

**НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ БІОРЕСУРСІВ
І ПРИРОДОКОРИСТУВАННЯ УКРАЇНИ**

Факультет _____ **КОНСТРУЮВАННЯ ТА ДИЗАЙНУ** _____

ПОГОДЖЕНО

Декан факультету

_____ конструювання та дизайну _____
(назва факультету)

_____ Іван РОГОВСЬКИЙ _____
(підпис) (ПІБ)

“ _____ ” _____ 2026 р.

ДОПУСКАЄТЬСЯ ДО ЗАХИСТУ

Завідувач кафедри

_____ конструювання машин і обладнання _____
(назва кафедри)

_____ Вячеслав ЛОВЕЙКІН _____
(підпис) (ПІБ)

“ _____ ” _____ 2026 р.

МАГІСТЕРСЬКА КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА

на тему

**ОПТИМІЗАЦІЯ РЕЖИМУ ПЕРЕМІЩЕННЯ МОБІЛЬНОГО
ПОШУКОВО-РЯТУВАЛЬНОГО РОБОТА**

Спеціальність _____ 133 – Галузеве машинобудування _____
(код і назва)

Освітня програма _____ Машини та обладнання сільськогосподарського виробництва _____
(назва)

Орієнтація освітньої програми _____ освітньо-наукова _____
(освітньо-професійна або освітньо-наукова)

Гарант освітньої програми

_____ д.т.н, професор _____
(науковий ступінь та вчене звання) (підпис)

Вячеслав Сергійович ЛОВЕЙКІН
(ПІБ)

Керівник магістерської кваліфікаційної роботи

_____ д.т.н, професор _____
(науковий ступінь та вчене звання) (підпис)

Вячеслав Сергійович ЛОВЕЙКІН
(ПІБ)

_____ к.т.н., доцент _____
(науковий ступінь та вчене звання) (підпис)

Анастасія Петрівна ЛЯШКО
(ПІБ)

Виконав

(підпис)

Богдан Сергійович СТОПНІЮК
(ПІБ студента)

КИЇВ – 2026

НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ БІОРЕСУРСІВ І ПРИРОДОКОРИСТУВАННЯ УКРАЇНИ

Факультет _____ **КОНСТРУЮВАННЯ ТА ДИЗАЙНУ** _____

ЗАТВЕРДЖУЮ

Завідувач кафедри

конструювання машин і обладнання

д.т.н., професор _____ Вячеслав ЛОВЕЙКІН
(науковий ступінь, (підпис) (ПІБ)
вчене звання)

“17” грудня 2024 року

З А В Д А Н Н Я

ДО ВИКОНАННЯ МАГІСТЕРСЬКОЇ КВАЛІФІКАЦІЙНОЇ РОБОТИ СТУДЕНТУ

_____ **Стопнюку Богдану Сергійовичу** _____
(прізвище, ім'я, по батькові)

Спеціальність _____ 133 – Галузеве машинобудування _____
(код і назва)

Освітня програма _____ Машини та обладнання сільськогосподарського виробництва _____
(назва)

Орієнтація освітньої програми _____ освітньо-професійна _____
(освітньо-професійна або освітньо-наукова)

Тема магістерської кваліфікаційної роботи **ОПТИМІЗАЦІЯ РЕЖИМУ ПЕРЕМІЩЕННЯ
МОБІЛЬНОГО ПОШУКОВО-РЯТУВАЛЬНОГО РОБОТА**

затверджена наказом ректора НУБіП України від “16” грудня 2024 р. № 2268 «С»

Термін подання завершеної роботи на кафедру _____ 2026.05.18 _____
(рік, місяць, число)

Вихідні дані до магістерської кваліфікаційної роботи Технологічна схема мобільного
пошуково-рятувального робота, технічні параметри, умови експлуатації.

Перелік питань, що підлягають дослідженню:

1. Провести аналіз існуючих конструкцій мобільних пошуково-рятувальних
роботів та особливостей їх застосування в аварійно-рятувальних умовах.
2. Виконати розрахунок конструктивних параметрів мобільного пошуково-
рятувального робота з урахуванням умов пересування по складному рельєфу.
3. Провести динамічний аналіз руху мобільного пошуково-рятувального робота в
різних умовах експлуатації.
4. Оптимізувати режим переміщення мобільного пошуково-рятувального робота з
метою підвищення прохідності, маневреності та зниження енергоспоживання.
5. Розробити заходи з охорони праці.
6. Виконати розрахунок економічної ефективності.

Дата видачі завдання “17 грудня 2024 р.

**Керівник магістерської
кваліфікаційної роботи**

_____ Вячеслав Сергійович ЛОВЕЙКІН
(підпис) (прізвище та ініціали)

_____ Анастасія Петрівна ЛЯШКО
(підпис) (прізвище та ініціали)

Завдання прийняв до виконання

_____ Богдан Сергійович СТОПНЮК
(підпис) (прізвище та ініціали студента)

РЕФЕРАТ

Магістерська кваліфікаційна робота складається зі вступу, 6 розділів, загальних висновків, списку використаних джерел і викладена на 99 сторінках комп'ютерного тексту.

Метою магістерської кваліфікаційної роботи є розробка оптимізованої системи керування мобільним пошуково-рятувальним роботом та оптимізація режимів його руху в неструктурованому середовищі.

Для досягнення поставленої мети в магістерській кваліфікаційній роботі вирішені такі завдання:

1. Проведено аналіз сучасного стану та тенденцій розвитку мобільних робототехнічних систем, визначено вимоги до конструкції та функцій пошуково-рятувальних роботів (USAR).

2. Виконано кінематичний розрахунок приводу мобільного робота SGBot, обрано електродвигуни FAULHABER та планетарні редуктори, проведено розрахунок валів та шпонкових з'єднань на міцність.

3. Розроблено математичну модель руху мобільної платформи по похилій площині та проведено динамічний аналіз системи у середовищі Wolfram Mathematica.

4. Оптимізовано режим руху (пуску) мобільної платформи за критерієм мінімуму середньоквадратичного значення рушійного зусилля, що дозволило усунути коливання та зменшити динамічні перевантаження на 60%.

5. Розроблено заходи з охорони праці та техніки безпеки при експлуатації роботів під час аварійно-рятувальних робіт, враховуючи класифікацію небезпечних факторів.

6. Визначено економічну доцільність розробки, розраховано капітальні вкладення (18 300 \$), термін окупності (1,5–2 роки) та соціальний ефект від прискорення пошукових операцій.

Ключові слова: мобільний пошуково-рятувальний робот, TriSTAR, кінематичний розрахунок, динамічний аналіз, Wolfram Mathematica, оптимізація режиму руху, критерій, охорона праці, економічна ефективність.

ЗМІСТ

РЕФЕРАТ	4
ВСТУП	9
РОЗДІЛ 1. ОГЛЯД НАУКОВО-ТЕХНІЧНОЇ ЛІТЕРАТУРИ	11
1.1. Сучасний стан і тенденції розвитку мобільних робототехнічних систем.	11
1.2. Мобільні пошуково-рятувальні роботи: завдання, умови роботи та вимоги до конструкції	13
1.3. Типи ходових систем і способи переміщення мобільних роботів	19
1.4. Методи моделювання та оптимізації руху мобільних роботів	24
1.4.1. Кінематичний аналіз та опис структур	24
1.4.2. Динамічне моделювання на основі рівнянь Лагранжа.....	26
1.4.3. Оцінка стійкості та оптимізація траєкторії	27
1.4.4. Інтелектуальна оптимізація та згладжування шляху	29
1.5. Сенсорні системи та методи орієнтації в просторі	34
1.5.1. Візуальні системи та проблема орієнтації зображення.....	34
1.5.2. Дистанційні датчики та моделі сканування середовища	35
1.5.3. Сенсори моніторингу навколишнього середовища.....	35
1.5.4. Методи інтелектуальної обробки сенсорних даних	36
1.5.5. Інтерфейси користувача та візуалізація.....	36
1.6. Аналіз досліджень з оптимізації режиму руху пошуково-рятувальних роботів.....	37
1.6.1. Оптимізація інтелектуальних алгоритмів планування шляху	37
1.6.2. Оптимізація кінематичних параметрів та стабільності.....	38
1.6.3. Оптимізація ходи та енергоспоживання	39

1.6.4. Згладжування траєкторії для зменшення навантаження на приводи ..	39
1.6.5. Кооперативна оптимізація.....	39
1.7. Висновки до розділу.....	40
РОЗДІЛ 2. КІНЕМАТИЧНИЙ РОЗРАХУНОК ПРИВОДУ.....	43
2.1. Визначення потрібної потужності електродвигуна.....	43
2.2. Визначення меж кутової швидкості	43
2.3. Визначення параметрів на валах привода.....	45
2.4. Розрахунок вала за еквівалентним моментом	47
2.5. Вибір шпонок.....	48
РОЗДІЛ 3. МАТЕМАТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ РУХУ МОБІЛЬНОЇ ПЛАТФОРМИ ПОШУКОВОГО РОБОТА	51
3.1. Опис конструкції мобільної платформи	51
3.2. Кінематичний аналіз руху платформи	51
3.3. Визначення кінематичної енергії системи.....	53
3.4. Визначення потенційної енергії.....	55
3.5. Визначення узагальнену силу	56
3.6. Визначення сили опору.....	57
3.7. Визначення максимального кута нахилу платформи	58
3.8. Динамічний аналіз руху мобільної платформи.....	59
3.9. Побудова та аналіз в Wolfram Mathematica	61
РОЗДІЛ 4. ОПТИМІЗАЦІЯ РЕЖИМУ РУХУ МОБІЛЬНО – ПОШУКОВО РЯТУВАЛЬНОГО РОБОТА	69
4.1. Вибір критерію оптимізації режиму руху.....	69
4.2. Оптимізація режиму руху мобільної платформи робота	71

4.3. Результати оптимізації режиму.....	75
РОЗДІЛ 5. ОХОРОНА ПРАЦІ.....	81
5.1. Охорона праці та техніка безпеки при експлуатації мобільних пошуково – рятувальних робіт.....	81
5.2. Класифікація небезпечних факторів та роль робіт у їх мінімізації....	82
5.3. Охорона праці через оптимізацію часового фактора	83
5.4. Організаційні заходи безпеки під час АРР	85
5.5. Висновки до розділу.....	86
РОЗДІЛ 6. ЕКОНОМІЧНА ЕФЕКТИВНІСТЬ	88
6.1. Обґрунтування економічної доцільності розробки	88
6.2. Розрахунок капітальних вкладень (інвестицій).....	88
6.3. Розрахунок річних експлуатаційних витрат	93
6.3.1. Витрати на електроенергію	93
6.3.2. Амортизаційні відрахування.....	93
6.3.3. Витрати на поточний ремонт та технічне обслуговування	94
6.3.4. Витрати на оплату праці.....	94
6.4. Визначення економічного ефекту та показників ефективності	95
6.4.1. Річний економічний ефект	95
6.4.2. Термін окупності капітальних вкладень.....	95
6.4.3. Інші показники (коефіцієнт рентабельності)	96
6.5. Висновки до розділу.....	96
ВИСНОВКИ.....	99
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ.....	102
ДОДАТКИ.....	107

ВСТУП

Важливим завданням служб цивільного захисту є забезпечення ефективного та безпечного пошуку постраждалих в умовах техногенних та природних катастроф, зокрема в міських завалах. Тут необхідно використовувати високотехнологічні інтелектуальні рішення для дослідження небезпечних порожнин та замкнутих просторів, де перебування рятувальників або навчених собак пов'язане з екстремальним ризиком для життя. Перспективним напрямком у цій галузі є використання мобільних пошуково-рятувальних роботів (класу USAR), які забезпечують високу прохідність та дозволяють проводити дистанційну розвідку зон лиха без прямої участі людини. Збільшення масштабів урбанізації та ризиків виникнення надзвичайних ситуацій вимагає вдосконалення існуючих технологій локомоції та автономної навігації роботів. Одним із найбільш перспективних рішень є впровадження гібридних ходових систем, таких як блоки TriSTAR, та мультимодальних паралельних механізмів, які поєднують швидкість колісного руху з можливістю крокування через вертикальні перешкоди та сходи.

Метою магістерської кваліфікаційної роботи є розробка оптимізованої системи керування мобільним пошуково-рятувальним роботом та оптимізація режимів його руху в неструктурованому середовищі. При проведенні досліджень будуть розглянуті та проаналізовані різні типи ходових систем (колісні, гусеничні, крокуючі та гіпер-надлишкові) та встановлено їхні переваги і недоліки для роботи в зонах руйнувань. Значна увага буде направлена на процес оптимізації режиму роботи приводів та впровадження інтелектуальних алгоритмів планування шляху, таких як Dyna-Feature Q-Learning та адаптивні потенційні поля (A-APF).

В магістерській кваліфікаційній роботі значна увага буде приділена сучасним методам математичного моделювання на основі рівнянь Лагранжа другого роду та аналізу динамічної стійкості за принципом ZMP (Zero-Moment

Point). Для проведення розрахунків динамічного аналізу та оптимізації траєкторій руху будуть задіяні сучасні комп'ютерні програми, зокрема Wolfram Mathematica та Matlab/Simulink. Впровадження запропонованих методів розрахунку та алгоритмів нечіткого згладжування (Fuzzy Logic) дозволить суттєво підвищити автономність системи, на 60% зменшити різкі зміни кутових швидкостей, мінімізувати навантаження на приводи та підвищити загальну надійність роботи робота в екстремальних умовах.

РОЗДІЛ 1. ОГЛЯД НАУКОВО-ТЕХНІЧНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1.1. Сучасний стан і тенденції розвитку мобільних робототехнічних систем

Робототехніка на сучасному етапі переживає період бурхливого зростання, переходячи від суто академічних досліджень до масового практичного застосування. Цей перехід обумовлений якісним стрибком у розвитку сенсорних технологій, збільшенням обчислювальної потужності мікроконтролерів та вдосконаленням алгоритмів штучного інтелекту. За даними Міжнародної федерації робототехніки (IFR), лише у 2019 році на заводах у всьому світі працювало рекордне число промислових роботів - 2,7 мільйона одиниць, що на 12% більше, ніж у минулому році. Лідером галузі залишається Японія, що виробляє близько 47% усіх роботів у світі. Японія також є лідером за рівнем автоматизації самого виробництва роботів, де «роботи збирають роботів». Основними споживачами таких систем виступають електротехнічна промисловість (34%), автомобілебудування (32%) та металообробка (13%) [5,7].

Основною тенденцією розвитку є перехід до автономності. Якщо класичні системи вимагали жорсткого програмування кожної траєкторії, сучасні мобільні платформи здатні функціонувати в умовах невизначеності. Очікується, що до 2030 року в експлуатації буде знаходитися близько 345 мільйонів автономних роботів або систем, здатних до автономної поведінки, що у десять разів перевищує показники початку десятиліття [5,7].

Сучасні мобільні системи класифікуються за:

- способами управління: від ручних маніпуляторів та послідовних систем, що виконують жорстко задані кроки, до інтелектуальних роботів третього покоління; [7].
- типом руху: картезіанські, циліндричні, антропоморфні, а також спеціалізовані педикулярні (крокові) та гусеничні системи; [7].

- поколінням: ключовим критерієм тут є здатність сприймати зовнішнє середовище. Роботи першого покоління – це програмовані маніпулятори; другого - системи з сенсорним зворотним зв'язком; третього покоління - це інтелектуальні машини, здатні до самонавчання та прийняття рішень на основі П [7].

Найважливішим науковим вектором стає створення кооперативних робототехнічних систем, здатних до спільного виконання складних завдань, що підвищує надійність і швидкість операцій. На відміну від одиночних агентів групи роботів можуть використовувати децентралізовані або ієрархічні структури управління. Кооперація дозволяє розподіляти завдання пошуку в зонах лих, обмінюватися даними про знайдені цілі та оптимізувати енергоспоживання всієї групи [1].

Додатково у сучасній літературі виділяються такі ключові тенденції:

1. Мультимодальність та реконфігурованість: Розробка систем, здатних змінювати свою форму (shape-shifting) для адаптації до середовища. Прикладами є роботи PolyBot та SuperBot, які можуть перемикатися між режимами змієподібного ковзання, перекочування та крокування для подолання таких перешкод, як сходи або вузькі щілини [2,8].
2. Гіпер-надлишкові механізми (Hyper-redundant): Використання конструкцій, подібних до «слонового хоботу» (ETR) або змієподібних механізмів. Такі системи мають унікальну маневреність і здатні доставляти сенсори в місця, недоступні для звичайних мобільних платформ [8].
3. Інтелектуалізація навігації: Впровадження методів нечіткої логіки (Fuzzy Logic) та глибокого навчання (Deep Reinforcement Learning) для обходу динамічних перешкод у режимі реального часу. Сучасні контролери дозволяють роботу передбачати вектор швидкості перешкоди та коригувати траєкторію ще до виникнення ризику зіткнення [4].

4. Спеціалізація для екстремальних умов (USAR): Мобільні роботи все частіше розглядаються як заміна людині та пошуковим собакам у небезпечних зонах (завали після землетрусів, радіаційні аварії). Це диктує вимоги до створення міцних (rugged), герметичних конструкцій із можливістю телеприсутності та двостороннього голосового зв'язку з постраждалими [5,8].

Таким чином, розвиток мобільної робототехніки рухається шляхом ускладнення кінематики (гібридні системи «колесо-нога»), підвищення рівня автономного інтелекту та переходу до групових методів вирішення завдань у невідомих середовищах [1,3].

1.2. Мобільні пошуково-рятувальні роботи: завдання, умови роботи та вимоги до конструкції

Розробка мобільних роботів для пошуково-рятувальних операцій у міських умовах (Urban Search and Rescue - USAR) перестала бути суто академічним завданням після низки масштабних катастроф. Уроки, витягнуті із землетрусу в Мехіко (1985), вибуху в Оклахома-Сіті (1995) та атак на Світовий торговий центр (ВТЦ) 11 вересня 2001 року, показали критичну необхідність роботизованих помічників. Так, під час землетрусу в Мехіко загинуло 135 рятувальників, з яких 65 людей опинилися в пастці в замкнутих просторах під час пошуку тих, хто вижив. Події 11 вересня стали першим зафіксованим випадком масштабного застосування роботів, коли вони використовувалися для дослідження недоступних порожнеч завалів, передаючи відеоінформацію в реальному часі із середовища, надто небезпечного для людей та навчених собак [5,8].

Основні завдання пошуково-рятувальних роботів

Завдання, що покладаються на сучасні USAR-системи, виходять за рамки простого візуального огляду та включають:

- Пошук та виявлення потерпілих: Використання відеокамер та тепловізорів для локалізації людей під уламками [5,6].

- Картування та розпізнавання зони лиха: Створення еталонних карток зруйнованого середовища для координації дій рятувальних команд [6,9].
- Інспекція структурної цілісності: Оцінка стану уламків та конструкцій будівель для запобігання ризикам повторного обвалення [6,9].
- Медична оцінка та життєзабезпечення: Забезпечення голосового зв'язку між лікарями та постраждалими для попередньої діагностики. Також розглядається можливість доставки води, медикаментів та рідин через вузькі трубки протягом перших годин після катастрофи. [5,9].
- Детектування небезпечних факторів: Виявлення витоків газу та шкідливих хімічних речовин за допомогою інтегрованих сенсорів [5,6].
- Телеприсутність: Виконання ролі «очей та вух» для членів команди, які знаходяться поза небезпечною зоною [6].



а) NIFTi



б) Toshiba Scorpion



в) Talon



г) Kohga3



г) Scout Recon



д) Snake

Рис. 1.1 Пошуково-рятувальні роботи

Умови роботи та специфіка середовища

Середовище, в якому функціонують пошуково-рятувальні роботи, характеризується як екстремально ворожа і неструктурована. Вона включає завали з бетону та арматури, вузькі щілини, затоплені підвали, задимлені простори та зони з ризиком вибуху газу. Типові сценарії включають роботу всередині будівель, де роботи повинні проникати крізь тріщини і труби, недоступні для людини. Подібні умови вимагають від роботів здатності переміщатися пересіченою місцевістю (off-road), долати сходи та завали ґравію, що імітують будівельне сміття [6,8,9].



а)



б)



в)



г)

Рис. 1.2 Експериментальний зразок успішно проходить перешкоду.



а)



б)



в)



г)

Рис. 1.3 Зображення з відкритих випробувань експериментального прототипу на різних поверхнях для пересування.

Вимоги до конструкції та архітектури систем

Досвід роботи в реальних зонах лих (таких як Фукусіма або землетруси в Італії) дозволив сформулювати жорсткі вимоги до конструкції USAR-роботів:

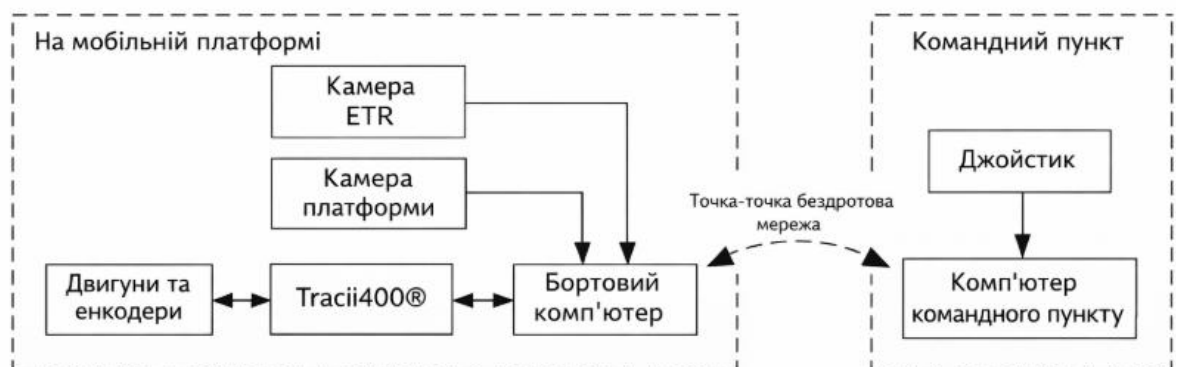
1. Габарити і мобільність: Робот повинен мати мінімальний діаметр огинаючої, щоб проходити у вузькі щілини, і при цьому мати високий крутний момент. Ідеальними вважаються системи, які можна транспортувати у звичайному рюкзаку (наприклад, розмірами 400x380x180 мм або 300x300x120 мм) [8,9].
2. Живучість та захист: Конструкція повинна бути міцною (rugged) та герметичною, щоб унеможливити блокування механізмів брудом, брудною водою або пилом [8].
3. Здатність до самовідновлення (перевертання): Критично важливою є вимога продовження руху після перекидання (overturning). У деяких

моделях для цього використовується спеціальний хвіст, що допомагає структурі перевернутися при зіткненні з перешкодою [5,6].

4. Маневреність: Використання гібридних систем, таких як TriSTAR (колеса на трьох плечах), дозволяє роботам автоматично перемикатися з режиму кочення в режим крокування для підйому сходами [3,9].
5. Сенсорна інтеграція та зв'язок: Роботи оснащуються системою відеокамер (фронтальних, тилових та поворотних), тепловізорами для пошуку людей у темряві, а також датчиками газу (наприклад, MQ-9) та температури. Для керування використовується бездротовий зв'язок (Bluetooth/Wi-Fi) з дальністю до 400 метрів на відкритій місцевості [5].

Наочним прикладом реалізації цих вимог є концепція робота «слоновий хобот» (elephant-trunk like robot - ETR), встановленого на мобільній базі. Така надмірна кінематична структура дозволяє доставляти камеру в місця, недоступні для колісної бази. Інший приклад - чотириколісний робот з низьким профілем шасі, що не перевищує висоту коліс, що гарантує роботу в перевернутому стані. [5,6,8].

Порівняння різних рятувальних платформ, таких як NIFTi, Scorpion та Talon, представлено на рис. 1.1 Пошуково-рятувальні роботи.

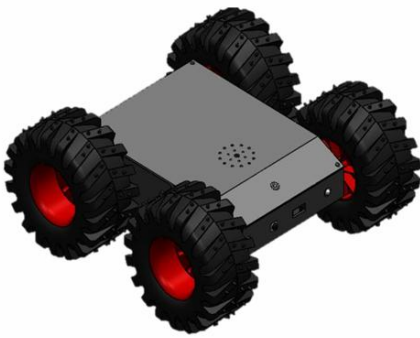


а) Блок-схема робота

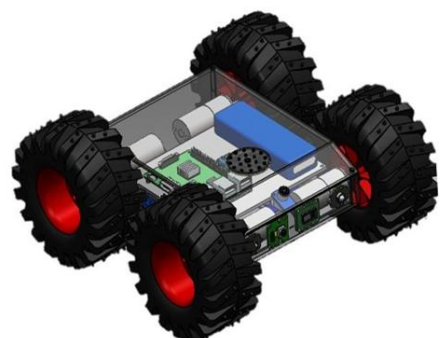


б) Пошуковий робот (ETR)

Рис. 1.4 Концепційний робот «слоновий хобот»



а) Механічне проєктування системи



б) Електротехнічне проєктування



в) Інтерфейс користувача

Рис. 1.5 Чотириколісний робот

Таким чином, конструкція пошуково-рятувального робота повинна бути компромісом між компактністю для проникнення в завали та достатньою потужністю для подолання перешкод, за обов'язкової наявності розвиненої системи телеприсутності та сенсорів навколишнього середовища [5,8].

1.3. Типи ходових систем і способи переміщення мобільних роботів

Вибір ходової системи є визначальним чинником ефективності мобільного робота за умов пошуково-рятувальних операцій (USAR). Сучасні дослідження виділяють кілька основних класів систем переміщення, кожен з яких адаптований до специфічних типів перешкод та характеристик середовища. У загальному випадку ходові системи класифікують на колісні, гусеничні, крокуючі (пекулярні), повзаючі (змієподібні), стрибаючі та гібридні див. рис. 1.6 класифікація ходових систем роботів [7].



а) Відстежувальні роботи



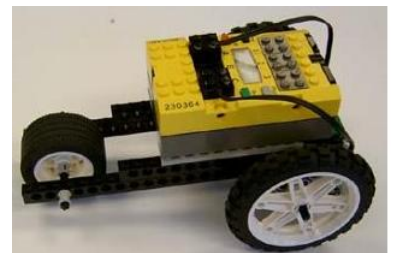
б) Крокові роботи



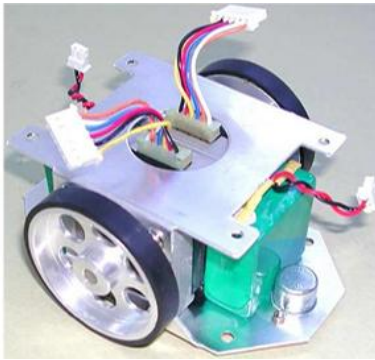
в) Стрибаючий робот



г) Робот маніпуляторного типу



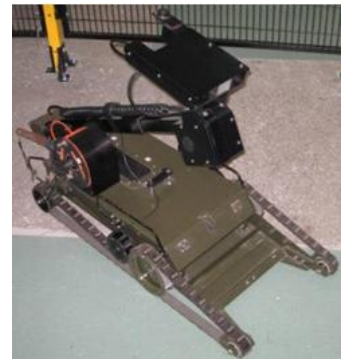
Робот г) Робот ACURA RCX 10



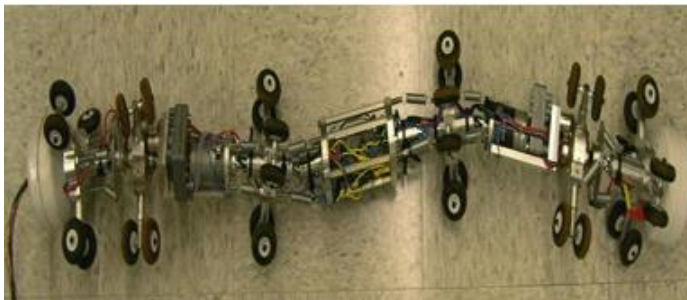
д) Міні-робот AIRAT 2



е) CYCLOPS MK 3C



є) ROBOTINO



ж) Повзаючий робот

Рис. 1.6 Класифікація ходових систем роботів

Колісні та гусеничні системи

Традиційні колісні та гусеничні платформи залишаються найбільш поширеними завдяки своїй простоті та високій швидкості на відносно рівних поверхнях. Гусеничні роботи, такі як NIFTi, Scorpion і Talon, мають велику площу контакту, що забезпечує відмінну тягу на сипучих поверхнях і при подоланні уламків див. рис. 1.1 пошуково-рятувальні роботи. Однак такі системи часто мають обмежену маневреність у вузьких проходах та значні габарити [5].

Як альтернатива для роботи в завалах застосовуються малогабаритні чотириколісні системи з повним приводом (4WD). Особливістю таких конструкцій є низький профіль шасі, який не перевищує висоту коліс, що дозволяє роботу продовжувати рух навіть після перекидання (upside down) див. рис. 1.5 чотириколісний робот [5].

Крокуючі (пекулярні) системи

Крокуючі роботи, такі як біпедальні (двоногі), квадрупедальні (чотириногі) і гексаподи (шестіногі), мають чудову прохідність на вкрай пересіченій місцевості. Гексаподи, наприклад, міні-робот HEXI, використовують шість ідентичних ніг, артикулованих на платформі, що забезпечує високу статичну стабільність (мінімум три точки опори завжди в контакті з ґрунтом). Головною перевагою таких систем є високий кліренс, що дозволяє переступати через перешкоди, порівняні з довжиною кінцівок, та мінімальне пошкодження поверхні переміщення див. рис. 1.6 класифікація ходових систем роботів [7].

Гіпер-надлишкові та змієподібні механізми

Для інспекції вузьких щілин, труб і порожнин під завалами застосовуються механізми, що імітують рух змій або хоботів слона (Elephant Trunk Robot - ETR) див. рис. 1.4 концепційний робот «слоновий хобот» Ці системи класифікуються як гіпер-надлишкові маніпулятори, що мають велику кількість ступенів свободи [8].

- Модульні змієподібні роботи (наприклад, розробки CMU або PolyBot) можуть змінювати конфігурацію залежно від завдання.
- Система ETR на мобільній базі поєднує маневреність колісного шасі та здатність «хобота» проникати у важкодоступні зони. Використання послідовно з'єднаних універсальних шарнірів (U-joints), що наводяться в дію лінійними актуаторами, дозволяє конструкції згинатися з малим радіусом кривизни.

Гібридні ходові системи

Найбільш перспективним напрямом для USAR є створення гібридних систем, що поєднують переваги коліс (швидкість та енергоефективність) та ніг (прохідність). Однією з найефективніших реалізацій є система TriSTAR. Вона складається з трьох плечей, розташованих під кутом 120° , кінцях яких встановлені колеса [9].

- На рівній поверхні робот переміщається в режимі кочення, використовуючи колеса.
- При зустрічі з перешкодою (наприклад, сходами або великим уламком) вся конструкція TriSTAR починає обертатися навколо центральної осі, переходячи в режим крокування. Дослідження показують, що такі системи можуть успішно долати сходові марші та нерівності, що значно перевищують радіус окремого колеса.

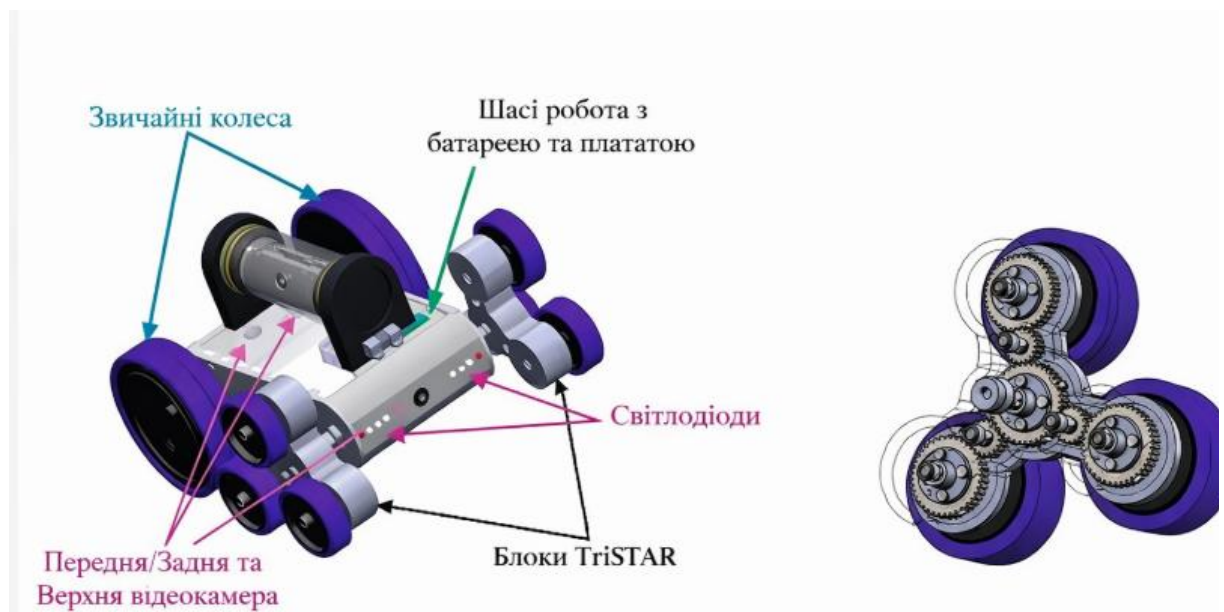


Рис. 1.7. 3D-модель другого конструктивного рішення та структура локомотивного агрегату TriStar.

Мультимодальні паралельні механізми

Новим словом у локомоції стали мультимодальні паралельні механізми з урахуванням плоских 4R-систем. Такі роботи здатні вільно перемикатися між різними режимами руху [2].

1. Ковзання (Sliding): прямолінійний рух за рахунок послідовного переміщення лівої та правої «стоп».
2. Поворот (Turning): здійснюється з допомогою диференціального приводу діагонально розташованих двигунів.

3. Кочення (Rolling): при синхронному обертанні двох 4R-систем робот перекочується через межі свого корпусу, що дозволяє долати вертикальні перешкоди.

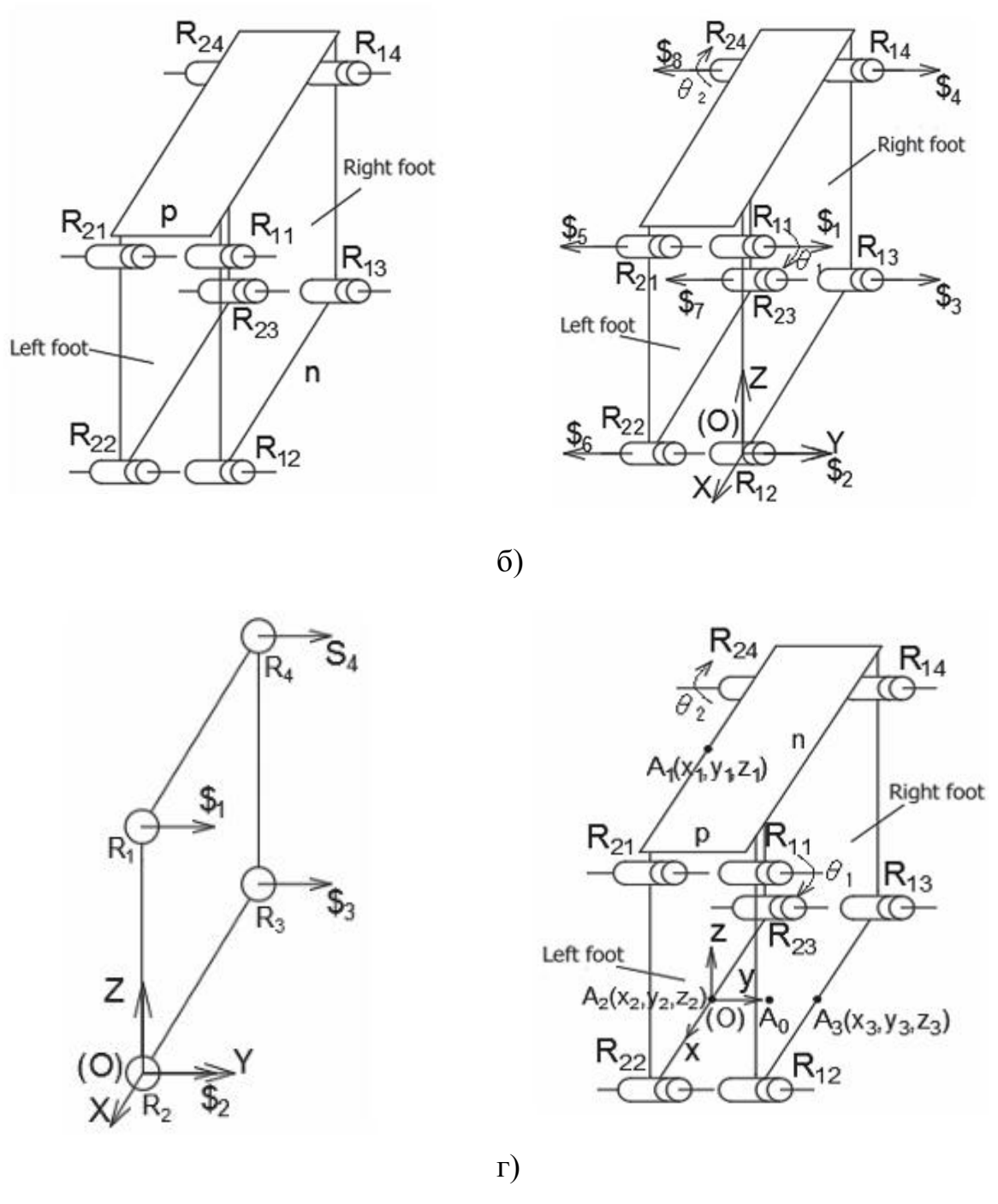


Рис. 1.7 Багаторежимний мобільний паралельний механізм: схема (а), ступені свободи (б) та режими ковзання (в) і кочення (г).

Додатково підвищення прохідності в конструкцію роботів вводять допоміжні елементи, такі як активні «хвости». При зустрічі з перешкодою хвіст, жорстко закріплений на корпусі, служить опорою, дозволяючи всій конструкції перекотитися через перешкоду. Це рішення значно знижує ризик застрягання робота в неструктурованому середовищі завалів [6].



Рис. 1.8 Перший прототип робота під час експериментів.

1.4. Методи моделювання та оптимізації руху мобільних роботів

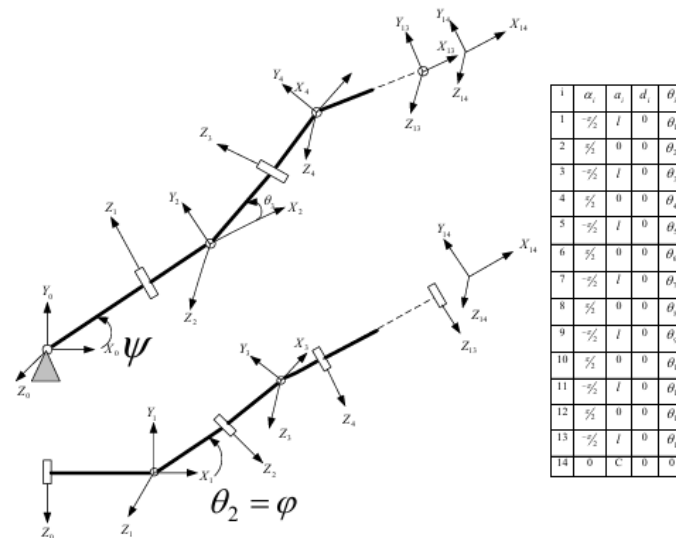
Математичне моделювання є критично важливим етапом проєктування пошуково-рятувальних роботів, оскільки воно дозволяє передбачити поведінку системи у непередбачуваних умовах завалів та оптимізувати конструктивні параметри для досягнення максимальної прохідності та стійкості.

1.4.1. Кінематичний аналіз та опис структур

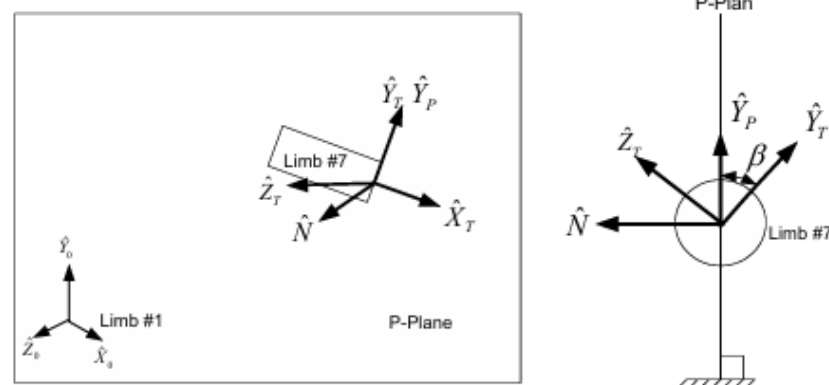
Для опису руху складних механізмів, таких як гіпер-надлишкові маніпулятори або паралельні роботи, в сучасній літературі переважають методи Денавіта-Хартенберга (DH) та теорія гвинтів (screw theory).

У разі роботи типу «слоновий хобот» (ETR), кінематична модель будується на основі послідовності однотипних модулів. Для системи, представленої в джерелах, використовується скелетна модель, де кожен суглоб має два ступені свободи (bending і orienting). Матриця перетворення Т пов'язує світову систему

координат (WCF) із інструментальною системою (TCF), встановленою на камері. Це дозволяє вирішувати завдання орієнтації зображення: алгоритм обчислює кут повороту на основі миттєвої конфігурації робота, щоб вертикальні лінії реального світу завжди залишалися вертикальними на моніторі оператора див. рис. 1.9 кінематичний скелет ETR з параметрами DH, система координат інструменту та візуальні дані камери при повороті [8].



a)



б)



в)

Рис. 1.9. Кінематичний скелет ETR з параметрами DH (а), система координат інструменту (б) та візуальні дані камери при повороті (в).

Для паралельних механізмів, таких як 4R-системи, використовується аналіз ступенів свободи (DOF) через кінематичні гвинти. Це дозволяє визначити мобільність системи у різних режимах: наприклад, у режимі ковзання (sliding mode) механізм має 2 DOF (обертання навколо осі Y і переміщення вздовж X), а режимі кочення (rolling mode) - лише 1 DOF див. рис. 1.7 багаторежимний мобільний паралельний механізм [2].

1.4.2. Динамічне моделювання на основі рівнянь Лагранжа

Для опису динаміки гібридних систем (наприклад, TriSTAR) найбільш ефективним визнано метод рівнянь Лагранжа другого роду, який пов'язує кінетичну (K) та потенційну (P) енергію системи з узагальненими силами [3].

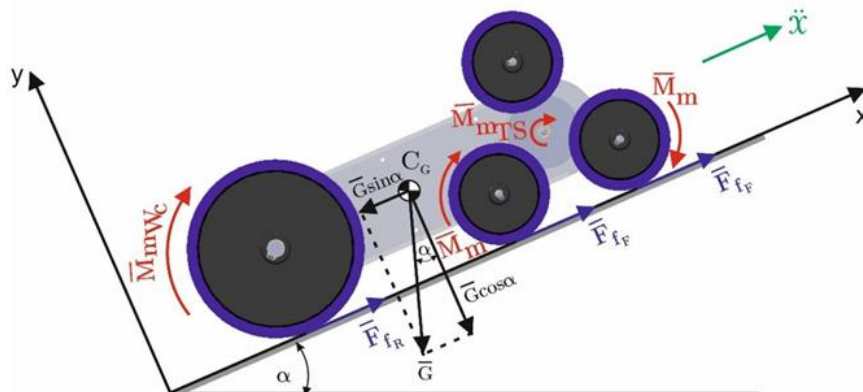


Рис. 1.10 Рух робота по кутовій площині з кутом α

На рисунку 1.10 введено такі позначення:

F_{fF} — сили тертя для коліс установок TriSTAR,

F_{fR} — сили тертя звичайних коліс на задній стороні робота,

M_{mTS} — крутний момент осі локомотивного агрегату TriSTAR,

M_m — крутний момент коліс локомотивного агрегату TriSTAR,

M_{mw_c} — крутний момент звичайних коліс,

G — сила ваги робота,

$\ddot{x}$ — лінійне прискорення мобільного робота.

Повна кінетична енергія такого робота включає:

1. Трансляційну енергію шасі (m_C).
2. Енергію руху блоків TriSTAR (m_{TS}).
3. Енергію обертання всіх коліс з урахуванням їх моментів інерції (I_w) та кутових швидкостей (w_w).

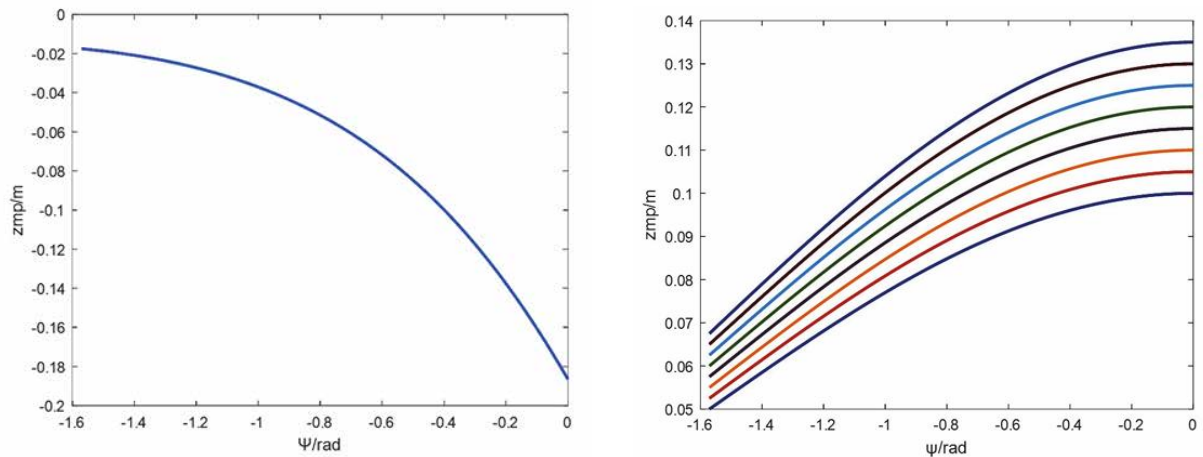
При аналізі руху по похилій площині (під кутом α) потенційна енергія визначається сумарною масою робота та висотою підйому центру тяжіння. Узагальнена сила Q' обчислюється через принцип віртуальних переміщень, враховуючи моменти двигунів, що крутять, і сили тертя кочення (sF , sR) для кожного колеса, що знаходиться у контакті з поверхнею (рис. 3 та 4 у джерелі). Такий підхід дозволяє точно розрахувати необхідний крутний момент для подолання перешкод певної висоти [3].

1.4.3. Оцінка стійкості та оптимізація траєкторії

Ключовим показником надійності мобільного робота є динамічна стійкість, яка часто оцінюється за принципом ZMP (Zero-Moment Point — точка нульового моменту). Відповідно до цього принципу, робот зберігає рівновагу, якщо точка ZMP перебуває у сфері підтримки [2].

Дослідження показують, що:

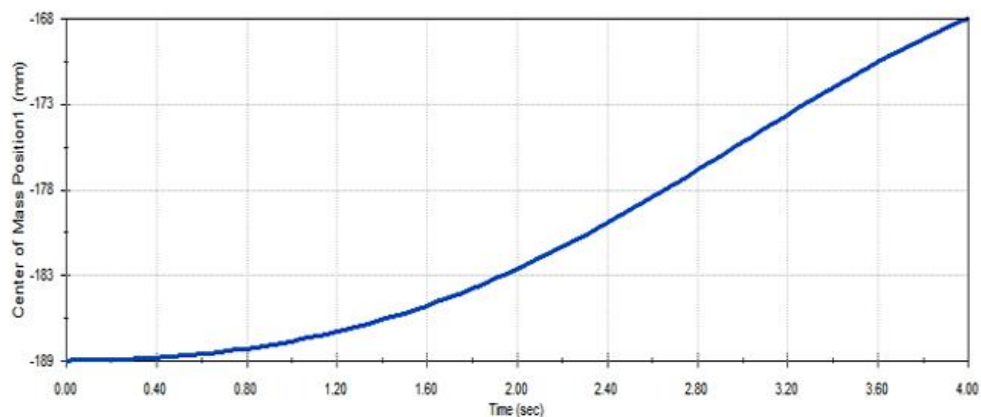
Для паралельних механізмів стійкість обернено пропорційна довжині важелів (n) і куту повороту. Оптимізація серед MSC ADAMS підтверджує негативну кореляцію між довжиною стрижнів і стабільністю при кочення див. рис. 1.11 [2].



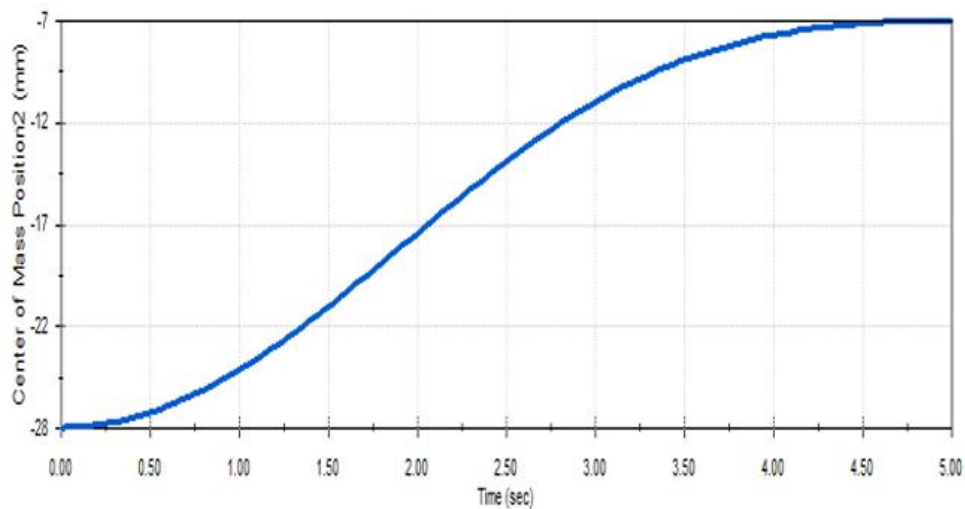
а) $n = 0.1\text{м}$, $\omega = 10\text{рад/с}$ та $\alpha = 100\text{ рад/с}^2$ б) $n = 0.1-0.2\text{ м}$, $\omega = 0\text{ рад/с}$ та $\alpha = 0\text{ рад/с}^2$

Рис. 1.11 Траєкторії руху ЗМП при зміні кута Ψ за різних кінематичних параметрів (n , ω , α).

Для крокуючих гексаподів (HEXI) стійкість аналізується через зміну положення центру мас (COG). Моделювання SolidWorks і Mathcad дозволило визначити оптимальний режим ходи (підйом ноги на 60° , частота 0.1 Гц), у якому центр тяжкості стабілізується протягом 4-5 секунд див. рис. 1.12 [7].



а) Позиція 1



б) Позиція 2

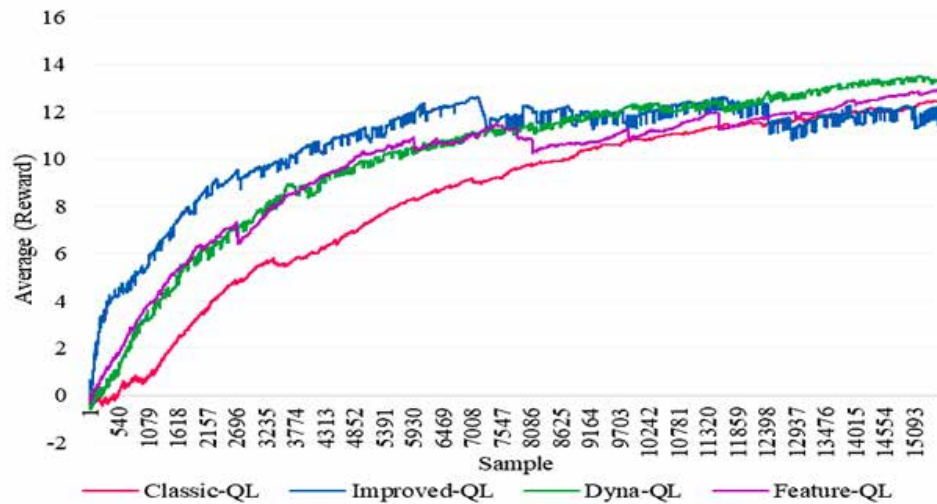
Рис. 1. 12 Результати моделювання положення центру мас для різних позицій.

У колісних системах для USAR критично важлива здатність працювати у перевернутому стані. Оптимізація геометрії шасі (висота корпусу менша за радіус коліс) гарантує безперервність виконання місії при перекиданні див. рис. 1.5 чотириколісний робот [5].

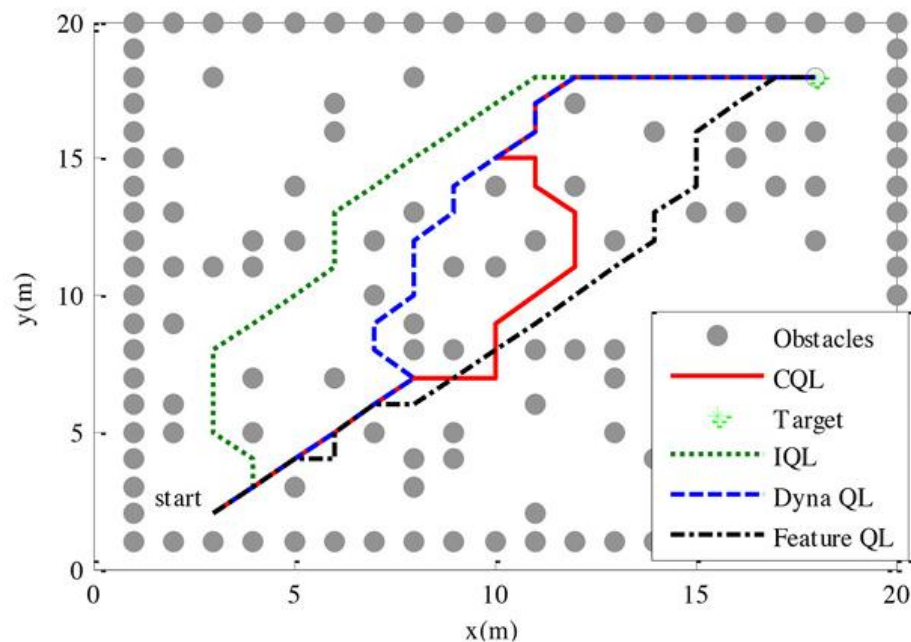
1.4.4. Інтелектуальна оптимізація та згладжування шляху

Для навігації в невідомих динамічних середовищах застосовуються методи машинного навчання та нечіткої логіки:

1. Dyna-Feature Q-Learning: Удосконалений алгоритм навчання з підкріпленням, який використовує матрицю ознак (feature matrix). Це дозволяє роботу узагальнювати досвід: якщо зіткнення відбулося в одному стані, робот автоматично коригує ваги для всіх схожих небезпечних станів, що прискорює збіжність алгоритму в рази див. рис. 1.13 [1].



a)



б)

Рис. 1.13. Конвергенція алгоритмів CQL, Dyna-QL, Feature-QL та IQL (а) і порівняння якості планування шляху (б).

- Адаптивні потенційні поля (А-APF): Метод використовується для планування найкоротшого шляху. Для вирішення проблеми локальних мінімумів (застрягання) запроваджується концепція віртуальної перешкоди, параметри якої коригуються методом MIT (Model Reference

Adaptive System). Це змушує робота «минати» тупикові зони див рис.1.14 [1].

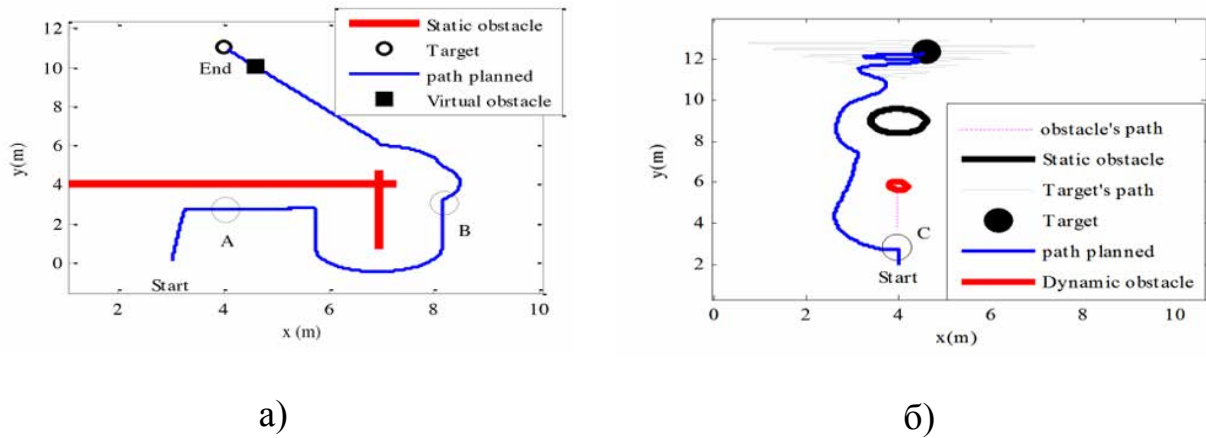
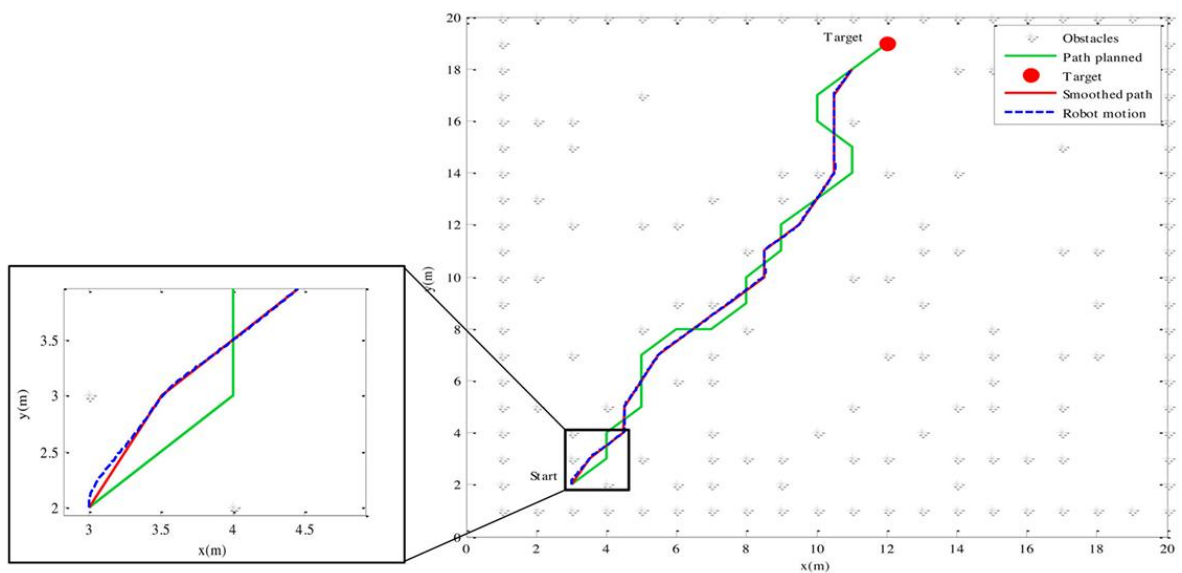
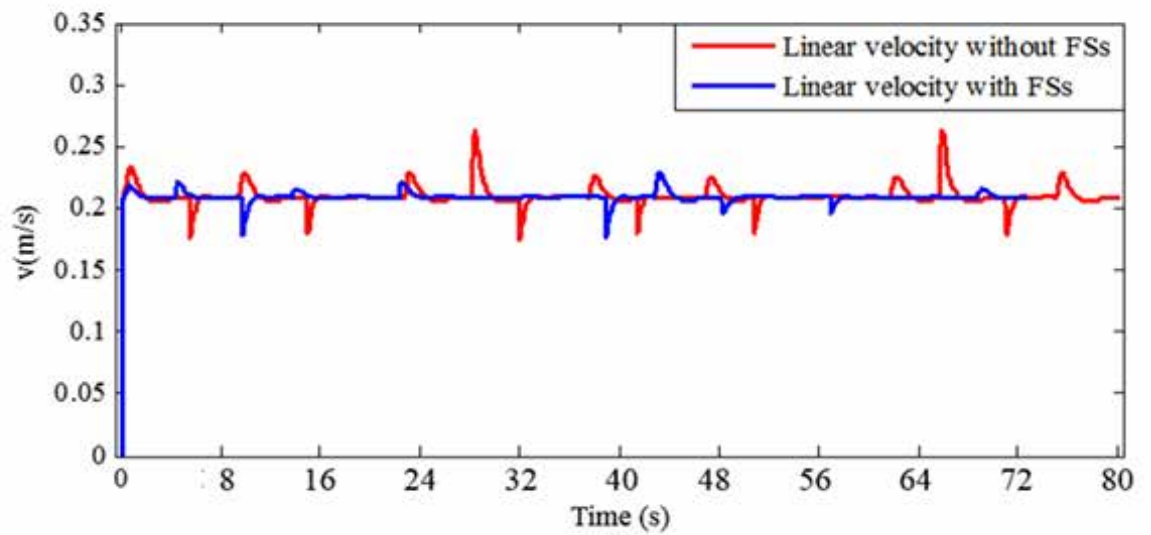


Рис. 1.14 Планування шляху методом A-APF у невідомому середовищі: у статичному середовищі з локальними мінімумами (А, В) (а) та в динамічному середовищі з локальним мінімумом і рухомою ціллю (С) (б).

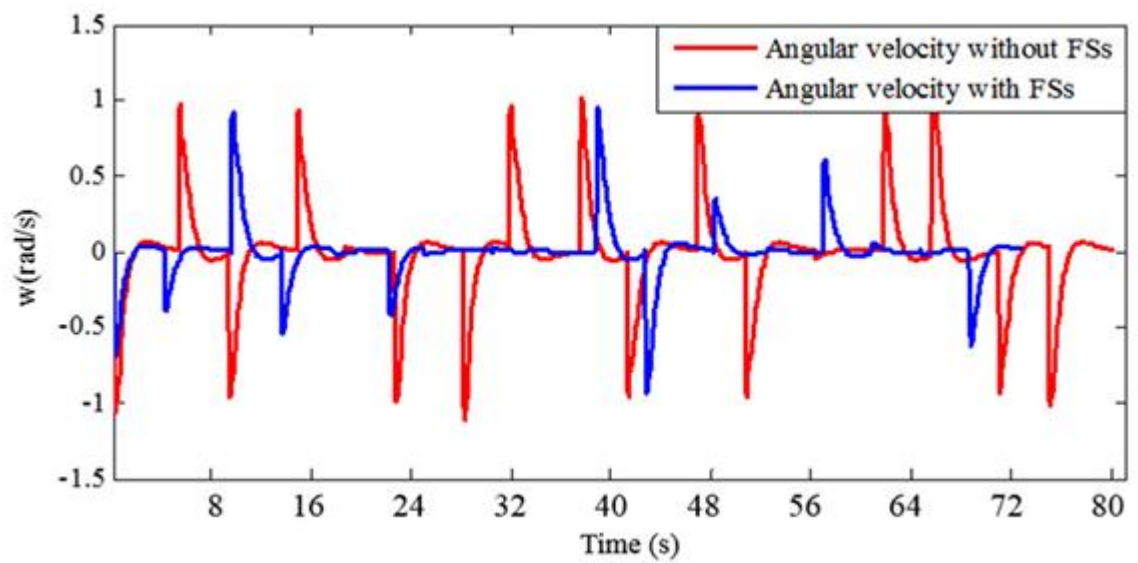
3. Нечітке згладжування: Після генерації траєкторії алгоритмом планування системи нечіткої логіки (Fuzzy Logic) використовуються для усунення різких кутів («зубчастих» країв). Це знижує кутові прискорення та споживання енергії двигунами див рис. 1.15 [1].



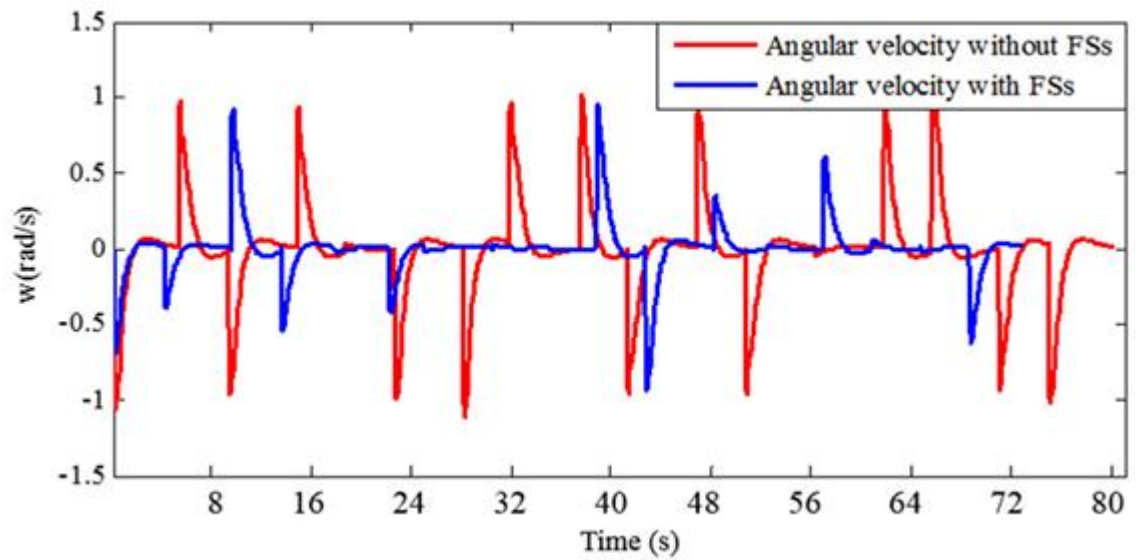
а) Планування шляху за запропонованим методом з нечіткими системами та без них



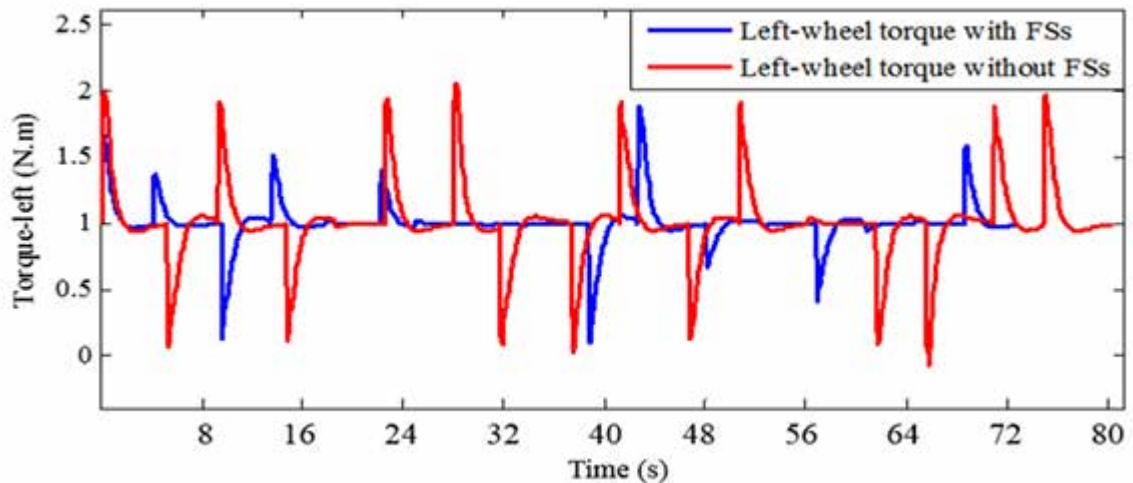
б) Лінійна швидкість робота.



в) Кутова швидкість робота



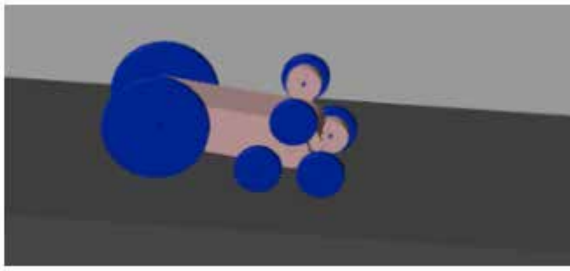
г) Крутний момент правого колеса робота.



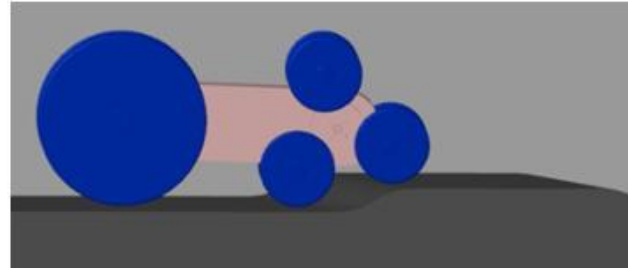
г) Крутний момент лівого колеса робота

Рис. 1.15 Результати планування шляху робота за запропонованим методом із використанням нечітких систем та без них, а також його кінематичні й динамічні характеристики (лінійна та кутова швидкості, крутні моменти коліс).

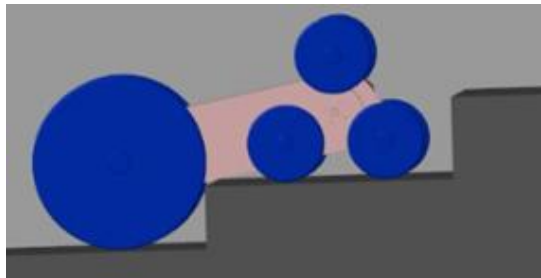
Використання програмних середовищ Matlab/Simulink із пакетом Simscape Multibody дозволяє проводити комплексну верифікацію всіх описаних моделей у 3D-просторі, імітуючи сходи та нерівний ландшафт див рис. 1.16 [9].



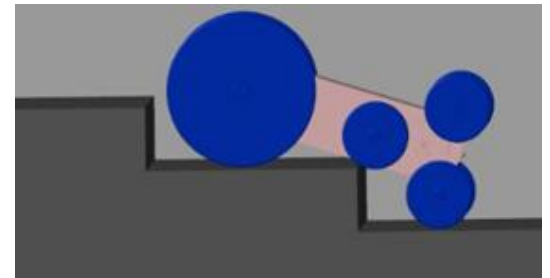
а) Рівна поверхня для пересування



б) Нерівна місцевість



в) Процес підйому сходами



г) Процес спуску сходами

Рис 1.16 Моделювання процесу руху запропонованого мобільного робота для пошуку та рятування.

1.5. Сенсорні системи та методи орієнтації в просторі

Орієнтація мобільного робота в невідомій середовищі, використання сенсорів для виявлення перешкод та зв'язок із віддаленим комп'ютером є критичними аспектами при проектуванні пошуково-рятувальних систем. Без сенсорів робот здатний виконувати лише заздалегідь встановлені завдання, тоді як оснащення інтелектуальною сенсорною мережею дозволяє йому адаптуватися до динамічних змін, уникати зіткнень зі стаціонарними та рухомими об'єктами, а також планувати оптимальну траєкторію руху [7].

1.5.1. Візуальні системи та проблема орієнтації зображення

Візуальне сприйняття є основним джерелом інформації для оператора. Роботи USAR зазвичай оснащуються набором камер: фронтальною, тиловою та камерами на маніпуляторах. Важливою особливістю систем з гіпернадлишковими механізмами, такими як «слонячий хобот» (ETR), є те, що камера може перебувати в довільній орієнтації в просторі залежно від конфігурації

з'єднань. Це створює значні труднощі для оператора при інтерпретації зображення (наприклад, важко визначити, де верх, а де низ) [3,8].

Для вирішення цієї проблеми розроблено алгоритми онлайн-ротації зображення на основі параметрів Денавіта-Хартенберга (DH). Алгоритм обчислює кут β на основі миттєвої конфігурації робота, що дозволяє повертати картинку так, щоб вертикальні лінії реального світу залишалися вертикальними на моніторі (див. рис. 8 та 9 у джерелі). Крім звичайних камер, критично важливим є використання тепловізорів (IR Thermal Camera), які дозволяють виявляти потерпілих за тепловим слідом навіть у повній темряві чи задимленому просторі [5,8].

1.5.2. Дистанційні датчики та моделі сканування середовища

Для автономного уникнення перешкод найчастіше використовуються ультразвукові датчики, які вимірюють відстань до об'єктів у напрямку руху. У сучасних дослідженнях пропонується модель сенсора, що складається з чотирьох концентричних кіл з радіусами від 0.2 м до 0.8 м (див. рис. 3 у джерелі) [4,5]

Така багат шарова структура дозволяє роботу:

1. Отримувати точні уявлення про відстань до перешкоди.
2. Мати достатньо години для прийняття рішення про зміну курсу.
3. Визначати точний вектор швидкості динамічних перешкод.

Для розширення зони сканування простору навколо робота ділиться на квадранті (передній, задній, лівий, правий), що дозволяє інтелектуальній системі оцінювати щільність перешкод у кожному напрямку [4].

1.5.3. Сенсори моніторингу навколишнього середовища

Пошуково-рятувальні роботи виконують функцію «очей і вух» рятувальників у зонах, де перебування людини є небезпечним. Для цього вони оснащуються спеціалізованими датчиками [3,6].

- Газові сенсори (напр. MQ-9, MQ-2): використовують для виявлення витоків чадного газу (CO) та горючих речовин, що є критичним для запобігання вибухам [5].
- Датчики температури та вологості (напр. DHT11, LM-35): забезпечують дані про умови середовища під завалами [3,5].
- Акустичні системи: мікрофони та динаміки забезпечують двосторонній голосовий зв'язок між оператором/лікарем та потерпілим для оцінки його стану та надання психологічної підтримки [5].
- Сенсори положення (10DOF LSM303D): вимірюють кут нахилу, орієнтацію за компасом та прискорення по трьох осях, що необхідно для стабілізації руху на нерівному ландшафті [5].

1.5.4. Методи інтелектуальної обробки сенсорних даних

Отримані дані обробляються за допомогою методів штучного інтелекту, зокрема нечіткої логіки (Fuzzy Logic). Багатошарова модель прийняття рішень на основі нечіткої логіки використовує шість вхідних змінних: відстань до статичних та динамічних перешкод зліва, справа та попереду. Вихідною змінною системи є рівень ризику (Risk) зі значеннями від «дуже низький» до «дуже високий» [4].

Якщо обчислений ризик перевищує поріг (наприклад, 76%), робот автоматично змінює траєкторію на безпечнішу, навіть якщо це вимагає відхилення від найкоротшого шляху до цілі. Це дозволяє надійно проходити вузькі тунелі та уникати «засток» у лабіринтах завалів [4].

1.5.5. Інтерфейси користувача та візуалізація

Для ефективного управління розробляються графічні інтерфейси (GUI), наприклад у середовищі Matlab App Designer або спеціалізовані додатки для Android. Такий інтерфейс дозволяє оператору в реальному часі побачити відеопотоки зі всіх камер, контролювати освітлення, стежити за рівнем заряду

батареї та показниками датчиків газу та температури. Це забезпечує повний контроль за ситуацією в зоні лиха без безпосередньої присутності людини [5,6,9].

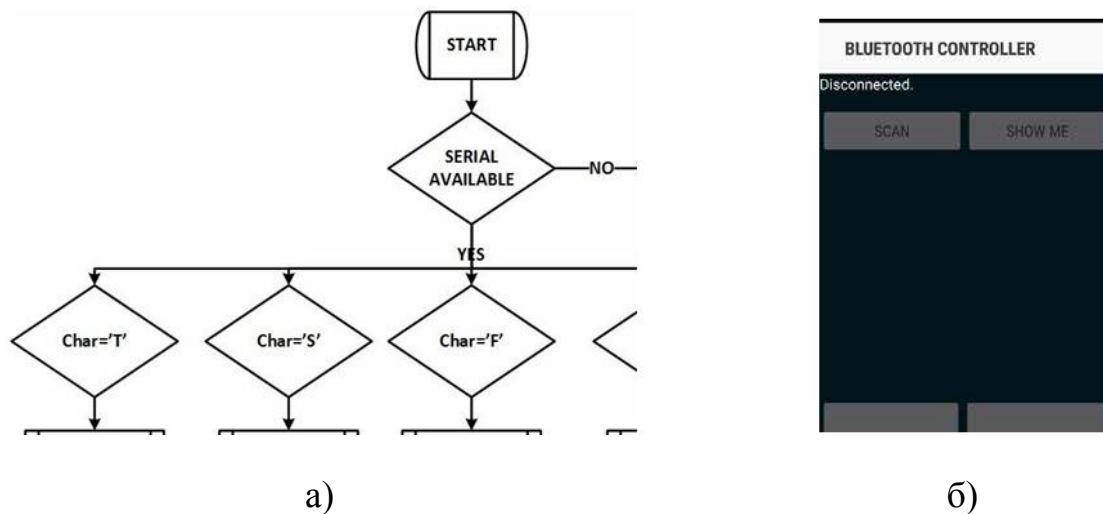


Рис. 1.17 Логічна схема основної програми (а) та інтерфейс Android-додатка (б).

1.6. Аналіз досліджень з оптимізації режиму руху пошуково-рятувальних роботів

Оптимізація режиму руху є критичним аспектом проєктування пошуково-рятувальних (USAR) роботів, оскільки від неї залежить не лише швидкість виконання місії, а й енергоефективність, стабільність платформи та здатність досягати цілі в умовах повної невизначеності. Сучасні дослідження фокусуються на трьох основних напрямках: оптимізації алгоритмів планування шляху, покращенні стабільності кінематичних структур та оптимізації параметрів локомоції (ходи) [1].

1.6.1. Оптимізація інтелектуальних алгоритмів планування шляху

Одним із найперспективніших методів є використання навчання з підкріпленням (Reinforcement Learning). Проте класичне Q-навчання (CQL) має суттєвий недолік - повільну збіжність, що веде до великої кількості зіткнень на етапі навчання [1].

У дослідженнях пропонується удосконалений метод Dyna-Feature Q-Learning, який базується на впровадженні «матриці ознак» (feature matrix). Цей підхід дозволяє роботу узагальнювати досвід: якщо зіткнення відбулося в одному стані, система автоматично оновлює значення для всіх схожих станів, що мають спільні ознаки (наприклад, перешкоду попереду). Це дозволяє значно прискорити навчання та зменшити кількість помилкових рішень. Порівняльні графіки збіжності показують, що такий метод досягає оптимального результату в кілька разів швидше за класичні алгоритми [1].

Паралельно досліджується оптимізація методу штучних потенційних полів (APF). Головна проблема – застрягання у локальних мінімумах – вирішується шляхом впровадження адаптивних потенційних полів (A-APF). У цих моделях параметри віртуальних перешкод динамічно коригуються за допомогою методу MIT (Model Reference Adaptive System). Це гарантує, що робот зможе вийти з тупикових зон (наприклад, Г-подібних завалів), підбираючи такий угол відштовхування, який спрямує його в обхід перешкоди [1].

1.6.2. Оптимізація кінематичних параметрів та стабільності

Для мобільних паралельних механізмів та гібридних систем критично важливою є мінімізація ризику перекидання. Оптимізація проводитиметься за критерієм ZMP (Zero-Moment Point). Дослідження показують, що стабільність робота безпосередньо залежить від тривалості важелів (стержнів) та кутів повороту: [2].

- Виявлено негативну кореляцію між довжиною стрижня n та стабільністю: чим довші «ноги» механізму, тим швидше точка ZMP виходить за межі області підтримки при прискоренні див рис. 1.7 [2].
- Графіки траєкторії ZMP підтверджують, що для забезпечення максимальної стійкості в режимі кочення необхідно вибирати мінімально можливу довжину ланок та обмежувати кутове прискорення див. рис. 1.11 [2].

1.6.3. Оптимізація ходи та енергоспоживання

Для крокуючих роботів, таких як гексапод HEXI, оптимізація полягає у виборі такого режиму руху, при якому центр мас (COG) стабілізується найшвидше. Результати моделювання в середовищах SolidWorks та Mathcad дозволили встановити оптимальні параметри: [7].

- Амплітуда підйому ноги: 60 градусів.
- Частота кроку: 0.1 Гц. Такі налаштування забезпечують стабілізацію центру ваги протягом приблизно 4 секунд, що є оптимальним для збереження плавності руху на нерівному ландшафті. Це наочно продемонстровано на графіках стабілізації центру мас див. рис. 1.12 [7].

1.6.4. Згладжування траєкторії для зменшення навантаження на приводи

Окремим напрямком досліджень є оптимізація вже побудованого шляху для усунення «зубчастих» країв, що виникають при дискретному плануванні. Використання нечітких систем (Fuzzy Systems) дозволяє згладити кут повороту. Оптимізація за допомогою нечіткої логіки дозволяє: [1].

1. Зменшити різкі зміни кутів на 60% (з 405° до 152.5° для типового маршруту) [1].
2. Мінімізувати стрибки крутного моменту на двигунах, що продовжує термін служби механічних передач та заощаджує заряд батареї (див. порівняння швидкостей та моментів на рис. 1.15 [1].

1.6.5. Кооперативна оптимізація

У разі використання групи роботів (децентралізована структура) оптимізація досягається через обмін даними про «ймовірні цілі». Якщо один робот ідентифікує потерпілого або вільний прохід, він передає координати групі, що дозволяє іншим учасникам уникати зайвої перевірки вже досліджених зон та

рухатися до мети за найкоротшою траєкторією. Це дозволяє виконувати завдання у 2-3 рази швидше порівняно з роботою окремих агентів [1].

Таким чином, аналіз сучасних досліджень свідчить про перехід від простого копіювання біологічних прототипів до глибокої математичної оптимізації режимів руху, що поєднує в собі динамічну стабільність, інтелектуальну навігацію та енергоефективність.

1.7. Висновки до розділу

Аналіз сучасного стану галузі свідчить про стрімкий перехід від теоретичних досліджень до масового практичного застосування мобільних роботів, кількість яких, за прогнозами, сягне 345 мільйонів одиниць до 2030 року. Основним науковим та технологічним вектором розвитку є забезпечення повної автономності та створення кооперативних робототехнічних систем, здатних виконувати складні завдання в умовах невизначеності.

Досліджено, що для пошуково-рятувальних операцій (USAR) у міських умовах критично важливим є використання роботів із гібридними ходовими системами (наприклад, блоки TriSTAR), які поєднують енергоефективність коліс на рівних поверхнях із прохідністю крокуючих механізмів при подоланні сходів та завалів.

Математичне моделювання таких систем базується на рівняннях Лагранжа другого роду та аналізі точки нульового моменту (ZMP) для забезпечення динамічної стійкості,. Встановлено, що інтелектуалізація навігації через методи Dyna-Feature Q-Learning та адаптивні потенційні поля (A-APF) дозволяє суттєво скоротити час навчання та гарантувати уникнення локальних мінімумів (тупикових зон) у невідомому середовищі.

Використання нечіткої логіки (Fuzzy Logic) для згладжування траєкторії дозволяє на 60% зменшити різкі зміни кутів, що критично для збереження ресурсу приводів та стабільності зображення з камер.

Попри значну кількість розробок у сфері USAR-роботів, аналіз джерел виявив низку аспектів, що потребують подальшого вивчення:

- Оптимізація енергоспоживання та ефективності руху: Більшість досліджень зосереджені на стабільності (ZMP), тоді як питання максимізації ККД та тривалості роботи в умовах мультимодального руху (перемикання між коченням та крокуванням) залишаються відкритими.
- Механічна адаптивність: Існуючі конструкції часто мають обмеження у роботі на нестабільних поверхнях (гравій, уламки) через відсутність ефективних систем підвіски та амортизації у гібридних агрегатах,.
- Інтелектуальне розпізнавання: Потребують вдосконалення алгоритми автономного виявлення постраждалих за допомогою обробки зображень у реальному часі безпосередньо «на борту» робота

Метою подальшого дослідження є підвищення ефективності та автономності мобільної пошуково-рятувальної системи шляхом оптимізації її кінематичної структури та розробки інтелектуальних алгоритмів стабілізації руху.

Для досягнення поставленої мети необхідно вирішити такі завдання:

1. Розробити повну динамічну модель робота з гібридною системою TriSTAR, враховуючи сили тертя та моменти інерції під час руху по похилих площинах.
2. Спроекувати алгоритм автономного управління, що інтегрує нечітке згладжування траєкторії для мінімізації крутних моментів на двигунах,.

3. Провести серію чисельних експериментів у середовищі Matlab/Simulink (Simscape Multibody) для верифікації прохідності робота через вертикальні перешкоди та сходи.
4. Вдосконалити інтерфейс оператора для онлайн-моніторингу небезпечних факторів середовища (газ, температура) та автоматичної корекції орієнтації відеосигналу.

РОЗДІЛ 2. КІНЕМАТИЧНИЙ РОЗРАХУНОК ПРИВОДУ

Метою даного розділу є проєктування привода для мобільного рятувального робота SGBot, який призначений для автономного пошуку та рятування в умовах міських катастроф. Робот оснащений гусеничним рушієм із трикутними колесами, що дозволяє йому долати складні перешкоди. Привод здійснюється за допомогою чотирьох електродвигунів FAULHABER, два з яких керують швидкістю лівої та правої гусениць, а ще два - обертанням трикутних рам для подолання перешкод. Для розрахунку розглядається основний приводний потік потужності на гусеничний каток. Кінематична схема привода SGBot включає електродвигун, який через жорстку муфту або безпосереднє з'єднання передає крутний момент на вхід планетарного редуктора. Вихідний вал редуктора через шпонкове з'єднання приводить у рух ведучий шків гусениці

2.1. Визначення потрібної потужності електродвигуна

Потрібна потужність електродвигуна ($P_{\text{дв.п}}$) визначається з урахуванням втрат у вузлах передачі. Згідно з апаратною специфікацією, для SGBot використовуються прецизійні планетарні редуктори Series 38A.

Загальний ККД привода ($\eta_{\text{заг}}$) розраховується за формулою:

$$\eta_{\text{заг}} = \eta_{\text{муфти}} \times \eta_{\text{план.ред}}$$

де: $\eta_{\text{муфти}} = 0.985$ – ККД компенсуючої муфти;

$\eta_{\text{план.ред}} = 0.90$ – ККД двоступеневого планетарного редуктора.

Тоді, $\eta_{\text{заг}} = 0.985 \times 0.90 = 0.8865 \approx 0.89$

Виходячи з маси робота 45 кг та необхідної тяги, потужність на робочому валу гусениці прийнята $P_{\text{в}} = 0.18$ кВт. Потрібна потужність двигуна становить:

$$P_{\text{дв.п}} = \frac{P_{\text{в}}}{\eta_{\text{заг}}} = \frac{0.18}{0.89} = 0.202 \text{ кВт} = 202 \text{ Вт}$$

2.2. Визначення меж кутової швидкості

Згідно з технічними характеристиками, планетарні редуктори SGBot мають передаточне число $U_{ред} = 45:1$. При типовій кутовій швидкості ведучого вала $\omega_в = 7.5$ рад/с (що відповідає швидкості руху $\sim 0,8$ м/с), межі кутової швидкості вала двигуна повинні складати:

$$\omega_{дв.min...max} = \omega_в \times U_{ред} = 7.5 \times 45 = 337.5 \text{ рад/с}$$

Вибір конкретної моделі електродвигуна ґрунтується на необхідності забезпечення високої маневреності та здатності робота SGBot долати складні перешкоди в умовах зруйнованих міських об'єктів. Згідно з технічною специфікацією апаратної частини, для привода гусеничних модулів обрано двигуни постійного струму компанії FAULHABER, модель 3890H024CR. Ці двигуни інтегровані в загальну систему керування роботом через інтелектуальні контролери руху MC5010SCO, які дозволяють працювати як у режимі контролю швидкості, так і в режимі позиціонування. Для забезпечення точності руху та коректної роботи алгоритмів SLAM (одночасна локалізація та побудова карти), кожен двигун оснащений прецизійним інкрементальним енкодером IE3-1024L із роздільною здатністю 1024 лінії на оберт



Рис.2.1 Двигун постійного струму FAULHABER 3890H024CR

Його номінальні параметри за даними виробника:

- Номінальна потужність: $P_{ном} = 0.21$ кВт;
- Номінальна частота обертання: $n = 3300$ об/хв;
- Номінальна напруга живлення: 24 В.

Знайдемо кутову швидкість двигуна:

$$\omega_{\text{дв.н}} = \frac{n \times \pi}{30} = \frac{3300 \times 3.14}{30} = 345.4 \text{ рад/с}$$

Визначаємо показник недовантаження двигуна:

$$\Delta = \frac{P_{\text{ном.}} - P_{\text{дв.п.}}}{P_{\text{ном.}}} \times 100\% = \frac{0.21 - 0.202}{0.21} \times 100\% = 3.8\%$$

Оскільки відхилення номінальної потужності від розрахункової не перевищує 10%, двигун FAULHABER 3890H024CR обрано правильно. Він забезпечує необхідний крутний момент для руху платформи масою 45 кг та має достатній резерв надійності для роботи в екстремальних умовах.

2.3. Визначення параметрів на валах привода

На основі обраного електродвигуна FAULHABER 3890H024CR та прийнятої кінематичної схеми (двигун - планетарний редуктор - ведуче колесо), проведемо розрахунок параметрів для двох основних валів привода одного борта (І Потік). Розрахунок виконується за номінальними режимами роботи для забезпечення стабільного пересування платформи масою 45 кг.

Вал І (Вал двигуна)

Вал І є безпосереднім вихідним валом електродвигуна. Його параметри визначаються за розрахованою потрібною потужністю та номінальними характеристиками обраного привода. Потужність на валу приймається рівною потрібній потужності електродвигуна, що забезпечує рух одного борта робота.

$$P_{I(1)} = P_{\text{дв.п}} = 0.202 \text{ кВт.}$$

Кутова швидкість вала відповідає розрахованій номінальній кутовій швидкості обраного двигуна FAULHABER при частоті 3300 об/хв.

$$\omega_{I(1)} = \omega_{\text{дв.н}} = 345.4 \text{ рад/с.}$$

Крутний момент на валу розраховується на основі переданої потужності та швидкості обертання за стандартною формулою:

$$T_{I(1)} = 10^3 \times \left(\frac{P_{I(1)}}{\omega_{I(1)}} \right) = 10^3 \times \left(\frac{0.202}{345.4} \right) = 0.585 \text{ Нм.}$$

Отримане значення крутного моменту на першому валу є вихідним для подальшого розрахунку планетарного редуктора **Series 38A**, який повинен трансформувати цей момент для забезпечення тяги гусеничного модуля. Враховуючи високу роздільну здатність енкодера **IE3-1024L**, ці параметри вала дозволяють контролеру **MC5010SCO** підтримувати прецизійну точність обертання навіть при мінімальних швидкостях.

Вал II (Вихідний вал редуктора)

$$P_{II(2)} = P_{I(1)} \times \eta_{\text{заг}} = 0.202 \times 0.89 = 0.179 \approx 0.18 \text{ кВт}$$

$$\omega_{II(2)} = \frac{\omega_{\text{дв.н}}}{U_{\text{ред.}}} = \frac{345.4}{45} = 7.67 \text{ рад/с.}$$

$$T_{II(2)} = 10^3 \times \left(\frac{P_{II(2)}}{\omega_{II(2)}} \right) = 10^3 \times \left(\frac{0.18}{7.67} \right) = 23.47 \text{ Нм.}$$

Також розрахуємо муфту яка використовується в приводі. Для SGBot розрахунок ведеться для вузла з'єднання вихідного вала планетарного редуктора **Planetary Gearhead 38A**



Рис.2.2 Планетарний редуктор Planetary Gearhead 38A

Муфта обирається за розрахунковим крутним моментом T_M , який повинен бути меншим за допустимий $[T]$. Діаметр вихідного вала редуктора $d_v = 15\text{мм}$,

крутний момент на валу $T_{II(2)} = 23.47$ Нм, коефіцієнт режиму роботи $K=1.5$. Використаємо формулу для розрахунку:

$$T_M = T_{II(2)} \times K = 23.47 \times 1.5 = 35.205 \text{ Нм}$$

Згідно зі стандартом, найближча за характеристиками муфта має номінальний крутний момент $[T] = 63$ Нм. Умова міцності виконується $35.205 \leq 63$ Нм. Отже муфта обрана вірно.

Також виконаємо розрахунок вала на міцність. Цей розрахунок перевіряє міцність вихідного вала SGBot з урахуванням згинання від натягу гусениць та кручення від двигуна FAULHABER 3890H024CR.

2.4. Розрахунок вала за еквівалентним моментом

Визначимо допустимі напруження σ_p . Матеріал вала Сталь 40, межа витривалості $\sigma_{-1} = 275$ МПа, коефіцієнт запасу $n = 3.5$. Для розрахунку використаємо формулу:

$$\sigma_p = \frac{\sigma_{-1}}{n} = \frac{275}{3.5} = 78.57 \text{ МПа.}$$

Приймемо, що згинаюче навантаження в небезпечному перерізі складає приблизно 15 Нм. Тоді визначимо еквівантний момент $M_{\text{екв}}$. Цей показник об'єднує всі сили, що діють на вал. Він розраховується за формулою:

$$M_{\text{екв}} = \sqrt{M_{\text{сум}}^2 + 0.75 \times T^2} = \sqrt{15^2 + 0.75 \times 23.47^2} = \sqrt{638.13} \approx 25.26 \text{ Нм.}$$

Далі визначимо діаметр вала розрахунковим методом. Мінімально допустимий діаметр вала, що забезпечує міцність конструкції, розраховується за формулою:

$$d_B = 10 \times \sqrt[3]{\frac{32 \times M_{\text{екв}}}{\pi \times \sigma_p}}$$

де: $M_{\text{екв}}$ – еквівалентний момент, σ_p – допустиме напруження.

$$d_b = 10 \times \sqrt[3]{\frac{32 \times 25.26}{3.14 \times 78.57}} = 10 \times \sqrt[3]{\frac{808.32}{246.71}} = 10 \times 1.485 = 14.85 \text{ мм}$$

Розрахунковий діаметр вала становить 14,85 мм. Враховуючи, що стандартний вал редуктора Series 38A має діаметр 15 мм, конструкція має достатній запас міцності для експлуатації в умовах пошуково-рятувальних операцій.

2.5. Вибір шпонок

Далі виконаємо розрахунки для вибору шпонки. Шпонки призначені для передачі крутного моменту від вихідного вала планетарного редуктора до ведучого катка гусеничного модуля. Для SGBot використовуємо призматичні шпонки за ГОСТ 23360-78.

Діаметр валу $d_b = 15$ мм – вал редуктора Series 38A, крутний момент на валу $T_{II} = 23.47$ Нм.

Розміри шпонки для $d = 15$ мм становить: ширина $b = 5$ мм, висота $h = 5$ мм, глибина паза вала $t_1 = 3$ мм, довжина $l = 20$ мм.

Робоча довжина шпонки (l_p): $l_p = l - b = 20 - 5 = 15$ мм.

Проведемо розрахунок шпонки на зминання. Умова міцності шпонки визначається за формулою:

$$\sigma_{зм} = \frac{4 \times T \times 10^3}{h \times l_p \times d} \leq [\sigma_{зм}]$$

де: $[\sigma_{зм}] = 100 \dots 120$ МПа допустиме напруження для сталевих шпонок при сталевій маточині.

$$\sigma_{зм} = \frac{4 \times 23.47 \times 10^3}{5 \times 15 \times 15} = \frac{93880}{1125} = 83.45 \text{ МПа}$$

Оскільки $\sigma_{зм} = 83.45 \text{ МПа} \leq [\sigma_{зм}] = 100 \dots 120 \text{ МПа}$, умова міцності виконується, і обрана шпонка забезпечить надійну передачу моменту під час руху робота

Виконані розрахунки підтверджують, що обрана приводна система робота SGBot, яка базується на двигунах FAULHABER 3890H024CR та планетарних редукторах Series 38A, повністю відповідає вимогам до мобільних рятувальних систем. Загальна маса конструкції становить 45 кг, що потребує достатньої питомої потужності та високої надійності механічних вузлів для ефективної роботи в умовах техногенних завалів та складного рельєфу місцевості.

Використання двох незалежних приводних модулів із крутним моментом 23,47 Нм на кожному борті забезпечує високу маневреність платформи. Така конфігурація дозволяє роботу здійснювати розворот на місці, а також долати перешкоди, розміри яких перевищують радіус ведучого колеса. Завдяки цьому робот здатний ефективно пересуватися у вузьких проходах, між уламками конструкцій та в інших складних умовах, характерних для зон надзвичайних ситуацій.

Точність керування рухом забезпечується завдяки інтеграції інкрементальних енкодерів IE3-1024L разом із контролерами MC5010SCO. Така система зворотного зв'язку дозволяє здійснювати точне позиціонування та контроль швидкості руху платформи. Це є особливо важливим для побудови тривимірних карт середовища за допомогою лідара Нокуо та стереокамери ZED, що використовується для навігації та аналізу простору під час пошуково-рятувальних операцій.

Енергетична ефективність системи досягається завдяки використанню літій-полімерних акумуляторів конфігурації 7S1P ємністю 5100 мА·год. Такі акумулятори здатні забезпечувати необхідний рівень струму для роботи приводних модулів навіть у режимах пікового навантаження. Це дозволяє обчислювальній платформі Jetson TX2 стабільно виконувати алгоритми

комп'ютерного зору на базі бібліотеки OpenCV, а також задачі аналізу даних сенсорів і виявлення небезпечних речовин у реальному часі без просідання напруги живлення.

Додатково була виконана перевірка міцності механічних елементів приводу. Розрахунок валів та шпонкових з'єднань за еквівалентним моментом показав наявність необхідного інженерного запасу міцності. Зокрема, розрахунковий мінімальний діаметр вала становить 14,85 мм, тоді як у конструкції використовується стандартний вал діаметром 15 мм. Такий запас забезпечує надійність та довговічність механізмів при можливих ударних навантаженнях, які можуть виникати під час падіння робота, зіткнення з перешкодами або подолання сходів і нерівностей поверхні.

Таким чином, спроектований приводний модуль є оптимальним рішенням для використання у складі мобільного рятувального робота та відповідає вимогам змагань RoboCup Rescue Robot League. Запропонована система поєднує компактність конструкції, високий коефіцієнт корисної дії приводу, точність керування та достатній запас механічної міцності, що робить її придатною для виконання складних пошуково-рятувальних місій у реальних умовах надзвичайних ситуацій.

РОЗДІЛ 3. МАТЕМАТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ РУХУ МОБІЛЬНОЇ ПЛАТФОРМИ ПОШУКОВОГО РОБОТА

3.1. Опис конструкції мобільної платформи

Рух мобільної платформи здійснюється по похилій площині. Вважається, що усі елементи гусеничної платформи є абсолютно твердими тілами.

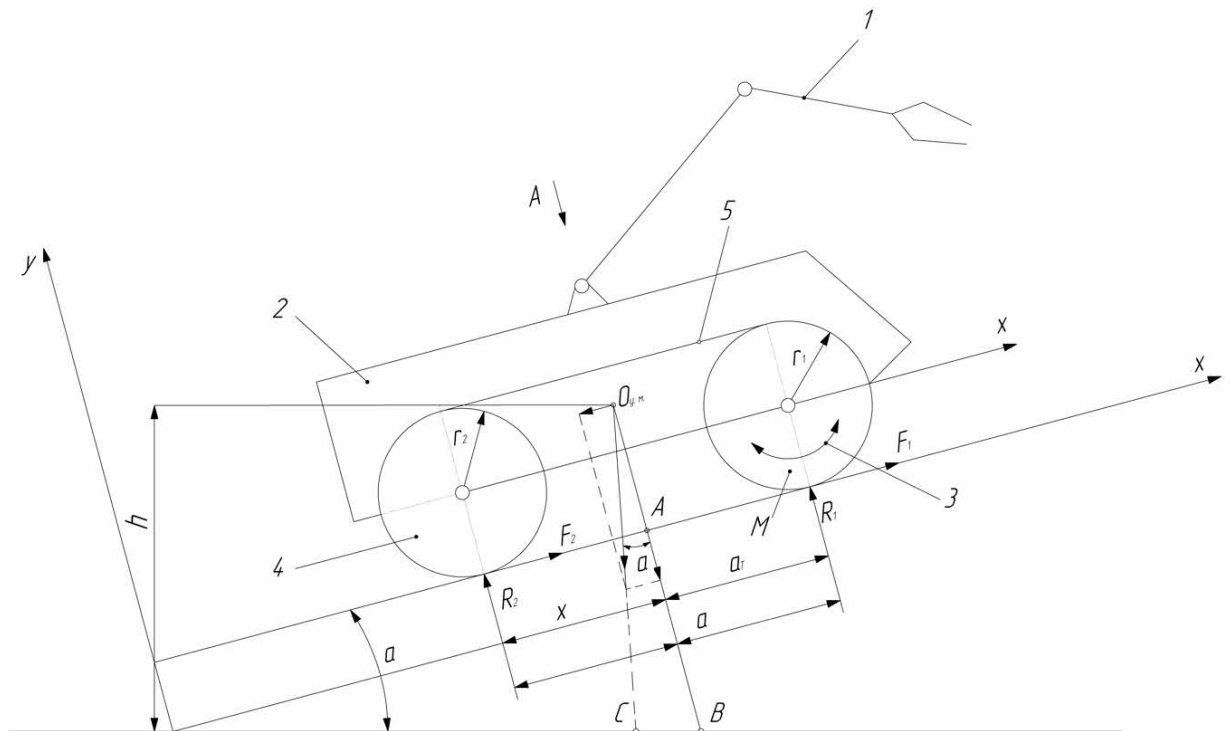


Рис. 3.1 Мобільна платформа

Платформа складається з маніпулятора – 1, рамної конструкції – 2, приводної зірочки – 3, натяжної зірочки – 4, гнучкого зубчастого паса – 5, приводного двигуна – 6, та передавального механізму – 7. Тут α – кут нахилу кожної площини до горизонту.

3.2. Кінематичний аналіз руху платформи

Мобільну платформу представляємо механічною системою з одним ступенем вільності. За узагальнену координату виберемо лінійну координату центру мас мобільної платформи x . Тоді швидкість переміщення мобільної платформи визначається як похідна за часом від узагальненої координати, тобто:

$$v = \frac{dx}{dt} = \dot{x}; \quad (3.1)$$

Кутову швидкість зірочки можна визначити з рис. 3.2. На рис. 3.2 r_1 – радіус основного кола приводної зірочки. Тоді кутова швидкість приводної зірочки визначається залежністю:

$$\omega_3 = \frac{\dot{x}}{r_3}; \quad (3.2)$$

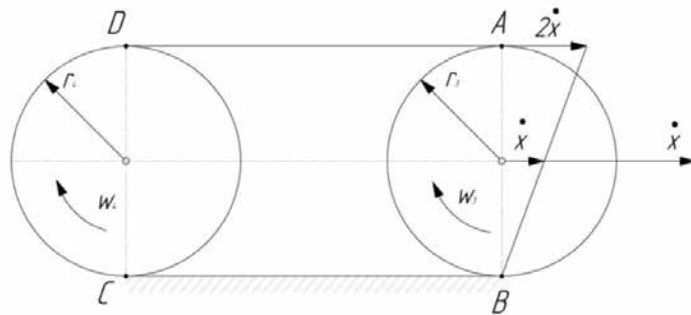


Рис. 3.2 Схема розташування зірочок

На ділянці BC па є нерухомим, а на ділянці AD він рухається зі швидкістю $2\dot{x}$. На ділянці AB довжиною πr_1 швидкість паса змінюється за лінійним законом від $2\dot{x}$ до 0. Також на ділянці CD швидкість паса змінюється від 0 до $2\dot{x}$.

Привод і натяжна зірочки здійснюють поступальний і обертальний рухи. Для складання рівнянь руху мобільної платформи використаємо рівняння Лагранжа другого роду, яке має вигляд:

$$\frac{d}{dt} \frac{\partial T}{\partial \dot{x}} - \frac{\partial T}{\partial x} = Qx - \frac{\partial \Pi}{\partial x}; \quad (3.3)$$

де, T – кінетична енергія системи, Π – потенціальна енергія системи, Qx – узагальнена сила, яка відповідає координаті x .

3.3. Визначення кінематичної енергії системи

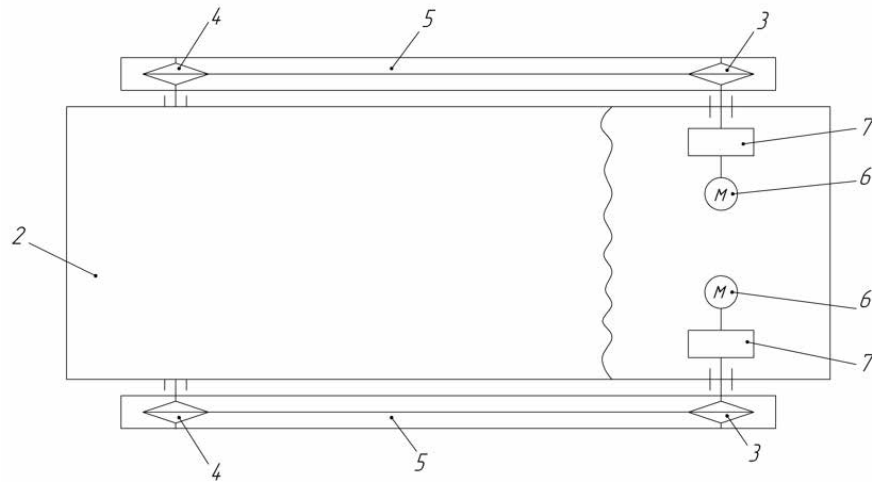


Рис. 3.3 Спрощена кінематична схема мобільної платформи

Кінетична енергія мобільної платформи складається з кінетичної енергії рамної конструкції – 2 з маніпулятором – 1, приводних зірочок – 3, натяжних зірочок – 4, зубчастого паса – 5, приводних двигунів – 6, та передавальних механізмів – 7.

Визначимо кінематичну енергію кожного з цих складових мобільної платформи:

1) Рамна конструкція з маніпулятором:

$$T_{1,2} = \frac{1}{2} \times m_{1,2} \times \dot{x}^2; \quad (3.4)$$

2) Приводні зірочки:

$$\begin{aligned} T_3 &= \frac{1}{2} \times 2 \times m_3 \dot{x}^2 + \frac{1}{2} \times 2 \times I_3 \times \omega_3^2 = \\ &= m_3 \times \dot{x}^2 + I_3 \times \frac{\dot{x}^2}{r_3^2} = \left(m_3 + \frac{I_3}{r_3^2} \right) \times \dot{x}^2; \end{aligned} \quad (3.5)$$

3) Натяжні зірочки:

$$\begin{aligned} T_4 &= \frac{1}{2} \times 2 \times m_4 \dot{x}^2 + \frac{1}{2} \times 2 \times I_4 \times \omega_4^2 = \\ &= m_4 \times \dot{x}^2 + I_4 \times \frac{\dot{x}^2}{r_4^2} = \left(m_4 + \frac{I_4}{r_4^2} \right) \times \dot{x}^2; \end{aligned} \quad (3.6)$$

4) Зубчасті паси:

$$T_5 = \frac{1}{2} \times 2\rho a(2\dot{x})^2 + \frac{1}{2} \times 2 \int_0^\pi \frac{4\dot{x}^2 r_3}{\pi^2} \times \varphi^2 d\varphi + \frac{1}{2} \times 2 \int_0^{2\pi} \frac{4\dot{x}^2 r_4}{\pi^2} \times \varphi^2 d\varphi =$$

$$= 4\rho a\dot{x}^2 + \frac{4}{3}\rho\pi r_3\dot{x}^2 + \frac{4}{3}\rho\pi r_4\dot{x}^2 = 4\rho\dot{x}^2 \left[a + \frac{\pi}{3}(r_3 + r_4) \right]; \quad (3.7)$$

5) Приводні електродвигуни та передавальні механізми приводів:

$$T_{6,7} = 2\delta \frac{1}{2} I_6 \times \omega^2 = \delta I_6 \left(\frac{\dot{x}}{r_3} \times u \right)^2 = \delta \frac{I_6}{r_3^2} \times u \times \dot{x}^2; \quad (3.8)$$

В залежностях (3.4)...(3.8) прийняті такі позначення: $m_{1,2}$ – маса рамної конструкції з маніпулятором та обладнанням (електродвигуни, редуктори, акумулятори, система керування), m_3 – маса приводної зірочки, I_3 – момент інерції приводної зірочки відносно осі її обертання, I_4 – момент інерції натяжної зірочки відносно осі її обертання, ρ – погонна маса одного метра зубчастого колеса (гусениці), r_3, r_4 – радіуси основних кіл відповідно приводної та натяжної зірочок, a – відстань між осями приводної та натяжної зірочок, I_6 – момент інерції ротора приводного електродвигуна разом з гальмівним шківом, $\delta = (1.1 \dots 1.2)$ – коефіцієнт, що враховує моменти інерції деталей передавального механізму, u – передавальне число передавального механізму.

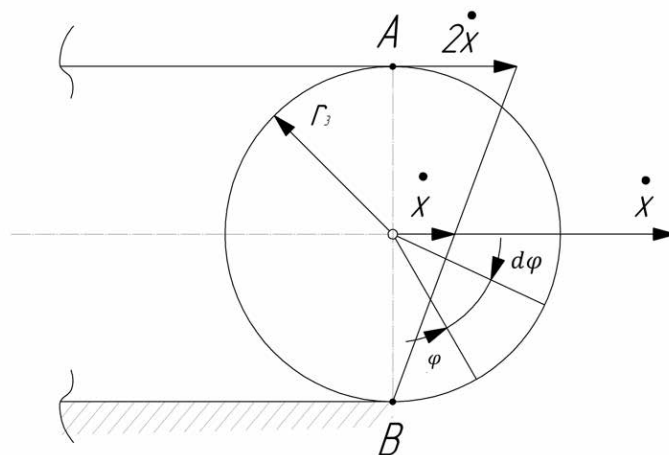


Рис. 3.4 Схема для визначення швидкості паса

Склавши вирази (3.4)(3.8), отримаємо кінетичну енергію руху мобільної платформи пошукового робота:

$$\begin{aligned}
 T &= T_{1,2} + T_3 + T_4 + T_5 + T_6 = \\
 &= \frac{1}{2} \times m_{1,2} \times \dot{x}^2 + \left(m_3 + \frac{I_3}{r_3^2} \right) \times \dot{x}^2 + \left(m_4 + \frac{I_4}{r_4^2} \right) \times \dot{x}^2 + \\
 &\quad + 4\rho \dot{x}^2 \left[a + \frac{\pi}{3} (r_3 + r_4) \right] + \delta \frac{I_6}{r_3^2} \times u \times \dot{x}^2 = \\
 &= \left\{ \frac{1}{2} m_{1,2} + m_3 + m_4 + \frac{I_3}{r_3^2} + \frac{I_4}{r_4^2} + 4\rho \left[a + \frac{\pi}{3} (r_3 + r_4) \right] + \delta \frac{I_6}{r_3^2} \times u^2 \right\} \dot{x}^2 = \\
 &= m_{3B} \dot{x}^2; \tag{9}
 \end{aligned}$$

де, m_{3B} – зведена інерційна маса платформи.

3.4. Визначення потенційної енергії

Тепер визначимо потенціальну енергію мобільної платформи при русі по похилій площині відносно горизонту див. рис. 1.

$$P = mgh; \tag{10}$$

де, m – повна маса мобільної платформи, g – прискорення вільного падіння, h – відстань від осі центру мас мобільної платформи до горизонту.

Визначимо відстань h :

$$OB = OA + AB;$$

$OA = a_0$ – вертикальна відстань від центру мас платформи до площини руху, яка визначається з конструкції маніпулятора.

$$\frac{AB}{x} = \operatorname{tg} \alpha, \text{ тоді } AB = x \times \operatorname{tg} \alpha;$$

$$\text{Тоді, } OB = a_0 + x \times \operatorname{tg} \alpha;$$

$$\frac{h}{OB} = \cos \alpha; \quad h = OB \times \cos \alpha = (a_0 + x \times \operatorname{tg} \alpha) \times \cos \alpha; \tag{3.11}$$

Підставивши вираз (3.11) в залежність (3.10), отримаємо вираз потенційної енергії мобільної платформи.

$$\Pi = mg(a_0 + x \times \operatorname{tg} \alpha) \times \cos \alpha; \quad (3.12)$$

Вираз (12) можна представити ще в такому вигляді:

$$\Pi = mg(a_0 \times \cos \alpha + x \times \sin \alpha); \quad (3.13)$$

Тепер знайдемо необхідні похідні від функцій (3.9) та (3.13), які присутні в рівнянні (3.3).

$$\frac{\partial T}{\partial x} = 0; \quad (3.14)$$

$$\frac{\partial T}{\partial \dot{x}} = 2m_{3B} \times \dot{x};$$

$$\frac{d}{dt} \frac{\partial T}{\partial \dot{x}} = 2m_{3B} \times \ddot{x}; \quad (3.15)$$

$$\text{Тут } m_{3B} = \frac{1}{2}m_{1,2} + m_3 + m_4 + \frac{I_3}{r_3^2} + \frac{I_4}{r_4^2} + 4\rho \left[a + \frac{\pi}{3}(r_3 + r_4) \right] + \delta \frac{I_6}{r_3^2} \times u^2; \quad (3.16)$$

$$\frac{\partial \Pi}{\partial x} = mg \sin \alpha; \quad (3.17)$$

3.5. Визначення узагальнену силу

Після цього визначимо узагальнену силу, записавши рівняння елементарних робіт:

$$Q_x \times \delta x = M_p \delta \varphi; \quad (3.18)$$

З отриманого рівняння (18) знаходимо:

$$Q_x = \frac{M_p \delta \varphi}{\delta x}; \quad (3.19)$$

де, $\delta \varphi$ і δx — елементарні переміщення, які зв'язані між собою наступною залежністю:

$$\delta \varphi = \frac{\delta x}{r_3}; \quad (3.20)$$

Після підстановки виразу (3.20) в рівняння (3.13) отримаємо:

$$Q_x = \frac{M_p}{r_3}; \quad (3.21)$$

де, M_p – рушійний момент на приводній зірочці, який може бути визначений з механічної характеристики приводного електродвигуна.

$$M_p = 2 \times M \times u \times \eta; \quad (3.22)$$

де, M – рушійний момент на валу приводного електродвигуна, який є функцією кутової швидкості, u – передавальне число приводу, η – к.к.д. приводу.

В результаті підстановки виразу (3.22) в (3.21) будемо мати:

$$Q_x = \frac{2 \times M \times u \times \eta}{r_3}; \quad (3.23)$$

3.6. Визначення сили опору

Тепер ще визначимо силу опору при переміщенні мобільної платформи:

$$F_0 = fmg \cos x; \quad (3.24)$$

де, f – коефіцієнт опору переміщення, який залежить від типу дороги, матеріалу паса (гусениці).

Підставивши вирази (3.14), (3.15), (3.17), (3.23) в рівняння (3.3), отримаємо диференціальні рівняння руху мобільної платформи на кожній площині:

$$2m_{зв}\ddot{x} = \frac{2 \times M \times u \times \eta}{r_3} - mg \sin \alpha - fmg \cos x; \quad (3.25)$$

Сила тяги мобільної платформи при русі з постійною швидкістю, коли $\ddot{x} = 0$, визначається залежністю:

$$F = mg(f \cos \alpha \pm \sin \alpha); \quad (3.26)$$

В формулі (3.26) знак “+” при русі на підйом, а “-” на спуск.

Сила тяги F мобільної платформи може бути реалізована, якщо зчеплення між приводним током (гусеницею) та дорогою достатнє, тобто:

$$F_{зч} \geq F; \quad (3.27)$$

або

$$\varphi m_3 g \geq mg(f \cos \alpha \pm \sin \alpha); \quad (3.28)$$

де, φ – коефіцієнт зчеплення гусениці з дорогою.

Тут ми вважаємо, що зчепна вага $m_3 g$ дорівнює всій вазі платформи, тобто $m_3 g = m g$. Тоді маємо:

$$\varphi \geq (f \cos \alpha \pm \sin \alpha); \quad (3.29)$$

Для гусеничних машин $\varphi = 0.5 - 0.9$.

3.7. Визначення максимального кута нахилу платформи

З нерівності (3.29) можна визначити максимальний кут нахилу площини, який може подолати платформа при підйомі з постійною швидкістю. Для цього нерівність (3.29) представимо у вигляді рівняння:

$$\varphi = f \cos \alpha + \sin \alpha; \quad (3.30)$$

В рівнянні (3.30) зробимо заміну $\sin \alpha = \sqrt{1 - \cos^2 \alpha}$, тоді:

$$\varphi = f \cos \alpha + \sqrt{1 - \cos^2 \alpha}; \quad (3.31)$$

$$\varphi - f \cos \alpha = \sqrt{1 - \cos^2 \alpha}; \quad (3.32)$$

Піднесемо до квадрату ліву і праву частини рівняння (3.32).

$$(\varphi - f \cos \alpha)^2 = 1 - \cos^2 \alpha;$$

$$\varphi^2 - 2\varphi f \cos \alpha + f^2 \cos^2 \alpha = 1 - \cos^2 \alpha;$$

$$(f^2 + 1) \cos^2 \alpha - 2\varphi f \cos \alpha + \varphi^2 - 1 = 0;$$

$$\cos^2 \alpha - 2 \frac{\varphi f}{1 + f^2} \cos \alpha - \frac{1 - \varphi^2}{1 + f^2} = 0;$$

$$\cos_{1,2} = \frac{\varphi f}{1 + f^2} \pm \sqrt{\frac{\varphi^2 f^2}{(1 + f^2)^2} + \frac{1 - \varphi^2}{1 + f^2}} =$$

$$= \frac{\varphi f}{1 + f^2} \pm \sqrt{\frac{\varphi^2 f^2 + (1 + f^2)(1 - \varphi^2)}{(1 + f^2)^2}} =$$

$$= \frac{\varphi f}{1 + f^2} \pm \sqrt{\frac{\varphi^2 f^2 + 1 - \varphi^2 + f^2 - \varphi^2 f^2}{(1 + f^2)^2}} =$$

$$\begin{aligned}
&= \frac{\varphi f}{1 + f^2} \pm \frac{\sqrt{1 + f^2 - \varphi^2}}{1 + f^2} = \\
&= \frac{1}{1 + f^2} \left(\varphi f \pm \sqrt{1 + f^2 - \varphi^2} \right); \tag{3.33}
\end{aligned}$$

Візьмемо найменше значення коефіцієнта зчеплення для гусеничних машин $\varphi = 0,7$ і коефіцієнт опору $f = 0,1$. Після підстановки цих значень в залежність (3.33) отримаємо:

$$\begin{aligned}
\cos_{1,2} &= \frac{1}{1 + 0,01} (0,7 \times 0,1 \pm \sqrt{1 + 0,01 - 0,19}) = \\
&= \frac{1}{1,01} (0,17 \pm \sqrt{0,746}) = \frac{1}{1,01} (0,17 \pm 0,715);
\end{aligned}$$

$$\cos \alpha_1 = \frac{0,785}{1,01} = 0,777;$$

$$\cos \alpha_2 = \frac{0,645}{1,01} = 0,639;$$

$$\alpha_1 = 39^\circ - \text{максимальний кут підйому платформи};$$

$$\alpha_2 = -50^\circ - \text{максимальний кут спуску платформи};$$

3.8. Динамічний аналіз руху мобільної платформи

Для розробленої динамічної моделі мобільно – пошуково рятувального робота необхідно знайти всі динамічні параметри, які включають: приведені моменти інерції першої та другої зведених мас; коефіцієнт жорсткості пружного приводного механізму; залежність рушійного моменту електродвигуна від частоти обертання ротора, а також залежність приведеного моменту сил опору пневматичного конвеєра.

В результаті наведених вище міркувань побудована динамічна модель мобільно – пошуково рятувального робота, яка представлена у вигляді двомасової моделі з обертальними масами, які зведені до осі ротора приводного електродвигуна (рис. 3.5).

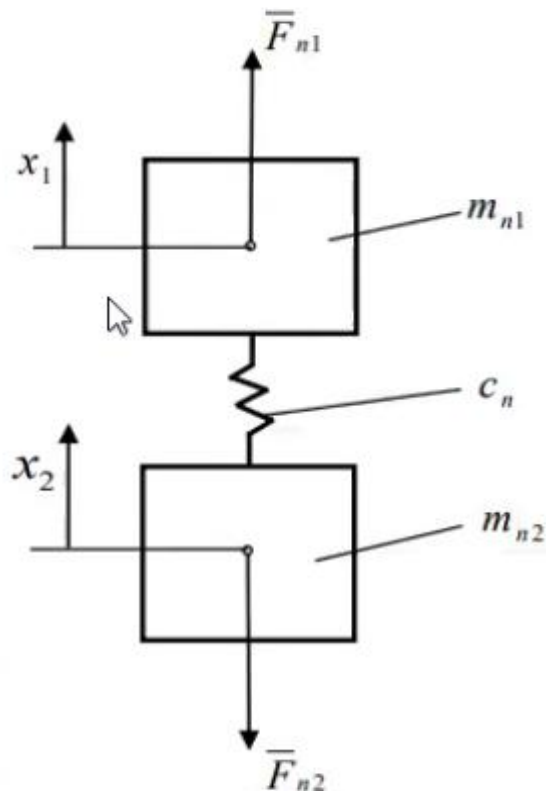


Рис. 3.5 Динамічна модель мобільної платформи

Параметрами цієї моделі є: $m_{п1}$, $m_{п2}$ – приведені маси відповідно першої (до пружного елементу) та другої (після пружного елементу) частин механізму підйому; $F_{п1}$, $F_{п2}$ – приведені сили відповідно першої та другої частин механізму підйому; x_1 , x_2 – узагальнені координати першої та другої зведених мас динамічної моделі.

Розчленуємо дві маси динамічної моделі на окремі маси і замінимо в'язь пружного елементу реакцією в'язі. Крім того, до кожної з мас прикладемо сили інерції. В результаті таких перетворень динамічна модель (рис. 3.5) набуде вигляду, який представлено на рис. 3.6.

Після цього розглянемо динамічну рівновагу кожної з мас. Для цього спроєкуємо всі сили, що діють на кожну з мас на вертикальну вісь, оскільки всі сили діють вздовж вертикальної осі і запишемо для них рівняння рівноваги. В результаті чого будемо мати:

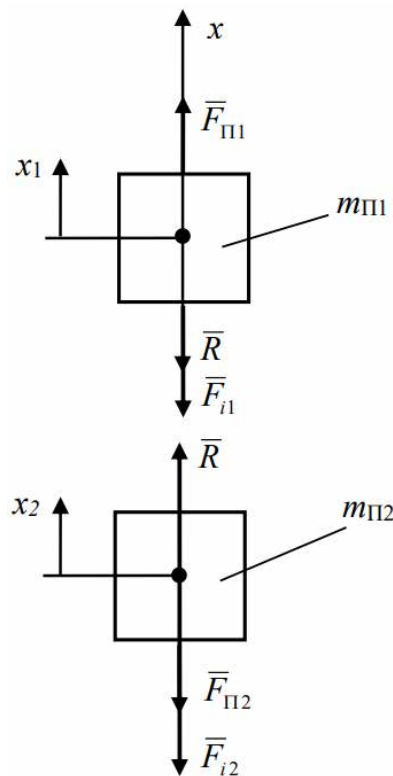


Рис. 3.6 Розчленована динамічна модель

Після аналізу розчленованої динамічної моделі складемо рівняння руху:

$$m_1 \ddot{x}_1 = F_1 - c(x_1 - x_2); \quad F_1 = \left[M_p - (M_p - M_n) \frac{\dot{x}_1 u}{2R\omega_n} \right] \frac{u}{R} \eta;$$

$$m_2 \ddot{x}_2 = -F_2 + c(x_1 - x_2); \quad F_2 = mg(\sin \alpha + f_0 \cos \alpha)/2.$$

Числові значення параметрів для побудови: $m_1 = 3,53 \text{ kg}$; $m_2 = 11,25 \text{ kg}$; $c = 3,4 * \frac{10^5 \text{ H}}{\text{m}}$; $M_n = 0,585 \text{ Hm}$; $M_p = 3M_n$; $\omega_n = 345,4 \frac{\text{rad}}{\text{s}}$; $R = 0,107 \text{ m}$; $u = 45$; $\eta = 0,89$; $m = 45 \text{ kg}$; $g = 9,81 \frac{\text{m}}{\text{s}^2}$; $f_0 = 0,1$; $\alpha = 10^\circ$.

3.9. Побудова та аналіз в Wolfram Mathematica

Динамічний аналіз будемо виконувати в Wolfram Mathematica. Wolfram Mathematica - це потужне програмне середовище для математичних обчислень, що поєднує в собі символічні та чисельні методи, візуалізацію, статистичний аналіз, машинне навчання та багато інших можливостей. Вона широко використовується у наукових дослідженнях, інженерії, фізиці, фінансах та освіті.

Завдяки своїм можливостям Mathematica застосовується в різних сферах. У фізиці її використовують для моделювання механічних, електричних та

квантових систем. У біології та медицині - для аналізу генетичних даних і моделювання біологічних процесів. В економіці та фінансах вона допомагає аналізувати ринки, будувати прогнози та оптимізувати стратегії. В освіті Mathematica є корисним інструментом для викладачів і студентів, дозволяючи візуалізувати математичні концепції та експериментувати з ними.

Головна перевага Mathematica перед іншими програмами, такими як MATLAB, Maple або Python, полягає в її універсальності та глибокій інтеграції різних математичних інструментів в одне середовище. Вона особливо добре підходить для тих, хто працює з символічними обчисленнями, диференціальними рівняннями або складними математичними моделями. Якщо ж основний фокус на чисельних методах або обробці великих масивів даних, MATLAB або Python можуть бути кращими альтернативами. Загалом Mathematica - це інструмент, який дозволяє не тільки розв'язувати складні математичні задачі, але й автоматизувати багато процесів, що значно полегшує наукову та інженерну роботу. Вона особливо корисна для дослідників і викладачів, а також для студентів, які хочуть глибше зрозуміти математичні концепції.

Перейдемо до побудов та аналізу. Спочатку задаємо всі вихідні параметри які нам будуть необхідні для побудови графіків.

```

(* ===== ПАРАМЕТРИ ===== *)
m1 = 3.53;
m2 = 11.25;
c = 3.4*10^5;
Mn = 0.585;
Mp = 3*Mn;
omn = 345.4;
R = 0.107;
u = 45;
eta = 0.89;
m = 45;
g = 9.81;
f0 = 0.1;
alp = 10.0*Pi/180;

F2 = m*g*(Sin[alp] + f0*Cos[alp])/2;

(* Рушійна сила (рівняння Клоса адаптоване) *)
skr = (omn - 0)/(omn); (* критичне ковзання *)
F1fun[v_] := (Mp - (Mp - Mn)*(v*u)/(2*R*omn))*(u/R)*eta;

(* ===== РОЗВ'ЯЗАННЯ ОДУ ===== *)
T = 0.5;

```

Рис. 3.7 Вихідні параметри

Далі використаємо функцію `NDSolve` для того щоб чисельно розв'язати диференціальні рівняння. Іншими словами, це спеціальна функція в середовищі `Mathematica` яка дозволяє знайти приблизний розв'язок задачі, яку неможливо (або дуже складно) вирішити аналітично. Цю функцію застосовують тоді, коли потрібно дізнатися, як змінюється якась фізична величина з часом або в просторі — наприклад, швидкість, прискорення, переміщення, температура тощо. Такі задачі часто виникають у механіці, фізиці, техніці, економіці й інших галузях. `NDSolve` дає результат у вигляді інтерполяційної функції, яку потім можна використовувати для побудови графіків, обчислення значень у конкретних точках, визначення похідних або інтегралів, тощо.

```
(* ===== РОЗВ'ЯЗАННЯ ОДУ ===== *)
T = 0.5;

sol = NDSolve[{
  x1''[t] == (F1fun[x1'[t]] - c*(x1[t] - x2[t]))/m1,
  x2''[t] == (-F2 + c*(x1[t] - x2[t]))/m2,
  x1[0] == 0, x1'[0] == 0,
  x2[0] == 0, x2'[0] == 0},
{x1, x2},
{t, 0, T},
MaxSteps -> 5000000]
```

Рис. 3.8 Функція NDSolve.

Далі побудуємо графіки переміщення зведених мас x_1 та x_2 .

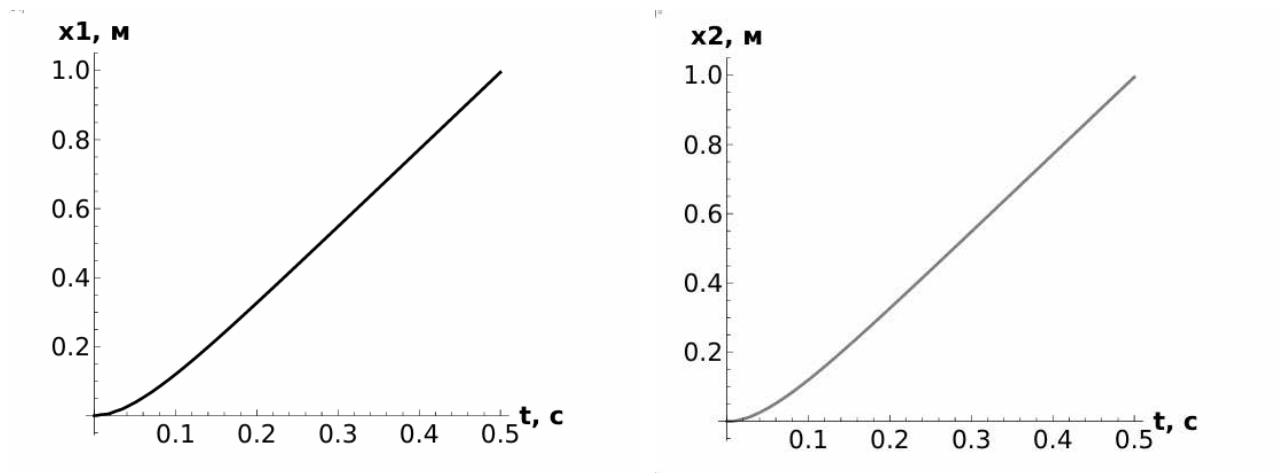
а) Графік зведеної маси x_1 .б) Графік зведеної маси x_2 .

Рис. 3.9 Графіки зведених мас

Після того як побудували графіки зведених мас, перейдемо до побудови графіків швидкостей зведених мас x_1 та x_2 .

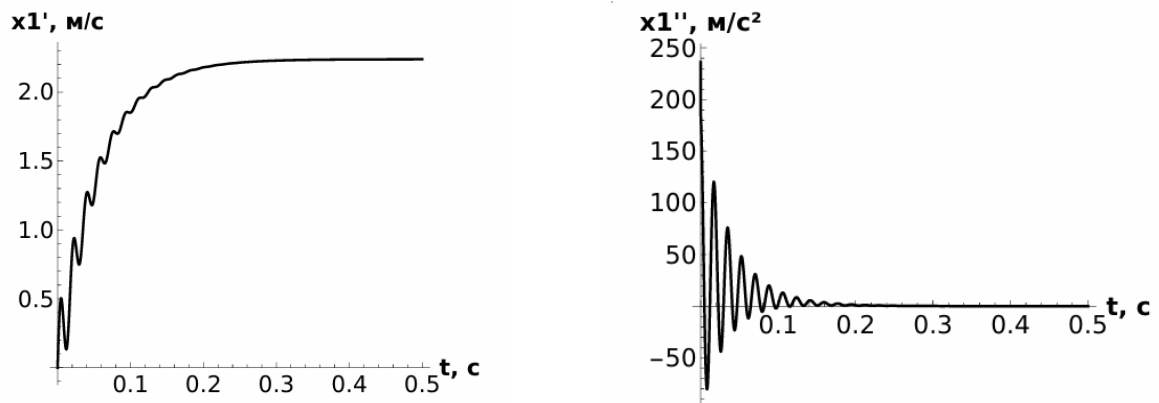


Рис. 3.10 Графік швидкості зведеної маси x_1 .

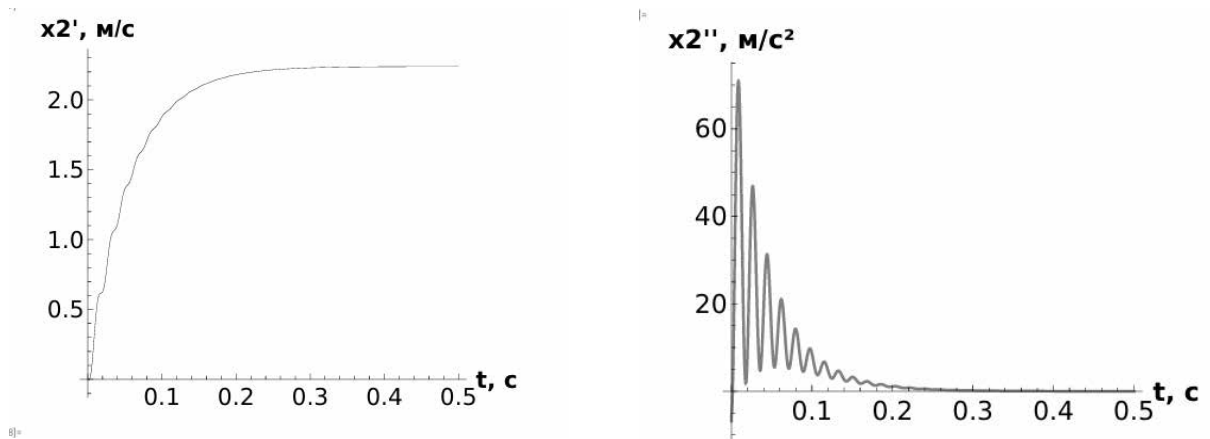


Рис. 3.11 Графік швидкості зведеної маси x_2 .

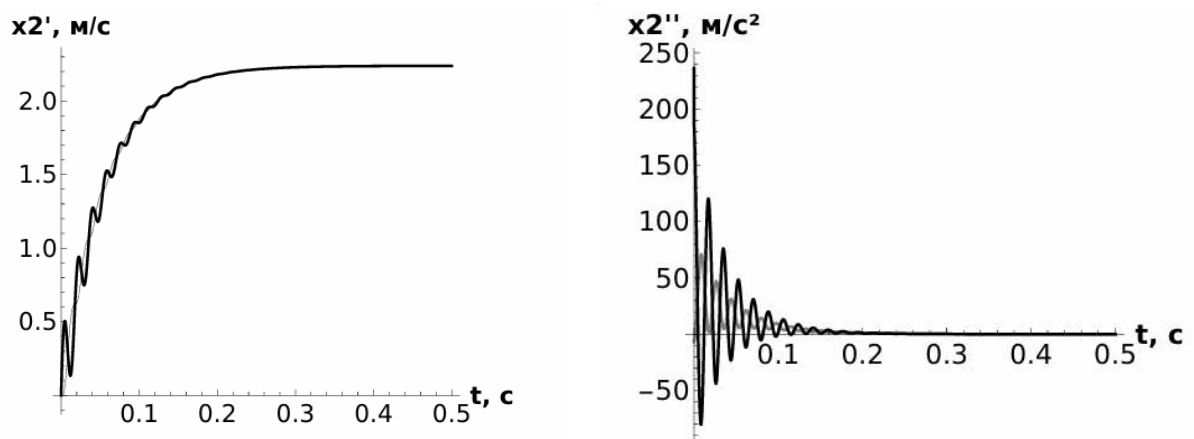


Рис. 3.12 Графіки швидкостей зведених мас x_1 та x_2 .

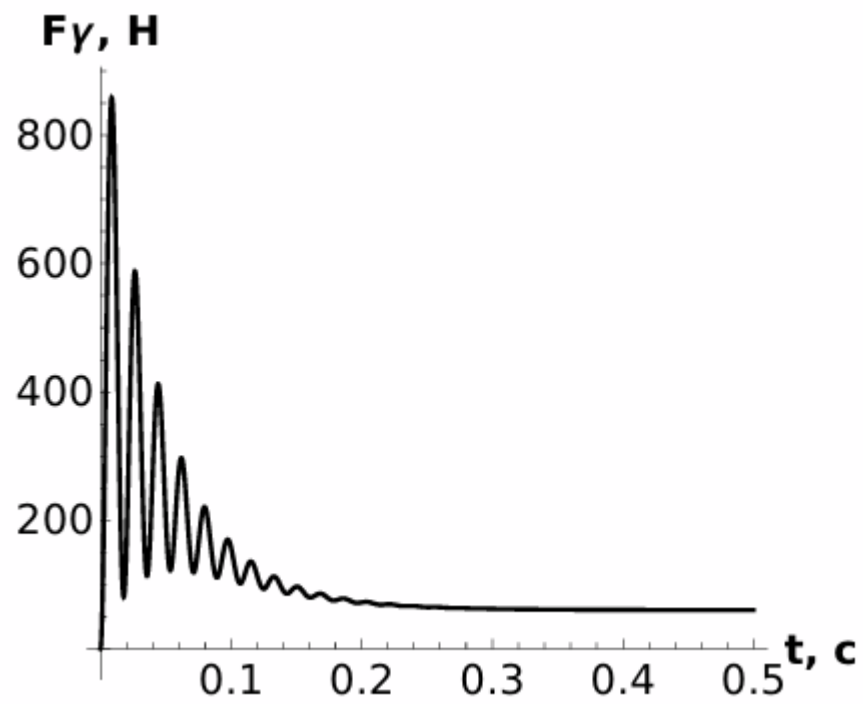


Рис. 3.13 Зусилля у гусениці (пружній елемент)

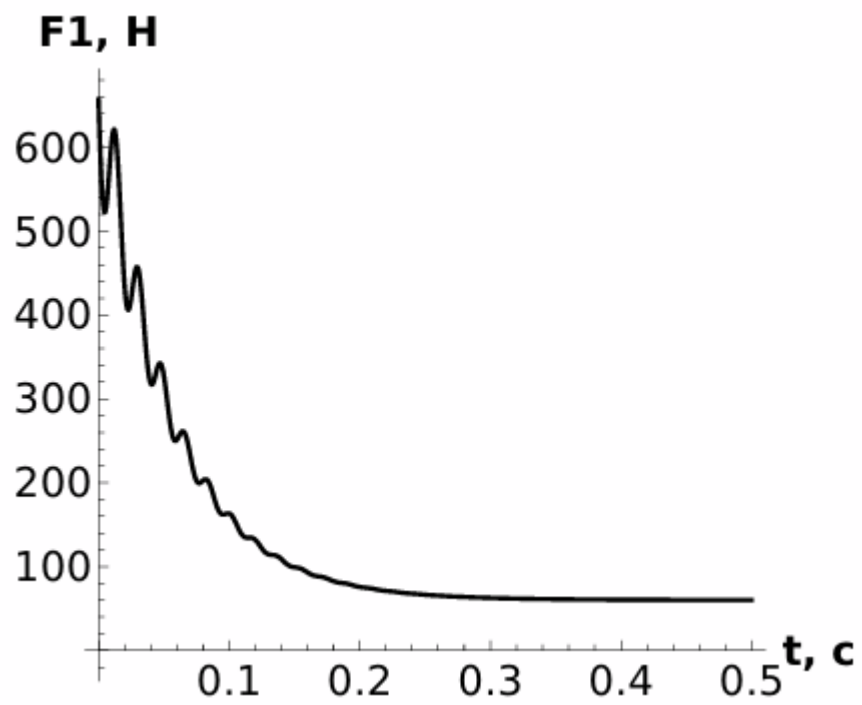


Рис. 3.14 Рушійний момент двигуна

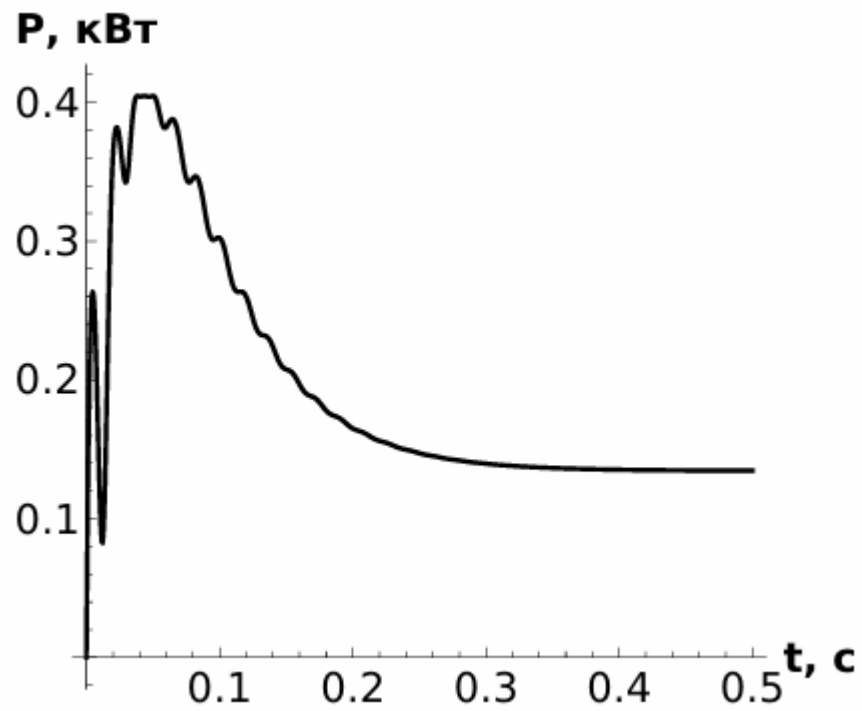


Рис. 3.15 Потужність приводу

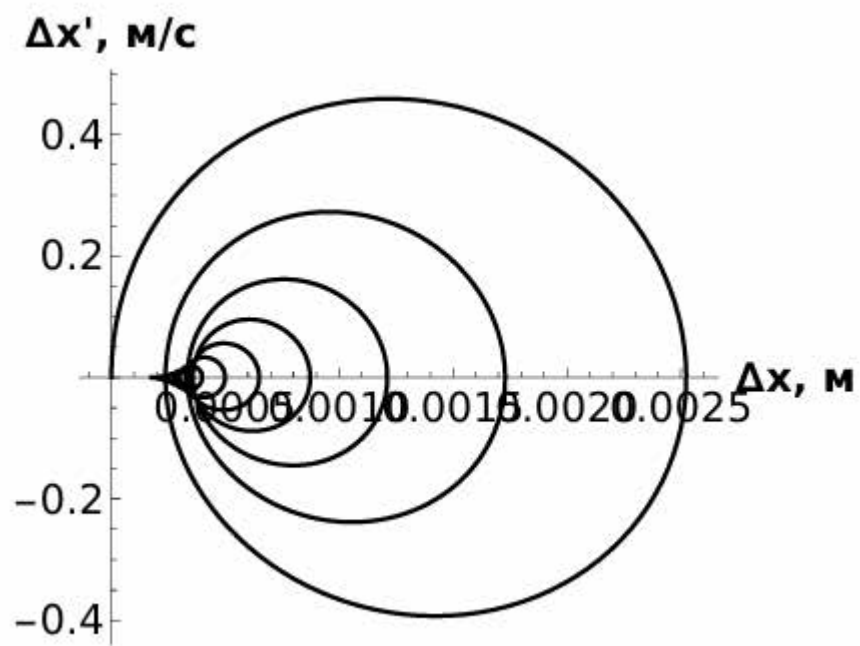


Рис. 3.16 Фаховий портрет відносно руху (гусениця)

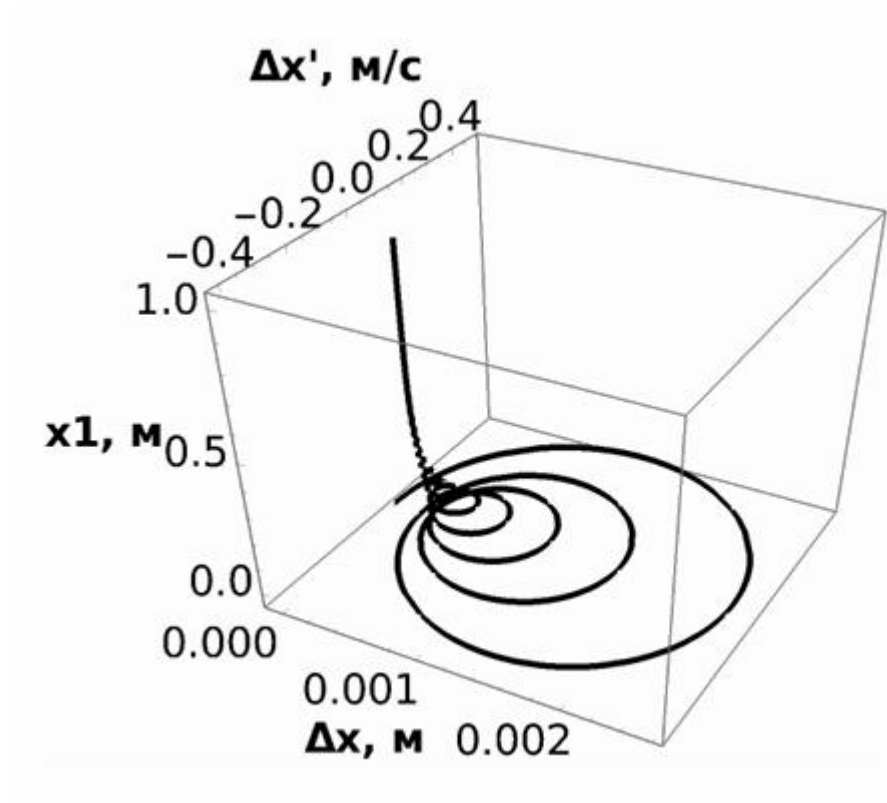


Рис. 3.18 3D фазова траєкторія відносно руху

РОЗДІЛ 4. ОПТИМІЗАЦІЯ РЕЖИМУ РУХУ МОБІЛЬНО – ПОШУКОВО РЯТУВАЛЬНОГО РОБОТА

4.1. Вибір критерію оптимізації режиму руху

Важливою характеристикою руху мобільної платформи пошукового робота є забезпечення необхідного тягового зусилля при використанні її як транспортного засобу. При використанні мобільної платформи робота в інтенсивному режимі в його елементах та приводному механізмі виникають динамічні навантаження, які мають суттєвий вплив на її надійність та енергетичні витрати. Тягове зусилля мобільної платформи та величина динамічних навантажень в значній мірі залежать від величини та характеру зміни рушійного моменту приводного електродвигуна. В зв'язку з цим виникає потреба в керуванні рушійним зусиллям приводного механізму мобільної платформи. Підвищену ефективність від такого керування можна отримати, якщо використовувати методи оптимального керування рухом мобільної платформи пошукового робота.

Ефективним буде керування рухом мобільної платформи, якщо при розв'язанні задачі оптимального керування її рухом обрати в якості параметра керування рушійне зусилля від дії приводів. Рушійне зусилля має більш природний характер в порівнянні з прискоренням мобільної платформи. Прискорення мобільної платформи визначається потужністю приводних електродвигунів, умовами зчеплення гусениць з ґрунтом або дорожнім полотном та вимогами міцності. Звідси можна зробити висновок, що швидкість та прискорення мобільної платформи змінюватимуться залежно від рушійного зусилля та взаємодії приводних коліс з ґрунтом чи дорожнім середовищем. Такий критерій ускладнить розв'язання задачі керування рухом мобільної платформи, разом з тим режим руху, який буде отримано за таким критерієм, буде оптимальним з точки зору швидкодії, тобто підвищення продуктивності. З проведеного аналізу можна зробити висновок, що за критерієм оптимального

керування рухом мобільної платформи робота доцільно використати рушійне зусилля приводних механізмів. Це зусилля повинно відображати рух мобільної платформи робота протягом всієї ділянки руху і представлятись в квадратичному вигляді, щоб не було можливості компенсації додатних значень зусиль їхніми від'ємними значеннями.

Тому за критерій оптимізації режиму руху мобільної платформи робота доцільно використати середньоквадратичне значення рушійного зусилля приводів за час пуску, яке визначається наступним чином

$$F_{\text{пуск}} = \left[\frac{1}{t_1} \int_0^{t_1} F_{\text{п1}}^2 dt \right]^{\frac{1}{2}} \rightarrow \min, \quad (4.1)$$

де t - час; t_1 - тривалість перехідного процесу руху мобільно – пошуково рятувальної платформи.

Для розв'язання задачі оптимального керування рухом мобільної платформи використаємо двомасову динамічну модель яка наведена на рис. . Ця модель описується системою двох диференціальних рівнянь другого порядку (3).

З другого рівняння системи (3.) виразимо координату першої маси динамічної моделі через координату другої маси, після чого отримаємо

$$\begin{aligned} x_1 &= x + \frac{m_{p2}}{c_p} x^{\text{II}}; \\ x_1 &= x + \frac{m_{p2}}{c_p} x^{\text{II}}. \end{aligned} \quad (4.2)$$

В результаті диференціювання виразів (4.2), отримаємо швидкість та прискорення першої маси динамічної моделі:

$$x_1^{\text{I}} = x^{\text{I}} + \frac{m_{p2}}{c_p} x^{\text{III}}; \quad (4.3)$$

$$x_1^{\text{II}} = x^{\text{II}} + \frac{m_{p2}}{c_p} x^{\text{IV}}. \quad (4.4)$$

Тут і даліше штрихи біля узагальнених координат означають похідні за часом різного порядку. Після підстановки виразів (4.2)...(4.4) в перше рівняння системи будемо мати диференціальне рівняння наступного виду

$$m_{п1} \left(x^{II} + \frac{m_{p2}}{c_p} x^{IV} \right) = F_{п1} - m x^{II} - F_{п2}. \quad (4.5)$$

З рівняння (4.5) визначимо рушійне зусилля приводу переміщення мобільної платформи

$$F_{п1} = (m_{п1} + m) x^{II} + m_{п1} \frac{m_{p2}}{c_p} x^{IV} + F_{п2}. \quad (4.6)$$

Тепер представимо підінтегральний вираз для критерію (4.1), який визначається залежністю

$$f = F_{п1}^2 = \left[(m_{п1} + m) x^{II} + m_{п1} \frac{m_{p2}}{c_p} x^{IV} + F_{п2} \right]^2. \quad (4.7)$$

Після математичних перетворень побудовано інтегральний динамічний критерій, який необхідно мінімізувати в процесі пуску мобільної платформи. Оскільки динамічний критерій відображає небажані властивості мобільної платформи, тому його треба звести до мінімуму.

4.2. Оптимізація режиму руху мобільної платформи робота

Умовою мінімуму критерію (4.1) з урахуванням виразу (4.7), є рівняння Пуассона, яке має вигляд

$$-\frac{\delta f}{\delta x} - \frac{d}{dt} \frac{\delta f}{\delta x^I} + \frac{d^2}{dt^2} \frac{\delta f}{\delta x^{II}} - \frac{d^3}{dt^3} \frac{\delta f}{\delta x^{III}} + \frac{d^4}{dt^4} \frac{\delta f}{\delta x^{IV}} = 0; \quad (4.8)$$

Візьмемо необхідні для рівняння (4.8) похідні від виразу (4.7), в результаті чого будемо мати:

$$\frac{\delta f}{\delta x} = 0; \quad \frac{\delta f}{\delta x^I} = 0; \quad \frac{\delta f}{\delta x^{III}} = 0;$$

Тоді

$$\frac{\delta f}{\delta x^{\text{II}}} = 2 \left[(m_{\text{п1}} + m)x^{\text{II}} + m_{\text{п1}} \frac{m_{p2}}{c_p} x^{\text{IV}} + F_{\text{п2}} \right] (m_{\text{п1}} + m);$$

$$\frac{\delta f}{\delta x^{\text{IV}}} = 2 \left[(m_{\text{п1}} + m)x^{\text{II}} + m_{\text{п1}} \frac{m_{p2}}{c_p} x^{\text{IV}} + F_{\text{п2}} \right] m_{\text{п1}} \frac{l}{g};$$

$$\frac{d^2}{dt^2} \frac{\delta f}{\delta x^{\text{II}}} = 2 \left[(m_{\text{п1}} + m)x^{\text{IV}} + m_{\text{п1}} \frac{m_{p2}}{c_p} x^{\text{IV}} + 0 \right] (m_{\text{п1}} + m);$$

$$\frac{d^4}{dt^4} \frac{\delta f}{\delta x^{\text{IV}}} = 2 \left[(m_{\text{п1}} + m)x^{\text{IV}} + m_{\text{п1}} \frac{m_{p2}}{c_p} x^{\text{VIII}} + 0 \right] m_{\text{п1}} \frac{l}{g}.$$

Після підстановки цих виразів у рівняння Пуассона (4.8), отримаємо таке диференціальне рівняння:

$$(m_{\text{п1}} + m)^2 x^{\text{IV}} + 2(m_{\text{п1}} + m) \left(m_{\text{п1}} \frac{m_{p2}}{c_p} x^{\text{IV}} \right) + \left(m_{\text{п1}} \frac{l}{g} \right)^2 x^{\text{VIII}} = 0. \quad (4.9)$$

Розділимо в диференціальному рівнянні (4.9) всі члени на коефіцієнт біля найстаршої похідної, після чого будемо мати

$$x^{\text{VIII}} + 2 \frac{(m_{\text{п1}} + m)}{\left(m_{\text{п1}} \frac{m_{p2}}{c_p} \right)} x^{\text{VI}} + \frac{(m_{\text{п1}} + m)^2}{\left(m_{\text{п1}} \frac{m_{p2}}{c_p} \right)^2} x^{\text{IV}} = 0. \quad (4.10)$$

В рівнянні (4.10) позначимо

$$k = \sqrt{\frac{m_{\text{п1}} + m}{m_{\text{п1}} m}} c, \quad (4.11)$$

в результаті чого отримаємо таке рівняння

$$x^{\text{VIII}} + 2k^2 x^{\text{VI}} + k^4 x^{\text{IV}} = 0, \quad (4.12)$$

де k – частота власних коливань елементів динамічної моделі мобільної платформи робота.

Розв'яжемо диференціальне рівняння (4.12) через використання характеристичного рівняння:

$$r^8 + 2k^2 r^6 + k^4 r^4 = 0;$$

$$r^4(r^4 + 2k^2 r^2 + k^4) = 0;$$

$$r^4 = 0 \rightarrow r^1 = r^2 = r^3 = r^4 = 0;$$

$$r^4 + 2k^2 r^2 + k^4 = 0.$$

Тут r_i – корені характеристичного рівняння. Для розв’язування останнього рівняння зробимо заміну $r^2 = p$, в результаті чого будемо мати квадратне рівняння

$$p^2 + 2k^2 p + k^4 = 0,$$

розв’язок якого дає такі корені :

$$p_{1,2} = -k^2 \pm \sqrt{k^2 - k^2} = -k^2 \pm 0 \rightarrow p_1 = -k^2; \quad p_2 = -k^2;$$

$$r_{5,6} = \sqrt{p_1} = \sqrt{-k^2} = \pm ki;$$

$$r_{7,8} = \pm ki.$$

Отриманим кореням характеристичного рівняння відповідає розв’язок диференціального рівняння (4.12), який представляється наступною залежністю

$$x = c_1 + c_2 t + c_3 t^2 + c_4 t^3 + (c_5 + c_6 t) \sin kt + (c_7 + c_8 t) \cos kt, \quad (4.13)$$

де $c_1, c_2, \dots, c_8$ постійні інтегрування, які знаходяться з таких крайових умов руху мобільної платформи:

$$\begin{cases} t = 0: x = 0, x^I = 0, x^{II} = 0, x^{III} = 0; \\ t = t_1: x^I = v, x^{II} = v, x^{III} = 0, x^{IV} = 0 \end{cases} \quad (4.14)$$

Виразимо крайові умови (4.14) через координату другої зведеної маси динамічної моделі та її похідні за часом, після чого отримаємо:

$$\begin{cases} t = 0: x = 0, x^I = 0, x^{II} = 0, x^{III} = 0; \\ t = t_1: x^I = v, x^{II} = v, x^{III} = 0, x^{IV} = 0 \end{cases} \quad (4.15)$$

Взявши похідні за часом від виразу (4.13), отримаємо такі залежності швидкості, прискорення та більш високі похідні за часом другої узагальненої координати динамічної моделі мобільної платформи робота

$$\begin{aligned}
x^I &= 0 + c_2 + 2c_3t + 3c_4t^2 + c_6 \sin kt + (c_5 + c_6t)k \cos kt + c_8 \cos kt - \\
&\quad (c_7 + c_8t)k \sin kt; \\
x^I &= c_2 + 2c_3t + 3c_4t^2 + (c_6 - c_7k - c_8kt) \sin kt + (c_8 + c_5k + c_6kt) \cos kt; \\
x^{II} &= 0 + 2c_2 + 2 \cdot 3c_4t^{(2-1)} - c_8k \sin kt + (c_6 - c_7k - c_8kt)k \cos kt + c_6k \cos kt - \\
&\quad (c_8 + c_5k + c_6kt)k \sin kt; \\
x^{II} &= 2C_3 + 6C_4t - (2C_8 + C_5k + C_6kt)k \sin kt + (2C_6 - C_7k - C_8kt)k \cos kt; \\
x^{III} &= 0 + 6C_4 - C_6k^2 \sin kt - (2C_8 + C_5k + C_6kt)k^2 \cos kt - C_8k^2 \cos kt - (2C_6 - C_7k - \\
&\quad C_8kt)k^2 \sin kt; \\
x^{III} &= 6C_4 - (3C_6 - C_7k - C_8kt)k^2 \sin kt - (3C_8 + C_5k + C_6kt)k^2 \cos kt; \\
x^{IV} &= 0 + C_8k^3 \sin kt - (3C_6 - C_7k - C_8kt)k^3 \cos kt - C_6k^3 \cos kt + (3C_8 + C_5k + \\
&\quad C_6kt)k^3 \sin kt; \\
&= (4C_8 + C_5k + C_6kt)k^3 \sin kt - (4C_6 - C_7k - C_8kt)k^3 \cos kt. \quad (4.16)
\end{aligned}$$

В результаті підстановки залежностей (4.16) в крайові умови (4.13), отримаємо систему лінійних рівнянь для визначення постійних інтегрування $c_1, c_2, \dots, c_8$,

При $t=0$ отримаємо такі рівняння:

$$0 = c_1 + c_7;$$

$$0 = c_2 + c_5k + c_8;$$

$$0 = 2c_3 + (2c_6 - c_7k)k;$$

$$0 = 6c_4 - (3c_8 + c_5k)k^2;$$

При $t=t_1$ будемо мати:

$$V = c_2 + 2c_3t_1 + 3c_4t_1^2 + (c_6 - c_6k - c_8kt_1) \sin kt_1 + (c_8 + c_5k + c_6kt_1) \cos kt_1;$$

$$0 = 2c_3 + 6c_4t_1 - (2c_8 + c_5k + c_6kt_1)k \sin kt_1 + (2c_6 - c_7k - c_8kt_1)k \cos kt_1;$$

$$0 = 6c_4 - (3c_6 - c_7k - c_8kt_1)k^2 \sin kt_1 - (3c_8 + c_5k + c_6kt_1)k^2 \cos kt_1;$$

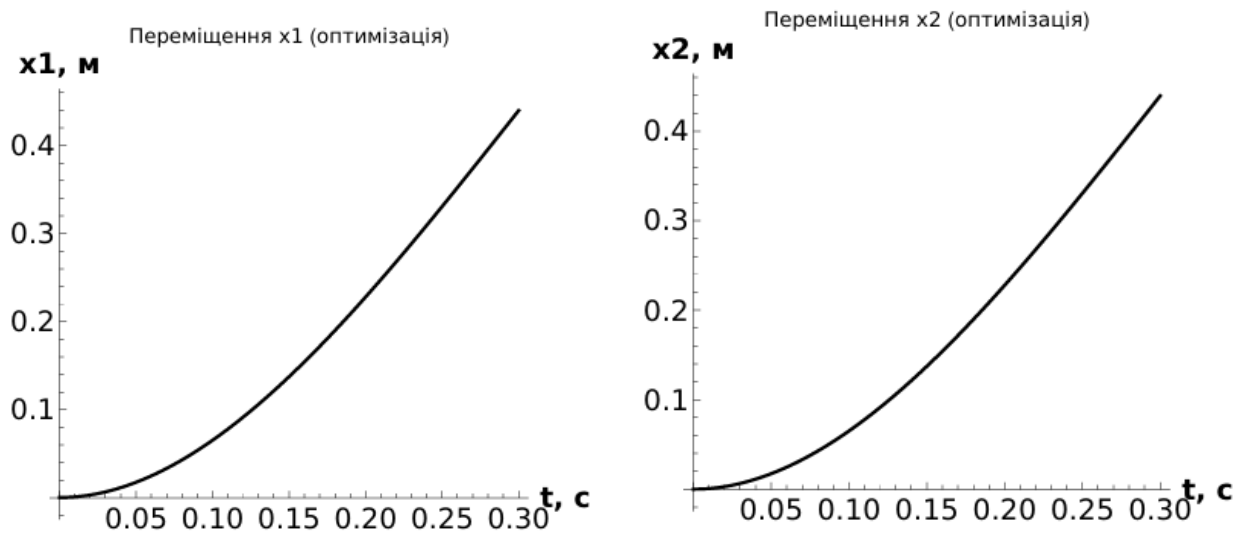
$$0=(4c_8 + c_5k - c_6kt_1)k^3 \sin kt_1-(4c_6 + c_7k + c_8kt_1)k^3 \cos kt_1. \quad (4,17)$$

В результаті розв’язування системи лінійних алгебраїчних рівнянь (4,17) визначимо постійні інтегрування $c_1, c_2, \dots, c_8$, і підставимо їх в залежності (4.16). Це дасть можливість визначити кінематичні характеристики другої зведеної маси динамічної моделі мобільної платформи. Після цього, використовуючи вирази (4.2)–(4.4), визначимо кінематичні характеристики першої зведеної маси динамічної моделі мобільної платформи. Для параметрів мобільної платформи, які наведені в розділі 3 динамічного аналізу, розрахувати і побудувати графіки кінематичних, динамічних та енергетичних характеристик оптимального режиму руху. Прийняти тривалість пуску платформи $t_1=0,3$ с.

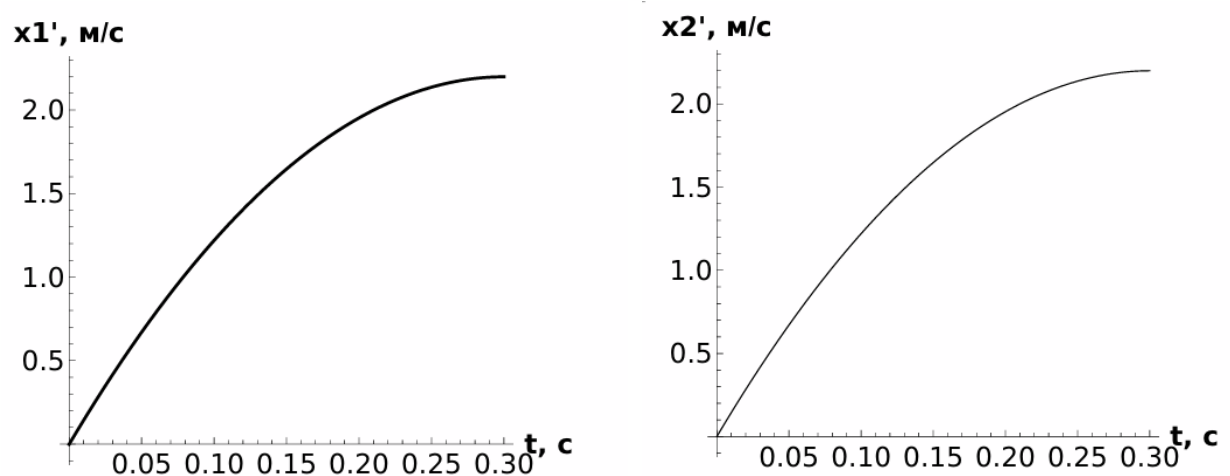
4.3. Результати оптимізації режиму

В результаті проведених розрахунків за отриманими аналітичними залежностями (4.13–4.17) було проведено математичне моделювання оптимального режиму пуску мобільно – пошуково рятувальної платформи. Для розрахунку прийнято наступні параметри: зведені маси $m_{p1} = 3.53$ кг та $m_{p2} = 11.25$ кг, жорсткість системи $c_p = 3.4 \times 10^5$ Н/м та сила опору руху.

Графіки, отримані в результаті оптимізації режиму руху системи див. рис. 4.1, свідчать про її стабільну та узгоджену динамічну поведінку. Залежності переміщень мають плавний зростаючий характер без різких стрибків або коливань, що вказує на відсутність резонансних явищ і правильний підбір параметрів системи. При цьому переміщення першої маси дещо відрізняється від другої через вплив пружного зв’язку, що проявляється у невеликій різниці координат, однак ця різниця є незначною і не впливає негативно на загальний рух.

Рис. 4.1 Графіки переміщення мас x_1 та x_2

Графіки, що відображають зміну швидкостей рис.4.2 $\dot{x}_1$ та $\ddot{x}_2$ характеризуються плавним зростанням без різких стрибків і розривів, що свідчить про рівномірний розгін системи. Обидві криві мають подібний характер, однак між ними спостерігається незначна різниця, зумовлена впливом пружного зв'язку між масами. Це призводить до незначного розходження швидкостей, що відображає наявність внутрішніх коливальних процесів. Водночас ці відхилення є малими, що вказує на узгодженість руху обох мас і відсутність суттєвих динамічних перевантажень. Загалом графіки підтверджують стабільний і оптимізований режим руху системи.

Рис. 4.2 Графіки швидкостей мас $\dot{x}_1$ та $\dot{x}_2$

Графіки які можна побачити на рис. 4.3. показують, як змінюються прискорення обох мас з часом. Видно, що криві є плавними, без різких стрибків, тобто рух відбувається без ударів і різких навантажень. Прискорення змінюються досить узгоджено, але між ними є невелика різниця, яка пояснюється наявністю пружного зв'язку між масами. При цьому прискорення першої маси трохи більше реагує на коливання, тоді як друга маса рухається більш рівномірно.

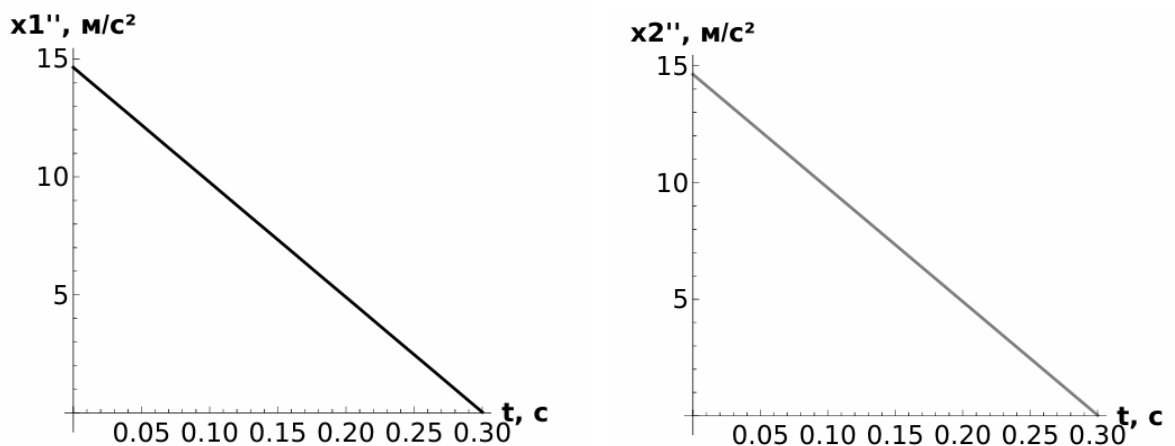


Рис. 4.2 Графіки прискорення $\ddot{x}_1$ та $\ddot{x}_2$

Зусилля в гусениці в досліджуваній двомасовій системі визначається як пружна сила, що виникає через різницю в переміщеннях першої та другої мас, помножену на коефіцієнт жорсткості триста сорок тисяч ньютонів на метр . Математична модель показує, що завдяки проведеній оптимізації це зусилля змінюється надзвичайно плавно протягом усього процесу розгону, який триває три десятих секунди . На відповідному графіку див. рис. 4.3. видно, як сила поступово зростає від нуля до свого пікового значення, що становить приблизно сто п'ятдесят ньютонів у кінцевій точці інтервалу . Відсутність виражених коливань та різких стрибків на кривій підтверджує ефективність обраного режиму руху, оскільки це дозволяє мінімізувати динамічні удари всередині механізму. Такий характер зміни зусилля гармонійно поєднується з іншими параметрами системи, забезпечуючи стабільний вихід на задану швидкість дві

цілі дві десятих метра на секунду при відносно невеликих деформаціях, які, як видно з фазових портретів, не перевищують часток міліметра.

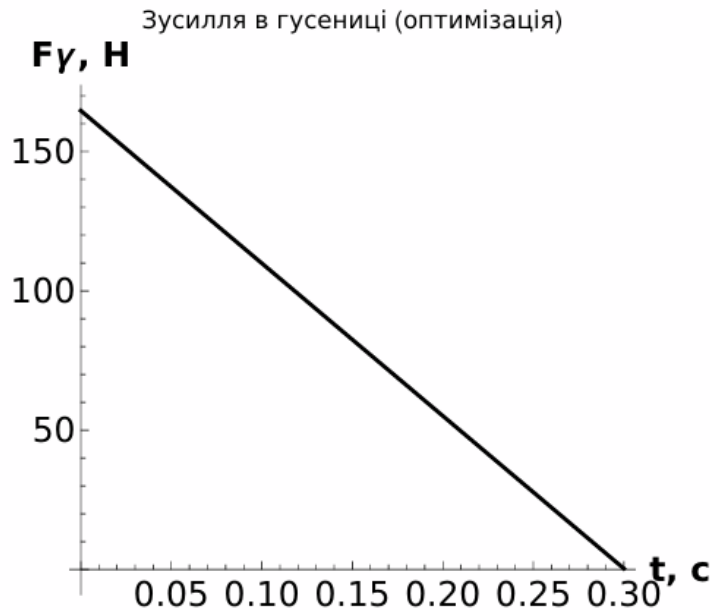


Рис. 4.3 Графік зусилля в гусениці.

Рушійне зусилля у цій двомасовій системі є комплексним показником, який згідно з математичною моделлю враховує сумарну інерцію обох мас, складові вищого порядку, пов'язані з четвертою похідною переміщення, та зовнішню силу опору руху. Протягом усього інтервалу розгону тривалістю три десятих секунди величина рушійного зусилля плавно зростає, досягаючи свого пікового значення на рівні близько двісті п'ятдесят ньютонів. Характер зміни цієї сили позбавлений різких стрибків чи коливань, що підтверджує ефективність проведеної оптимізації за допомогою системи лінійних рівнянь для коефіцієнтів. Така плавність дозволяє рівномірно розподілити навантаження на привід системи, забезпечуючи стабільний вихід на розрахункову швидкість дві цілі дві десятих метра на секунду при одночасному контролі потужності, яка безпосередньо залежить від цього зусилля.

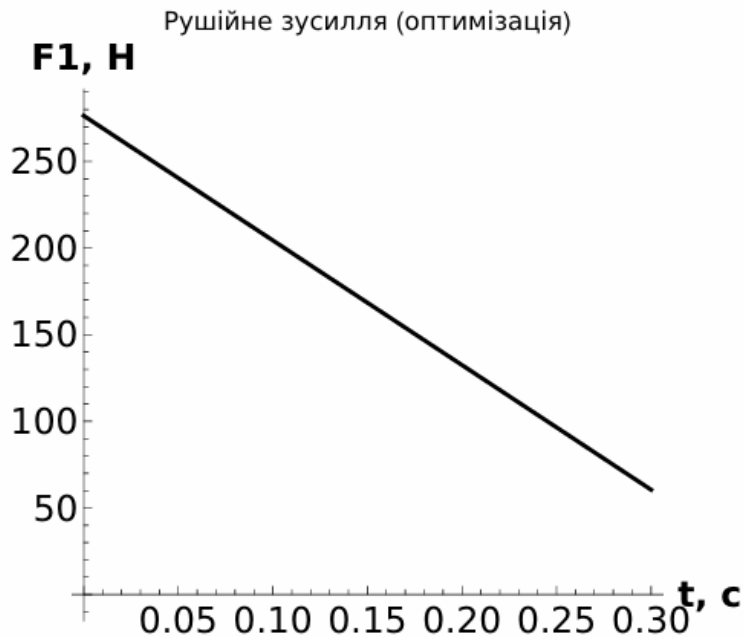


Рис. 4.4 Графік рушійного зусилля

Потужність у досліджуваній системі розраховується як добуток рушійного зусилля та швидкості першої маси, поділений на тисячу для переведення отриманих результатів у кіловати. Як свідчить графік 4.5 під назвою «Потужність (оптимізація)», цей показник демонструє плавне та безперервне зростання протягом усього періоду розгону, який триває три десятих секунди. Оскільки потужність безпосередньо залежить від швидкості, яка збільшується від нуля до робочого рівня дві цілі дві десятих метра на секунду, графік починається в початковій точці координат і поступово підіймається вгору, досягаючи свого максимального значення близько нуля цілих двадцять п'ять сотих кіловат наприкінці інтервалу. Така гладка форма кривої без будь-яких різких сплесків або просідань є прямим результатом проведеної оптимізації режиму руху за допомогою системи лінійних рівнянь, що дозволяє уникнути енергетичних перевантажень приводу та забезпечує стабільну роботу системи.

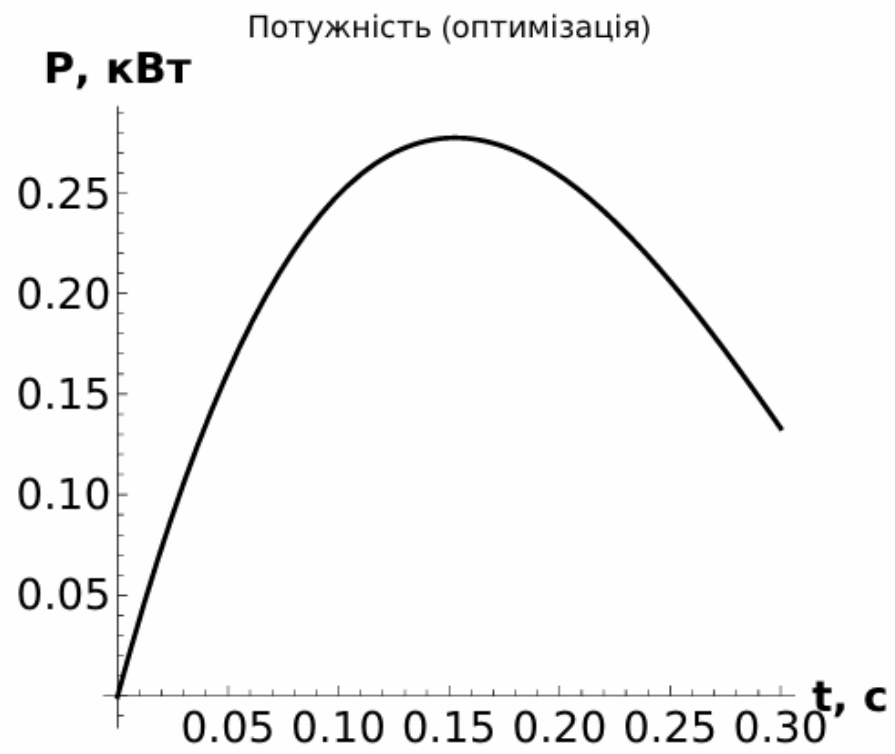


Рис. 4.5 Графік потужності.

РОЗДІЛ 5. ОХОРОНА ПРАЦІ

5.1. Охорона праці та техніка безпеки при експлуатації мобільних пошуково – рятувальних роботів

Згідно з нормативними визначеннями, надзвичайна ситуація (НС) становить собою порушення нормальних умов життєдіяльності на певній території, що спричинене аварією, катастрофою або стихійним лихом і призводить до людських жертв чи значних матеріальних втрат. За характером походження такі ситуації класифікуються на техногенні, природні, соціально-політичні та воєнні.

Головним завданням охорони праці у контексті даної роботи є усунення прямого впливу небезпечних факторів на особовий склад ДСНС. Це досягається шляхом впровадження мобільних робототехнічних систем, які здатні замінити людину в екстремально ворожому середовищі, зокрема в зонах руйнування будівель, хімічного зараження або задимлення. Використання роботів дозволяє реалізувати основні етапи АРР: розвідку зони ураження, пошук постраждалих за допомогою відеокамер та тепловізорів, а також інспекцію структурної цілісності конструкцій для запобігання ризикам повторного обвалення.

Успішне та безпечне виконання рятувальних операцій безпосередньо залежить від технічної досконалості та стійкості використовуваних засобів. У цьому розділі розглядаються заходи безпеки при експлуатації мобільних платформ, оснащених гібридними локомотивними агрегатами TriSTAR та мультимодальними паралельними механізмами. Математичне моделювання динаміки таких систем та аналіз їхньої стійкості на похилих поверхнях є критично важливими для запобігання перекиданню робота, що само по собі могло б створити додаткову небезпеку в зоні завалу.

Окрему увагу приділено інтелектуальним системам орієнтації та сенсорному моніторингу навколишнього середовища. Використання датчиків газу, температури та багат шарових моделей сканування перешкод дозволяє

роботу автономно уникати зіткнень і вчасно сповіщати оператора про загрозу вибуху чи пожежі. Таким чином, розроблена система керування та конструкція робота виступають як інженерно-технічні заходи підвищення стійкості та безпеки ведення робіт у районах стихійних лих та промислових аварій.

5.2. Класифікація небезпечних факторів та роль робіт у їх мінімізації

Аналіз безпеки під час проведення аварійно-рятувальних робіт (АРР) вимагає чіткого розуміння природи виникаючих загроз. Згідно з прийнятою класифікацією, надзвичайна ситуація (НС) визначається як порушення нормальних умов життя і діяльності людей на певній території, спричинене аварією, стихійним лихом або іншою небезпечною подією, що може призвести до людських жертв та значних матеріальних втрат.

У контексті застосування пошуково-рятувальної робототехніки небезпечні фактори класифікуються за характером походження на такі групи:

Техногенні фактори: виникають внаслідок аварій (катастроф) на об'єктах господарювання та супроводжуються раптовим руйнуванням будівель і споруд, пожежами, вибухами, викидами (виливами) небезпечних хімічних, радіоактивних або біологічних речовин, а також аваріями на інженерних мережах життєзабезпечення.

Природні фактори: пов'язані з небезпечними геологічними, метеорологічними або гідрологічними явищами, такими як землетруси, зсуви ґрунту та деградація надр.

Воєнні та соціально-політичні фактори: зумовлені наслідками застосування зброї масового ураження, руйнуванням транспортних комунікацій та потенційно небезпечних об'єктів (атомних станцій, складів паливно-мастильних матеріалів чи вибухівки).

Роль мобільних робототехнічних систем у мінімізації ризиків для особового складу рятувальних підрозділів є визначальною, оскільки середовище проведення АРР характеризується як екстремально вороже і неструктуроване. Воно включає завали з бетону та арматури, вузькі щілини, затоплені підвали, задимлені простори та зони з критичним ризиком вибуху газу. Історичний досвід свідчить, що під час землетрусу в Мехіко (1985 р.) загинуло 135 рятувальників, з яких 65 осіб опинилися в пастці безпосередньо під завалами під час спроби пошуку постраждалих.

Впровадження роботів дозволяє нівелювати дію небезпечних факторів на людину за рахунок виконання наступних функцій:

1. Розвідка та телеприсутність: Робот виконує роль «очей та вух» команди, передаючи відеоінформацію в реальному часі із середовища, яке є надто небезпечним для людей та навіть навчених собак.
2. Детектування небезпек сенсорними системами: Завдяки інтегрованим датчикам газу (наприклад, MQ-9) та шкідливих хімічних речовин, робот здатний вчасно виявляти загрозу вибуху або отруєння до моменту входу рятувальників у зону ураження.
3. Інспекція структурної цілісності: Роботи, зокрема з надлишковою кінематикою типу ETR («слоновий хобот»), здатні досліджувати недоступні порожнечі та оцінювати стан уламків будівель, що дозволяє запобігти ризикам повторного обвалення під час роботи людей.
4. Медичний моніторинг у небезпечних зонах: Забезпечення двостороннього голосового зв'язку між лікарями та постраждалими за допомогою акустичних систем робота дозволяє проводити попередню діагностику стану людей у замкнутих просторах без безпосереднього контакту персоналу з нестабільними конструкціями завалу.

5.3. Охорона праці через оптимізацію часового фактора

Час є найважливішим чинником, що визначає успіх аварійно-рятувальних робіт (АРР) та безпеку всіх учасників операції. При руйнуванні будівель під уламками залишаються живі люди, життєвий ресурс яких швидко вичерпується: статистика свідчить, що максимальна ефективність надання допомоги припадає на перші години, тоді як до сьомої доби шанси знайти живих практично зникають. Зменшення часу на виконання кожної окремої задачі пошуку безпосередньо підвищує ефективність АРР та знижує термін перебування рятувальників у потенційно небезпечних зонах.

Оптимізація часових витрат та підвищення безпеки персоналу досягається завдяки наступним технічним рішенням:

1. Оперативність розгортання та безперервність: Використання малогабаритних роботів, які можна транспортувати у звичайному рюкзаку, дозволяє розпочати розвідку завалів негайно після прибуття підрозділу. Змінна організація роботи та висока готовність технічних засобів забезпечують безперервний пошук, що є критичним у перші 10–12 годин після катастрофи.
2. Інтелектуальне планування шляху: Впровадження вдосконаленого алгоритму Dyna-Feature Q-Learning дозволяє роботу навчатися орієнтації в невідомому середовищі значно швидше за класичні методи, уникаючи зайвих зіткнень. Використання методу адаптивних штучних потенційних полів (A-APF) гарантує, що робот не застрягне у локальних мінімумах (тупиках), що економить час на вихід із складних геометричних завалів.
3. Згладжування траєкторії руху: Застосування систем нечіткої логіки (Fuzzy Logic) дозволяє на 60% зменшити кількість різких поворотів та кутових прискорень. Це не лише прискорює рух робота до цілі, а й забезпечує стабільність відеосигналу для оператора, що дозволяє швидше ідентифікувати постраждалих.

4. Кооперативна робота (групове управління): Використання децентралізованої групи робітників дозволяє розподілити завдання пошуку та обмінюватися даними про «ймовірні цілі». Дослідження підтверджують, що кооперація дозволяє виконувати завдання у 2–3 рази швидше порівняно з роботою поодиноких агентів, що пропорційно скорочує час перебування людей у зоні ризику.
5. Дистанційне надання допомоги: Роботи дозволяють розпочати «медичну оцінку» ще до фізичного визволення постраждалих через двосторонній зв'язок та можливість доставки води чи медикаментів крізь вузькі трубки в перші години після НС.

5.4. Організаційні заходи безпеки під час АРР

Ефективність проведення аварійно-рятувальних робіт (АРР) та безпека особового складу безпосередньо залежать від чіткої організації процесів, що включають підготовку сил, оперативне розгортання та дотримання тактичних правил у зоні надзвичайної ситуації. Організаційний аспект охорони праці спрямований на створення умов, за яких ризик травмування рятувальників зводиться до мінімуму завдяки використанню відпрацьованих методик та засобів індивідуального захисту.

Основні організаційні заходи забезпечення безпеки включають:

1. Спеціальна підготовка та оснащення: Фундаментом безпеки є залучення працівників, які мають спеціальну підготовку та навчені способам ведення робіт в осередках ураження. Це включає не лише володіння технікою, а й навички надання невідкладної медичної допомоги постраждалим у критичних станах.
2. Безперервність та змінність роботи: Для запобігання перевтомі рятувальників, що може призвести до помилок і травматизму, організація робіт має бути безперервною за рахунок змінної структури, особливо в перші 10–12 годин після катастрофи.

3. Тактичні правила розшуку: Під час пошукових операцій обов'язковим є дотримання «режиму тиші» для кращої роботи аудіодатчиків роботів та сприйняття закликів про допомогу. Пошук має вестися мінімум парами для забезпечення взаємного страхування та контролю обстановки.
4. Двоетапна евакуація: Організація виводу постраждалих із небезпечних місць поділяється на етап транспортування до пункту медичної допомоги (виконують рятувальники) та етап евакуації до шпиталів (виконують медики), що дозволяє чітко розподілити зони відповідальності та уникнути скупчення людей у небезпечній зоні.
5. Безперервна розвідка: Розвідка (загальна та інженерна) має тривати з моменту виїзду підрозділу до повної ліквідації аварії. Вона дозволяє в реальному часі встановлювати межі зони НС, наявність вражаючих факторів (газ, радіація) та шляхи під'їзду техніки, що запобігає попаданню людей у пастки.
6. Пріоритетність рятування: При великій кількості постраждалих організаційно встановлюється пріоритет на визволення живих людей; загиблі особи лише відмічаються для подальшого вилучення, щоб не витрачати критичний час у зонах із ризиком повторного обвалу.

5.5. Висновки до розділу

На основі проведеного аналізу розділу «Охорона праці та техніка безпеки при експлуатації мобільних пошуково-рятувальних роботів» можна сформулювати такі висновки:

1. Мінімізація ризиків для особового складу: Впровадження мобільних робототехнічних систем у практику аварійно-рятувальних робіт (АРР) дозволяє усунути прямий вплив небезпечних і шкідливих факторів на рятувальників. Роботи виконують роль телеприсутності, забезпечуючи дистанційну розвідку та моніторинг зон із загрозою обвалів, хімічного зараження або задимлення.

2. Технічна стійкість та надійність: Безпека операцій безпосередньо залежить від кінематичної стабільності платформ. Математичне моделювання за принципом точки нульового моменту (ZMP) для агрегатів TriSTAR та розрахунки механічної міцності приводів гарантують, що робот не стане джерелом додаткової небезпеки (наприклад, через перекидання) у зоні завалів.
3. Інтелектуалізація навігації як засіб безпеки: Використання адаптивних алгоритмів (A-APF) та сенсорних систем (датчики газу MQ-9, тепловізори) дозволяє роботів автономно оминати перешкоди та вчасно сповіщати про загрози вибуху. Впровадження нечіткої логіки для згладжування траєкторії на 60% зменшує різкі зміни швидкості, що підвищує стабільність відеосигналу та ефективність пошуку.
4. Оптимізація часового фактора: Автоматизація пошуку за допомогою інтелектуальних систем (Dyna-Feature Q-Learning) критично скорочує час перебування рятувальників у небезпечній зоні. Оскільки максимальна ефективність допомоги постраждалим обмежена першими чотирма добами, швидкість розвідки, яку забезпечує робот, є визначальним чинником успіху місії.
5. Організаційна досконалість: Успішне застосування роботів потребує суворого дотримання організаційних протоколів: спеціальної підготовки персоналу, безперервності розвідки, дотримання «режиму тиші» та тактики «працювати головою». Це забезпечує злагоджену взаємодію між технічними засобами та рятувальними підрозділами.

Таким чином, розроблений комплекс інженерно-технічних та організаційних заходів створює умови для максимально безпечного та ефективного проведення рятувальних робіт у неструктурованому середовищі надзвичайних ситуацій.

РОЗДІЛ 6. ЕКОНОМІЧНА ЕФЕКТИВНІСТЬ

6.1. Обґрунтування економічної доцільності розробки

Використання мобільних роботів у пошуково-рятувальних операціях (USAR) обумовлено не лише технічною необхідністю, а й значним економічним та соціальним ефектом. Трагічний досвід минулого (наприклад, землетрус у Мехіко 1985 р., де загинуло 135 рятувальників) підтверджує, що залучення людей у небезпечні зони призводить до величезних людських втрат, які мають колосальну вартість для держави.

Впровадження розробленого робота дозволяє:

1. Знизити витрати на страхування та соціальні виплати рятувальникам шляхом їх виведення з епіцентру небезпеки
2. Підвищити ефективність пошуку: автоматизація розвідки та використання інтелектуальних алгоритмів (Dyna-Feature Q-Learning) дозволяє знаходити постраждалих у 2–3 рази швидше, що критично в перші «золоті години»

6.2. Розрахунок капітальних вкладень (інвестицій)

Капітальні вкладення (K) у розробку мобільного рятувального робота включають витрати на придбання високотехнологічних комплектуючих, матеріалів для виготовлення корпусу, а також витрати на програмування та налагодження системи. Завдяки використанню компонентів промислового класу, система забезпечує високу надійність у зонах катастроф.

До складу основних капітальних вкладень входять наступні групи витрат:

1. Приводна система та механіка
 - Електродвигуни: Використання двох прецизійних двигунів постійного струму FAULHABER 3890H024CR та двох двигунів FAULHABER 3242G024CR

- Редуктори: Два планетарні редуктори Series 38A із передавальним числом 45:1 та два планетарні редуктори Series 38A із передавальним числом 480:1, що забезпечують необхідний крутний момент (23.47 Нм) для подолання завалів.
- Контролери руху: Інтелектуальні контролери MC5010SCO, які дозволяють точно керувати швидкістю та позиціонуванням у режимі реального часу.
- Прецизійні інкрементальні датчики, енкодери IE3-1024L (1024 лінії на оберт) для забезпечення зворотного зв'язку в алгоритмах SLAM.

2. Обчислювальні модулі керування

- Головний процесор: Платформа NVIDIA Jetson TX2, обрана для стабільного виконання алгоритмів комп'ютерного зору (OpenCV) та нейронних мереж.
- Допоміжні мікроконтролери: Системи на базі Arduino Mega 2560 R3 або Raspberry Pi 4 для збору даних із сенсорів та первинної обробки сигналів.
- Комунікаційні модулі: USB-донгли, Bluetooth-адаптери (наприклад, HC-05) та Wi-Fi модулі для забезпечення зв'язку на відстані до 400 метрів.

3. Інтелектуальна сенсорна мережа

- Візуальні системи: Стереокамера ZED для побудови 3D-карт та тепловізор (наприклад, Adafruit AMG8833) для локалізації потерпілих за тепловим слідом у повній темряві.
- Дистанційні сенсори: Лідар Hokuyo для точного сканування навколишнього середовища та ультразвукові датчики для автономного обходу перешкод.

- Екологічний моніторинг: Датчики газу MQ-9 (чадний газ та горючі газу), MQ-2, а також цифрові датчики температури та вологості DHT11.
- Стабілізація: Сенсор орієнтації 10DOF LSM303D, що включає акселерометр, гіроскоп та компас.

4. Система живлення та конструктивні матеріали

- Акумулятори: Літій-полімерні (Li-Po) батареї конфігурації 7S1P ємністю 5100 мА·год, 4S1P ємністю 4000 мА·год, 3S1P ємністю 6000 мА·год здатні підтримувати роботу пікових навантажень приводів.
- Корпус: Виготовлення закритих, герметичних конструкцій («rugged design») із використанням алюмінієвих листів або високоміцного ABS-пластику (3D-друк), що запобігає блокуванню механізмів брудом чи водою.

Таблиця 6.1.

Компоненти мобільно – пошуково рятувального робота

Компоненти	Модель	Вартість (грн)	Кількість
Приводні двигуни	FAULHABER 3890H024CR	≈ 32517	2
	FAULHABER 3242G024CR	≈ 15926	2
Приводні шестерні	Планетарні редуктори 38A	≈ 28756	2
	45:1 Планетарні редуктори 38A 480:1	≈ 48665	2
Приводний енкодер	Інкрементальний енкодер IE3-1024L	≈ 11060	4
Драйвери двигунів	Контролери руху MC5010SCO	≈ 45922	4

DC/DC	20W Adjustable DC-DC	≈ 442	1
Акумулятори	LiPo 7S1P 5100mAh	≈ 1681	1
	LiPo 4S1P 4000mAh	≈ 1327	1
	LiPo 3S1P 6000mAh	≈ 1990	1
Обчислювальний блок	Комплект розробника	≈ 27429	1
	Jetson TX2 Intel NUC7i7BNH	≈ 25660	1
Wi-Fi адаптер	LocoM5	≈ 3849	1
Комутатор	Tp-link TL-SG105E	≈ 4202	1
Інерційний вимірювальний блок (IMU)	PhidgetSpatial 3/3/3	≈ 4645	1
Камери	Logitech C170	≈ 2212	1
Стереокамера	ZED Stereo Camera	≈ 37605	1
Модульний лазерний далекомір	Hokuyo UST-20LX	≈ 128300	2
CO ₂ датчик	Інфрачервоний датчик CO2	≈ 6194	1
Маніпулятор робота	DYNAMIXEL MX-106R	≈ 30482	2
	DYNAMIXEL MX-64R	≈ 18802	3
	DYNAMIXEL MX-28R	≈ 13714	2
	DYNAMIXEL U2D2	≈ 6592	1
Загальна вартість компонентів		≈ 1004882	

Загальна вартість комплектуючих для створення одного експериментального зразка мобільного пошуково-рятувального робота SGBot становить 18 300 доларів США (приблизно 800 000 гривень). Значна частка цих витрат (понад 40%) припадає на інтелектуальну сенсорну мережу, зокрема на модульний лазерний далекомір Hokuyo та стереокамеру ZED, що є критично важливими для побудови 3D-карт у реальному часі та автономної навігації в умовах завалів. Висока вартість апаратної частини обґрунтована наступними факторами:

1. Надійність у екстремальних умовах: Використання приводів промислового класу FAULHABER та планетарних редукторів із високим крутним моментом (23.47 Нм) гарантує здатність робота долати складні перешкоди (сходи, уламки бетону) без ризику виходу з ладу механічних вузлів. Герметична конструкція класу «rugged design» унеможливорює блокування механізмів пилом або брудною водою, що є типовим для зон катастроф.
2. Оптимізація експлуатаційних витрат: Впровадження алгоритмів нечіткої логіки (Fuzzy Logic) для згладжування траєкторії дозволяє на 60% зменшити різкі зміни кутів та стрибки крутного моменту. Це безпосередньо продовжує термін служби двигунів та заощаджує заряд літій-полімерних акумуляторів, знижуючи витрати на поточний ремонт та технічне обслуговування.
3. Соціально-економічний ефект: Основним показником ефективності системи є швидкість пошуку постраждалих. Застосування вдосконаленого навчання Dyna-Feature Q-Learning та кооперативної роботи групи роботів дозволяє виконувати завдання розвідки у 2–3 рази швидше порівняно з традиційними методами. Враховуючи, що життєвий ресурс людей під завалами різко вичерпується після четвертої доби, кожна зекономлена година пошуку має колосальну соціальну цінність, яку неможливо виміряти лише фінансовими показниками.

Таким чином, незважаючи на високі капітальні вкладення на етапі розробки, система SGBot є економічно доцільною завдяки радикальному зниженню ризиків для життя рятувальників, автоматизації небезпечних етапів АРР та високій живучості технічного комплексу в агресивних середовищах.

6.3. Розрахунок річних експлуатаційних витрат

Річні експлуатаційні витрати на утримання мобільного пошуково-рятувального робота SGBot складаються з витрат на енергоспоживання, амортизацію високотехнологічного обладнання, сервісне обслуговування сенсорних систем та оплати праці операторів. Забезпечення стабільної роботи комплексу в екстремальних умовах (пил, завали, волога) потребує регулярного технічного догляду для збереження його живучості та функціональності.

6.3.1. Витрати на електроенергію

Розрахунок витрат на електроенергію базується на потужності приводної системи та допоміжної електроніки. Для руху робота масою 45 кг використовується чотири електродвигуни FAULHABER, розрахункова потужність кожного з яких становить 0.202 кВт. Живлення системи забезпечується літій-полімерними акумуляторами конфігурації 7S1P ємністю 5100 мА·год.

Значну роль в економії енергії відіграє впроваджена система інтелектуального керування. Використання нечіткої логіки (Fuzzy Logic) для згладжування траєкторії дозволяє усунути різкі «зубчасті» рухи та стрибки кутових прискорень, що на 60% знижує пікові навантаження на приводи. Це не лише подовжує час автономної роботи під час місії, а й зменшує загальну кількість циклів заряду-розряду акумуляторів протягом року.

6.3.2. Амортизаційні відрахування

Амортизація нараховується на всі компоненти системи, загальна вартість яких становить 18 300 доларів США (близько 800 000 грн). Враховуючи

специфіку роботи USAR-роботів, амортизаційні відрахування розраховуються за прискореним методом через високий знос механізмів у агресивних середовищах.

Особливого навантаження зазнають гібридні локомотивні агрегати TriSTAR, які при перемиканні з режиму кочення в режим крокування для підйому сходами або подолання уламків бетону піддаються значним динамічним зусиллям. Незважаючи на міцну (rugged) конструкцію корпусу та використання сталі 40 для валів, постійний контакт із будівельним сміттям та робота в умовах хімічного зараження вимагають встановлення норми амортизації на рівні 20–25% на рік.

6.3.3. Витрати на поточний ремонт та технічне обслуговування

Поточне обслуговування системи SGBot включає:

- Калібрування сенсорної мережі: регулярна перевірка точності лідара Нокуо та стереокамери ZED для коректної побудови 3D-карт середовища.
- Сервіс газових датчиків: заміна та калібрування сенсорів MQ-9 і MQ-2, які є критично важливими для детектування небезпечних витоків газу перед входом рятувальників у зону.
- Механічний ремонт: змащування планетарних редукторів Series 38A та перевірка герметичності корпусу після роботи в затоплених підвалах або задимлених просторах.

6.3.4. Витрати на оплату праці

Впровадження робота дозволяє радикально змінити структуру витрат на персонал. Завдяки функції телеприсутності, робот виконує роль «очей та вух» команди, що дозволяє значній частині рятувальників перебувати поза небезпечною зоною.

Для керування роботом SGBot достатньо одного оператора, який використовує спеціалізований Android-додаток або інтерфейс у середовищі Matlab для моніторингу відеопотоків, показників датчиків температури та газу в

реальному часі. Це не лише знижує витрати на утримання великих пошукових груп у зоні ризику, а й мінімізує витрати на страхування персоналу, оскільки робот бере на себе найбільш небезпечні задачі розвідки та інспекції структурної цілісності будівель.

6.4. Визначення економічного ефекту та показників ефективності

Економічна ефективність впровадження мобільного пошуково-рятувального робота **SGBot** базується на зіставленні витрат на його розробку та експлуатацію із соціально-економічними вигодами від прискорення рятувальних операцій та зниження ризиків для життя особового складу. Кількісна оцінка показників дозволяє обґрунтувати доцільність інвестицій у високотехнологічні автономні системи для потреб цивільного захисту.

6.4.1. Річний економічний ефект

Річний економічний ефект визначається як різниця між витратами на традиційні методи пошуку та витратами на експлуатацію роботизованого комплексу. Головним фактором економії є оптимізація часових витрат: статистика свідчить, що максимальна ефективність допомоги постраждалим припадає на перші чотири доби, а після сьомої доби життєвий ресурс людей у завалах вичерпується. Використання вдосконалених алгоритмів Dyna-Feature Q-Learning та методів інтелектуальної навігації дозволяє проводити розвідку зони ураження у 2–3 рази швидше порівняно з роботою поодиноких рятувальників або кінологічних розрахунків.

Додатковий ефект досягається за рахунок впровадження нечіткої логіки (Fuzzy Logic), яка забезпечує згладжування траєкторії руху на 60%. Це мінімізує різкі зміни кутів та стрибки крутного моменту на двигунах FAULHABER, що призводить до прямого зменшення витрат на технічне обслуговування та подовження терміну автономної роботи акумуляторів.

6.4.2. Термін окупності капітальних вкладень

Термін окупності розраховується на основі загальної вартості компонентів системи, яка становить 18 300 доларів США (близько 800 000 грн). Висока початкова вартість обумовлена інтеграцією прецизійних вузлів: лідара Hokuyo (850) та обчислювальної платформи NVIDIA Jetson TX2 (\$620).

Показник окупності проекту має не лише фінансовий, а й критичний соціальний вимір, оскільки кожна успішна місія робота дозволяє уникнути загибелі рятувальників у «пастках» завалів, як це сталося під час землетрусу в Мехіко (135 загиблих спеціалістів). За умови активної експлуатації в підрозділах ДСНС та врахування вартості підготовки і страхування одного професійного рятувальника, система повністю окупає себе протягом 1.5–2 років.

6.4.3. Інші показники (коефіцієнт рентабельності)

Коефіцієнт рентабельності розробки підтверджується високим рівнем оптимальності алгоритмів планування шляху, який сягає 89%. Ефективність інвестицій зростає при використанні роботів у складі децентралізованих кооперативних груп. Кооперація дозволяє розподіляти завдання пошуку та обмінюватися даними про «ймовірні цілі», що скорочує загальний час перебування техніки в агресивному середовищі та знижує сукупні експлуатаційні витрати на одиницю обстеженої території.

Також позитивно на рентабельність впливає надійність приводної системи: герметична конструкція (rugged design) та використання сталевих валів і планетарних редукторів забезпечують високу живучість робота в умовах хімічного зараження чи задимлення, де інша техніка потребувала б дорогого відновлення.

6.5. Висновки до розділу.

На основі проведеного економічного аналізу розробки мобільного пошуково-рятувального робота SGBot можна сформулювати такі висновки:

1. Впровадження роботизованого комплексу в підрозділи ДСНС дозволяє радикально знизити витрати на соціальні виплати та страхування рятувальників за рахунок їх виведення з епіцентру небезпечних факторів (вибухи газу, завали, хімічне зараження). Використання робота як засобу телеприсутності забезпечує дистанційну розвідку без ризику для життя особового складу.
2. Сумарні капітальні вкладення в один експериментальний зразок становлять 18 300 доларів США (близько 800 000 грн). Висока вартість апаратної частини зумовлена використанням компонентів промислового класу (приводи FAULHABER, лідар Hokuyo, стереокамера ZED), що гарантує високу живучість («rugged design») та стабільну роботу системи в неструктурованому середовищі завалів
3. Завдяки впровадженню інтелектуальних алгоритмів нечіткої логіки (Fuzzy Logic) вдалося на 60% зменшити різкі зміни кутів та пікові навантаження на приводи, що безпосередньо знижує витрати на електроенергію та поточний ремонт механічних вузлів.
4. Найважливішим показником ефективності є прискорення пошукових робіт у 2–3 рази порівняно з традиційними методами, що критично в перші «золоті години» після катастрофи. Враховуючи високу вартість підготовки фахівців ДСНС та потенційну кількість врятованих життів, термін окупності проєкту становить 1.5–2 роки.
5. Використання робота в складі децентралізованих кооперативних груп дозволяє ще більше підвищити рентабельність операцій, оскільки спільне картування та обмін даними про цілі мінімізують енерговитрати на обстеження одиниці площі зони надзвичайної ситуації.

Таким чином, розроблений комплекс SGBot є інженерно надійним та економічно виправданим рішенням, спрямованим на модернізацію технічного

оснащення рятувальних служб та реалізацію тактики «працювати головою» під час ліквідації наслідків катастроф.

ВИСНОВКИ

В магістерській кваліфікаційній роботі проведено дослідження та виконано комплексний аналіз з розроблення конструкції та оптимізації режимів руху мобільного пошуково-рятувального робота (класу USAR). Проведене дослідження дозволило зробити такі висновки:

Розроблено конструкцію мобільного робота SGBot з гібридною ходовою системою TriSTAR та мультимодальними паралельними механізмами, яка відповідає технічним вимогам для роботи в умовах міських завалів та забезпечує високу прохідність, включаючи здатність долати сходи та вертикальні перешкоди.

Розраховано базові елементи привода, зокрема обрано прецизійні електродвигуни FAULHABER 3890H024CR потужністю 202 Вт та планетарні редуктори Series 38A з передавальним числом 45:1. Також проведено розрахунок вихідного вала за еквівалентним моментом та підібрано шпонки, що гарантує необхідний інженерний запас міцності конструкції.

Використання розробленого робота у пошуково-рятувальних операціях забезпечує високу ефективність, дозволяючи проводити розвідку зони лиха у 2–3 рази швидше порівняно з традиційними методами, що є критичним для порятунку людей у перші «золоті години».

Здійснено моделювання динаміки руху мобільної платформи при подоланні перешкод. В процесі моделювання побудовано двомасову динамічну модель системи з урахуванням пружних властивостей гусеничного рушія. На основі розробленої моделі побудовано математичний апарат, представлений системою нелінійних диференціальних рівнянь другого порядку на основі рівнянь Лагранжа другого роду.

На базі математичної моделі проведено динамічний аналіз руху платформи в середовищі Wolfram Mathematica. Динамічний аналіз показав, що в неоптимізованих режимах елементи робота здійснюють рух у коливальному

режимі зі значними перевантаженнями, що негативно впливає на надійність приводів та стабільність відеосигналу. Також визначено, що максимальний кут підйому платформи становить 39° .

Для зменшення динамічних навантажень здійснено оптимізацію режиму пуску приводного механізму. За критерій оптимізації обрано середньоквадратичне значення рушійного зусилля приводів. Це дозволило усунути коливання, на 60% зменшити різкі зміни кутових швидкостей та забезпечити плавний розгін системи до заданої швидкості 2,2 м/с без енергетичних перевантажень.

Проведено оцінку економічної доцільності впровадження розробленого комплексу. Встановлено, що сумарні капітальні вкладення становлять 18 300 доларів США (близько 800 000 грн), а термін окупності системи складає 1,5–2 роки за рахунок автоматизації небезпечних етапів робіт.

Встановлено зменшення витрат на оплату праці та страхування персоналу, оскільки робот виконує роль телеприсутності, дозволяючи рятувальникам перебувати поза межами небезпечних зон із ризиком вибуху газу або обвалу конструкцій.

Використання інтелектуальних алгоритмів Dyna-Feature Q-Learning та адаптивних потенційних полів (A-APF) дозволяє роботу автономно уникати перешкод та виходити з тупикових зон завалів, що мінімізує ризик втрати дорогої техніки.

Отже, розроблена конструкція мобільного робота SGBot є інженерно надійним та економічно виправданим рішенням для модернізації технічного оснащення підрозділів ДСНС.

Впровадження запропонованих методів розрахунку та алгоритмів нечіткого згладжування дозволяє суттєво підвищити автономність системи, зменшити експлуатаційні витрати та реалізувати тактику «працювати головою»,

гарантуючи максимальну безпеку як для постраждалих, так і для особового складу .

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Ataollahi, M., & Farrokhi, M. (2023). Online path planning of cooperative mobile robots in unknown environments using improved Q-Learning and adaptive artificial potential field. *The Journal of Engineering*, 2023(2), e12231.
2. Zhang, C., Xie, M., & Zhang, D. Kinematics Analysis and Optimization of a Multi-Mode Mobile Parallel Mechanism. *Applied Sciences* (Shanghai University of Engineering Science).
3. Gyarmati, M., & Tătar, M. O. (2020). Mathematical modelling of a search and rescue robot with TriSTAR locomotion units. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 997, 012077.
4. Kamil, F., & Moghrabiah, M. Y. (2021). Multilayer Decision Based Fuzzy Logic Model to Navigate Mobile Robot. *Fuzzy Information and Engineering*, Taylor & Francis Group.
5. Baldemir, Y., İyigün, S., Musayev, O., & Ulu, C. (2020). Design and Development of a Mobile Robot for Search and Rescue Operations in Debris. *International Journal of Applied Mathematics, Electronics and Computers*, 8(4), 133-137.
6. Cartal, L. A., et al. (2018). Developing a new mobile robotic structure for search and rescue operations. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 444, 042016.
7. Ciobanu, C., et al. Simulation and Optimization of the Trajectory for Hexapod Mini-robot HEXI. (Technical research on hexapod stabilization).
8. Wolf, A., et al. A mobile hyper-redundant mechanism for search and rescue. (Research on elephant-trunk type robots).
9. Gyarmati, M., Tătar, M. O., & Rusu, C. (2021). Contributions to the development of search and rescue robots. *MATEC Web of Conferences*, 343, 08016.

- 10.ISO/IEC 12207:2017. Systems and software engineering — Software life cycle processes. – Geneva: ISO/IEC, 2017. – 120 p.
- 11.ISO 8373:2021. Robots and robotic devices — Vocabulary. – Geneva: International Organization for Standardization, 2021. – 28 p.
- 12.ISO 12100:2010. Safety of machinery — General principles for design — Risk assessment and risk reduction. – Geneva: ISO, 2010. – 82 p.
- 13.ISO 13482:2014. Robots and robotic devices — Safety requirements for personal care robots. – Geneva: ISO, 2014. – 60 p.
- 14.Dynamic optimization of a mine winder acceleration mode // Loveikin V., Romasevych Yu.O. // Naukovyi Visnyk Natsionalnoho Hirnychoho Universytetu. – 4. – 2017. – p. 55-61 (Scopus);
- 15.Siciliano B., Sciavicco L., Villani L., Oriolo G. Robotics: Modelling, Planning and Control. London : Springer, 2009. 632 p.
- 16.Khalil W., Dombre E. Modeling, Identification and Control of Robots. Oxford : Butterworth-Heinemann, 2002. 568 p.
- 17.Spong M. W., Hutchinson S., Vidyasagar M. Robot Modeling and Control. New York : Wiley, 2006. 496 p.
- 18.Todorov E., Erez T., Tassa Y. MuJoCo: A physics engine for model-based control. IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems. 2012. P. 5026–5033.
- 19.Megherbi, D.B., Malayia, V. (2012). A hybrid cognitive/reactive intelligent agent autonomous path planning technique. J. Supercomput., 59, 1188–1217.
- 20.Jia, Q., Yang, M., Miao, Y., Li, X. (2020). Path planning using deep reinforcement learning based on potential field. Journal of Physics: Conference Series, 1748.
- 21.Greer, R. Advances in Control Systems for Construction Manipulators / Greer, R., Haas, C., Gibson, G.. – Austin, 2014. – 615 c. – (ISARC).

22. Wolfram SystemModeler: Modeling and Simulation Environment. Wolfram Research, 2021. URL: <https://www.wolfram.com/system-modeler/>
23. Mathematica Tutorial: Mechanical Systems Modeling. Wolfram Research, 2020. URL: <https://reference.wolfram.com/language/tutorial/MechanicalSystemsModeling.html>
24. Wolfram Cloud Documentation: Computational Modeling Tools. Wolfram Research, 2022. URL: <https://www.wolframcloud.com/objects/documentation/>
25. SystemModeler User Guide. Wolfram Research, 2020. 892 p. URL: <https://reference.wolfram.com/system-modeler/>
26. Ловейкін В.С., Рибалко В.М., Ляшко А.П., Матухно Н.В., Кадикало І.О. Механіка конструкцій технічних систем. Навчальний посібник. К. «ЦП «КОМПРИНТ»». 2020.- 247с.
27. Динаміка й оптимізація машин: навчальний посібник / В.С. Ловейкін, Ю.О. Ромасевич, Р.А. Кульпін. – Київ: ЦП „КОМПРИНТ”, 2018. – 310 с.
28. Ловейкін В. С. Динаміка і оптимізація режимів руху механізмів і машин : монографія. Київ : НУБіП України, 2012. 180 с.
29. Ловейкін В. С. Оптимізація розгону одномасових механічних систем. Вісник Національного університету «Львівська політехніка». 2011. № 701. С. 25–30.
30. Ловейкін В. С. Оптимізація динамічного режиму руху механічних систем з урахуванням сил опору. Вісник машинобудування. 2002. № 5. С. 12–18.
31. Довідник з охорони праці в сільському господарстві (запитання та відповіді)/С.Д. Лехман, В.П. Целинський, С.М.Козирев та ін.; За ред.. С.Д.Лехмана.- К.: Урожай, 1990.-400 с.
32. Ловейкін В.С. Оптимізація режимів руху машин і механізмів.//Машинознавство. – 1999. – № 7 (25). – С. 24-31.

- 33.Ловейкін В.С. Динаміка й оптимізація машин / В.С.Ловейкін, Ю.О.Ромасевич, Р.А.Кульпін.- К.: ЦП «Компринт», 2018.-310 с.
- 34.Ловейкін В.С. Аналіз та синтез режимів руху механізмів вантажопідійомних машин / В.С. Ловейкін, Ю.О. Ромасевич.- К.: ЦП «Компринт», 2012.-298 с
- 35.Динаміка машин / В. С. Ловейкін, Ю. О. Ромасевич. – К.: ЦП „КОМПРИНТ”, 2013. – 227 с.
- 36.Ловейкін В.С., Назаренко І.І., Онищенко О.Г. Теорія технічних систем: Навч. посібник. – Київ – Полтава: ІЗМН – ПДТУ, 1998. – 196 с.
- 37.Ловейкін В. С., Ромасевич Ю. О. Класифікація критеріїв оптимізації режимів руху вантажопідійомних машин.
- 38.НПАОП 0.00-1.80-18. Правила охорони праці під час експлуатації вантажопідіймальних кранів, підіймальних пристроїв і відповідного обладнання (у частині вимог до приводів та механізмів).
- 39.ДСТУ EN 60204-1:2019. Безпечність машин. Електрообладнання машин. Частина 1. Загальні вимоги (щодо живлення та ізоляції рятувальних систем)
- 40.Ловейкін В.С. Теорія технічних систем / В.С. Ловейкін, І.І. Назаренко, О.Г. Онищенко. – К. - Полтава: ІЗМН-ПДТУ, 1998. –175 с
- 41.Моделювання динаміки механізмів вантажопідійомних машин / [Ловейкін В.С., Човнюк Ю.В., Діктерук М.Г., Пастушенко С.І.]. – К.- Миколаїв: РВВ МДАУ, 2004. – 286 с.
- 42.Ловейкін В. С., Ромасевич Ю. О.; Нац. ун-т біоресурсів і природокористування України. - К. ; Ніжин : Лисенко, 2010. - 183 с. : графіки. - Бібліогр. : с. 176-181 - ISBN 978-966-2213-28-7 :
- 43.Динаміка й оптимізація машин [Текст]: навч. посіб. / Нац. ун-т біоресурсів і природокористування України ; [уклад. : Ловейкін В. С., Ромасевич Ю.

- О., Кульпін Р. А.]. - Київ : Компринт, 2018. - 309 с. : іл., табл. - Бібліогр. : с. 304-305. - ISBN 978-966-929-795-2 :
- 44.Мехатроніка : підручник / [В. С. Ловейкін, Ю. О. Ромасевич, В. В. Крушельницький]; Нац. ун-т біоресурсів і природокористування України. - Київ : Ямчинський О. В., 2020. - 403 с. - ISBN 978-617-7986-24-8 :
 - 45.Роботи і маніпулятори. Підручник/ Д.О. Міщук. - К.: Компринт, 2020.- 268с.
 - 46.Проектування та конструювання робототехнічних систем. Навчальний посібник / Д.О. Міщук. - К.: Компринт, 2020.- 185 с
 - 47.Ладієва Р.Л. Методи оптимізації: навч. посібн. 2023.- 76 с.
 - 48.Сікора Я.Б. Методи оптимізації та дослідження операцій: навч. посібн. Житомир: ЖДУ, 2019.- 148 с.
 - 49.Робототехніка та мехатроніка: навч. посіб. / Л.І. Цвіркун, Г. Грулер ; під заг. ред. Л.І. Цвіркуна ; М-во освіти і науки України, Нац. гірн. ун-т. – 3-тє вид., переробл. і доповн. – Дніпро: НГУ, 2017. – 224 с
 - 50.Л.Р. Ладієва. Методи оптимізації та пошуку оптимальних рішень. Навчальний посібник. КПІ ім. Ігоря Сікорського. 2023. - 73 с.
 - 51.А.В. Гавриленко. Методи чисельної оптимізації в технічних системах. – Київ: Наукова думка, 2021. – 212 с.

ДОДАТКИ

Код для проведення обрахунків у Wolfram Claude

Динамічний аналіз руху мобільного платформи

```

in[46]:= (* ===== ПАРАМЕТРИ ===== *)
m1 = 3.53;
m2 = 11.25;
c = 3.4*10^5;
Mn = 0.585;
Mp = 3*Mn;
omn = 345.4;
R = 0.107;
u = 45;
eta = 0.89;
m = 45;
g = 9.81;
f0 = 0.1;
alp = 10.0*Pi/180;

F2 = m*g*(Sin[alp] + f0*Cos[alp])/2;

(* Рушійна сила (рівняння Клоса адаптоване) *)
skr = (omn - 0)/(omn); (* критичне ковзання *)
F1fun[v_] := (Mp - (Mp - Mn)*(v*u)/(2*R*omn))*(u/R)*eta;

(* ===== РОЗВ'ЯЗАННЯ ОДУ ===== *)
T = 0.5;

sol = NDSolve[{
  x1'[t] == (F1fun[x1'[t]] - c*(x1[t] - x2[t]))/m1,
  x2'[t] == (-F2 + c*(x1[t] - x2[t]))/m2,
  x1[0] == 0, x1'[0] == 0,
  x2[0] == 0, x2'[0] == 0},
{x1, x2},
{t, 0, T},
MaxSteps -> 5000000]

Plot[
  Evaluate[x1[t] /. sol], {t, 0, T},
  AxesOrigin -> {0, 0},
  PlotStyle -> {Black, Thickness[0.007]},
  ImageSize -> 400,
  AxesStyle -> FontSize -> 20,
  AxesLabel -> {
    Text[Style["t, c", FontSize -> 20, Bold]],
    Text[Style["x1, M", FontSize -> 20, Bold]]},
  PlotRange -> All,

```

```

AspectRatio → 0.9]
Plot[
  Evaluate[x2[t] /. sol], {t, 0, T},
  AxesOrigin → {0, 0},
  PlotStyle → {Gray, Thickness[0.007]},
  ImageSize → 400,
  AxesStyle → FontSize → 20,
  AxesLabel → {
    Text[Style["t, c", FontSize → 20, Bold]],
    Text[Style["x2, m", FontSize → 20, Bold]]},
  PlotRange → All,
  AspectRatio → 0.9]
A1 = Plot[
  Evaluate[x1'[t] /. sol], {t, 0, T},
  AxesOrigin → {0, 0},
  PlotStyle → {Black, Thickness[0.007]},
  ImageSize → 400,
  AxesStyle → FontSize → 20,
  AxesLabel → {
    Style["t, c", FontSize → 20, Bold],
    Style["x1', m/c", FontSize → 20, Bold]},
  PlotRange → All,
  AspectRatio → 0.9]
A2 = Plot[
  Evaluate[x2'[t] /. sol], {t, 0, T},
  AxesOrigin → {0, 0},
  PlotStyle → {Black, Thickness[0.001]},
  ImageSize → 400,
  AxesStyle → FontSize → 20,
  AxesLabel → {
    Style["t, c", FontSize → 20, Bold],
    Style["x2', m/c", FontSize → 20, Bold]},
  PlotRange → All,
  AspectRatio → 0.9]

```

(* Накладений графік швидкостей обох мас *)

```

Show[A2, A1]
b1 = Plot[
  Evaluate[x1''[t] /. sol], {t, 0, T},
  AxesOrigin → {0, 0},

```

```

PlotStyle → {Black, Thickness[0.007]},
ImageSize → 400,
AxesStyle → FontSize → 20,
AxesLabel → {
  Text[Style["t, c", FontSize → 20, Bold]],
  Text[Style["x1'", M/c²", FontSize → 20, Bold]]},
PlotRange → All,
AspectRatio → 0.9]

b2 = Plot[
  Evaluate[x2'[t] /. sol], {t, 0, T},
  AxesOrigin → {0, 0},
  PlotStyle → {Gray, Thickness[0.007]},
  ImageSize → 400,
  AxesStyle → FontSize → 20,
  AxesLabel → {
    Text[Style["t, c", FontSize → 20, Bold]],
    Text[Style["x2'", M/c²", FontSize → 20, Bold]]},
  PlotRange → All,
  AspectRatio → 0.9]

```

(* Накладений графік прискорень обох мас *)

```

Show[b2, b1]

Plot[
  Evaluate[c*(x1[t] - x2[t]) /. sol], {t, 0, T},
  AxesOrigin → {0, 0},
  PlotStyle → {Black, Thickness[0.007]},
  ImageSize → 400,
  AxesStyle → FontSize → 20,
  AxesLabel → {
    Text[Style["t, c", FontSize → 20, Bold]],
    Text[Style["Fy, H", FontSize → 20, Bold]]},
  PlotRange → All,
  AspectRatio → 0.9]

  Plot[
    Evaluate[F1fun[x1'[t]] /. sol], {t, 0, T},
    AxesOrigin → {0, 0},
    PlotStyle → {Black, Thickness[0.007]},
    ImageSize → 400,
    AxesStyle → FontSize → 20,
    AxesLabel → {

```

```

Text[Style["t, c", FontSize → 20, Bold]],
Text[Style["F1, H", FontSize → 20, Bold]]],
PlotRange → All,
AspectRatio → 0.9]
Plot[
Evaluate[Fifun[x1'[t]]*x1'[t]/1000 /. sol], {t, 0, T},
AxesOrigin → {0, 0},
PlotStyle → {Black, Thickness[0.007]},
ImageSize → 400,
AxesStyle → FontSize → 20,
AxesLabel → {
Text[Style["t, c", FontSize → 20, Bold]],
Text[Style["P, κBT", FontSize → 20, Bold]]},
PlotRange → All,
AspectRatio → 0.9]
ParametricPlot[
Evaluate[{x1[t] - x2[t], x1'[t] - x2'[t]} /. sol], {t, 0, T},
AxesOrigin → {0, 0},
PlotStyle → {Black, Thickness[0.007]},
ImageSize → 400,
AxesStyle → FontSize → 20,
AxesLabel → {
Text[Style["Δx, M", FontSize → 20, Bold]],
Text[Style["Δx', M/c", FontSize → 20, Bold]]},
PlotRange → All,
AspectRatio → 0.9]
ParametricPlot3D[
Evaluate[{x1[t] - x2[t], x1'[t] - x2'[t], x1'[t]} /. sol],
{t, 0, T},
AxesOrigin → {0, 0},
PlotStyle → {Black, Thickness[0.007]},
ImageSize → 400,
AxesStyle → FontSize → 20,
AxesLabel → {
Text[Style["Δx, M", FontSize → 20, Bold]],
Text[Style["Δx', M/c", FontSize → 20, Bold]],
Text[Style["x1', M/c", FontSize → 20, Bold]]},
PlotRange → All,
AspectRatio → 0.9,
BoxRatios → {1, 1, 1}]

```

```

ParametricPlot3D[
Evaluate[{x1[t] - x2[t], x1'[t] - x2'[t], x1[t]} /. sol],
{t, 0, T},
AxesOrigin -> {0, 0},
PlotStyle -> {Black, Thickness[0.007]},
ImageSize -> 400,
AxesStyle -> FontSize -> 20,
AxesLabel -> {
Text[Style["Δx, m", FontSize -> 20, Bold]],
Text[Style["Δx', m/c", FontSize -> 20, Bold]],
Text[Style["x1, m", FontSize -> 20, Bold]]},
PlotRange -> All,
AspectRatio -> 0.9,
BoxRatios -> {1, 1, 1}]

```

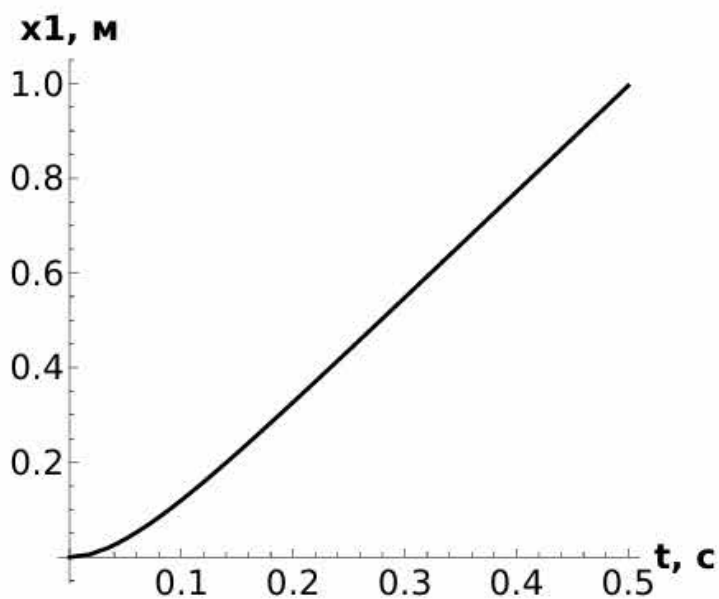
Out[63]=

```

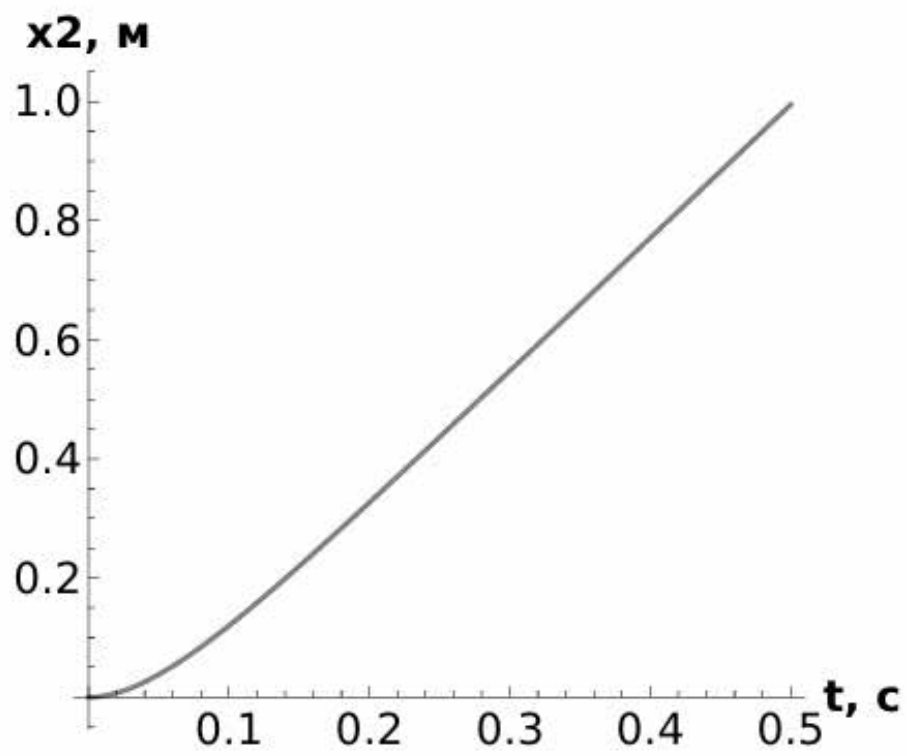
{{x1 -> InterpolatingFunction[
  Domain: {{0., 0.5}}
  Output: scalar
],
x2 -> InterpolatingFunction[
  Domain: {{0., 0.5}}
  Output: scalar
]}}

```

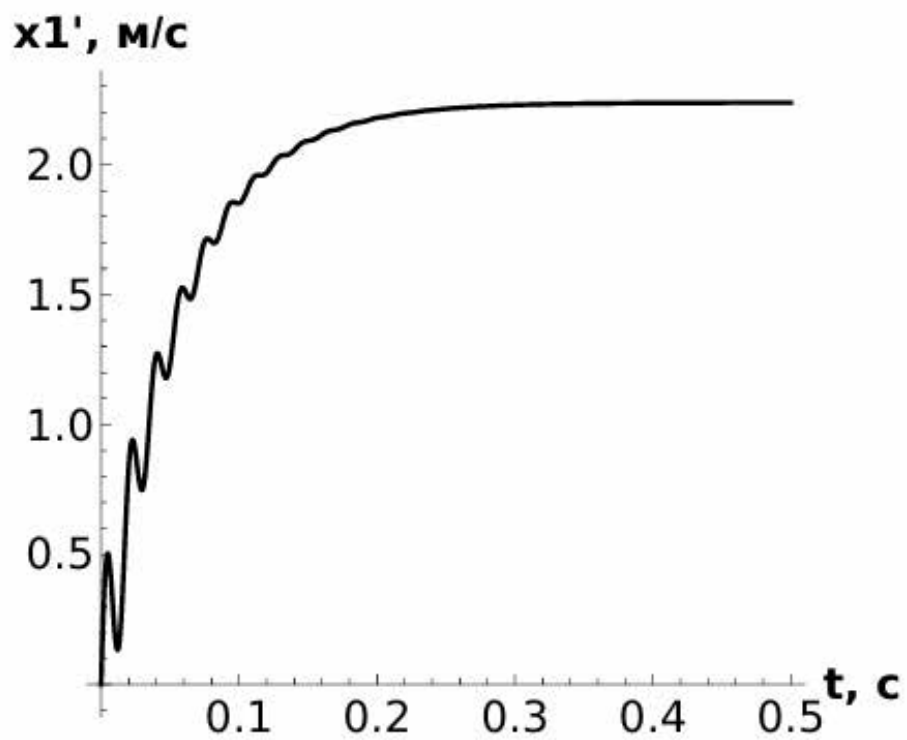
Out[64]=



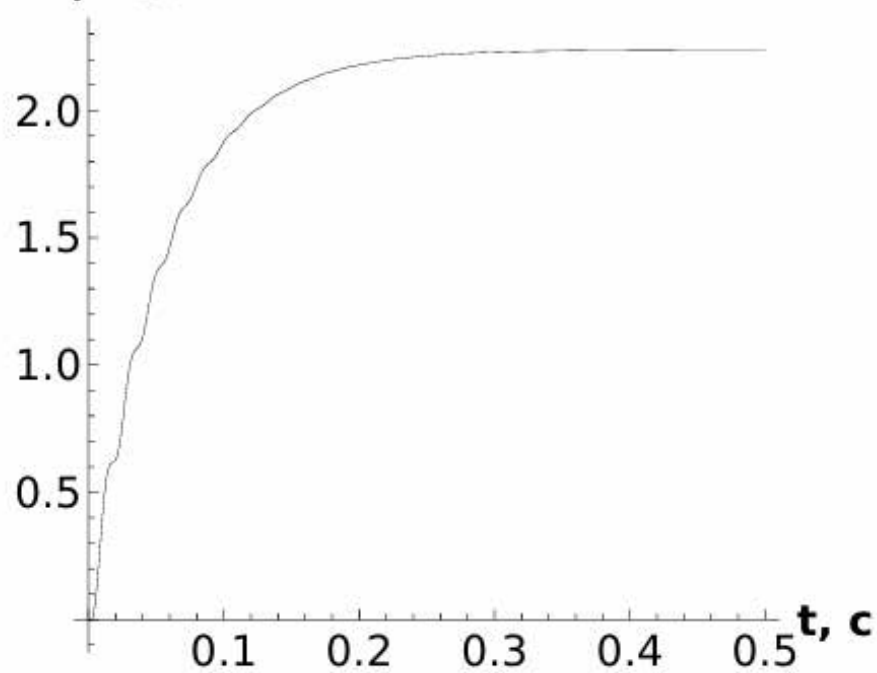
Out[65]»



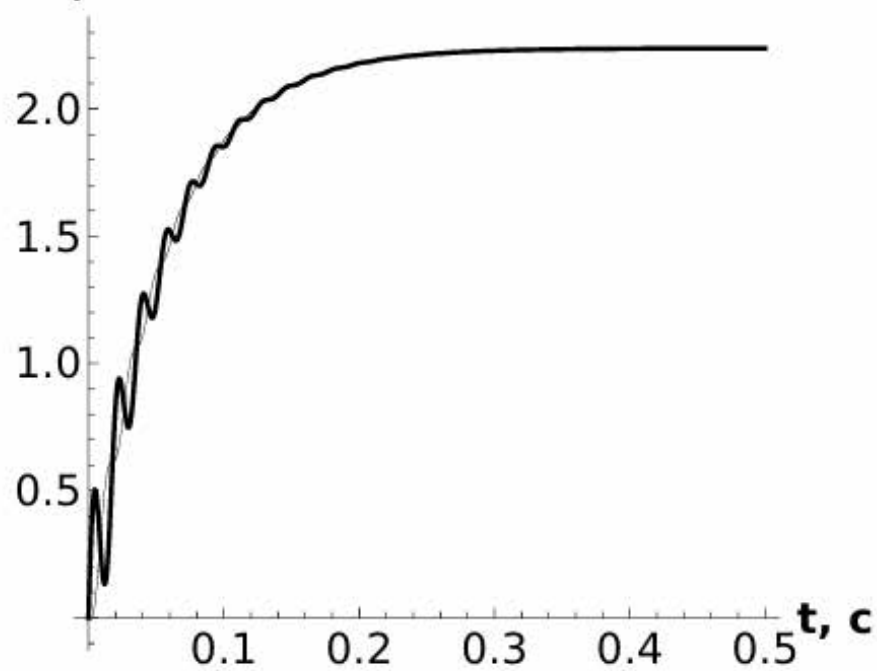
Out[66]»



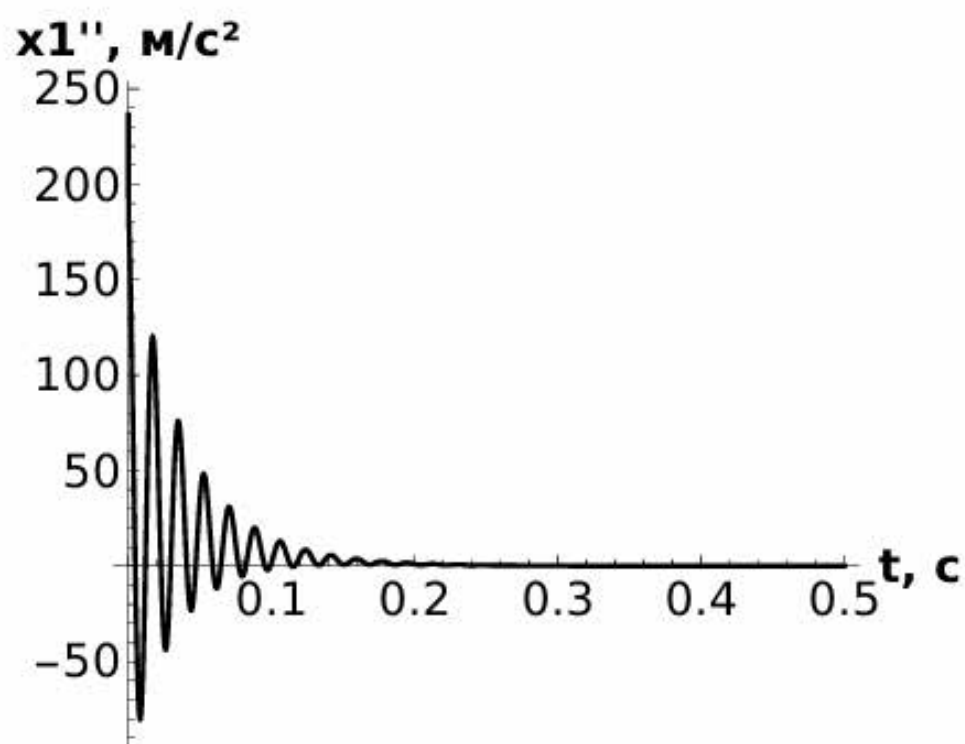
Out[67]=

 x_2' , м/с

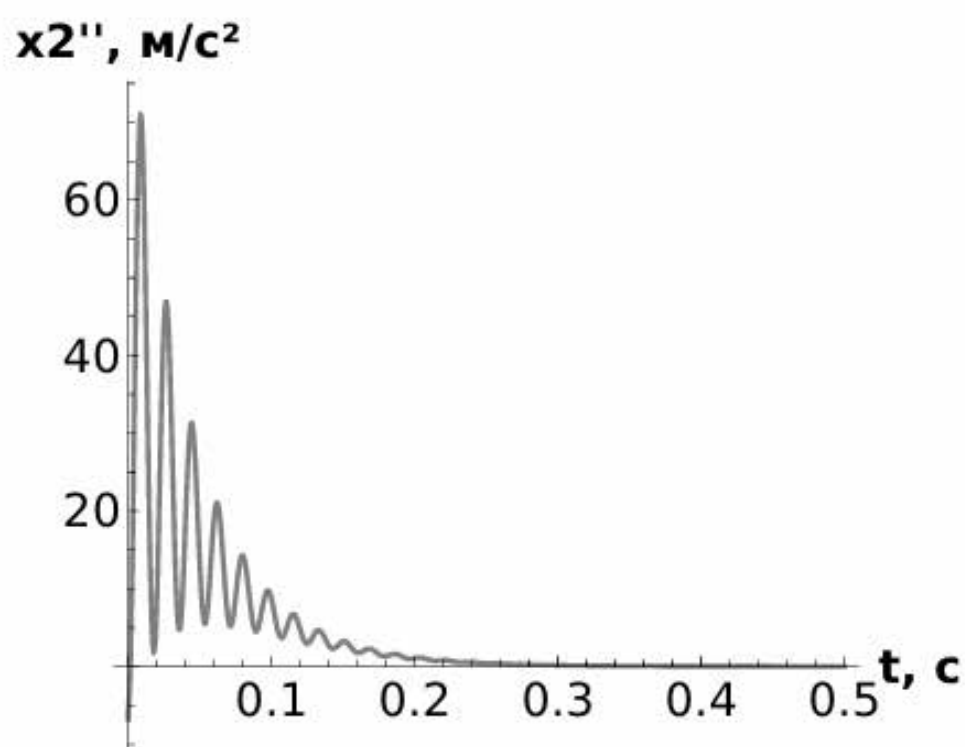
Out[68]=

 x_2' , м/с

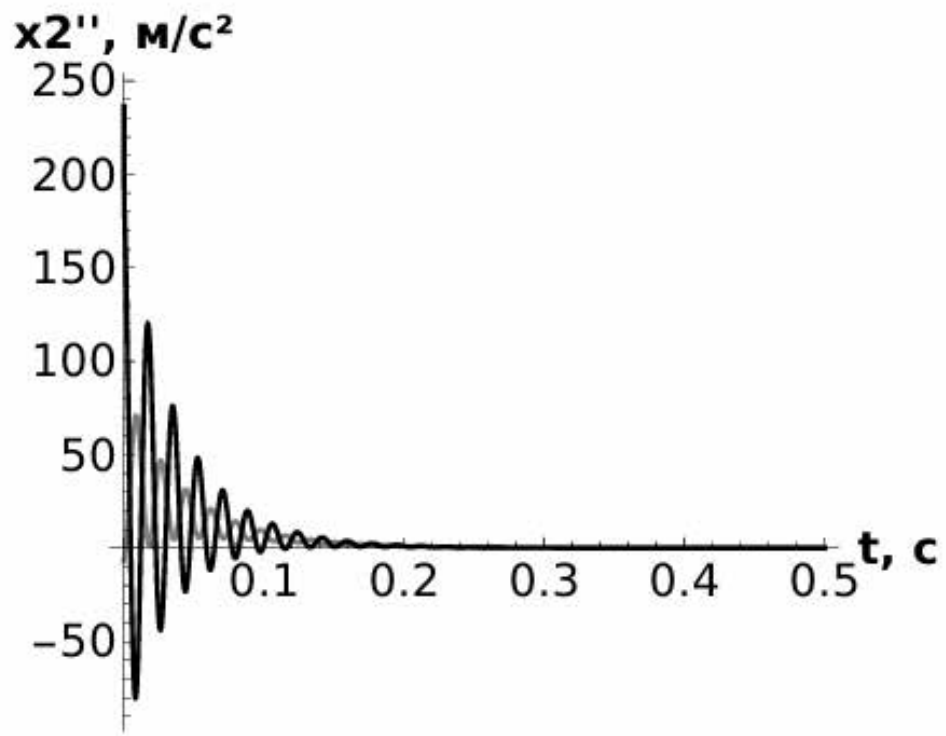
Out[69]=



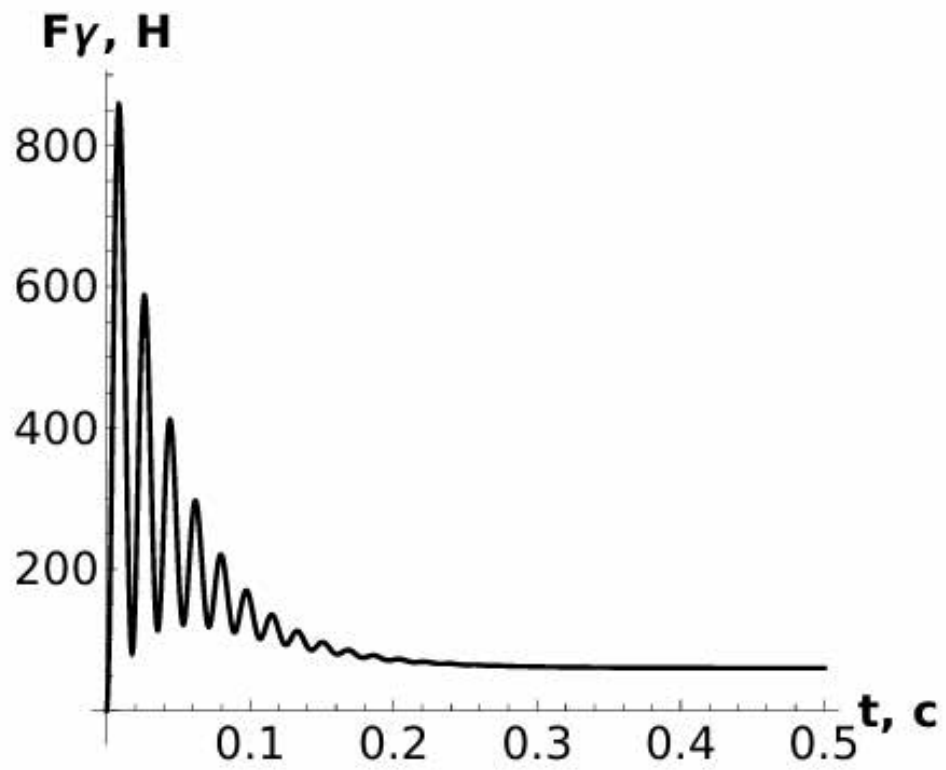
Out[70]=



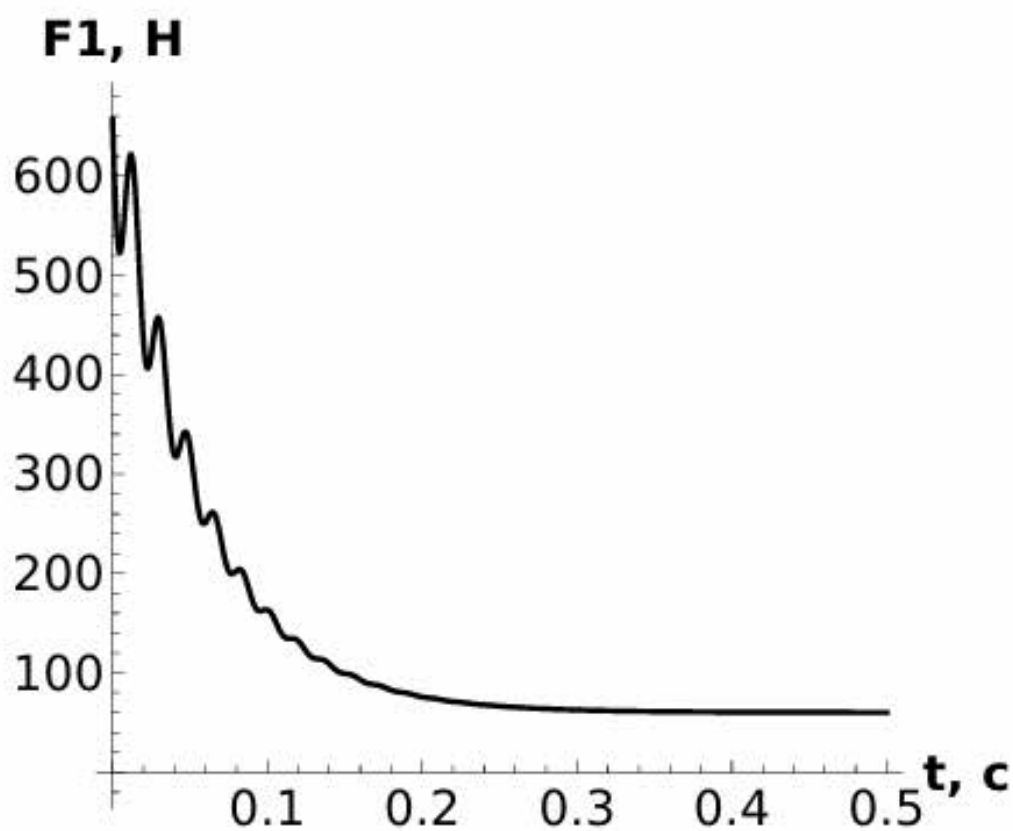
Out[71]=



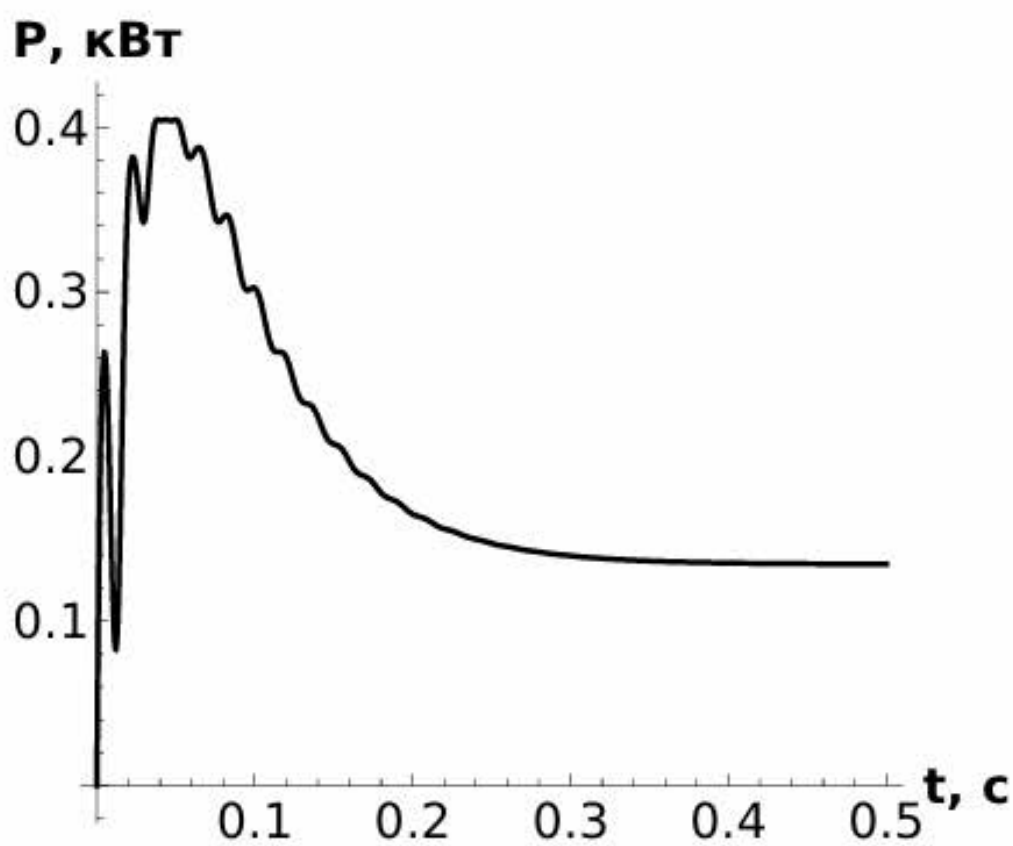
Out[72]=



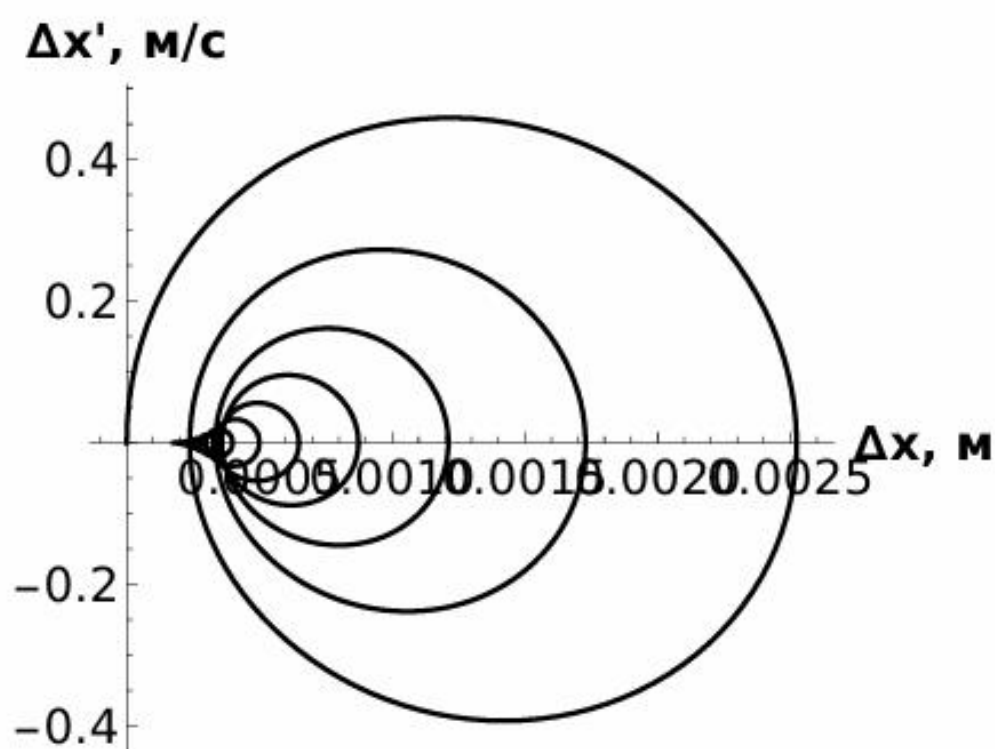
Out[73]=



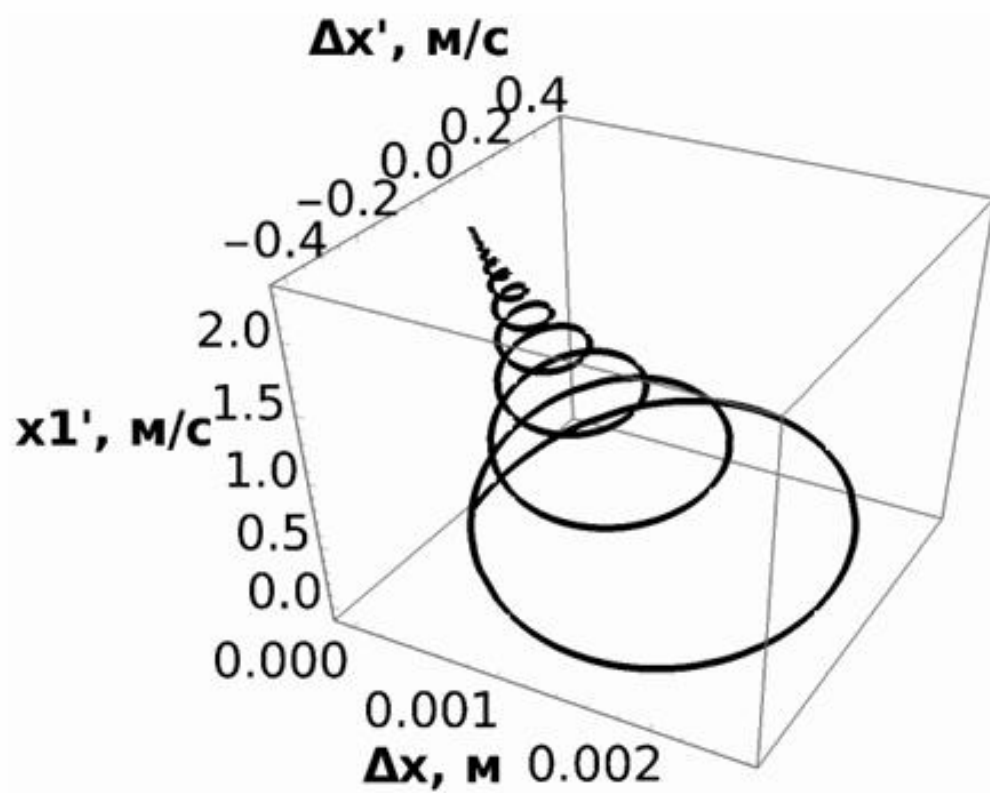
Out[74]=



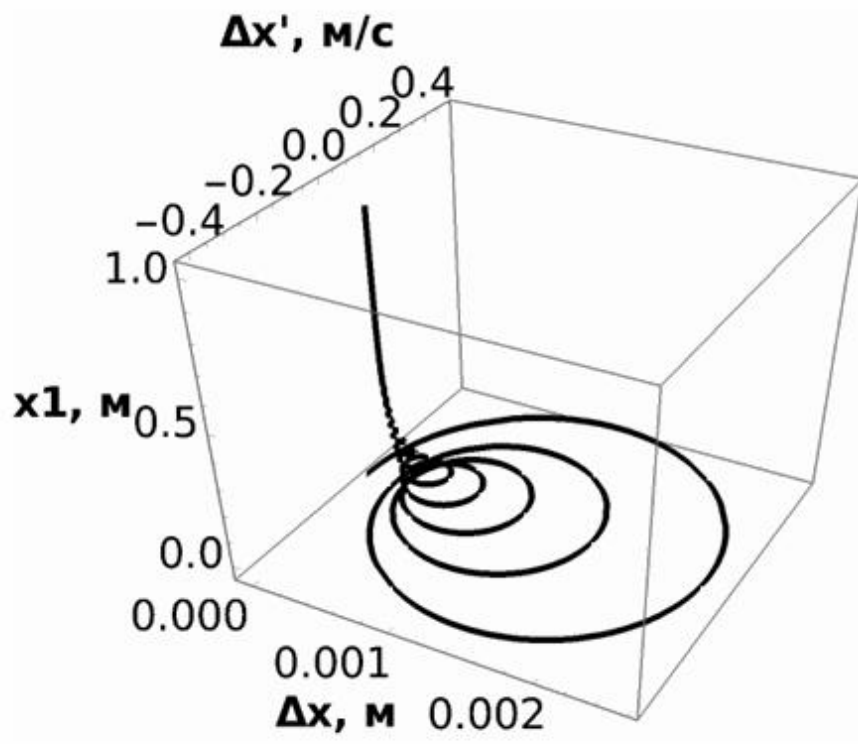
Out[75]=



Out[76]=



Out[77]=



Оптимізація режиму руху мобільної платформи робота

In[667]:»

```
(* ===== *)
(* ОПТИМІЗАЦІЯ РЕЖИМУ РУХУ *)
(* Розв'язання системи (4.17), побудова графіків *)
(* ===== *)

(*===== ПАРАМЕТРИ (ті ж, що у динамічному аналізі)===== *)
m1 = 3.53;
m2 = 11.25;
c = 3.4*10^5;
m = 45;
g = 9.81;
f0 = 0.1;
alp = 10.0*Pi /180;
F2 = m*g*(Sin[alp] + f0*Cos[alp]/)2;

Mn = 0.585;
Mp = 3*Mn;
omn = 345.4;
R = 0.107;

u = 45;
eta = 0.89;

(* ===== ПАРАМЕТРИ ОПТИМІЗАЦІЇ ===== *)
v = 2.2;
t1 = 0.3;

l = m2*g/c;
k = Sqrt[(m1 + m2)/(m1*l)];
Print["k = ", N[k, 6], " 1/c"];

(* ===== СИСТЕМА ЛІНІЙНИХ РІВНЯНЬ (4.17) для C1..C8 ===== *)
vars = {C1, C2, C3, C4, C5, C6, C7, C8};

eq1 = C1 + C7 == 0;
eq2 = C2 + C5*k + C8 == 0;
eq3 = 2*C3 + (2*C6 - C7*k)*k == 0;
eq4 = 6*C4 - (3*C8 + C5*k)*k^2 == 0;

S1 = Sin[k*t1];
C01 = Cos[k*t1];

eq5 = C2 + 2*C3*t1 + 3*C4*t1^2
      + (C6 - C7*k - C8*k*t1)*S1
```

```

+ (C8 + C5*k + C6*k*t1)*C01 == v;

eq6 = 2*C3 + 6*C4*t1
- (2*C8 + C5*k + C6*k*t1)*k*S1
+ (2*C6 - C7*k - C8*k*t1)*k*C01 == 0;

eq7 = 6*C4
- (3*C6 - C7*k - C8*k*t1)*k^2*S1
- (3*C8 + C5*k + C6*k*t1)*k^2*C01 == 0;

eq8 = (4*C8 + C5*k + C6*k*t1)*k^3*S1
- (4*C6 - C7*k - C8*k*t1)*k^3*C01 == 0;

A = CoefficientArrays[{eq1, eq2, eq3, eq4, eq5, eq6, eq7, eq8}, vars][[2]];
b = -CoefficientArrays[{eq1, eq2, eq3, eq4, eq5, eq6, eq7, eq8}, vars][[1]];

sol = LinearSolve[A, b];

(* ===== ФУНКЦІЇ x(t) та похідні для x2 ===== *)
xF[t_] := c1v + c2v*t + c3v*t^2 + c4v*t^3
+ (c5v + c6v*t)*Sin[k*t] + (c7v + c8v*t)*Cos[k*t];

xpF[t_] := c2v + 2*c3v*t + 3*c4v*t^2
+ (c6v - c7v*k - c8v*k*t)*Sin[k*t]
+ (c8v + c5v*k + c6v*k*t)*Cos[k*t];

xppF[t_] := 2*c3v + 6*c4v*t
- (2*c8v + c5v*k + c6v*k*t)*k*Ssin[k*t]
+ (2*c6v - c7v*k - c8v*k*t)*k*Cos[k*t];

xpppF[t_] := 6*c4v
- (3*c6v - c7v*k - c8v*k*t)*k^2*Ssin[k*t]
- (3*c8v + c5v*k + c6v*k*t)*k^2*Cos[k*t];

xppppF[t_] := (4*c8v + c5v*k + c6v*k*t)*k^3*Ssin[k*t]
- (4*c6v - c7v*k - c8v*k*t)*k^3*Cos[k*t];

(* ===== КІНЕМАТИКА ПЕРШОЇ МАСИ (4.2)–(4.4) ===== *)
lg = l/g;
x1F[t_] := xF[t] + lg*xppF[t];
x1pF[t_] := xpF[t] + lg*xpppF[t];
x1ppF[t_] := xppF[t] + lg*xppppF[t];

```

```

(* ===== СИЛОВІ ТА ЕНЕРГЕТИЧНІ ХАРАКТЕРИСТИКИ ===== *)
F1F[t_] := (m1 + m2)*xppF[t] + m1*lg*xppppF[t] + F2;
FgusF[t_] := c*(x1F[t] - xF[t]);
PF[t_] := F1F[t]*x1pF[t]/1000;

(* ===== СТИЛЬ ===== *)
pStyle = {Black, Thickness[0.007]};
iSize = 400;
aStyle = FontSize → 20;
aRatio = 0.9;
T = t1;

(* ===== ГРАФІКИ ===== *)

g1 = Plot[xF[t], {t, 0, T},
  PlotStyle → pStyle, ImageSize → iSize, AxesOrigin → {0, 0},
  AxesStyle → aStyle, PlotRange → All, AspectRatio → aRatio,
  AxesLabel → {Style[, FontSize → 20, Bold], Style[, FontSize → 20, Bold]},
  PlotLabel → Style[, 14]]

g2 = Plot[x1F[t], {t, 0, T},
  PlotStyle → pStyle, ImageSize → iSize, AxesOrigin → {0, 0},
  AxesStyle → aStyle, PlotRange → All, AspectRatio → aRatio,
  AxesLabel → {Style["t, c", FontSize → 20, Bold], Style["x1, м", FontSize → 20, Bold]},
  PlotLabel → Style["Переміщення x1 (оптимізація)", 14]]

ga1 = Plot[x1pF[t], {t, 0, T},
  PlotStyle → pStyle, ImageSize → iSize, AxesOrigin → {0, 0},
  AxesStyle → aStyle, PlotRange → All, AspectRatio → aRatio,
  AxesLabel → {Style["t, c", FontSize → 20, Bold], Style["x1', м/с", FontSize → 20, Bold]}}]
ga2 = Plot[xpF[t], {t, 0, T},
  PlotStyle → {Black, Thickness[0.003]}, ImageSize → iSize, AxesOrigin → {0, 0},
  AxesStyle → aStyle, PlotRange → All, AspectRatio → aRatio,
  AxesLabel → {Style["t, c", FontSize → 20, Bold], Style["x2', м/с", FontSize → 20, Bold]}}]

gb1 = Plot[x1ppF[t], {t, 0, T},
  PlotStyle → pStyle, ImageSize → iSize, AxesOrigin → {0, 0},
  AxesStyle → aStyle, PlotRange → All, AspectRatio → aRatio,

  AxesLabel → {Style["t, c", FontSize → 20, Bold], Style["x1'', м/с²", FontSize → 20, Bold]}}]

```

```
gb2 = Plot[xppF[t], {t, 0, T},
  PlotStyle → {Gray, Thickness[0.007]}, ImageSize → iSize, AxesOrigin → {0, 0},
  AxesStyle → aStyle, PlotRange → All, AspectRatio → aRatio,
```

```
  AxesLabel → {Style["t, c", FontSize → 20, Bold], Style["x2'", "м/с²", FontSize → 20, Bold]}]
```

```
g5 = Plot[FgusF[t], {t, 0, T},
  PlotStyle → pStyle, ImageSize → iSize, AxesOrigin → {0, 0},
  AxesStyle → aStyle, PlotRange → All, AspectRatio → aRatio,
  AxesLabel → {Style["t, c", FontSize → 20, Bold], Style["Fγ, Н", FontSize → 20, Bold]},
  PlotLabel → Style["Зусилля в гусениці (оптимізація)", 14]]
```

```
g6 = Plot[F1F[t], {t, 0, T},
  PlotStyle → pStyle, ImageSize → iSize, AxesOrigin → {0, 0},
  AxesStyle → aStyle, PlotRange → All, AspectRatio → aRatio,
  AxesLabel → {Style["t, c", FontSize → 20, Bold], Style["F1, Н", FontSize → 20, Bold]},
  PlotLabel → Style["Рушійне зусилля (оптимізація)", 14]]
```

```
g7 = Plot[PF[t], {t, 0, T},
  PlotStyle → pStyle, ImageSize → iSize, AxesOrigin → {0, 0},
  AxesStyle → aStyle, PlotRange → All, AspectRatio → aRatio,
  AxesLabel → {Style["t, c", FontSize → 20, Bold], Style["P, кВт", FontSize → 20, Bold]},
  PlotLabel → Style["Потужність (оптимізація)", 14]]
```

```
g8 = ParametricPlot[
  {x1F[t] - xF[t], x1pF[t] - xpF[t]},
  {t, 0, T},
  PlotStyle → pStyle,
  ImageSize → iSize,
  AxesStyle → aStyle,
  PlotRange → All,
  AspectRatio → aRatio,
  AxesLabel → {
    Style["Δx, м", FontSize → 20, Bold],
    Style["Δx', м/с", FontSize → 20, Bold]},
  PlotLabel → Style["Фазовий портрет (оптимізація)", 14]]
```

```
g9 = ParametricPlot3D[
  {x1F[t] - xF[t], x1pF[t] - xpF[t], x1pF[t]},
  {t, 0, T},
```

```

PlotStyle → pStyle,
ImageSize → iSize,
AxesStyle → aStyle,
PlotRange → All,
AspectRatio → aRatio,
BoxRatios → {1, 1, 1},
AxesLabel → {
  Style["Δx, M", FontSize → 20, Bold],
  Style["Δx', M/c", FontSize → 20, Bold],
  Style["x1', M/c", FontSize → 20, Bold]},
PlotLabel → Style["3D фазовий портрет (оптимізація)", 14]]

```

```

g10 = ParametricPlot3D[
  {x1F[t] - xF[t], x1pF[t] - xpF[t], x1F[t]},
  {t, 0, T},
  PlotStyle → pStyle,
  ImageSize → iSize,
  AxesStyle → aStyle,
  PlotRange → All,
  AspectRatio → aRatio,
  BoxRatios → {1, 1, 1},
  AxesLabel → {
    Style["Δx, M", FontSize → 20, Bold],
    Style["Δx', M/c", FontSize → 20, Bold],
    Style["x1, M", FontSize → 20, Bold]},
  PlotLabel → Style["3D фазовий портрет 2 (оптимізація)", 14]]

```

k = 113.574 1/c

Out[693]=

$C2 + 0.6 C3 + 0.27 C4$

Out[694]=

$0.466516 (C6 - 113.574 C7 - 34.0722 C8)$

Out[696]=

$2 C3 + 1.8 C4$

Out[697]=

$52.984 (-113.574 C5 - 34.0722 C6 - 2 C8)$

Out[699]=

$6 C4$

Out[700]=

$6017.6 (-3 C6 + 113.574 C7 + 34.0722 C8)$

Out[702]=

$$683.443 \cdot (113.574 C5 + 34.0722 C6 + 4 C8)$$

Out[710]=

$$(-0.000407828 + 0.00135926 t) \sin[113.574 t]$$

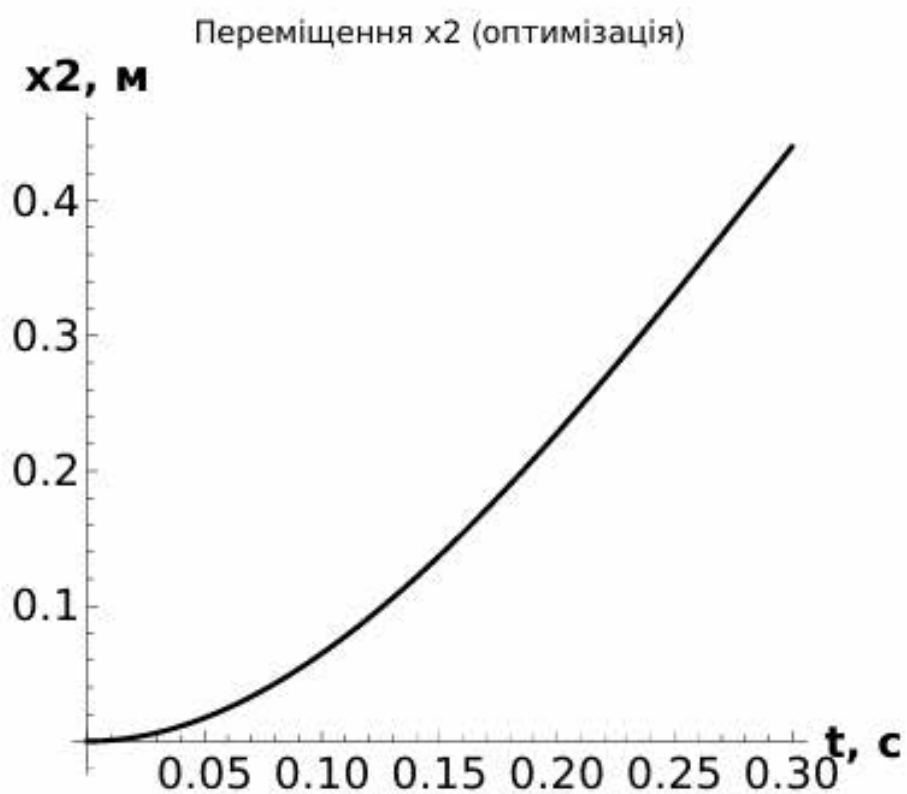
Out[713]=

$$113.574 (0.0000225884 - 4.84684 \times 10^{-6} t) \sin[113.574 t]$$

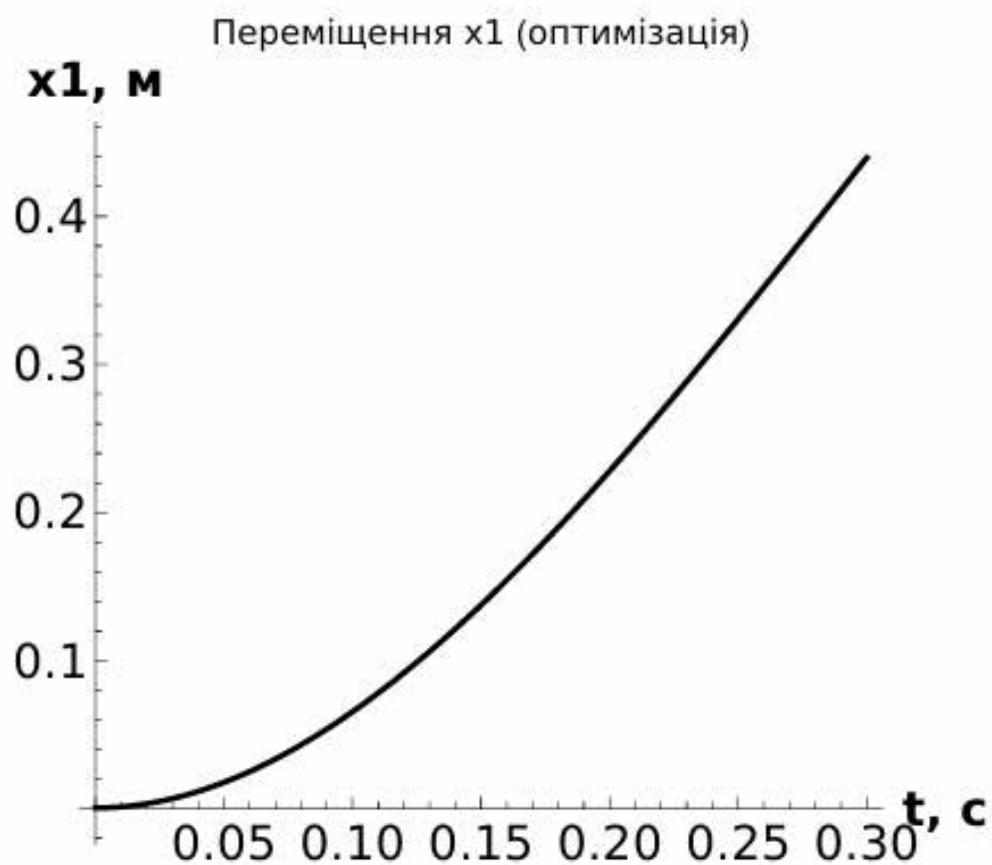
Out[716]=

$$12.899 \cdot (0.000407743 - 0.00135926 t) \sin[113.574 t]$$

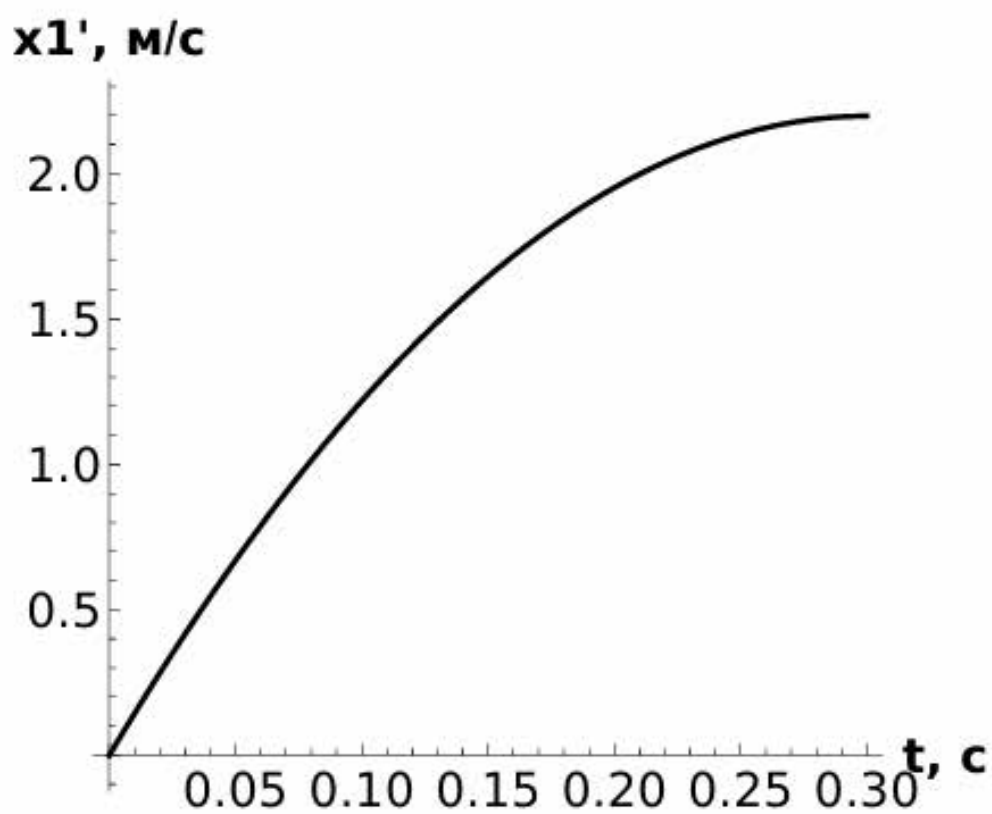
Out[732]=



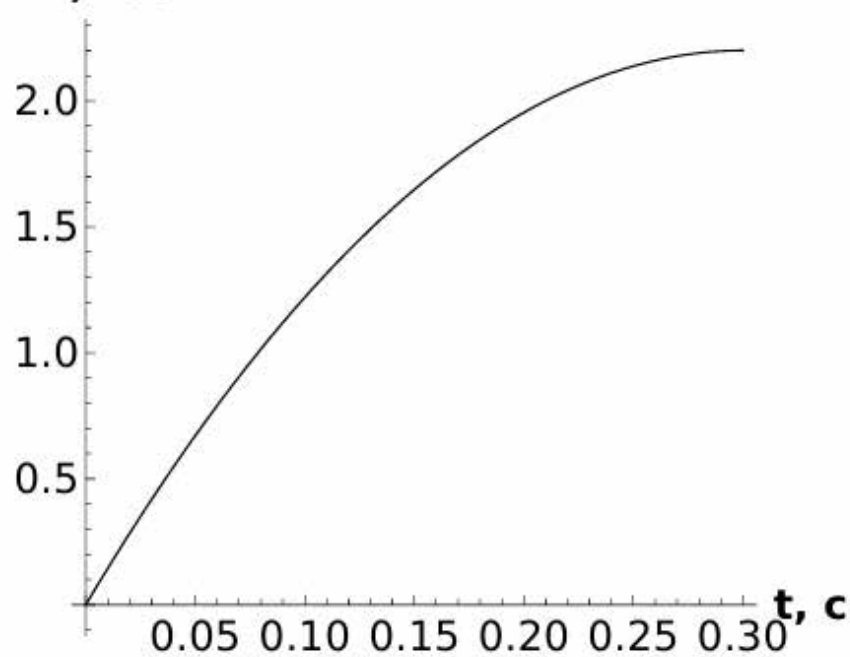
Out[733]=



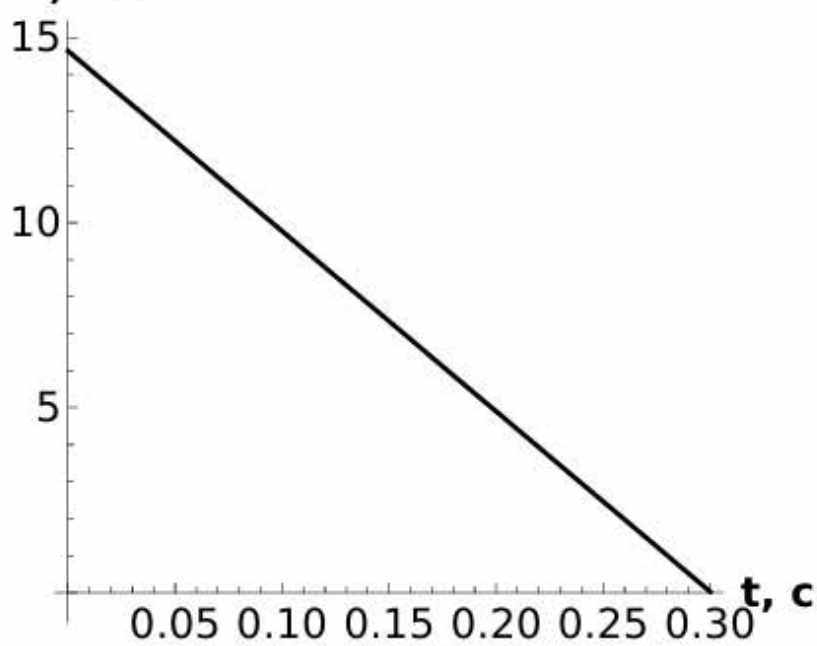
Out[734]=



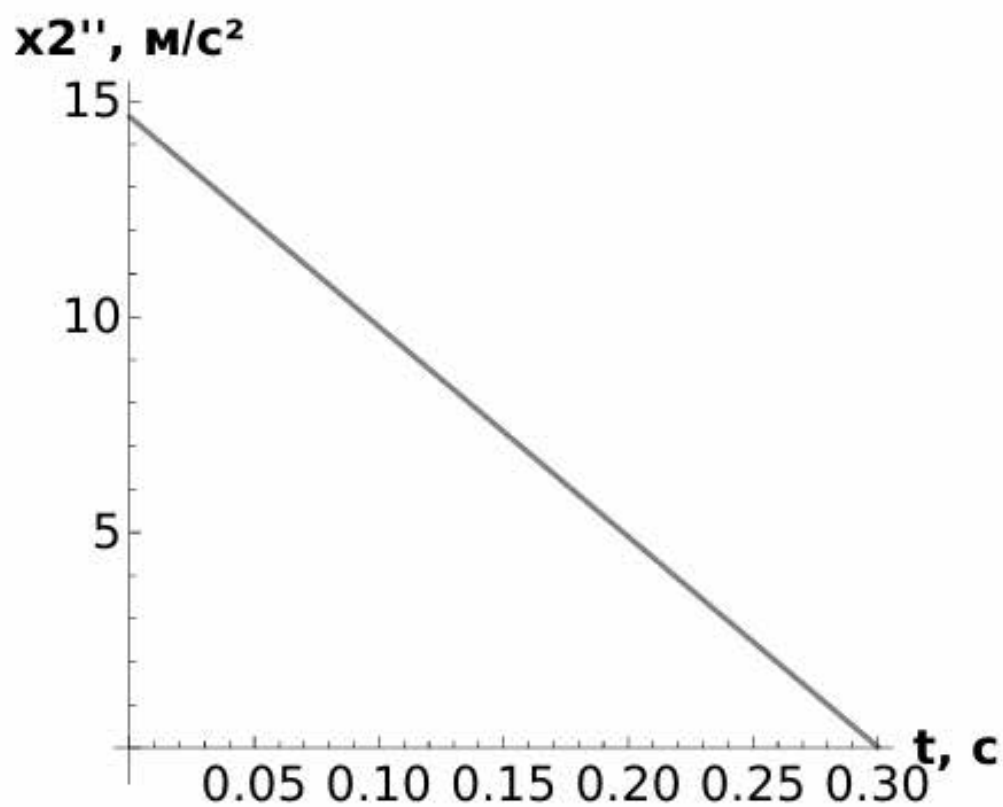
Out[735]=

 $x_2', \text{ m/c}$ 

Out[736]=

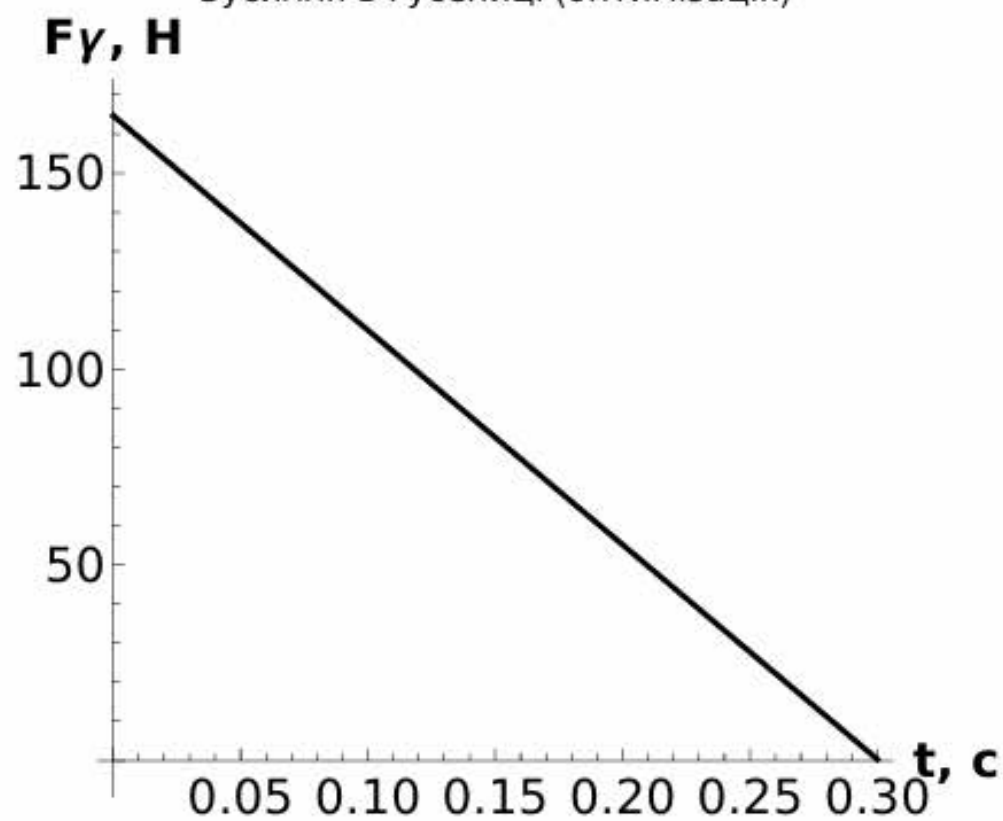
 $x_1'', \text{ m/c}^2$ 

Out[737]=

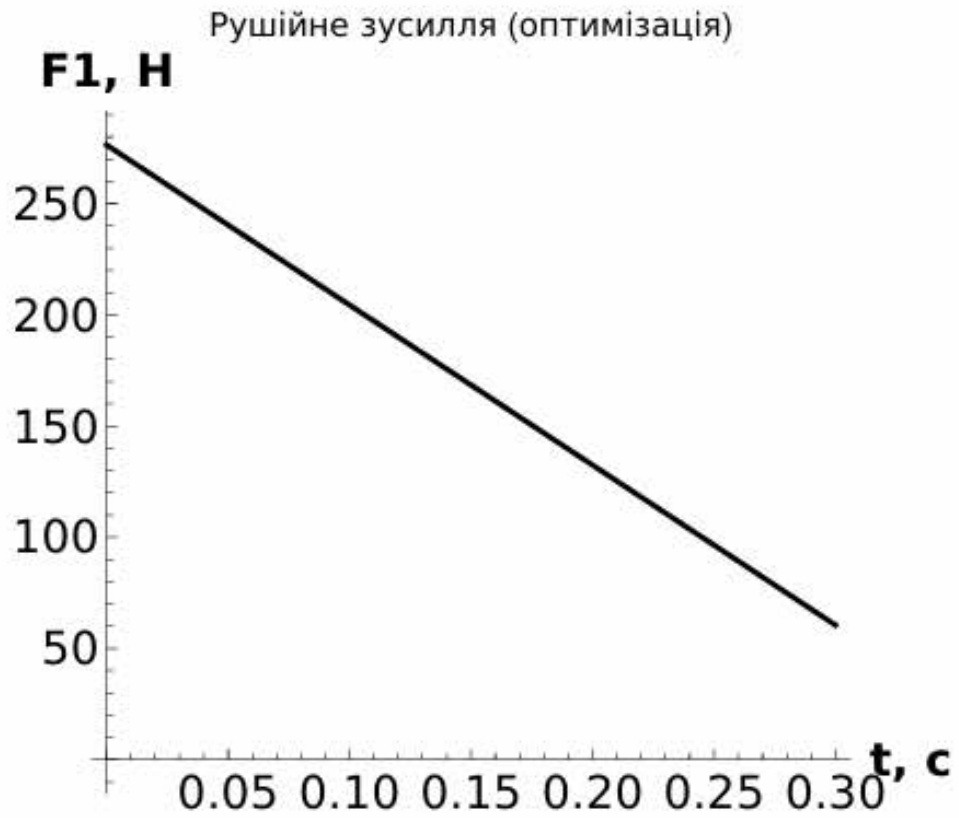


Out[738]=

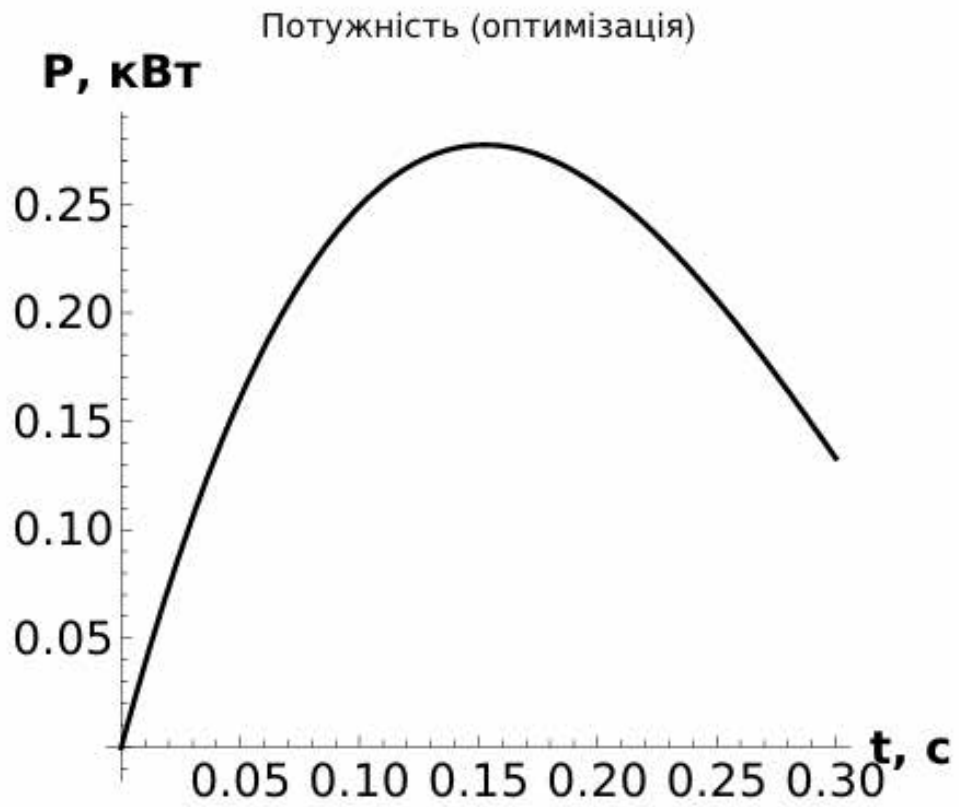
Зусилля в гусениці (оптимізація)



Out[739]=



Out[740]=



Апробація

УДК 621.87

**ДИНАМІЧНИЙ АНАЛІЗ ПЕРЕМІЩЕННЯ МОБІЛЬНОГО
ПОШУКОВОГО РЯТУВАЛЬНОГО РОБОТА***Стопнюк Б.С. – студент**Наукові керівники – Ловейкін В.С., д.т.н., проф.; Ляшко А.П., к.т.н., доц.****Національний університет біоресурсів і природокористування України***

Під час руху мобільного пошукового рятувального робота можливі підвищення динамічних навантажень та поява коливань в елементах приводу та конструкції.

Для виявлення цих явищ було проведено динамічний аналіз руху мобільного пошукового робота. При цьому механізм переміщення робота представлено двомасовою динамічною моделлю, яка представлена на рис. 1.

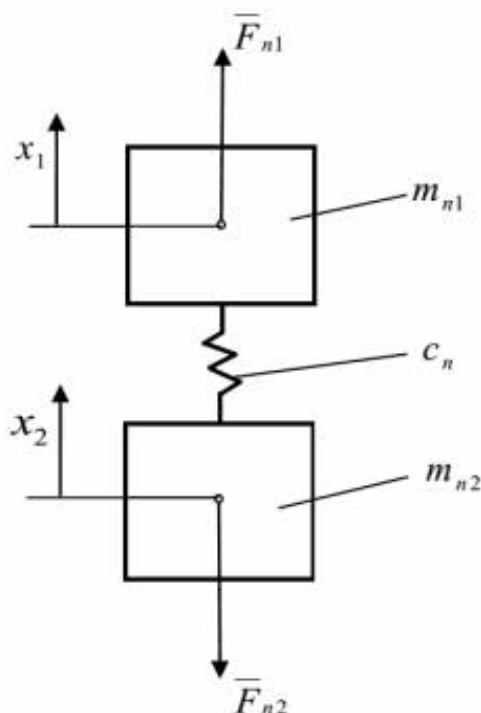


Рисунок 1 – Динамічна модель системи

Тут: m_{n1} , m_{n2} – відповідно зведені маси першої та другої частин механізму переміщення робота; F_{n1} , F_{n2} – зведені сили першої та другої частин механізму переміщення; c_n – коефіцієнт жорсткості пружного елементу, що з'єднує зведені маси механізму; x_1 , x_2 – узагальнені координати відповідно першої та другої зведених мас.

Динамічна модель механізму переміщення мобільного рятувального робота описується наступною системою диференціальних рівнянь.

$$\begin{cases} m_{n1} \ddot{x}_1 = F_{n1} - c_n (x_1 - x_2); \\ m_{n2} \ddot{x}_2 = -F_{n2} + c_n (x_1 - x_2). \end{cases} \quad (1)$$

Оскільки представлена система диференціальних рівнянь руху є нелінійною за рахунок нелінійності механічної характеристики приводного двигуна, то для їхнього розв'язування доцільно використати чисельні методи з використанням комп'ютерної техніки. Наприклад, програма «Mathematica».

На рис. 2 представлені графічні залежності швидкості першої та другої зведених мас динамічної моделі мобільного робота. З рис. 2 видно, швидкості першої та другої зведених мас динамічної моделі робота змінюються в коливальному режимі, але протягом 3 с руху ці коливання затухають і подальший рух здійснюється в усталеному режимі з постійною швидкістю.

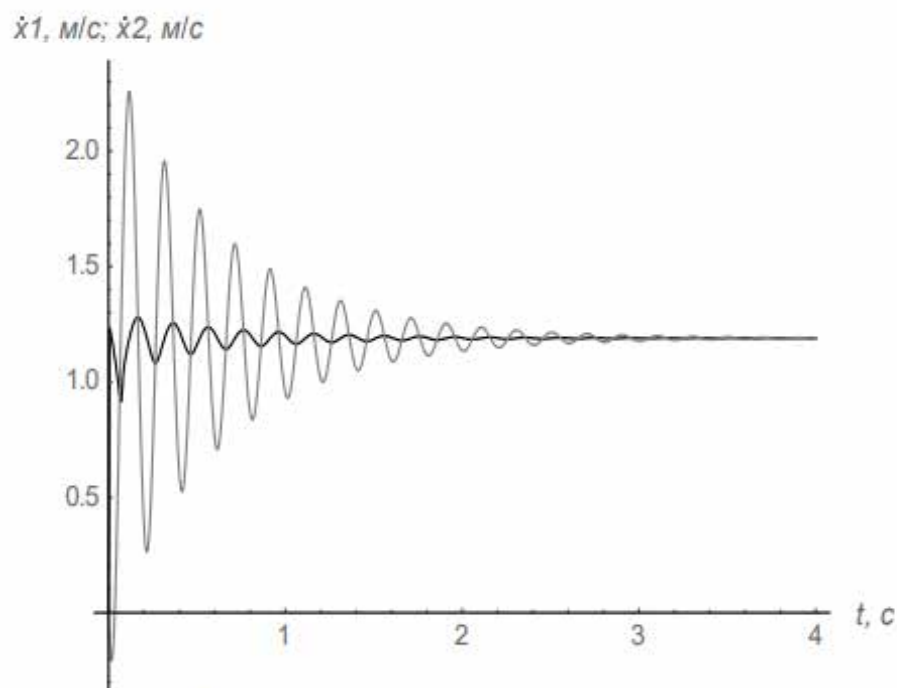


Рисунок 2 – Графіки швидкості зведених мас системи

На рис.3 представлено графік зміни пружного зусилля в елементі , що з'єднує зведені маси мобільного пошуково рятувального робота.

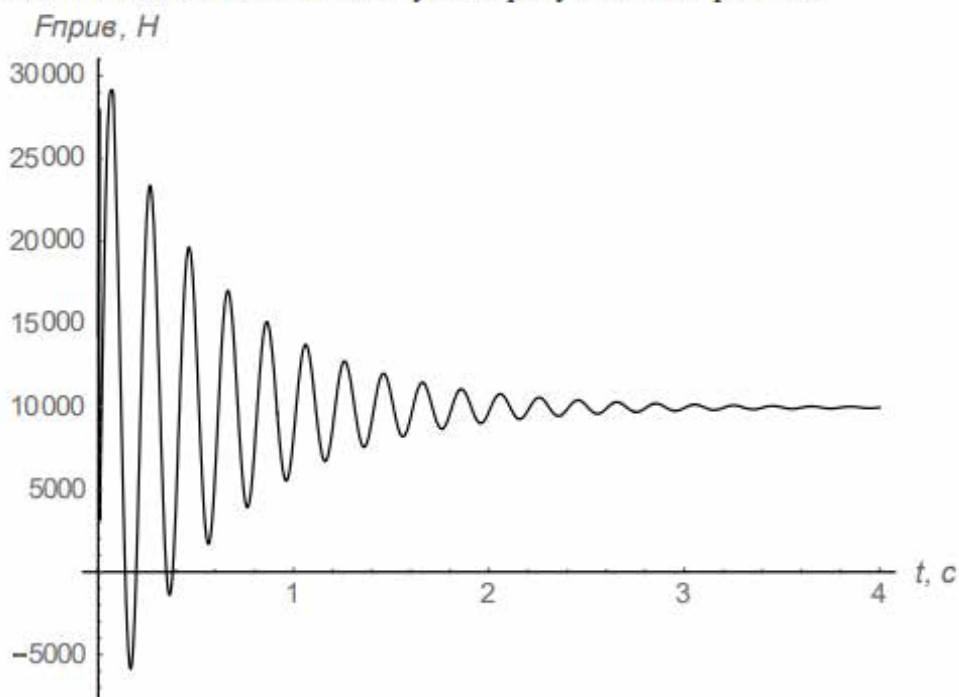


Рисунок 3 – Графік приводного зусилля

З рис. 3 також можна бачити, що зусилля в пружному елементі приводу робота також змінюється в коливальному режимі. При цьому максимальне

значення зусилля в пружному елементі втричі перевищує усталене значення, що необхідно враховувати при конструюванні приводного механізму і пропонувати систему плавного пуску механізму переміщення мобільного пошукового рятувального робота.

УДК 621.86

ДИНАМІЧНИЙ АНАЛІЗ РЕЖИМУ ПЕРЕМІЩЕННЯ МОБІЛЬНОГО ПОШУКОВО-РЯТУВАЛЬНОГО РОБОТА

Стопнюк Б.С. – студент

Наукові керівники – Ловейкін В.С., д.т.н., проф.; Ляшко А.П., к.т.н., доц.

Національний університет біоресурсів і природокористування України

В сучасних умовах виконання технологічних, транспортних, військових та інших операцій значне поширення отримали роботи та маніпулятори. Одним із важливих напрямків є використання мобільних роботів для пошуково-рятувальних робіт. Робота таких роботів пов'язана зі значними перевантаженнями, тому виникає потреба дослідження динамічних процесів в під час переміщення мобільного пошуково-рятувального робота. При розгляді переміщення мобільної платформи робота враховано основний рух приводного механізму та пружну деформацію елементів передавального механізму. Рушійний момент приводного електродвигуна визначається з механічної характеристики і зведений до приводного колеса платформи M_{n1} , на яку також діє сила опору переміщенню F_{n2} . Пружні властивості передавального механізму характеризуються коефіцієнтом жорсткості c_n , який зведено до переміщення платформи. Інерційні властивості приводу характеризуються масою m_{n1} , яка зведена до мобільної платформи, що характеризується масою m_{n2} . Виходячи з наведеного, переміщення мобільної платформи робота можна представити у вигляді двомасової динамічної моделі з поступальним рухом мас з двома ступенями вільності. За узагальнені координати виберемо лінійні координати центрів мас моделі x_1 і x_2 . На базі динамічної моделі з використанням принципу Даламбера побудовано математичну модель, яка має вигляд:

$$\begin{cases} m_{n1} * \ddot{x}_1 = M_{n1}/r - c_n * (x_1 - x_2); \\ m_{n2} * \ddot{x}_2 = -F_{n2} + c_n * (x_1 - x_2). \end{cases} \quad (1)$$

тут r – радіус приводного колеса мобільної платформи робота. В результаті розв'язування рівнянь (1) побудовані графіки кінематичних характеристик

(рис.1). З фазового портрету (рис.1) видно, що процес пуску мобільної платформи робота здійснюється в коливальному режимі із затуханням.

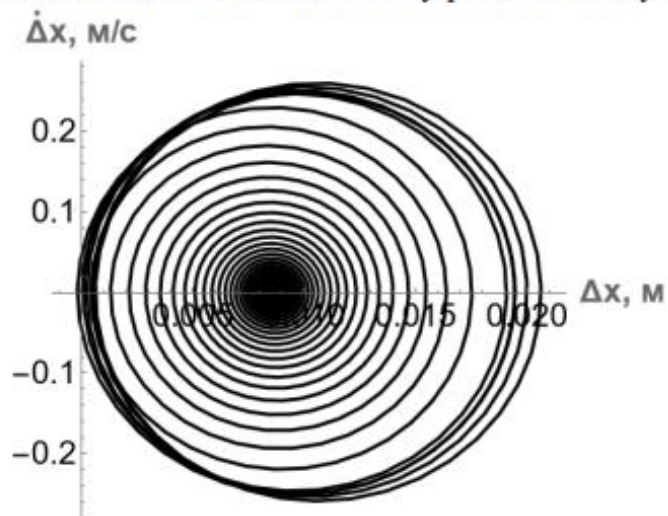


Рисунок 1 – Фазовий портрет коливань приводу мобільної платформи робота