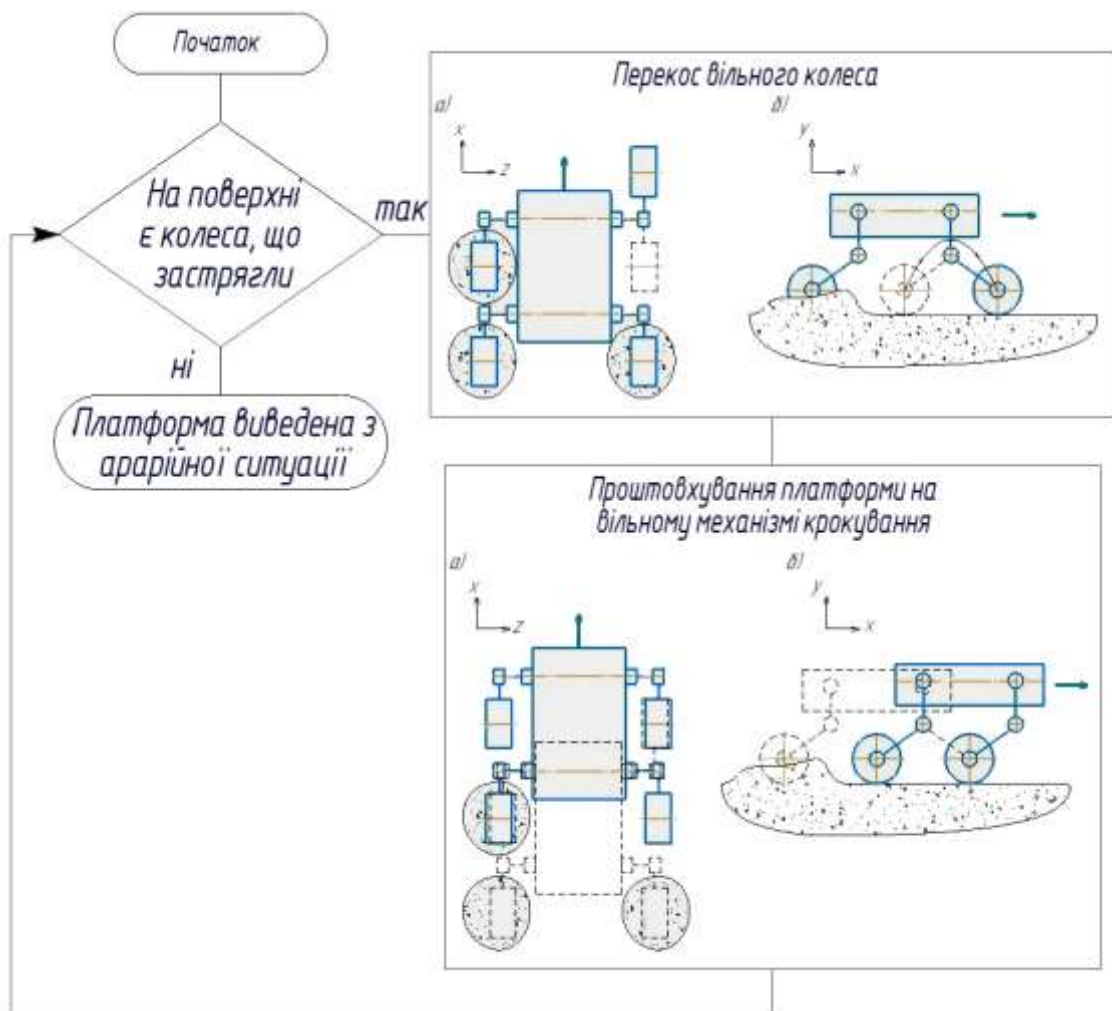


Рисунок 3.4 – Алгоритм під час кроку в аварійній ситуації:

а) Вид платформи згори; б) Вид платформи збоку

Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата

геометричне властивість можна використовувати для визначення довжини кроку механізму, оскільки при проходженні такого сегмента колесо упирається в ґрунт, що ініціює крокування. Протяжність цієї ділянки називається використовуваним кроком S_u . Висота траєкторії H та, відповідно, висота використаного кроку h не встановлюються окремо, а є наслідком геометрії механізму крокування.

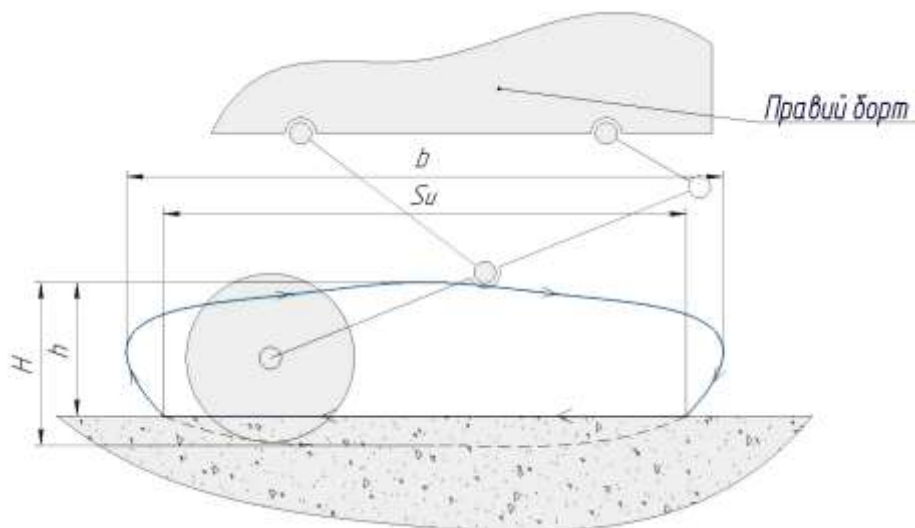


Рисунок 3.7 – Траєкторія руху нижньої точки колеса механізму крокування
 b – протяжність траєкторії; H - висота траєкторії; S_u – довжина використаного кроку; h – висота кроку, що використовується

У теорії крокуючих механізмів деякі параметри траєкторії визначаються експериментально, тому частину цієї теорії пропонується спростити для розрахункової моделі. Визначимо геометричні умови для обчислення довжини використаного кроку S_u .

При проектуванні механізмів і машин використовується поняття кута тиску – це кут між вектором лінійної швидкості вихідної ланки та реакцією, що передається від ведучої ланки до вихідної. Ця реакція без урахування сил тертя спрямована по загальній нормалі до поверхонь, що взаємодіють. Кут тиску визначається експериментально. Для класичного кулачкового механізму з поступальним рухом штовхача допустиме значення кута тиску становить 25° – 35° .

При взаємодії вихідної ланки (грунту) з ведучою ланкою (колесом) відбуваються деформації ґрунту, що змінюють кут тиску. Для визначеності приймається допустиме значення кута тиску $\alpha = 20^\circ$. У такому випадку формується пляма контакту – ділянка траєкторії з довжиною, що дорівнює використаному кроку S_i .

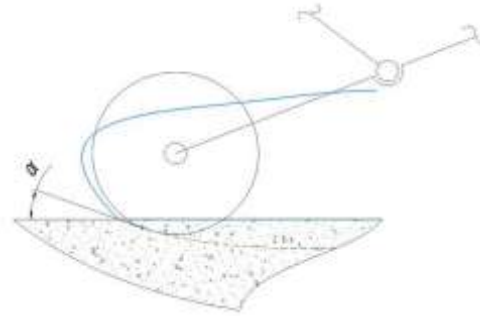


Рисунок – 3.8 Ділянка траєкторії крокування:

α – кут тиску колеса з ґрунтом

У зоні контакту колеса з ґрунтом кут тиску збігається з кутом між дотичною до траєкторії крокування та горизонтом. Тому далі розглядається геометрична залежність цього кута від положення механізму.

Окрім того, пропонується аналіз процесу крокування по похилій стінці кратера, що дозволить оцінити ситуацію, коли проєкції сили тяжіння додатково збільшують навантаження на привід механізму крокування. На відповідній ілюстрації представлений механізм крокування на похилій ділянці з відображеною траєкторією руху колеса.

Корпус платформи умовно фіксується, а траєкторія руху розглядається відносно його системи координат $\{A\}$.

Введемо буквено-цифрові позначення ланок і точок механізму крокування.

На відповідній ілюстрації представлений механізм крокування у довільному положенні. Він має одну ступінь рухливості, а вхідною координатою є положення кривошипа φ_1 .

					04.1.Б-25.00.00.00.000.ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		51

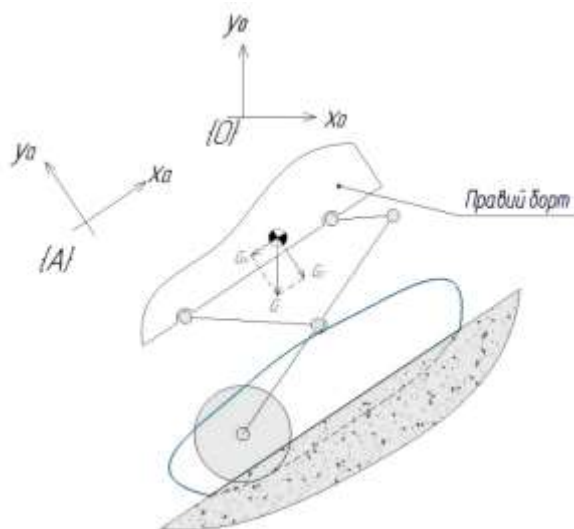


Рисунок – 3.9 Ділянка траєкторії крокування

{O} – система координат абсолютна; {A} – система координат щодо платформи; G – результуюча сила тяжіння; G_x – проекція сили тяжіння на Ox_a ; G_y – проекція сили тяжіння на Oy_a

Для спрощення розрахунків колесо розглядається як матеріальна точка. Інші сили тяжіння, прикладені до інших ланок, тут не відображені, але будуть враховані в силовому аналізі.

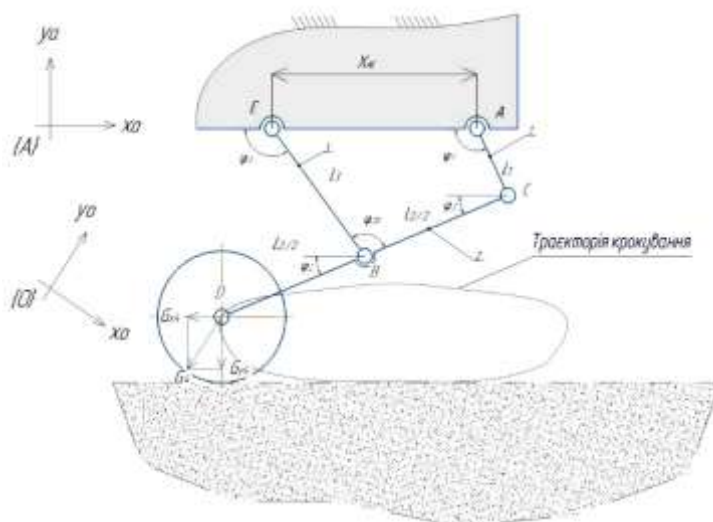


Рисунок 3.10 – Механізм крокування у довільному становищі

{O} – система координат абсолютна; {A} – система координат щодо платформи; G – результуюча сила тяжіння; G_x – проекція сили тяжіння на Ox_a ; G_y – проекція сили тяжіння на Oy_a .

$$tg\alpha(\varphi_1)_i = \frac{Y_D(\varphi_1)_{i+1} - Y_D(\varphi_1)_i}{X_D(\varphi_1)_{i+1} - X_D(\varphi_1)_i}$$

де $\alpha(\varphi_1)$ – шуканий кут у тому положенні.

За допомогою програмного продукту Mathcad були отримані результати вищеописаної математичної моделі.

На графіку показано залежність шуканого кута від положення кривошипа, розбитого на 50 дискретних позицій, де $i = 0, 1 \dots 49$. Точками позначені вузли, що відповідають значенню $\alpha_i = 20^\circ$, у цих положеннях колесо контактує з ґрунтом і відривається від нього. Ділянка між двома точками утворює робочу зону, в якій відбувається крокування (на графіку вона заштрихована).

Ця траєкторія отримана для довільних значень довжин ланок механізму: $AC = l_1 = 0.136$ м, $CB = l_2 = 0.514$ м, $AE = l_3 = 1.028$ м.

Якщо з графіка відняти умовне значення кута тиску 20° , можна визначити шуканий кут φ_{1_search} та область його положень:

$$\varphi_1 \in [2\pi - \varphi_{1_search}; \varphi_{1_search}],$$

де колесо перебуває в контакті з ґрунтом.

Оскільки траєкторія симетрична відносно вертикальної осі, довжина використаного кроку визначається за формулою: $S_{ш} = 2|X_D(0) - X_D(\varphi_{1_search})|$.

На основі цієї математичної моделі можна встановити параметри траєкторії для різних довжин ланок механізму. Для оптимізації рекомендується вибірка щонайменше 5-7 значень, оскільки менша кількість не дасть повного уявлення про типові траєкторії крокування.

					04.1.Б-25.00.00.00.000.ПЗ	Арк.
						54
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

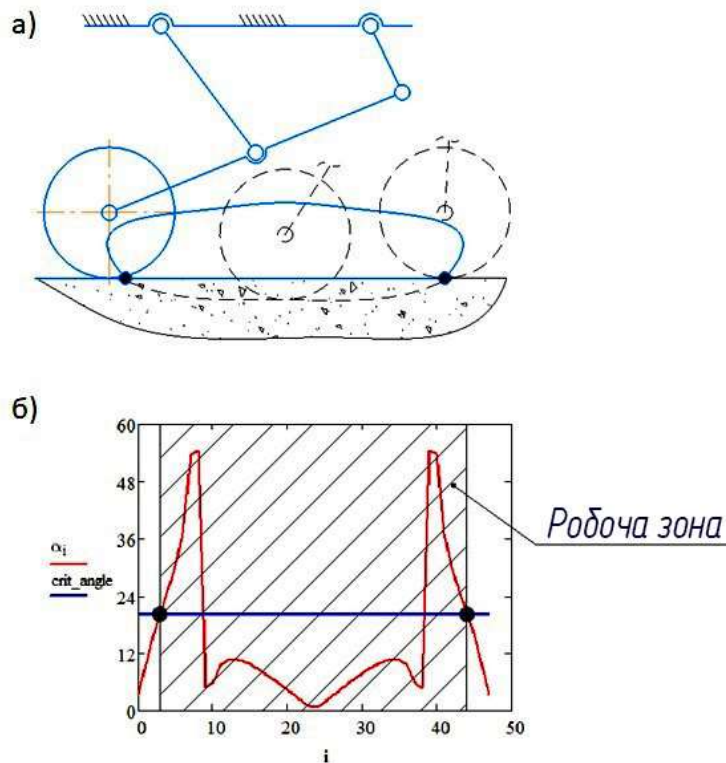


Рисунок 3.11 – Визначення ділянки кроку, що використовується: а) ділянка траєкторії, що використовується, щодо механізму крокування; б) залежність кута між дотичною до траєкторії крокування та горизонтом від положення кривошипу α_i – шуканий кут в i -тому положенні кривошипу, градус; crit_angle – позначення кута тиску 20°

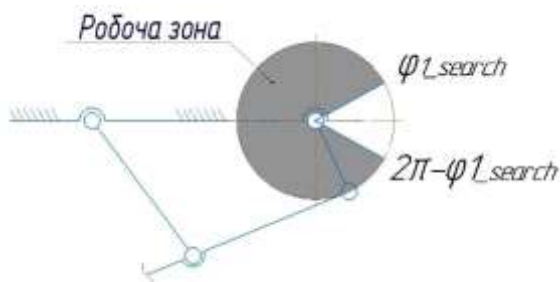


Рисунок 3.12 – Відношення області кроку, що використовується на траєкторії обертання кривошипа механізму крокування

Пропоновані варіанти:

Варіант №1:

$$AC = l1 = 0.2 \text{ м}, BE = l3 = 0.5 \text{ м}, AE = XAE = 0.4 \text{ м}.$$

Варіант №2:

$$AC = l_1 = 0.25 \text{ м}, BE = l_3 = 0.6 \text{ м}, AE = X_{AE} = 0.5 \text{ м}.$$

Варіант №3:

$$AC = l_1 = 0.148 \text{ м}, BE = l_3 = 0.318 \text{ м}, AE = X_{AE} = 0.421 \text{ м}.$$

Варіант №4:

$$AC = l_1 = 0.225 \text{ м}, BE = l_3 = 0.5 \text{ м}, AE = X_{AE} = 0.5 \text{ м}.$$

Варіант №5:

$$AC = l_1 = 0.136 \text{ м}, BE = l_3 = 0.514 \text{ м}, AE = X_{AE} = 0.3 \text{ м}.$$

За варіантами було побудовано траєкторії механізмів крокування. Після обговорення цих траєкторій з керівником ВКР було виведено два найбільш перспективні варіанти: 1 і 5. Додано контрольний варіант, що є середнім арифметичним цих варіантів.

Варіант №0:

$$AC = l_1 = \frac{0.2 + 0.136}{2} = 0.168 \text{ м}, CE = l_3 = \frac{0.5 + 0.514}{2} = 0.507 \text{ м},$$

$$AE = X_{AE} = \frac{0.4 + 0.3}{2} = 0.35 \text{ м}.$$

Отриманий набір траєкторій зображено на рис. 3.13. З поєднаного графіка видно, що більшість траєкторій приймають витягнуту форму, що сприятливо впливає процес крокування.

Щоб вибрати оптимальну траєкторію, потрібно скласти низку критеріїв. Для цього звернемося до теорії крокуючих механізмів. [2]

Шлях переміщення машини за один цикл S_M визначається з довжини кроку, що використовується $S_{ш}$:

$$S_M = S_{ш} \frac{n_0}{z_0} (1 - s_{ю})$$

де

$s_{ю} = 0.06$ – коефіцієнт юзу для кварцового піску;

$z_0 = 4$ – загальна кількість опор;

$n_0 = 3$ – максимальне постійне число опор.

ККД частини траєкторії крокування, що використовується:

					041.Б-25.00.00.00.000.ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		56

Складемо порівняльну таблицю за даними критеріями з інформацією про виконання чи невиконання умов критерію оптимізації (табл. 7).

Таблиця 3.1 – Умови критерію оптимізації

Критерій оцінки		Варіант, №					
		0	1	2	3	4	5
b	Вище середнього	Так	Так	Так	Ні	Ні	Так
η	Вище середнього	Так	Ні	Ні	Ні	Ні	Так
S_m	Вище середнього	Так	Так	Так	Ні	Ні	Так
h	Нижче середнього	Так	Так	Ні	Ні	Ні	Так
Рейтинг		4	3	2	0	0	4

З табл. 3.1 видно, що оптимальними є траєкторії 0 і 5, проте висота використовуваного кроку h у траєкторії 5 менше, а це означає, що механізм має менші габарити, тому вибираємо варіант 5:

$$AC = l_1 = 0.136 \text{ м}, CE = l_3 = 0.514 \text{ м}, AE = X_{AE} = 0.3 \text{ м}.$$

РОЗДІЛ 4

ОХОРОНА ПРАЦІ

4.1 Аналіз виробництва, безпеки праці та навколишнього середовища

Автоматичне управління активно використовується на складних та потенційно небезпечних виробництвах. Сучасні підприємства працюють у режимі майже повної автоматизації, де людське втручання мінімізоване. Оператор лише задає параметри виробничого процесу на старті та контролює справність обладнання. Автоматизовані системи управління забезпечують постійний моніторинг та точне регулювання ключових параметрів, таких як температура, тяга чи швидкість конвеєра, що гарантує стабільну якість продукції. Важливим аспектом є безпека експлуатації, особливо для обладнання, що працює на газі, оскільки людський фактор залишається ключовою причиною виробничих аварій.

Під час розробки промислових роботів та захисних механізмів для персоналу необхідно враховувати особливості конструкції, функціональність та алгоритми управління. Некоректно реалізована технологія може не лише не підвищити рівень безпеки, а й стати джерелом додаткових ризиків. Важливо також передбачити необхідність присутності обслуговуючого персоналу в робочій зоні роботизованих систем, оскільки їхні функції включають налаштування, програмування, технічне обслуговування та контроль автоматизованих процесів.

Оцінка безпеки роботизованих та автоматизованих виробництв має включати аналіз необхідності доступу обслуговуючого персоналу до робочого простору для програмування, обслуговування чи контролю. Важливим аспектом є ідентифікація шкідливих виробничих факторів та джерел їх виникнення, а також оцінка ризиків появи небезпечних ситуацій. Крім того, слід визначити основні методи захисту під час розробки промислових роботів та провести

					041.Б-25.00.00.00.000.ПЗ	Арк.
						59
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

комплексну оцінку безпеки, щоб підтвердити достатність застосованих засобів захисту для мінімізації ризиків.

Промислові роботи, що працюють у складних умовах, таких як підвищена запиленість, висока температура або наявність вибухонебезпечних сумішей, повинні мати відповідний рівень захисту. До заходів безпеки належать обмеження діапазону переміщення, аварійне та запобіжне відключення, знижена швидкість роботи та захисне блокування. Якщо конструкція виробництва не гарантує безпеку персоналу, необхідно встановити захисні огороження.

Пульти та органи управління мають відповідати вимогам нормативних документів, зокрема наказу № 62 щодо правил охорони праці при експлуатації вантажопідіймальних кранів та наказу № 67 про загальні вимоги до охорони праці. Вони повинні містити чітке маркування, що пояснює їхнє призначення, гарантувати безпомилковий вибір необхідного режиму та мати доступний орган аварійного відключення. Якщо виробництво може керуватися дистанційно, має бути передбачене перемикання на локальне керування.

Небезпечні ситуації можуть виникати через непередбачені рухи промислових роботів під час налагодження або ремонту, раптову відмову обладнання, ненавмисні дії оператора, доступ людини до робочого простору робота, порушення умов експлуатації або недотримання вимог ергономіки та безпеки. Найбільший ризик травмування виникає при прямому контакті людини з машиною під час перепрограмування, налагодження, ремонту, встановлення та зняття інструменту, монтажу, змащення або чищення обладнання. Працівники, такі як слюсарі-монтажники, збирачі, електротехніки, наладчики та майстри дільниць, піддаються найбільшій небезпеці під час виконання цих операцій.

4.2 План локалізації та ліквідації аварійних ситуацій в цеху

Під час роботи людина може опинитися в небезпечній зоні маніпулятора через відсутність захисних огорожень, сигнальних пристроїв або попереджувальних знаків. Це може бути наслідком порушення правил безпеки,

					041.Б-25.00.00.00.000.ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		60

технічної помилки або аварійної ситуації, що призводить до впливу небезпечних виробничих факторів. Будь-яка дія, що спричиняє потрапляння людини у цю зону, вважається небезпечною, адже вона виникає через відхилення від регламентованого режиму роботи обладнання, порушення норм охорони праці або правил експлуатації об'єктів.

У людино-машинних системах травми, аварії та катастрофи мають схожі механізми формування, тому їх можна описати за допомогою схем. Так, конструктивний недолік, наприклад, відсутність огороження, може спричинити потрапляння робітника в зону переміщення маніпулятора, що у свою чергу може призвести до аварійної ситуації, пов'язаної з зіткненням частин механізму або вантажу з людиною. Потік таких подій виглядає так:

відсутність огороження → потрапляння в небезпечну зону → небезпечна ситуація → аварія або травма.

Небезпечна умова або загроза може провокувати працівника до допущення помилки або іншої ризикованої дії, що спричиняє розвиток небезпечної ситуації.

В цьому випадку події розгортаються за схемою:

небезпечна умова → небезпечна дія → небезпечна ситуація → аварія або травма.

На виробництві бувають випадки, коли одна помилка оператора вимагає негайного реагування, а повторна помилка вже призводить до небезпечної ситуації. Потік подій може мати вигляд:

перша помилка → друга помилка → небезпечна ситуація → аварія або травма. Наприклад, якщо оператор перевищує вантажопідйомність маніпулятора, це може змінити траєкторію його руху, що своєю чергою спричиняє втрату стійкості механізму та падіння вантажу. У результаті можливе пошкодження обладнання або травмування оператора.

					041.Б-25.00.00.00.000.ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		61

4.3 Засоби захисту від ураження електричним струмом

Безпека автоматичних та автоматизованих виробничих процесів базується на принципі мінімізації ймовірності виникнення небезпечних ситуацій, які можуть призвести до нещасних випадків або інших небажаних явищ. Важливим аспектом є також економічна доцільність: оскільки абсолютна безпека недосяжна при сучасному рівні розвитку техніки, необхідно обирати такі технології, організаційні рішення та засоби захисту, які забезпечують необхідний рівень безпеки за мінімально можливих витрат.

Реалізація цих принципів передбачає застосування системного аналізу для виявлення небезпечних виробничих факторів та їх наслідків, оцінку рівня безпеки процесу, визначення кількісних показників безпеки для проєктованого або експлуатованого виробництва, а також забезпечення виконання встановлених вимог на всіх етапах проєктування та експлуатації.

Для захисту людини від небезпеки використовують два основні методи. Перший передбачає запобігання проникненню людини в небезпечну зону завдяки огорожувальним, блокуючим, попереджувальним і сигналізуючим пристроям. Другий метод зосереджений на застосуванні спеціальних захисних механізмів, які безпосередньо убезпечують людину від небезпеки, наприклад, систем дистанційного керування або автоматичного відключення джерел енергії у разі появи людини в робочій зоні.

Оцінка виробничих ризиків та аналіз причин травматизму при експлуатації автоматичних ліній допомагають запобігати повторенню помилок у проєктуванні нових виробництв та технологічних комплексів, сприяючи підвищенню загального рівня безпеки.

					041.Б-25.00.00.00.000.ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		62

ВИСНОВКИ ТА РЕКОМЕНДАЦІЇ

Експлуатація роботизованих платформ вимагає особливих інженерних рішень. Класичні надійні конструкції, що застосовуються, у складних умовах стають непридатними через надмірну масу та габарити, а також через специфічні фактори середовища.

У цій випускній роботі були розглянуті варіанти реалізації рухомих пристроїв роботизованих платформ, а також способи захисту мехатронних вузлів від впливу шкідливого середовища.

У процесі виконання дослідження деякі аспекти, пов'язані з браком інформації, були спрощені або зведені до базових випадків. Тому можливе подальше удосконалення як математичної моделі, так і конструкції рухомого механізму.

Щоб отримати точніші дані про особливості й недоліки конструкції, необхідно провести серію експериментальних досліджень тягово-зчіпних властивостей в складних умовах. Такі експерименти виконуються на стендах, що дозволяє підтвердити придатність розробленого механізму.

Варто зазначити, що частина досліджень і розрахунків у цій роботі були виконані з підвищеною точністю, що стало можливим завдяки накопиченому досвіду проектування, отриманому під час навчання. Цей досвід має відкритий характер, формуючи загальні тенденції у створенні механізмів, що працюють у складних умовах. Багато конструктивних рішень для сучасної техніки були запозичені з механізмів земних літальних апаратів.

					04.1.Б-25.00.00.00.000.ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		63

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Kuznetsov Yu.N. (2017). Challenges of the fourth industrial revolution "Industry 4.0" in front of scientists of Ukraine. Vestnik KhNTU, Kherson. 2(61), pp. 67–75.
2. Raju D.D., Jaju S.B. (2014). Developments in wall climbing robots: a review. International journal of engineering research and general science. 12 (2(3)), p. 37.
3. Кузнєцов Ю. М., Шибєцький В. Ю. Робототехнічні системи і комплекси для фармацевтичних біотехнологічних виробництв — К.: ТОВ «ГНОЗИС», 2012. — 335 с.
4. Крижанівський В.А., Кузнєцов Ю.М., Валявський І.А., Склярів Р.А. Технологічне обладнання з паралельною кінематикою: Під ред. Ю.М.Кузнєцова. — Кіровоград, 2004. — 449с.
5. Механізм Кланна [Електронний ресурс]. – Режим доступу: https://uk.wikipedia.org/wiki/%D0%9C%D0%B5%D1%85%D0%B0%D0%BD%D1%96%D0%B7%D0%BC_%D0%9A%D0%BB%D0%B0%D0%BD%D0%BD%D0%B0
6. Янсен Тео [Електронний ресурс]. – Режим доступу: https://ua.wikipedia.org/wiki/%D0%AF%D0%BD%D1%81%D0%B5%D0%BD_%D0%A2%D0%B5%D0%BE
7. ATHLETE [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://en.wikipedia.org/wiki/ATHLETE>
8. Ловейкін В. С., Ромасевич Ю. О. Динаміка машин. К.: ЦП „КОМПРИНТ”, 2013. 227 с.
9. Tin Lun Lam. Yangsheng Xu. Tree Climbing Robot: Design, Kinematics and Motion Planning. Springer Heidelberg New York, 2012.
10. Zhengyan Zhang, Dingfang Chen, Min Feng, Dynamics Model and Dynamic Simulation of Overhead Crane Load Swing Systems Based on the ADAMS //

									Арк.
									64
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата	041.Б-25.00.00.00.000.ПЗ				

9th International Conference on Computer-Aided Industrial Design and Conceptual Design. 2008. С. 484-487.

11.Робототехнічні системи та комплекси: мобільні роботи довільної орієнтації: підруч. для студ. спец. «Інформаційні системи та технології» / М. М. Поліщук, М. М. Ткач; КПІ ім. Ігоря Сікорського. – Електронні текстові дані (1 файл: 14,7 Мбайт). – Київ : КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2023. – 301 с.

					041.Б-25.00.00.00.000.ПЗ	Арк.
						65
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

ДОДАТКИ

