

ХАРКІВСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ РАДІОЕЛЕКТРОНІКИ

Факультет _____ АКТ _____
Кафедра _____ КІТАМ _____
Рівень вищої освіти _____ другий (магістерський) _____
Спеціальність _____ 151 Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології _____
Тип програми _____ Освітньо-професійна _____
Освітня програма _____ Комп'ютеризовані та робототехнічні системи _____
(шифр і назва)

ЗАТВЕРДЖУЮ:

Зав. кафедри КІТАМ

(підпис)

«__» _____ 2021 р.

ЗАВДАННЯ НА КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ

студентові _____ Баканову Даніилу Юхимовичу _____
(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема роботи Автоматизоване управління тягловими електричними двигунами колісної роботизованої платформи з метою забезпечення плавності її руху
Затверджена наказом по університету від 08 листопада 2021 р № 1698Ст
2. Термін подання студентом роботи до екзаменаційної комісії 17 грудня 2021 р
3. Вихідні дані до роботи 3.1 Базові вимоги до тягового електроприводу колісної роботизованої платформи ; 3.2 Схема роботизованої платформи з геометричними розмірами; 3.3 Розрахункова схема колісної роботизованої системи
4. Перелік питань, що потрібно опрацювати в роботі
 - 4.1 Аналіз варіантів реалізації системи управління колісної роботизованої платформи
 - 4.1.1 Загальна характеристика автоматизованих систем управління
 - 4.1.2 Короткий огляд мікропроцесорних систем
 - 4.1.3 Базові вимоги до тягового електроприводу колісної роботизованої платформи
 - 4.2 Дослідження кінематичних і динамічних особливостей руху роботизованої платформи
 - 4.2.1 Опис конструкції та принцип руху колісної роботизованої платформи
 - 4.2.2 Кінематичний аналіз руху роботизованої платформи
 - 4.2.3 Дослідження динамічних особливостей руху колісної роботизованої платформи
 - 4.2.4 Моделювання динаміки електроприводів
 - 4.3 Моделювання динаміки колісної роботизованої системи
 - 4.3.1 Дослідження прямолінійного руху платформи при типових керуючих впливах
 - 4.3.2 Дослідження динаміки колісної роботизованої системи при русі по криволінійній траєкторії

5. Перелік графічного матеріалу із зазначенням креслеників, схем, плакатів, комп'ютерних ілюстрацій Демонстраційний матеріал, представлений у форматі презентації PowerPoint (*.ppt) на аркушах формату А4.

6. Консультанти розділів роботи

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

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№	Назва етапів роботи	Термін виконання етапів роботи	Примітка
1	<i>Дослідження та аналіз теми кваліфікаційної роботи</i>	<i>04.09 – 17.09</i>	<i>виконано</i>
2	<i>Базові вимоги до тягового електроприводу колісної роботизованої платформи</i>	<i>18.09 – 26.09</i>	<i>виконано</i>
3	<i>Дослідження кінематичних і динамічних особливостей руху роботизованої платформи</i>	<i>27.08 – 09.09</i>	<i>виконано</i>
4	<i>Опис конструкції та принцип руху колісної роботизованої платформи</i>	<i>9.09 – 24.09</i>	<i>виконано</i>
5	<i>Кінематичний аналіз руху роботизованої платформи</i>	<i>25.09 – 17.10</i>	<i>виконано</i>
6	<i>Дослідження динамічних особливостей руху колісної роботизованої платформи</i>	<i>18.10 – 31.10</i>	<i>виконано</i>
7	<i>Моделювання динаміки електроприводів</i>	<i>01.11 – 22.11</i>	<i>виконано</i>
8	<i>Дослідження прямолінійного руху платформи при типових керуючих впливах</i>	<i>23.11 – 05.12</i>	<i>виконано</i>
9	<i>Оформлення пояснювальної записки</i>	<i>06.12 – 10.12</i>	<i>виконано</i>
10	<i>Оформлення презентаційних матеріалів комп'ютерного захисту</i>	<i>11.12 – 13.12</i>	<i>виконано</i>
11	<i>Представлення на рецензування</i>	<i>14.12</i>	<i>виконано</i>

Дата видачі завдання 02.09.2021

Студент _____
(підпис)

Баканов Д.Ю.
(прізвище, ініціали)

Керівник роботи _____
(підпис)

проф. Ромашов Ю.В.
(посада, прізвище, ініціали)

РЕФЕРАТ

Пояснювальна записка: 81 с., 2 табл., 48 рис., 30 джерел

РОБОТИЗОВАНА ПЛАТФОРМА, КОЛІСНА ПЛАТФОРМА,
ТЯГЛОВИЙ ЕЛЕКТРИЧНИЙ ДВИГУН, ЕЛЕКТРОДВИГУН,
ВИМІРЮВАННЯ, ЕЛЕКТРОМЕХАНІЧНА СИСТЕМА, АВТОМАТИЗАЦІЯ,
МОДЕЛЮВАННЯ, ЕЛЕКТРОМЕХАНІКА, МЕХАТРОНІКА, ЦЕНТР
ТЯЖІННЬ

Мета роботи – розробка математичних моделей для автоматизованого управління тягловими електричними двигунами колісної роботизованої платформи з метою забезпечення плавності її руху.

Об'єкт дослідження – колісні роботизовані платформи робототехнічних систем.

Предмет розробки – математичні моделі автоматизованого управління тягловими електричними двигунами колісної роботизованої платформи з метою забезпечення плавності її руху.

Досліджено динамічні особливості керованого руху електромеханічної системи, отримані характеристики переміщення для різних властивостей поверхні та параметрів конструкції мобільної платформи. Дослідження показали, що при зміні коефіцієнта тертя для пари коліс, що рухається по внутрішньому радіусу, форма траєкторії центру мас пристрою практично не змінюється, а при зменшенні сили тертя для пари коліс, що рухається по зовнішньому радіусу, відповідно зменшується і швидкість повороту корпусу щодо вертикальної осі. Швидкість переміщення центру мас платформи та кутове прискорення його корпуси залежать як від співвідношення керуючих напруг, так і від співвідношення коефіцієнтів тертя.

ABSTRACT

Explanatory note: 81 pages, 2 tables, 48 pictures, 30 sources.

ROBOTIC PLATFORM, WHEEL PLATFORM, TRACTIONAL ELECTRIC MOTOR, ELECTRIC MOTOR, MEASUREMENT, ELECTROMECHANICAL SYSTEM, SYSTEM, SYSTEM

The purpose of the work is to develop and study mathematical models for automated control of traction electric motors of a wheeled robotic platform in order to ensure the smoothness of its movement.

The object of development is wheeled robotic platforms of robotic systems.

The subject of development – mathematical models of automated control of traction electric motors of a wheeled robotic platform in order to ensure the smoothness of its movement.

The dynamic features of the controlled motion of the electromechanical system are studied, the displacement characteristics for different surface properties and design parameters of the mobile platform are obtained. Studies have shown that when the coefficient of friction for a pair of wheels moving on the inner radius, the shape of the trajectory of the center of mass of the device does not change, and with decreasing friction for a pair of wheels moving on the outer radius, the speed of rotation decreases. axis. The speed of movement of the center of mass of the platform and the angular acceleration of its body depend on the ratio of control stresses and the ratio of friction coefficients.

ЗМІСТ

Перелік скорочень	6
Вступ	7
1 Аналіз варіантів реалізації системи управління колісної роботизованої платформи	9
1.1 Загальна характеристика автоматизованих систем управління	9
1.2 Короткий огляд мікропроцесорних систем	14
1.3 Базові вимоги до тягового електроприводу колісної роботизованої платформи	24
1.4 Висновки до першого розділу.	27
2 Дослідження кинематичних і динамічних особливостей руху роботизованої платформи	28
2.1 Опис конструкції та принцип руху роботизованої платформи	28
2.2 Кінематичний аналіз руху роботизованої платформи	29
2.3 Дослідження динамічних особливостей руху колісної роботизованої платформи	40
2.4 Моделювання динаміки електроприводів	49
2.5 Висновки до другого розділу.	52
3 Моделювання динаміки колісної роботизованої системи	53
3.1 Дослідження прямолінійного руху платформи при типових керуючих впливах	53
3.2 Дослідження динаміки колісної роботизованої системи при русі по криволінійній траєкторії	61
3.3 Інструментальні засоби проектування колісних роботизованих електромеханічних систем	66
3.4 Висновки до третього розділу	70
4 Охорона праці	71

	6
Висновки	74
Перелік джерел посилання	76

ПЕРЕЛІК СКОРОЧЕНЬ

СУРП – система управління роботизованою платформою;

СУ – система управління;

ОУ – об'єкт управління;

САУ – системи автоматичного управління;

САУ – автоматизовані системи управління;

КРП – колісна роботизована платформа;

ЕС – електромеханічна система.

ВСТУП

Характерною рисою сучасної науково-технічної революції є широке впровадження робототехніки у сферу виробництва та наукові дослідження.

Роботи застосовуються для комплексної автоматизації виробництва, зростання продуктивності праці, поліпшення якості продукції. Від традиційних засобів автоматизації промислові роботи відрізняються універсальністю, можливістю їх швидкого перенастроювання, що дозволяє створювати на базі універсального обладнання роботизовані технологічні комплекси, гнучкі автоматизовані виробництва. Внаслідок розвитку робототехніки людство отримує можливість вирішувати принципово нові наукові та виробничі завдання.

Об'єктом дослідження є колісні роботизовані платформи з використанням тяглових електричних двигунів.

Предметом дослідження є математичні моделі автоматизованого управління тягловими електричними двигунами колісної роботизованої платформи з метою забезпечення плавності її руху.

Роботизовані платформи можливо використовувати при виконанні пошукових та інших робіт на небезпечних для людини ділянках місцевості. Найбільш поширене застосування роботизованих платформ є їх використання у вигляді наземних колісних і гусеничних мобільних платформ. Основна перевага, яке дає їх застосування - можливість розмістити оператора платформи поза межами небезпечної зони, або використовувати мобільну платформу без необхідності в операторі, тим самим зберегти здоров'я і життя людей.

Актуальність роботи та підстави для її виконання. Удосконалення систем автоматизованої оцінки механічної взаємодії роботизованої колісної платформи із тягловими електричними двигунами дозволить значно покращити показники руху роботизованої платформи, що сприятиме підвищенню плавності руху та розширенню можливостей щодо їхнього використання. Підставою для

виконання роботи є її узгодженість із поточними науковими дослідженнями кафедри КІТАМ.

Мета роботи й можливі сфери застосування. Мета роботи полягає у створенні наукових засад та інструментальних засобів проектування колісних роботизованих платформ, для врахування процесу взаємодії з поверхнею, виявлення закономірностей руху, аналізу динаміки та синтезу раціональних параметрів конструкції, що зможе забезпечити плавність руху. Передбачається використання результатів даної роботи на кафедрі КІТАМ при проектуванні навчальних та дослідницьких систем; також результати є корисними для проектних організацій, що здійснюють розробку електромеханічних та робототехнічних систем різного призначення.

В процесі виконання магістерської роботи необхідно вирішити наступні завдання: дослідити кинематичні та динамічні особливості руху роботизованої платформи, провести моделювання динаміки електроприводів та виконати моделювання динаміки колісної роботизованої системи.

За результатами роботи опубліковано наукові статті [1, 2].

Взаємозв'язок з іншими роботами. Тема роботи відповідає напрямкам наукових досліджень кафедри КІТАМ щодо розробки колісних робототехнічних платформ із розширеними маніпуляційними можливостями.

1 АНАЛІЗ ВАРІАНТІВ РЕАЛІЗАЦІЇ СИСТЕМИ УПРАВЛІННЯ КОЛІСНОЇ РОБОТИЗОВАНОЇ ПЛАТФОРМИ

У даному розділі розглядаються принципи побудови автоматизованих систем управління в контексті використання як основи СУРП.

1.1 Загальна характеристика автоматизованих систем управління

В даному підрозділі розглядаються системи управління, їх структура, основні властивості автоматизованих систем управління та їх життєвий цикл в контексті використання для СУРП [2].

Задачі автоматизації зводяться до створення систем управління машинами, агрегатами, поточними лініями, наземними об'єктами, повітряними об'єктами тощо.

Відповідно до загального визначання СУ у процесі управління існує об'єкт, яким управляють і система, що здійснює управління (технічний засіб, людина). У процесі управління цей модуль отримує інформацію про стан зовнішнього середовища, де перебуває об'єкт і з яким він пов'язаний. Уся ця інформація сприймається управляючим модулем, який виробляє на її основі управляючу інформацію (приймає рішення). На основі прийнятого рішення виконавчий модуль здійснює управляючий вплив на об'єкт управління.

Структурна схема системи управління наведена на рисунку 1.1.

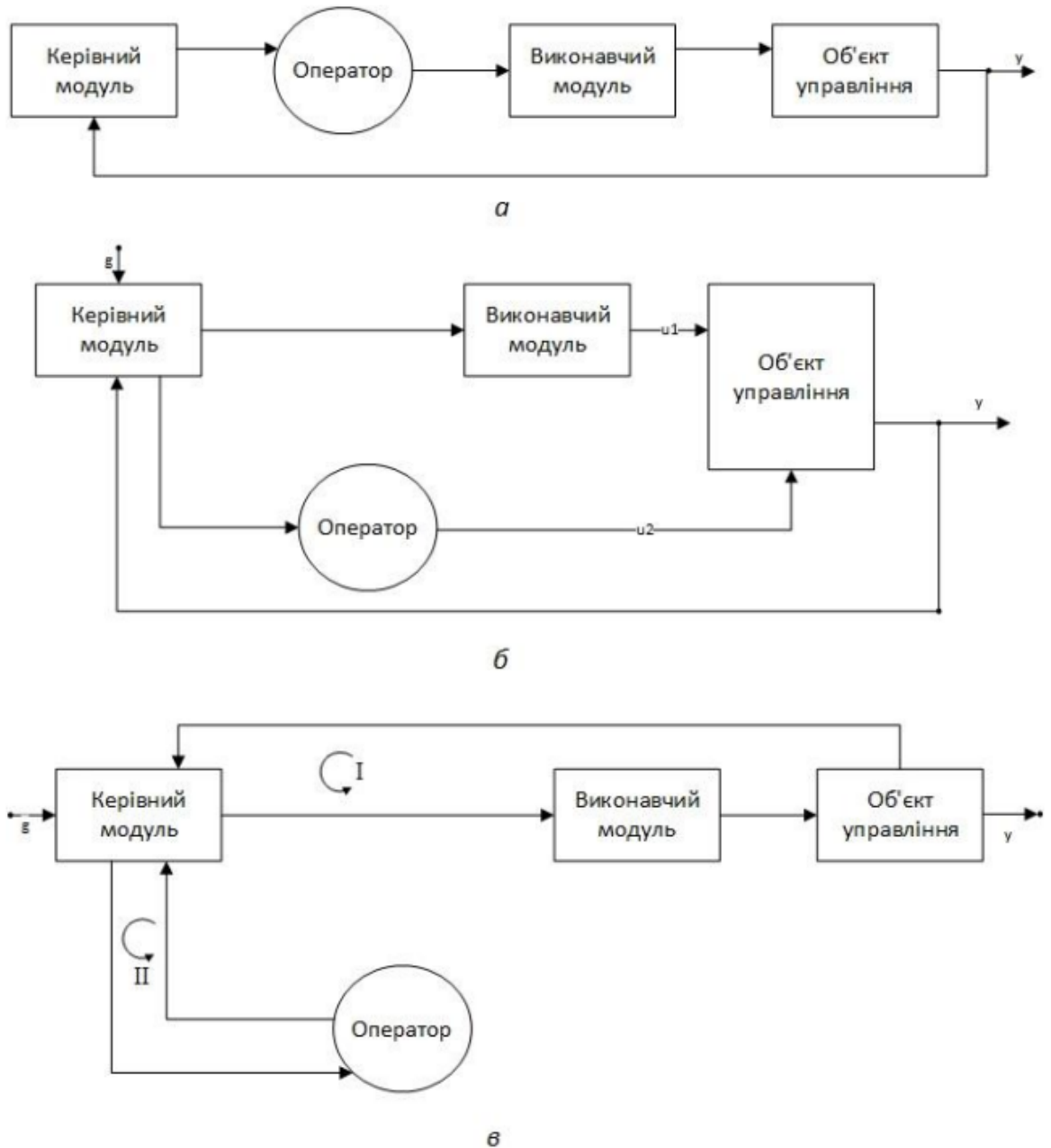


Рисунок 1.1 – Структура системи управління

Об'єкт управління (ОУ) – умовно виокремлена частина системи, на яку впливає система управління для досягнення необхідного результату [3].

Управління завжди здійснюється для досягнення зазначеної мети, яка завжди конкретна для заданого об'єкта управління і пов'язана зі станом об'єкта та середовища, в якому він перебуває.

Серед усіх видів інформації, що надходить до управляючого модулю, надзвичайно важлива інформація, яка йде по лініях зворотного зв'язку від об'єкта управління. У системах управління зворотний зв'язок визначається як інформаційний зв'язок, за допомогою якого в управляючу частину надходить інформація про наслідки управління об'єктом, тобто інформація про новий стан об'єкта, який виник під впливом управляючих дій.

Відповідно до структури системи управління, зображеної на рисунку 1.1, людина може виконувати різні функції. На рисунку 1.1, а показана система де керівний модуль отримує інформацію про стан ОУ, оброблює її і передає людині-оператору у вигляді, зручному для прийняття рішення. Людина у цій системі виконує функції прийняття рішень(фактично керівного модуля). Один із варіантів такого способу розподілення функцій представлений на рисунку 1.1, б.

У цьому випадку керівний модуль отримує і оброблює інформацію про всі параметри ОУ і виконує керування деякими з них u_1 . Людина-оператор отримує від керівного модуля інформацію, яку вона використовує для управління іншими параметрами u_2 . У двох розглянутих варіантах контур управління був розірваний, і замикався за допомогою людини-оператора. У схемі, зображеній на рисунку 1.1, в, основний контур керування є замкнутим. Керівний модуль управляє параметрами ОУ згідно з закладеному алгоритму. При зміні умов роботи ОУ людина-оператор змінює програму роботи керівного модуля. У даному випадку оператор та керівний модуль утворюють другий контур системи(позначений цифрою II). Це є прикладом адаптивної системи, у якій контур II використовується в міру необхідності. Такий контур виконує функцію пам'яті – досвід людини-оператора[4].

Системи управління поділяються на два класи: системи автоматичного управління (САУ) і автоматизовані системи управління (АСУ). У САУ управління об'єктом або системою здійснюється автоматичними пристроями без безпосередньої участі людини.

Основні функції САУ: автоматичний контроль і вимірювання, автоматична сигналізація, автоматичний захист, автоматичний пуск і зупинка різних двигунів і приводів, автоматична підтримка заданих режимів роботи устаткування, автоматичне регулювання. На відміну від САУ в АСУ у сферу управління включена людина, на яку покладаються функції прийняття найважливіших рішень і відповідальності за прийняті рішення.

АСУ є людино-машинними системами, що використовують сучасні економіко-математичні методи, засоби електронно-обчислювальної техніки, а також нові організаційні принципи для пошуку і реалізації ефективного управління об'єктом. У роботі АСУ необхідна участь людини-оператора.

Автоматизована система управління – автоматизована система (АС), призначена для автоматизації процесів збирання та пересилання інформації про об'єкт управління, її перероблення та видачі керівних дій на об'єкт управління [5].

Найважливіше завдання АСУ – підвищення ефективності управління об'єктом на основі зростання продуктивності праці та вдосконалення методів планування процесу управління.

Функції АСУ встановлюють у технічному завданні на створення конкретної АСУ на основі аналізу цілей управління, заданих ресурсів для їх досягнення, очікуваного ефекту від автоматизації і відповідно до стандартів, що поширюються на цей вид АСУ [7].

Функції АСУ в загальному випадку включають в себе наступні елементи:

- планування і прогнозування;
- облік, контроль, аналіз;
- координацію і регулювання.

АСУ повинна здійснювати наступні дії:

- збирання, обробку і аналіз інформації (сигналів, повідомлень, документів і т. п.) про стан об'єкту управління;
- вироблення управляючих дій (програм, планів і т. п.);

- передавання управляючих дій (сигналів, вказівок, документів) на виконання;
- реалізація і контроль виконання управляючих дій;
- обмін інформацією (документами, повідомленнями тощо) зі взаємозв'язаними автоматизованими системами.

Приклади АСУ: автоматизована система управління дорожнім рухом, автоматизована система управління вуличним освітленням, автоматизована система управління підприємством, система управління готелем.

Життєвий цикл автоматизованої системи - сукупність взаємопов'язаних процесів створення та зміни стану АС від формування початкових вимог до неї до закінчення експлуатації та утилізації [6].

Життєвий цикл передбачає наступні стадії і етапи:

а) Формування концепції АС:

- обстеження об'єкту і обґрунтування необхідності створення АС;
- формування вимог користувача до АС; оформлення звіту про виконання робіт та заявки на розробку АС; вивчення об'єкта; проведення необхідних науководослідних робіт;

– аналіз матеріалів і формування документації: розробка варіантів концепції АС і вибір варіанта концепції АС, що задовольняє вимогам користувачів; оформлення звіту про виконану роботу, розробка та затвердження технічного завдання на створення АС[6].

б) Розробка:

- ескізне проектування – розробка попередніх проектних рішень щодо систем і її частин; розробка документації на АС і її частини;
- технічне проектування: розробка проектних рішень щодо системи і її частин; розробка документації на АС і її частини; розробка та оформлення документації на поставку комплектуючих виробів; розробка завдань на проектування в суміжних частинах проекту.

в) Реалізація:

- розробка робочої документації на АС і її частини; створення робочого проекту; підготовка інструкцій користувачів;

- програмування: розробка програмних модулів; тестування; коректування бази даних.

г) Експлуатація:

- підготовка до введення в дію: підготовка об'єкта автоматизації, підготовка персоналу, комплектація АС програмними і технічними засобами, програмно-технічними комплексами, інформаційними виробами, будівельно-монтажні роботи, пусконаладжувальні роботи, проведення попередніх випробувань;

- проведення дослідної експлуатації;

- проведення приймальних випробувань.

д) Супровід АС: супровід програмних засобів. Оперативне обслуговування, адміністрування базами даних.

і) Зняття з експлуатації: припинення використання, демонтаж, архівування системи.

1.2 Короткий огляд мікропроцесорних систем

Arduino є електронним конструктором і зручною платформою швидкого створення електронних інтелектуальних пристроїв для користувачів різної кваліфікації. Ця платформа має величезну популярність по всій земній кулі завдяки зручному інтерфейсу, простій мові програмування, а також завдяки відкритій архітектурі та вихідному програмному коду. Пристрої платформи програмуються безпосередньо через USB-порт без будь-яких додаткових засобів або програматорів.

Arduino дозволяє розширити функціонал персонального комп'ютера та вийти за рамки віртуальної реальності та фізично взаємодіяти з нею.

Плати на основі платформи Arduino отримують інформацію завдяки різним датчикам, а також, крім вимірювань, здатні керувати всілякими периферійними пристроями [7].

Плати на основі платформи Arduino можуть бути придбані в готовому вигляді або бути зібрані користувачем своїми руками. Програмне забезпечення є повністю відкритим та вільно розповсюджуваним. Вихідні креслення схем і друкованих плат (файли формату CAD) відкриті та знаходяться у загальному доступі, тому користувачі здатні застосовувати їх на власний розсуд.

У 2006 платформа Arduino вперше отримала всевітнє звання у номінації Digital Communities на виставці Ars Electronica Prix.

Далі представлені основні види плат платформи Arduino:

Arduino Due є новою платою на основі мікроконтролера Cortex-M3 ARM SAM3U4E, який зображено на рисунку 1.2.

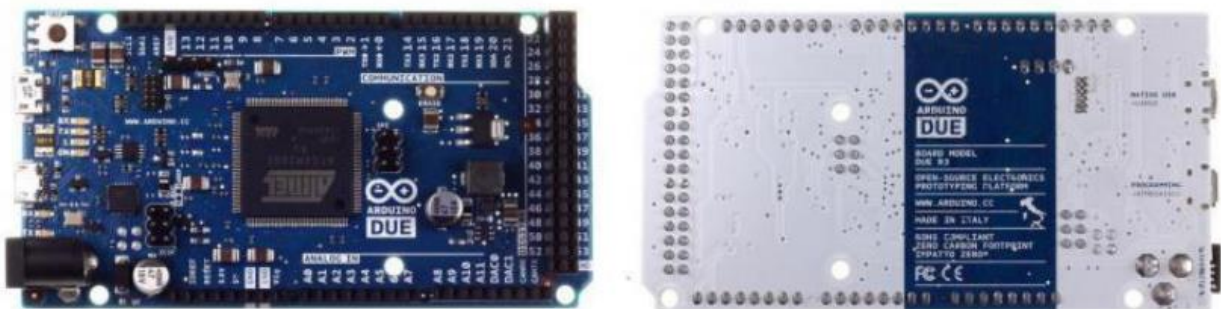


Рисунок 1.2 – Arduino Due

Arduino Leonardo, зображений на рисунку 1.3 є останньою версією платформи Arduino на мікропроцесор ATmega32u4. Відмінністю є роз'єм microUSB. Дана плата з топології сумісна з UNO.



Рисунок 1.3 – Arduino Leonardo

Arduino Yun нове рішення, що підтримує мережу WiFi на базі мікроконтролера ATmega32u4 та чіпа бездротового зв'язку Atheros AR9331, який зображено на рисунку 1.4.



Рисунок 1.4 – Arduino Yun

Arduino Uno, зображений на рисунку 1.5 є найпопулярнішою версією базової топології Arduino USB. Arduino Uno підтримує стандартний порт USB. Arduino Uno подібна до Duemilanove, але на відміну від неї містить допоміжний контролер ATmega8U2 для зв'язку з USB портом та оновлену більше доступне

маркування вводів/виводів. Платформа адаптована під різні плати розширення, наприклад, користувальницькими платами з різними функціями.

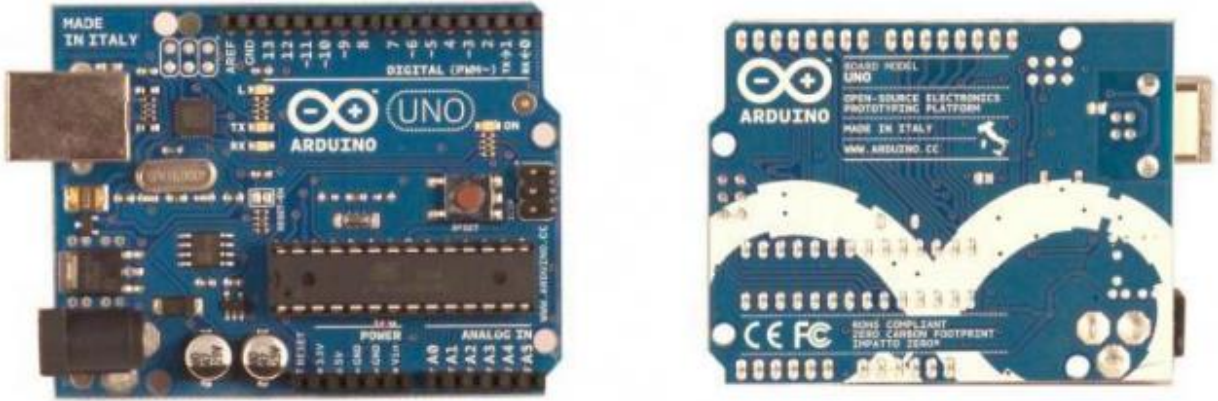


Рисунок 1.5 – Arduino Uno

Arduino Ethernet плата розширення з інтегрованою підтримкою роботи мережі Ethernet, який зображено на рисунку 1.6.

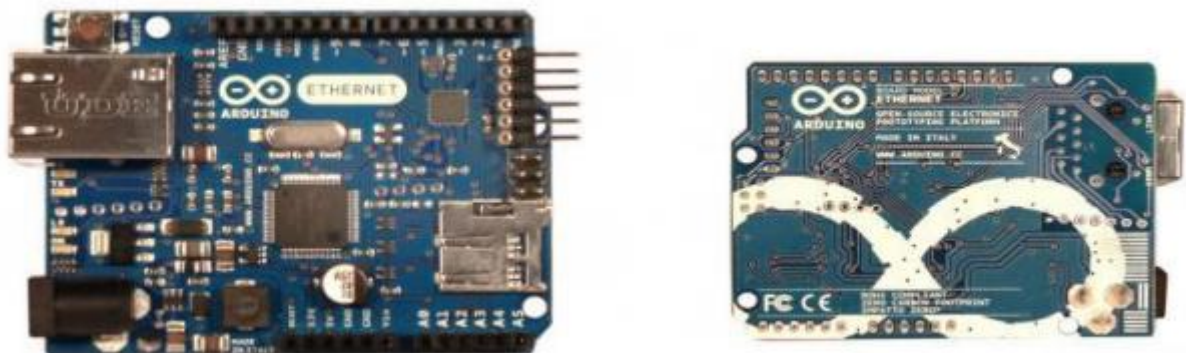


Рисунок 1.6 – Arduino Ethernet



Рисунок 1.7 – Arduino Micro

Arduino Micro – нове мініатюрне рішення на основі ATmega32u4, який зображено на рисунку 1.7. Arduino Nano, зображений на рисунку 1.8 є компактною платформою, що використовується для макетування.



Рисунок 1.8 – Arduino Nano

Mega2560 – оновлена версія плати серії Mega, яка будується на основі Atmega2560 та із застосуванням чіпа ATmega8U2 для підключення до USB порту, який зображено на рисунку 1.9.



Рисунок 1.9 – Arduino Mega

Fiо, зображений на рисунку 1.10 – платформа розроблена для бездротових та сенсорних мереж. Fiо складається з розетки для модулів XBee, відсіку для підключення джерела LiPo та внутрішньої мікросхеми DC-DC перетворювача.

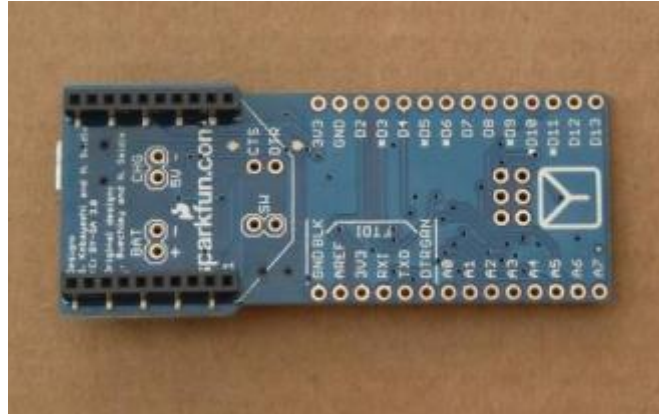


Рисунок 1.10 – Arduino Fio

Mini є найменшою платформою Arduino, який зображено на рисунку 1.11. Ця платформа використовується як макетна модель, або в проектах, де простір є критичним параметром. Платформа підключається до комп'ютера за допомогою адаптера Mini USB.



Рисунок 1.11 – Arduino Mini

Плати розширення, що встановлюються на платформи розширюють функціональність Arduino для керування різними пристроями, отримання даних тощо. Як контролер пристрою використовується мікропроцесорний модуль Arduino Uno на основі мікроконтролера Atmel ATmega 328p. Arduino Uno має компактний розмір, 14 цифрових входів/виходів, 32 Кбайт пам'яті та працює від джерела живлення 5В.

До складу мікропроцесорного модуля Arduino Uno входить все необхідне для зручної роботи з мікроконтролером: 14 цифрових входів/виходів (з них 6 можуть використовуватися як ШІМ-виходів), 6 аналогових входів, кварцовий резонатор на 16 МГц, роз'єм USB, роз'єм живлення, роз'єм для внутрішньо-схемного програмування (ICSP) та кнопка скидання. Для початку роботи з пристроями досить просто подати живлення від АС/DC-адаптера або або підключити його до комп'ютера за допомогою USB-кабелю.

На відміну від усіх попередніх плат Arduino, Uno як перетворювача інтерфейсів USB-UART використовує мікроконтролер atmega16U2 (ATmega8U2 до версії R2) замість мікросхеми FTDI.

Виходячи з перегляду серії Arduino платформ було обрано дві платформи, які рекомендуються для керування колісною роботизованою платформою. Порівняння характеристик обраних Arduino UNO та Arduino Mega наведено на у таблиці 1.1.

Таблиця 1.1 – Порівняння характеристик Arduino UNO та Arduino Mega

Параметр	Значення	
Мікроконтролер	ATmega328	ATmega2560
Робоча напруга, В	5	5
Напруга живлення (рекомендована), В	7-12	7-12
Напруга живлення (гранична), В	6-20	6-20
Цифрові входи/виходи	14	54
Аналогові входи	6	16
Максимальний струм одного виходу, мА	40	40
Максимальний вихідний струм виходу 3.3V, ма	50	50
Flash-пам'ять, КБ	32	256
SRAM, КБ	2	8
EEPROM, КБ	1	4
Тактова частота, МГц	16	16

У файлах проекту Arduino можуть фігурувати мікроконтролери ATmega8, 168 або 328. Наприклад, в останніх моделях використовується мікроконтролер ATmega328, але на схемі може бути вказаний мікроконтролер ATmega8. Це не є помилкою, оскільки всі три мікросхеми повністю сумісні між собою за висновками.

Arduino Uno може бути запитаний від USB або від зовнішнього джерела живлення – тип джерела вибирається автоматично. Як зовнішній джерело живлення (не USB) може використовуватися мережевий AC/DC-адаптер або акумулятор/батарея. Штекер адаптера (діаметр – 2.1мм, центральний контакт – позитивний) необхідно вставити в відповідний роз'єм живлення на платі. У разі харчування від акумулятора/батареї, її дроти необхідно підключити до висновків Gnd та Vin рознімання POWER. Напруга зовнішнього джерела живлення може бути в межах від 6 до 20 В. Однак, зменшення напруги живлення нижче 7В призводить до зменшення напруги на виведенні 5V, що

може стати причиною нестабільної роботи пристрою. Використання напруги більше 12В може призводити до перегріву стабілізатора напруги та виходу плати з ладу. З урахуванням цього, рекомендується використовувати джерело живлення з напругою в діапазоні від 7 до 12 В [7].

Нижче наведено висновки харчування, розташовані на платі.

Напруга, що надходить в Arduino безпосередньо від зовнішнього джерела живлення (не пов'язано з 5В від USB або іншим стабілізованим напругою). Через цей висновок можна як подавати зовнішнє харчування, так і споживати струм, коли пристрій запитано від зовнішнього адаптера.

На висновок надходить напруга 5В від стабілізатора напруги на платі, незалежно від того, як запитано пристрій: від адаптера (7 – 12В), від USB (5В) або через виведення VIN (7 – 12В). Запитувати пристрій через висновки 5V або 3V3 не рекомендується, оскільки в цьому випадку не використовується стабілізатор напруги, що може призвести до виходу плати з ладу.

3.3В, що надходять від стабілізатора напруги на платі. Максимальний струм, який споживається від цього висновку, становить 50 мА. GND.

Вивід землі IOREF. Цей вивід надає платам розширення інформацію про робочій напрузі мікроконтролера Arduino. Залежно від напруги, зчитаної з висновку IOREF, плата розширення може перейти на відповідне джерело живлення або задіяти перетворювачі рівнів, що дозволить їй працювати як з 5В, так та з 3.3В-пристроями.

Об'єм флеш-пам'яті ATmega328 складає 32 КБ (з яких 0.5 КБ використовуються завантажувачем). Мікроконтролер також має 2 КБ пам'яті SRAM та 1 КБ EEPROM (з якої можна зчитувати або записувати інформацію).

З використанням функцій `pinMode()`, `digitalWrite()` та `digitalRead()` кожен з 14 цифрових виводів може працювати як вход або вихід. Рівень напруги на висновках обмежений 5В. Максимальний струм, який може віддавати чи споживати один висновок, що становить 40 мА. Усі висновки пов'язані із внутрішніми підтягуючими резисторами (за замовчуванням відключеними)

номіналом 20-50 кОм. Крім цього, деякі висновки Arduino можуть виконувати додаткові функції: послідовний інтерфейс: висновки 0 (RX) та 1 (TX). Використовуються для отримання (RX) та передачі (TX) даних за послідовним інтерфейсом. Ці виводи з'єднані з відповідними висновками мікросхеми ATmega8U2, виконує роль перетворювача USB-UART.

Зовнішні переривання: висновки 2 і 3 можуть бути джерелами переривань, що виникають при фронті, спаді або при низькому рівні сигналу цих висновків. Для отримання додаткової інформації див функцію `attachInterrupt`.

ШІМ виходи 3, 5, 6, 9, 10 та 11 за допомогою функції `analogWrite()` можуть виводити 8-бітові аналогові значення у вигляді ШІМ-сигналу.

Інтерфейс SPI з виходи 10 (SS), 11 (MOSI), 12 (MISO), 13 (SCK). З застосуванням бібліотеки SPI дані висновки можуть здійснювати зв'язок інтерфейс SPI.

Arduino Uno має 6 аналогових входів (A0 – A5), кожен з яких може уявити аналогову напругу у вигляді 10-бітного числа (1024 різних значень). За замовчуванням вимірювання напруги здійснюється щодо діапазону від 0 до 5 В. Тим не менш, верхню межу цього діапазону можна змінити, використовуючи висновок AREF та функцію `analogReference()`. Крім цього, деякі з аналогових входів мають додаткові функції:

Wire дані висновки можуть здійснювати зв'язок за інтерфейсом TWI. Крім перерахованих на платі, існує ще кілька висновків.

AREF – опорна напруга для аналогових входів. Може задіяти функцією `analogReference`.

Reset – формування низького рівня (LOW) на цьому висновку призведе до перезавантаження мікроконтролера. Зазвичай цей висновок служить для функціонування кнопки скидання на платах розширення.

Arduino Uno надає ряд можливостей для здійснення зв'язку з комп'ютером, ще одним Ардуїним або іншими мікроконтролерами. У

ATmega328 є приймач UART, що дозволяє здійснювати послідовний зв'язок за допомогою цифрових висновків 0 (RX) та 1 (TX).

Мікроконтролер ATmega16U2 на платі забезпечує зв'язок цього приймача з USB-портом комп'ютера, і при підключенні до ПК дозволяє Ардуїно визначатися як віртуальний COM-порт. Прошивка мікросхеми 16U2 використовує стандартні драйвери USB-COM, тому встановлення зовнішніх драйверів не потрібно. У пакет програмного забезпечення Ардуїно входить спеціальна програма, що дозволяє зчитувати та відправляти на Ардуїно прості текстові дані. При передачі даних через мікросхему-перетворювач USB-UART під час USB-з'єднання з комп'ютером, на платі блиматимуть світлодіоди RX та TX. (Після послідовної передачі даних за допомогою висновків 0 та 1, без використання USB-перетворювача, дані світлодіоди не задіяні).

Бібліотека SoftwareSerial дозволяє реалізувати послідовний зв'язок будь-яких цифрових висновків Arduino Uno. У мікроконтролері ATmega328 також реалізовано підтримку послідовних інтерфейсів I2C (TWI) та SPI. У програмне забезпечення Arduino входить бібліотека Wire, що дозволяє спростити роботу із шиною I2C. Для роботи з інтерфейсом SPI використовується бібліотека SPI.

Так як можливі перебої з електропостачанням, пристрій має зберігати всі попередні налаштування в незалежній пам'яті. При цьому у черговому режимі використання споживачів, які використовують величезне кількість струму неприпустима. Необхідно щоб протягом усього резервного циклу роботи пристрою забезпечувалася стабільна напруга живлячих ланцюгів [8].

1.3 Базові вимоги до тягового електроприводу колісної роботизованої платформ

Тяговий електропривод є системою, яка в більшості випадків працює в умовах обмеженої потужності, що підводиться. Це обмеження: по струму контактного дроту, струму акумуляторної батареї, потужності дизель-

генераторної установки і т.д. Ця обставина змушує розробників тягових електроприводів забезпечувати роботу електроприводу у двох зонах регулювання: вниз та вгору від номінальної швидкості [9].

Регулювання вниз забезпечується у режимі сталості моменту, регулювання вгору – у режимі сталості потужності.

До тягового електроприводу висуваються різні вимоги, з яких можна виділити такі основні показники:

- максимальна швидкість руху;
- максимальний долаючий ухил;
- ухил, що тривало долається;
- час розгону/гальмування до/з заданої швидкості руху.

Крім того, існує маса другорядних вимог, частина з яких часто не можуть бути пояснені з позиції здорового глузду, наприклад, підтримання постійного значення потужності, що розвивається тяговим електроприводом у всьому діапазоні швидкостей. Як буде показано далі, ця вимога суттєво впливає на вибір встановленої потужності тягового електрообладнання та призводить до завищення показників щодо необхідних.

Для розгляду основних вимог слід визначити сили, що діють на колісну роботизовану платформу, які найбільше впливають на зазначені вимоги. Це сила опору потоку повітря, що набігає – F_A (air drag), сила тертя кочення коліс КРП при зіткненні з дорожнім покриттям – F_R (rolling drag), проекція сили тяжіння на поздовжню вісь, що виникає при русі транспортного засобу по дорозі з ухилом – F_G (grade), і сила тяги – F_T (traction force). Сила опору потоку повітря, що набігає, залежить від щільності повітря – ρ , коефіцієнта аеродинамічного опору кузова КРП – C_d , площі поперечного перерізу кузова КРП – A , і швидкості руху – V відповідно до рівняння:

$$F_A = \frac{1}{2} \rho C_d A V^2. \quad (1.1)$$

Сила тертя кочення визначається через коефіцієнт опору коченню f , який залежить від типу шини і типу дорожнього полотна. Коефіцієнт окреслюється відношення моменту тертя кочення M_R до сили реакції опори $N=m_{max}g$. З урахуванням радіуса колеса R вираз для сили записується як:

$$F_R = \frac{f}{R} m_{max}g . \quad (1.2)$$

Для оцінки сили та потужності, які потрібні для руху на максимальній швидкості, вважають, що дорога строго горизонтальна. Тоді результуюча сила дорівнюватиме сумі (1.1) і (1.2):

$$F_{Vmax} = F_A + F_R, \quad (1.3)$$

а потужність може бути розрахована шляхом множення на максимальну швидкість:

$$P_{Vmax} = \frac{1}{2} \rho C_d A V_{max}^3 + \frac{f}{R} m_{max}g V_{max}. \quad (1.4)$$

Максимальна тяга найчастіше визначається ухилом дороги, який потрібно долати або короткочасному режимі, або постійно. Формула повинна враховувати одночасно і силу тертя кочення, і проекцію сили тяжіння:

$$F_{max} = mg(\sin(\alpha) + \frac{f}{R}), \quad (1.5)$$

де α – кут ухилу дороги.

1.4 Висновки до першого розділу

Під час виконання аналізу варіантів реалізації системи управління колісної роботизованої платформи була представлена загальна структура систем управління, були порівняні автоматичні і автоматизовані системи управління. Розглянуті основні характеристики та завдання автоматичних систем управління, та проведено огляд життєвого циклу автоматизованої системи, і розглянуто усі стадії, які необхідно виконати для впровадження автоматизованої СУРП.

Виходячи з перегляду серії Arduino платформ було обрано дві платформи, які рекомендуються для керування колісною роботизованою платформою, це Arduino UNO та Arduino Mega.

Також було складено базові вимоги до тягового електроприводу колісної роботизованої платформи.

2 ДОСЛІДЖЕННЯ КИНЕМАТИЧНИХ І ДИНАМІЧНИХ ОСОБЛИВОСТЕЙ РУХУ РОБОТИЗОВАНОЇ ПЛАТФОРМИ

На підставі аналізу існуючих підходів до розрахунку та математичного моделювання колісних платформ, а також дослідження конструкційних особливостей побудови колісного рушій з гнучким зв'язком та окремих його частин, був запропонований до розгляду спрощена схема електромеханічної системи з попарно кінематично зв'язаними колесами. Математичний опис більш складних конструкцій електромеханічної платформи вимагатиме введення додаткових рівнянь та розрахунків, проте розроблені базові алгоритми розрахунку та принципи моделювання для них матимуть аналогічний характер. Дослідження математичної моделі щодо простий конструкції дозволяє зосередити увагу на динамічних особливості руху платформи в цілому. При цьому встановлені закономірності та ефекти будуть характерні для всіх типів машин з попарно кінематично зв'язаними колесами та не будуть обумовлені деякими конструктивними особливостями складної підвіски, багатоланкової конструкції корпусу та ін.

2.1 Опис конструкції та принцип руху роботизованої платформи

Роботизована платформа з гнучким зв'язком між колесами складається з корпусу, всередині якого розташовані: два моторредуктори, провідні колеса, ведені колеса, система автоматичного управління та джерело живлення. Ведучі та ведені колеса, з'єднані за допомогою ремінної передачі, закріплені з обох боків корпусу. Ведучі колеса жорстко з'єднані з вихідним валом моторредуктора.

Пристрій працює наступним чином: система автоматичного керування, генерує керуючий сигнал, який посилюється за допомогою драйверної схеми і

надходить на моторредуктор. Крутний момент, що створюється приводом, надає руху провідне колесо 3. Під дією моменту, що крутить, наводиться в рух ведене колесо. За рахунок сил тертя між колесами та контактною поверхнею система рухається. Поворот електромеханічної платформи у горизонтальній площині здійснюється шляхом додання різних швидкостей обертання коліс платформи [9].

2.2 Кінематичний аналіз руху роботизованої платформи

Положення платформи однозначно визначається координатами центру мас корпусу і кутом повороту корпусу φ . При кінематичному аналізі руху колісної платформи вирішується завдання визначення положення, швидкості центру мас платформи та швидкості точок C_i , і K_i зображено на рисунку 2.1.

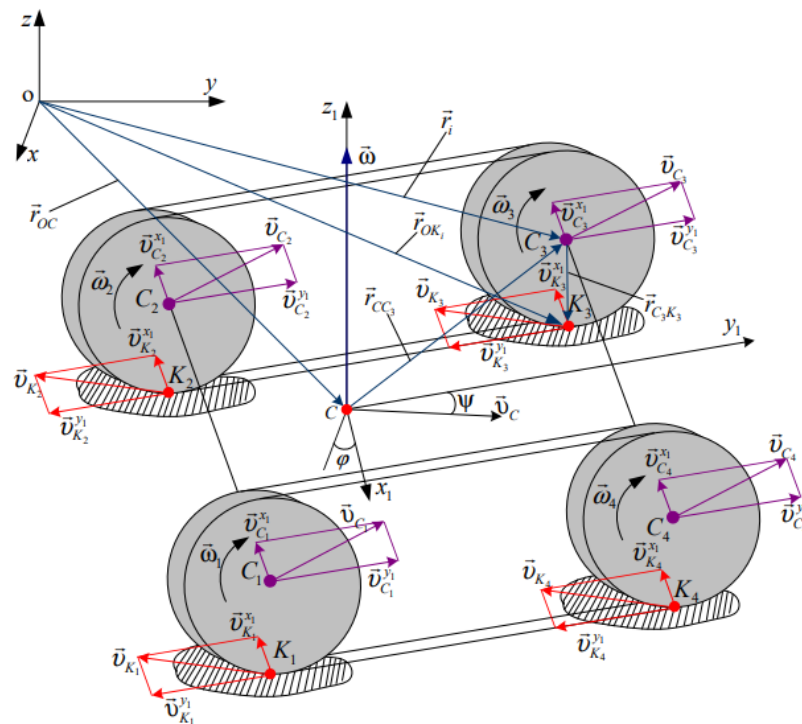


Рисунок 2.1 – Кінематична схема мобільної електромеханічної системи

На схемі прийнято такі позначення: $xOyz$ – нерухома система координат, $Cx_1y_1z_1$ – рухома система координат, M_1, M_2 – крутні моменти на провідних

колесах 1 і 2, C_1, C_2, C_3, C_4 – точки кріплення центру коліс; K_1, K_2, K_3, K_4 – точки контакту коліс із поверхнею; N_1, N_2, N_3, N_4 – сили нормальних реакцій, що діють у точках контакту коліс мобільної електромеханічної системи з поверхнею, $F_{TP1}^{x1}, F_{TP2}^{x2}, F_{TP3}^{x3}, F_{TP4}^{x4}, F_{TP1}^{y1}, F_{TP2}^{y2}, F_{TP3}^{y3}, F_{TP4}^{y4}$, – проєкції сил тертя, відповідно на вісь OX_1 і вісь OY_1 ; $v_{C1}, v_{C2}, v_{C3}, v_{C4}$ – швидкості точок кріплення центру коліс; $v_{C1}^{x1}, v_{C2}^{x2}, v_{C3}^{x3}, v_{C4}^{x4}, v_{C1}^{y1}, v_{C2}^{y2}, v_{C3}^{y3}, v_{C4}^{y4}$ – проєкції швидкостей точок кріплення центру коліс на вісь OX_1 та OY_2 ; $v_{K1}, v_{K2}, v_{K3}, v_{K4}$ – швидкості точок контакту коліс із поверхнею; $v_{C1}^{x1}, v_{C2}^{x2}, v_{C3}^{x3}, v_{C4}^{x4}, v_{C1}^{y1}, v_{C2}^{y2}, v_{C3}^{y3}, v_{C4}^{y4}$ – проєкції швидкостей точок контакту коліс з поверхнею на вісь OX_1 та OY_1 ; $\omega_1, \omega_2, \omega_3, \omega_4$ – кутові швидкості обертання коліс, mg – сила тяжіння, що діє на платформу, l_1 – відстань від центру мас до 1-го та 4-го колеса, l_2 – відстань від центру мас до 2-го та 3-го колеса, φ – кут повороту корпусу електромеханічної платформи навколо $CZ1$. α_1, α_2 – кут між лінією $CC1$ та віссю $CY1$ (α_1 для $i=1,4$; α_1 для $i=2,3$ відповідно [10]).

Для спрощення розглянемо рух системи у площині $ХОУ$, який зображено на рисунку 2.2.

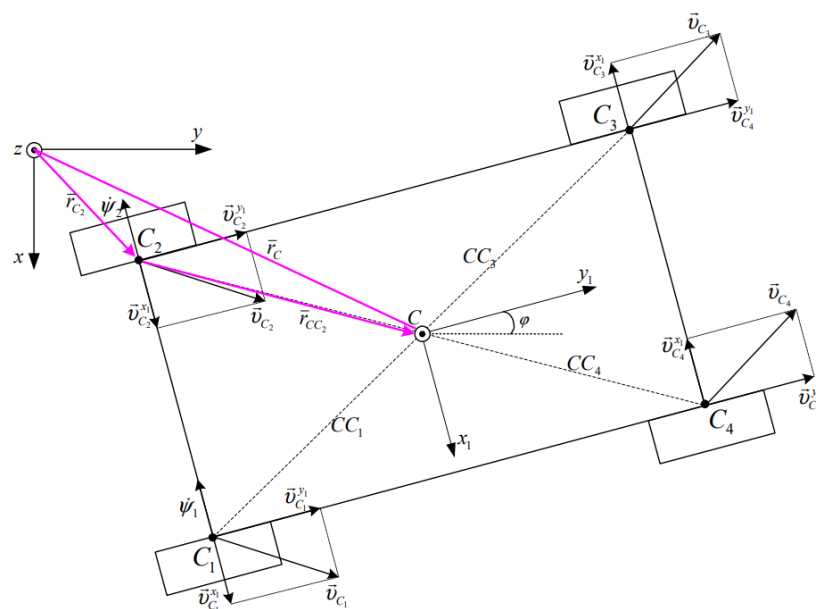


Рисунок 2.2 – Кінематична схема роботизованої платформи у проєкції на площину $ХОУ$

Визначимо положення точки C_i – центру i -го колеса платформи.

$$\vec{r}_{OA1}^{(0)} = \vec{r}_{OC}^{(0)} + \vec{r}_{CC1}^{(0)}; \quad (2.1)$$

де $\vec{r}_{OC}^{(0)} + \vec{r}_{CC1}^{(0)}$ – радіус-вектори, в абсолютній системі координат $OXYZ$ (далі – система координат (0)), що визначаються як:

$$\vec{r}_{OC}^{(0)} = \begin{bmatrix} x_C \\ y_C \\ a_5 + r \end{bmatrix}; \quad (2.2)$$

$$\vec{r}_{OC}^{(0)} = T_{10} \vec{r}_{CCi}^{(1)}; \quad (2.3)$$

де $\vec{r}_{CCi}^{(1)}$ – радіус-вектор у локальній системі координат $O_1X_1Y_1Z_1$ (далі – система координат (1)), T_{10} – матриця повороту. Запишемо T_{10} :

$$T_{10} = \begin{bmatrix} \cos \varphi & -\sin \varphi & 0 \\ \sin \varphi & \cos \varphi & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}. \quad (2.4)$$

Запишемо радіус-вектори $\vec{r}_{CCi}^{(1)}$ для точок C_1, C_2, C_3 та C_4 (центрів мас коліс):

$$\vec{r}_{CC1}^{(1)} = |a_4 \quad -a_1 \quad -a_5|^T; \quad (2.5)$$

$$\vec{r}_{CC2}^{(1)} = |-a_3 \quad -a_1 \quad -a_5|^T; \quad (2.6)$$

$$\vec{r}_{CC3}^{(1)} = |-a_3 \quad a_2 \quad -a_5|^T; \quad (2.7)$$

$$\vec{r}_{CC4}^{(1)} = |a_4 \quad a_2 \quad -a_5|^T. \quad (2.8)$$

Визначимо радіус-вектор точок C_i :

$$\vec{r}_{OC_1}^{(0)} = \vec{r}_{OC}^{(0)} + \vec{r}_{CC_1}^{(0)}. \quad (2.9)$$

Виконавши перетворення отримаємо:

$$\vec{r}_{OC_1}^{(0)} = \begin{vmatrix} x + a_4 * \cos\varphi + a_1 * \sin\varphi \\ y - a_1 * \cos\varphi + a_4 * \sin\varphi \\ r \end{vmatrix}; \quad (2.10)$$

$$\vec{r}_{OC_2}^{(0)} = \begin{vmatrix} x - a_3 * \cos\varphi + a_1 * \sin\varphi \\ y - a_1 * \cos\varphi - a_3 * \sin\varphi \\ r \end{vmatrix}; \quad (2.11)$$

$$\vec{r}_{OC_3}^{(0)} = \begin{vmatrix} x - a_3 * \cos\varphi - a_2 * \sin\varphi \\ y + a_2 * \cos\varphi - a_3 * \sin\varphi \\ r \end{vmatrix}; \quad (2.12)$$

$$\vec{r}_{OC_4}^{(0)} = \begin{vmatrix} x + a_4 * \cos\varphi - a_2 * \sin\varphi \\ y + a_2 * \cos\varphi + a_4 * \sin\varphi \\ r \end{vmatrix}. \quad (2.13)$$

Знайдемо швидкість точок A_1 , A_2 , A_3 та A_4 про диференціювавши вирази (2.10 – 2.13):

$$\vec{v}_{OC_1}^{(0)} = \begin{pmatrix} \dot{x} + a_1 \dot{\varphi} \cos(\varphi) - a_4 \dot{\varphi} \sin(\varphi) \\ \dot{y} + a_4 \dot{\varphi} \cos(\varphi) + a_1 \dot{\varphi} \sin(\varphi) \\ 0 \end{pmatrix}; \quad (2.14)$$

$$\vec{v}_{OC_2}^{(0)} = \begin{pmatrix} \dot{x} + a_1 \dot{\varphi} \cos(\varphi) + a_3 \dot{\varphi} \sin(\varphi) \\ \dot{y} + a_1 \dot{\varphi} \sin(\varphi) - a_3 \dot{\varphi} \cos(\varphi) \\ 0 \end{pmatrix}; \quad (2.15)$$

$$\vec{v}_{OC_3}^{(0)} = \begin{pmatrix} \dot{x} + a_3 \dot{\varphi} \sin(\varphi) - a_2 \dot{\varphi} \cos(\varphi) \\ \dot{y} - a_2 \dot{\varphi} \sin(\varphi) - a_3 \dot{\varphi} \cos(\varphi) \\ 0 \end{pmatrix}; \quad (2.16)$$

$$\vec{v}_{OC_4}^{(0)} = \begin{pmatrix} \dot{x} - a_4 \dot{\varphi} \sin(\varphi) - a_2 \dot{\varphi} \cos(\varphi) \\ \dot{y} + a_4 \dot{\varphi} \cos(\varphi) - a_2 \dot{\varphi} \sin(\varphi) \\ 0 \end{pmatrix}. \quad (2.17)$$

Взявши другу похідну від отриманих радіус-векторів отримаємо вирази, що пов'язують прискорення точок C_i та узагальнені координати \ddot{x} , \ddot{y} , φ , $\dot{\varphi}$, $\ddot{\varphi}$:

$$\vec{a}_{OC_1}^{(0)} = \begin{vmatrix} \ddot{x} + a_1 \ddot{\varphi} \cos \varphi - a_4 \ddot{\varphi} \sin \varphi - a_4 \dot{\varphi}^2 \cos \varphi - a_1 \dot{\varphi}^2 \sin \varphi \\ \ddot{y} + a_4 \ddot{\varphi} \cos \varphi + a_1 \ddot{\varphi} \sin \varphi + a_1 \dot{\varphi}^2 \cos \varphi - a_4 \dot{\varphi}^2 \sin \varphi \\ 0 \end{vmatrix}; \quad (2.18)$$

$$\vec{a}_{OC_2}^{(0)} = \begin{vmatrix} \ddot{x} + a_1 \ddot{\varphi} \cos \varphi + a_3 \ddot{\varphi} \sin \varphi + a_3 \dot{\varphi}^2 \cos \varphi - a_1 \dot{\varphi}^2 \sin \varphi \\ \ddot{y} - a_3 \ddot{\varphi} \cos \varphi + a_1 \ddot{\varphi} \sin \varphi + a_1 \dot{\varphi}^2 \cos \varphi + a_3 \dot{\varphi}^2 \sin \varphi \\ 0 \end{vmatrix}; \quad (2.19)$$

$$\vec{a}_{OC_3}^{(0)} = \begin{vmatrix} \ddot{x} - a_2 \ddot{\varphi} \cos \varphi + a_3 \ddot{\varphi} \sin \varphi + a_3 \dot{\varphi}^2 \cos \varphi + a_2 \dot{\varphi}^2 \sin \varphi \\ \ddot{y} - a_3 \ddot{\varphi} \cos \varphi - a_2 \ddot{\varphi} \sin \varphi - a_2 \dot{\varphi}^2 \cos \varphi + a_3 \dot{\varphi}^2 \sin \varphi \\ 0 \end{vmatrix}; \quad (2.20)$$

$$\vec{a}_{OC_4}^{(0)} = \begin{vmatrix} \ddot{x} - a_2 \ddot{\varphi} \cos \varphi - a_4 \ddot{\varphi} \sin \varphi - a_4 \dot{\varphi}^2 \cos \varphi + a_2 \dot{\varphi}^2 \sin \varphi \\ \ddot{y} + a_4 \ddot{\varphi} \cos \varphi - a_2 \ddot{\varphi} \sin \varphi - a_2 \dot{\varphi}^2 \cos \varphi - a_4 \dot{\varphi}^2 \sin \varphi \\ 0 \end{vmatrix}. \quad (2.21)$$

В окремому випадку, коли $a_1 = a_2 = a_3 = a_4 = a$ можемо записати вирази для $\vec{a}_{OC_i}^{(0)}$ наступним чином:

$$\vec{a}_{OC_1}^{(0)} = \begin{vmatrix} \ddot{x} + a \ddot{\varphi} (\cos \varphi - \sin \varphi) - a \dot{\varphi}^2 (\cos \varphi + \sin \varphi) \\ \ddot{y} + a \ddot{\varphi} (\cos \varphi + \sin \varphi) + a \dot{\varphi}^2 (\cos \varphi - \sin \varphi) \\ 0 \end{vmatrix}; \quad (2.22)$$

$$\vec{a}_{OC_2}^{(0)} = \begin{vmatrix} \ddot{x} + a \ddot{\varphi} (\cos \varphi + \sin \varphi) + a \dot{\varphi}^2 (\cos \varphi - \sin \varphi) \\ \ddot{y} - a \ddot{\varphi} (\cos \varphi - \sin \varphi) + a \dot{\varphi}^2 (\cos \varphi + \sin \varphi) \\ 0 \end{vmatrix}; \quad (2.23)$$

$$\vec{a}_{OC_3}^{(0)} = \begin{vmatrix} \ddot{x} - a \ddot{\varphi} (\cos \varphi - \sin \varphi) + a \dot{\varphi}^2 (\cos \varphi + \sin \varphi) \\ \ddot{y} - a \ddot{\varphi} (\cos \varphi + \sin \varphi) - a \dot{\varphi}^2 (\cos \varphi - \sin \varphi) \\ 0 \end{vmatrix}; \quad (2.24)$$

$$\vec{a}_{OC_4}^{(0)} = \begin{vmatrix} \ddot{x} - a \ddot{\varphi} (\cos \varphi + \sin \varphi) - a \dot{\varphi}^2 (\cos \varphi - \sin \varphi) \\ \ddot{y} + a \ddot{\varphi} (\cos \varphi - \sin \varphi) - a \dot{\varphi}^2 (\cos \varphi + \sin \varphi) \\ 0 \end{vmatrix}. \quad (2.25)$$

Кутова швидкість корпусу електромеханічної платформи $\vec{\omega}$ визначається так [10]:

$$\vec{\omega} = \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ \dot{\varphi} \end{pmatrix}. \quad (2.26)$$

Аналогічно виразу (2.1) можемо записати для точок контакту з поверхнею K_i :

$$\vec{r}_{K_i}^{(0)} = \vec{r}_{OC_i}^{(0)} + \vec{r}_{C_iK_i}. \quad (2.27)$$

Положення точок центрів коліс електромеханічної платформи задається такими проекціями:

$$\begin{cases} x_{C_1} = x_C + l_1 \cos(\varphi + \alpha_1) \\ y_{C_1} = y_C + l_1 \sin(\varphi + \alpha_1) \end{cases}, \quad (2.28)$$

$$\begin{cases} x_{C_2} = x_C + l_1 \cos(\varphi - \alpha_1) \\ y_{C_2} = y_C + l_1 \sin(\varphi - \alpha_1) \end{cases}, \quad (2.29)$$

$$\begin{cases} x_{C_3} = x_C - l_2 \cos(\varphi + \alpha_2) \\ y_{C_3} = y_C - l_2 \sin(\varphi + \alpha_1) \end{cases}, \quad (2.30)$$

$$\begin{cases} x_{C_4} = x_C - l_2 \cos(\varphi - \alpha_2) \\ y_{C_4} = y_C - l_2 \sin(\varphi - \alpha_2) \end{cases}. \quad (2.31)$$

де, x_{C_i}, y_{C_i} – координати центру i -того колеса ($i = 1,2,3,4$), x_C, y_C – координати центру мас колісної роботизованої платформи, $l_1, l_2, \alpha_1, \alpha_2$ – геометричні розміри роботизованої платформи, як зображено на рисунку 2.3.

Розглянемо рух КРП по колу та спіралеподібної траєкторії. Для отримання чисельного результату, при моделюванні руху використовувався пакет MathCad.

Прийняті позначення параметрів конструкції зображено на рисунку 2.3.

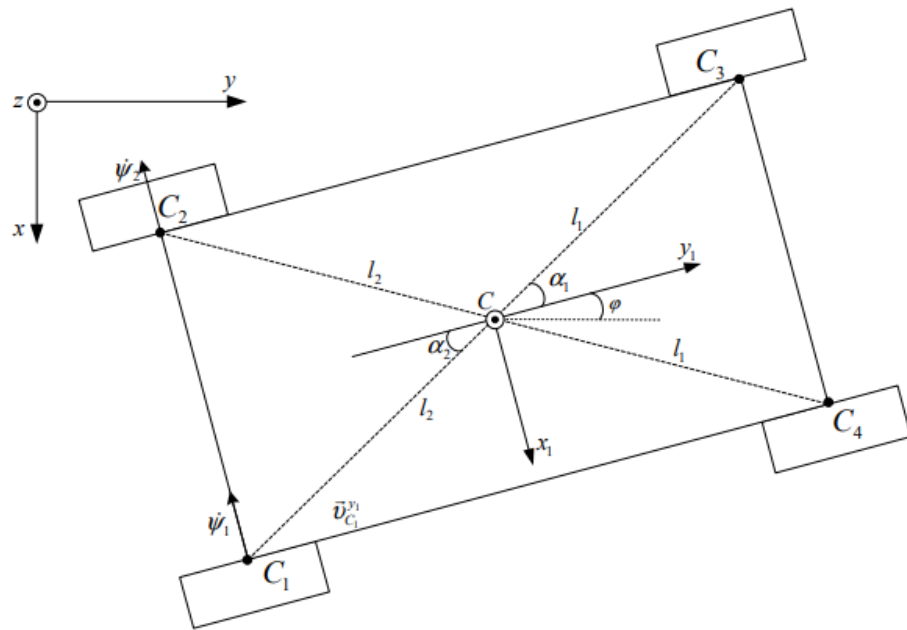


Рисунок 2.3 – Схема роботизованої платформи
з геометричними розмірами

Нехай центр мас корпусу роботизованої платформи рухається по колу, координати якого задаються рівняннями [11]:

$$\begin{cases} x_C = R \cos(\omega t); \\ y_C = R \sin(\omega t); \end{cases} \quad (2.32)$$

де R – радіус кривизни кола, яким рухається центр мас роботизованої платформи,

ω – кутова швидкість корпусу роботизованої платформи.

Вважатимемо, що коли $\omega = \dot{\varphi}$, рухлива вісь CY_1 завжди спрямована по дотичній до траєкторії та кут φ змінюється за заданим законом, тобто $\varphi = \omega t + \varphi_0$, де φ_0 – початковий кут, визначаючий положення корпусу роботизованої платформи на траєкторії.

Вихідні дані для моделювання подаємо у вигляді таблиці 2.1.

Таблиця 2.1 – Параметри математичної моделі роботизованої платформи

Радіус кривизни траєкторії	$R = 1$ м
Час моделювання	10 с
Постійна інтегрування	0,0001 с
Відстань від центру мас до точки кріплення колеса	$l = 0,06$ м
Радіус коліс двигуна	$r = 0,03$ м
Кут, що визначає геометрію КРП	$\alpha = 45^\circ$
Постійна кутова швидкість	$\omega = 45^\circ\text{с}^{-1}$

На рисунку 2.4 зображено траєкторію руху колісної роботизованої платформи під час моделювання.

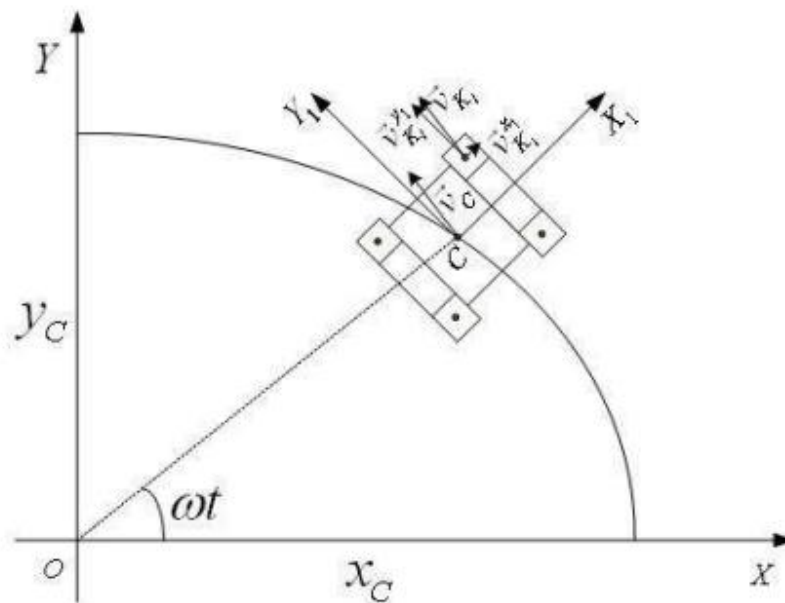


Рисунок 2.4 – Схема руху роботизованої платформи по траєкторії

Виконаємо чисельне моделювання руху роботизованої платформи та визначимо траєкторію. Результати моделювання представлені на рисунку 2.5-2.6.

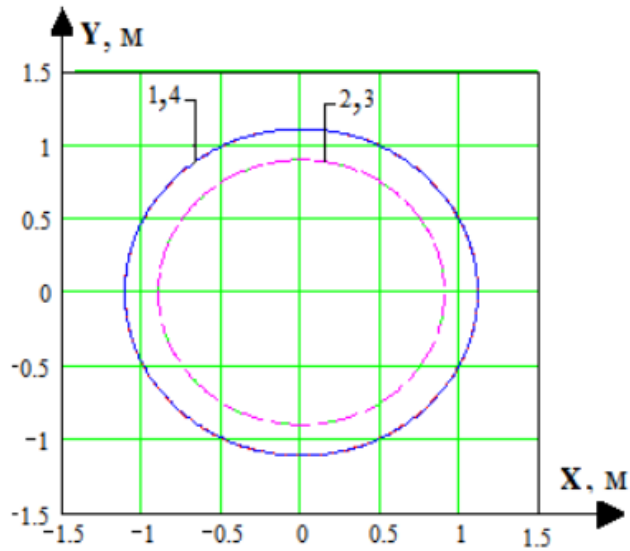
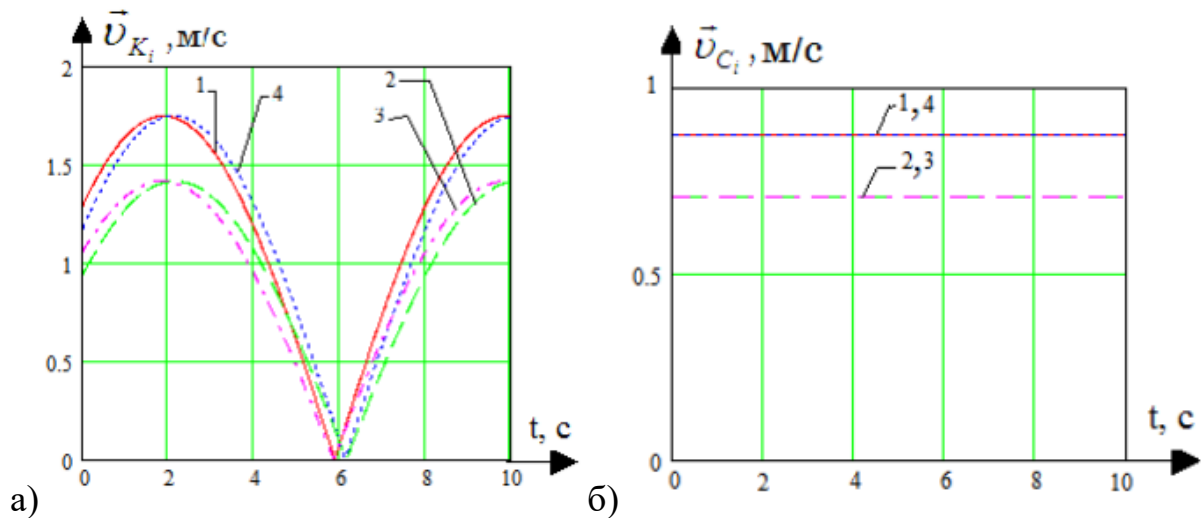


Рисунок 2.5 – Траєкторія руху пристрою під час руху по колу



а – залежність швидкості точок контакту пристрою з поверхнею від часу; б – залежність швидкості точок центрів коліс від часу

Рисунок 2.6 – Тимчасові діаграми параметрів руху пристрою по колу:

На цих рисунках: 2, 3 – швидкості зовнішньої пари коліс; 1, 4 – швидкості внутрішньої пари коліс.

Зазначимо, що при русі по криволінійній траєкторії в точці контакту коліс з поверхнею виникає поздовжнє ковзання [12]. Для оцінки величини прослизання здійснимо моделювання руху колісної роботизованої платформи по спіралеподібній траєкторії, при якому радіус кривизни змінюватиметься у часі, тобто. $R = R(t)$.

В даному випадку координати центру мас будуть задаватися рівняннями:

$$\begin{cases} x_c = R(t)\cos(\omega t) \\ y_c = R(t)\sin(\omega t) \end{cases} \quad (2.33)$$

Виконаємо чисельний розрахунок руху роботизованої платформи в MathCAD та отримаємо графік траєкторії руху платформи. Також, побудуємо графіки залежності швидкостей точок контакту з поверхнею від часу. Результати моделювання представлені на рисунках 2.7-2.8.

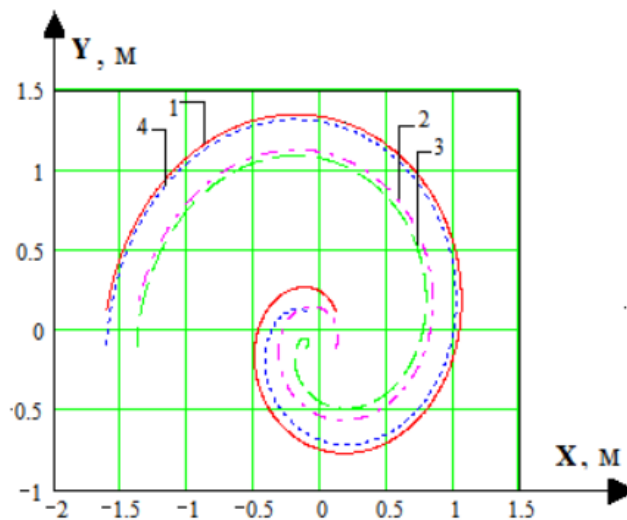
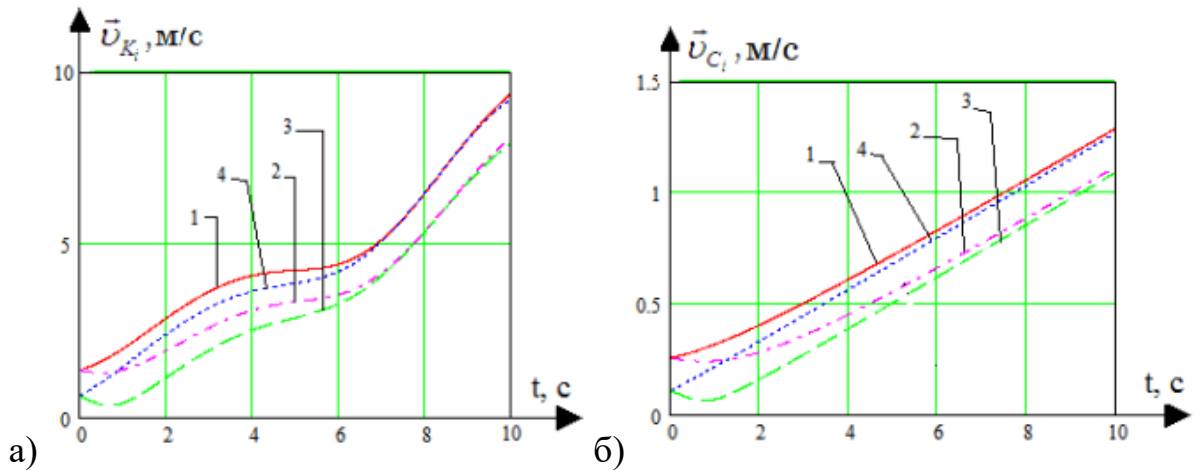


Рисунок 2.7 – Траєкторія руху коліс роботизованої платформи при спіральному русі



а – залежність швидкості точок контакту з поверхнею від часу;

б – залежність швидкості точок центрів коліс від часу

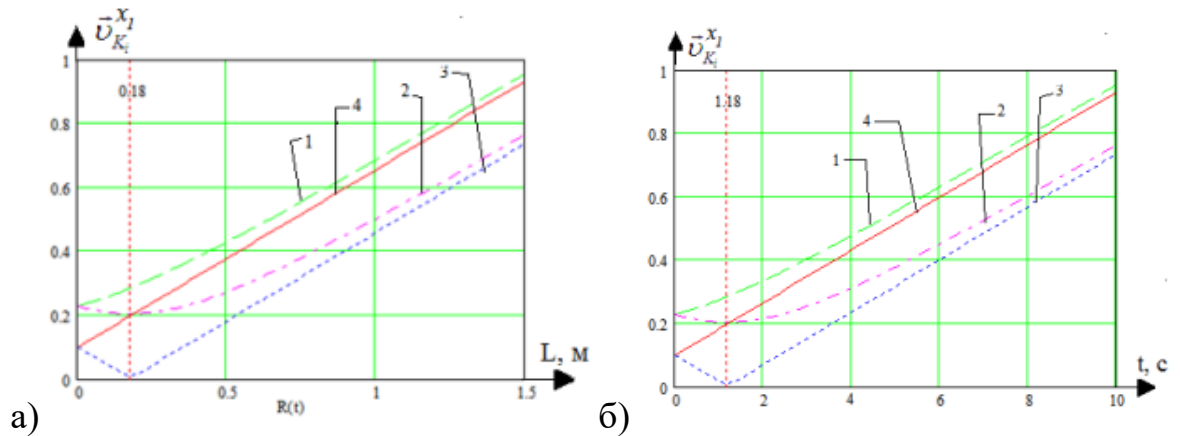
Рисунок 2.8 – Тимчасові діаграми параметрів спірального руху роботизованої колісної системи

На наведених рисунках також: 2, 3 – швидкості зовнішньої пари коліс; 1, 4 – швидкості внутрішньої пари коліс.

Визначимо величину поздовжнього ковзання коліс пристрою. Для цього обчислимо нормальну складову швидкості кожного колеса, скориставшись формулою [13]:

$$v_{K_i}^{x_i}(t) = v_{C_i}(t)\cos(\alpha). \quad (2.34)$$

Зробивши необхідні обчислення, отримаємо графіки прослизання кожного з коліс, який зображено на рисунку 2.9.



1, 4 – швидкості внутрішньої пари коліс;
 2, 3 – швидкості зовнішньої пари коліс

Рисунок 2.9 – Залежність прослизання від радіусу кривизни

Як видно з графіка величина поздовжнього прослизання нелінійно залежить від радіусу кривизни криволінійної траєкторії. Характерною є точка, позначена на рисунку 3.7, де $R=0,18$ м, а $t=1,18$ с. В даному випадку швидкість другого колеса роботизованої платформи, що є веденим у зовнішній колісній парі, стає рівною нулю. У цей момент часу колісна система починає обертатися щодо цього колеса. Після цього моменту, коли $R > 0,18$ м, швидкість всіх коліс має вигляд зростаючої прямої, так як радіус кривизни лінійно змінюється у часі.

2.3 Дослідження динамічних особливостей руху колісної роботизованої платформи

Виконаний у попередньому розділі кінематичний аналіз руху роботизованої платформи з попарним кінематичним зв'язком між колесами, показав, що при переміщенні пристрою по криволінійній траєкторії, спостерігається ефект прослизання, при цьому прослизання відбувається як по осі руху, так і в поперечному напрямку. Встановлений факт свідчить про необхідність проведення динамічного аналізу руху, при цьому потрібно

враховувати сили тертя, що виникають у точках торкання коліс роботизованої платформи з контактною поверхнею [14].

Для розробки математичної моделі КРП було запропонована наступна узагальнена схема пристрою, оснащеного двома незалежними парами колісних рушіїв з гнучким зв'язком між колесами кожної пари [15], яка зображена на рисунку 2.10.

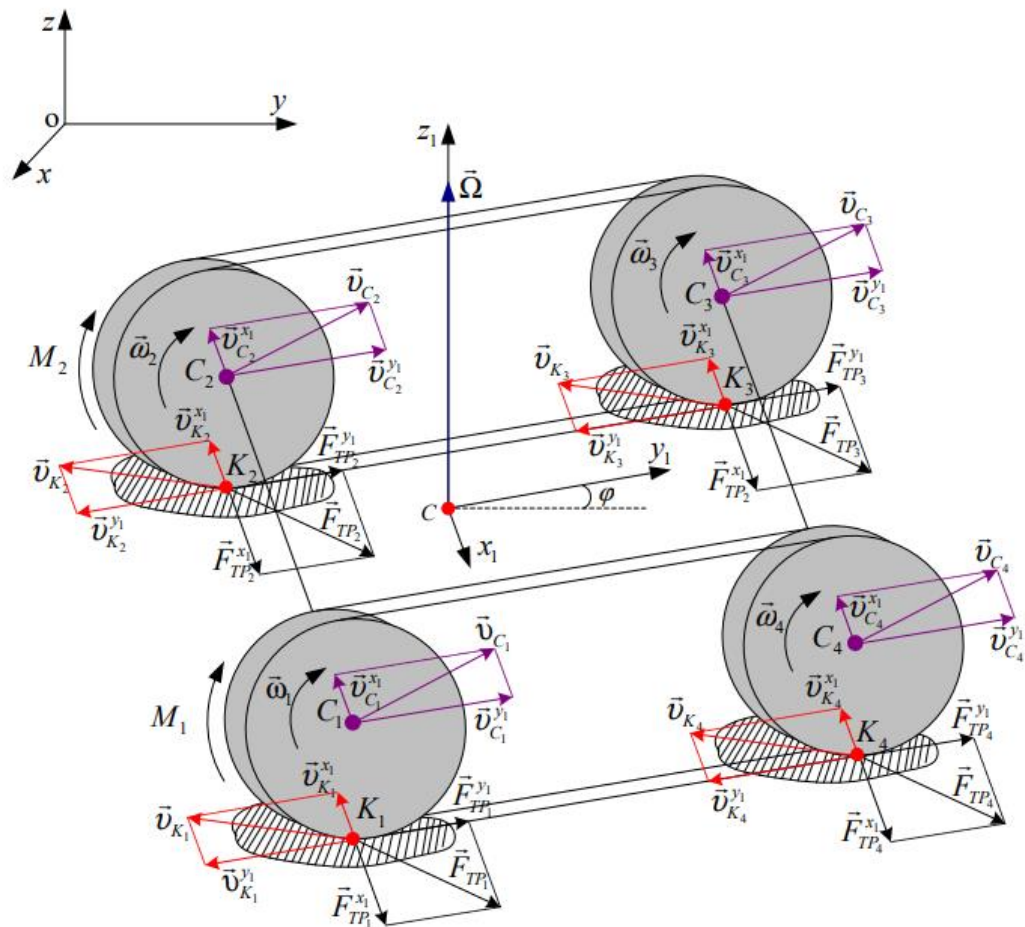


Рисунок 2.10 – Розрахункова схема колісної роботизованої системи

На даній схемі прийнято такі позначення: $HOYZ$ – нерухома система координат, $SX_1Y_1Z_1$ – рухлива система координат, M_1, M_2 – крутні моменти на провідних колесах 1 і 2, C_1, C_2, C_3, C_4 – точки кріплення центру коліс; K_1, K_2, K_3, K_4 – точки контакту коліс з поверхнею; $\vec{N}_1, \vec{N}_2, \vec{N}_3, \vec{N}_4$ – сили нормальних реакцій, що діють у точках контакту коліс платформи з поверхнею, $\vec{F}_{TP_1}^{x_1}$,

$\vec{F}_{TP_2}^{x_1}, \vec{F}_{TP_3}^{x_1}, \vec{F}_{TP_4}^{x_1}, \vec{F}_{TP_1}^{y_1}, \vec{F}_{TP_2}^{y_1}, \vec{F}_{TP_3}^{y_1}, \vec{F}_{TP_4}^{y_1}$ – проекції сил тертя, відповідно на вісь OX_1 та вісь OY_1 ; $\vec{v}_{C_1}, \vec{v}_{C_2}, \vec{v}_{C_3}, \vec{v}_{C_4}$ – швидкості точок кріплення центру коліс; $\vec{v}_{C_1}^{x_1}, \vec{v}_{C_2}^{x_1}, \vec{v}_{C_3}^{x_1}, \vec{v}_{C_4}^{x_1}, \vec{v}_{C_1}^{y_1}, \vec{v}_{C_2}^{y_1}, \vec{v}_{C_3}^{y_1}, \vec{v}_{C_4}^{y_1}$ – проекції швидкостей точок кріплення центру коліс на вісь на вісь OX_1 та вісь OY_1 ; $\vec{v}_{K_1}, \vec{v}_{K_2}, \vec{v}_{K_3}, \vec{v}_{K_4}$ – швидкості точок контакту коліс із поверхнею; $\vec{v}_{K_1}^{x_1}, \vec{v}_{K_2}^{x_1}, \vec{v}_{K_3}^{x_1}, \vec{v}_{K_4}^{x_1}, \vec{v}_{K_1}^{y_1}, \vec{v}_{K_2}^{y_1}, \vec{v}_{K_3}^{y_1}, \vec{v}_{K_4}^{y_1}$ – проекції швидкостей точок контакту коліс з поверхнею на вісь OX_1 та OY_1 ; $\vec{\omega}_1, \vec{\omega}_2, \vec{\omega}_3, \vec{\omega}_4$ – кутові швидкості обертання коліс, mg – сила тяжіння, що діє на платформу.

У загальному випадку колісна роботизована платформа має 6 узагальнених координат, для кожної з яких запишемо рівняння, використовуючи відомі теореми динаміки.

Для складання рівнянь, що описують поступальні рухи вздовж осей OX , OY , OZ , скористаємося теоремою про збереження кількості руху системи. Вважаємо тіло абсолютно твердим, тому сума внутрішніх сил дорівнює нулю і теорема набуває наступного вигляду [16]:

$$\frac{dQ}{dt} = \sum_{K=1}^n F_K; \quad (2.35)$$

де $\frac{dQ}{dt}$ – зміна імпульсу системи;

$\sum_{K=1}^n F_K$ – сума зовнішніх сил, які діють тіло.

Відповідно до схеми зображеної на рисунку 2.10, визначимо суму зовнішніх сил, які діють на пристрій у проекціях на осі OX , OY , OZ :

Вісь OX :

$$\sum_{K=1}^n F_K^{x_1} = \left(F_{TP_1}^{x_1} \cos \varphi + F_{TP_2}^{x_1} \cos \varphi + F_{TP_3}^{x_1} \cos \varphi + F_{TP_4}^{x_1} \cos \varphi - \right. \\ \left. - F_{TP_1}^{y_1} \sin \varphi - F_{TP_2}^{y_1} \sin \varphi + F_{TP_3}^{y_1} \sin \varphi + F_{TP_4}^{y_1} \sin \varphi \right); \quad (2.36)$$

Вісь OY :

$$\sum_{K=1}^n F_K^{x_1} = \left(\begin{array}{l} F_{TP_1}^{x_1} \sin \varphi + F_{TP_2}^{x_1} \sin \varphi + F_{TP_3}^{x_1} \sin \varphi + F_{TP_4}^{x_1} \sin \varphi + \\ + F_{TP_1}^{y_1} \cos \varphi + F_{TP_2}^{y_1} \cos \varphi - F_{TP_3}^{y_1} \cos \varphi - F_{TP_4}^{y_1} \cos \varphi \end{array} \right); \quad (2.37)$$

Вісь OZ :

$$\sum_{K=1}^n F_K^{z_1} = N_1 + N_2 + N_3 + N_4 - mg \quad (2.38)$$

Так як маса постійна і не змінюється в процесі руху, то права частина виразу (6) набуває вигляду:

$$\frac{d\vec{Q}}{dt} = \frac{d(m\vec{v})}{dt} = m \frac{d(\vec{v})}{dt}; \quad (2.39)$$

де m – маса системи,

$\frac{d(\vec{v})}{dt}$ – прискорення вздовж відповідної осі.

В результаті отримуємо наступні диференціальні рівняння руху вздовж осей OX , OY , OZ :

Рух вздовж осі OX :

$$m\ddot{x} = \left(\begin{array}{l} F_{TP_1}^{x_1} \cos \varphi + F_{TP_2}^{x_1} \cos \varphi + F_{TP_3}^{x_1} \cos \varphi + F_{TP_4}^{x_1} \cos \varphi - \\ - F_{TP_1}^{y_1} \sin \varphi - F_{TP_2}^{y_1} \sin \varphi + F_{TP_3}^{y_1} \sin \varphi + F_{TP_4}^{y_1} \sin \varphi \end{array} \right); \quad (2.40)$$

Рух вздовж осі OY :

$$m\ddot{y} = \left(\begin{array}{l} F_{TP_1}^{x_1} \sin \varphi + F_{TP_2}^{x_1} \sin \varphi + F_{TP_3}^{x_1} \sin \varphi + F_{TP_4}^{x_1} \sin \varphi + \\ + F_{TP_1}^{y_1} \cos \varphi + F_{TP_2}^{y_1} \cos \varphi - F_{TP_3}^{y_1} \cos \varphi - F_{TP_4}^{y_1} \cos \varphi \end{array} \right); \quad (2.41)$$

Рух вздовж осі OZ :

Оскільки рух центру тяжіння вздовж осі OZ просто відсутній, то координата $Z = \text{const}$ (Z не дорівнює нулю, оскільки центр тяжіння розташований на деякій висоті від поверхні, якою рухається роботизована платформа), а прискорення та швидкість у цьому напрямі дорівнюють нулю [17].

$$0 = N_1 + N_2 + N_3 + N_4 - mg. \quad (2.42)$$

Для узагальнених координат, що описують обертальний рух щодо осей OX_1 , OY_1 , OZ_1 , що проходять через центр мас пристрою складемо диференціальні рівняння руху, скориставшись теорема про кінетичний момент системи в наступному вигляді:

$$\frac{d\vec{K}_C}{dt} = \vec{L}_C, \quad (2.43)$$

де $\frac{d\vec{K}_C}{dt}$ – зміна кінетичного моменту системи щодо центру мас

\vec{L}_C – головний момент системи щодо центру мас [18].

Кінетичний момент системи \vec{K}_C та головний момент системи \vec{L}_C щодо центру мас виражаються так:

$$\vec{K}_C = I_C \dot{\omega}; \quad (2.44)$$

$$\vec{L}_C = \sum_{i=1}^n \vec{M}_{C_i}; \quad (2.45)$$

де $\sum_{i=1}^n \vec{M}_{C_i}$ – сума моментів зовнішніх сил

$I_C \dot{\omega}$ – момент інерції та кутовий прискорення системи щодо якоїсь нерухомої осі [19].

Визначимо основні моменти навколо осей OX_1 , OY_1 , OZ_1 .

Відносно осі OZ_1 :

$$\vec{L}_C^z = \sum_{i=1}^n \vec{M}_{C_i}^z = \begin{pmatrix} F_{TP_1}^{x_1} a_1 - F_{TP_2}^{x_1} a_1 - F_{TP_3}^{x_1} a_1 + F_{TP_4}^{x_1} a_1 - \\ -F_{TP_1}^{y_1} a_1 - F_{TP_2}^{y_1} a_1 - F_{TP_3}^{y_1} a_1 - F_{TP_4}^{y_1} a_1 \end{pmatrix}. \quad (2.46)$$

Для визначення головного моменту системи щодо двох наступних осей (осей OX_1 та OY_2) необхідно визначити плечі сил реакцій, прикладених відповідно у точках K_1, K_2, K_3 та K_4 :

$$\begin{aligned} l_y^1 &= \frac{a_1 \cos(\varphi+a_1)}{\sin a_1}; \quad l_y^3 = \frac{a_2 \cos(\varphi+a_3)}{\sin a_3}; \\ l_x^1 &= \frac{a_1 \cos(\varphi+a_1)}{\sin a_1}; \quad l_x^3 = \frac{a_2 \cos(\varphi+a_3)}{\sin a_3}; \\ l_y^2 &= \frac{a_2 \cos(\varphi-a_2)}{\sin a_2}; \quad l_y^4 = \frac{a_1 \cos(\varphi-a_4)}{\sin a_4}; \\ l_x^2 &= \frac{a_2 \cos(\varphi-a_2)}{\sin a_2}; \quad l_x^4 = \frac{a_1 \cos(\varphi-a_4)}{\sin a_4}. \end{aligned} \quad (2.47)$$

Відносно осі OY_1 :

$$\vec{L}_C^y = \sum_{i=1}^n \vec{M}_{C_i}^y = N_1 l_y^1 + N_2 l_y^2 + N_3 l_y^3 + N_4 l_y^4; \quad (2.48)$$

Відносно осі OX_1 :

$$\vec{L}_C^x = \sum_{i=1}^n \vec{M}_{C_i}^x = N_1 l_x^1 + N_2 l_x^2 + N_3 l_x^3 + N_4 l_x^4. \quad (2.49)$$

Оскільки момент інерції не змінюється у часі постійною величиною, отриманою експериментально, то права частина виразу (8) набуває вигляду:

$$\frac{d\vec{K}_C}{dt} = I \frac{d\omega}{dt}. \quad (2.50)$$

В результаті отримуємо наступні диференціальні рівняння руху для останніх трьох узагальнених координат:

Відносно осі OZ:

$$I_z \frac{d\dot{\omega}}{dt} = \begin{pmatrix} F_{TP_1}^{x_1} a_1 - F_{TP_2}^{x_1} a_2 - F_{TP_3}^{x_1} a_2 + F_{TP_4}^{x_1} a_1 - \\ - F_{TP_1}^{y_1} a_3 - F_{TP_2}^{y_1} a_3 - F_{TP_3}^{y_1} a_4 - F_{TP_4}^{y_1} a_4 \end{pmatrix}; \quad (2.51)$$

Відносно осі OY:

$$I_y \frac{d\dot{\omega}}{dt} = N_1 l_y^1 + N_2 l_y^2 + N_3 l_y^3 + N_4 l_y^4; \quad (2.52)$$

Підставляючи у формулу значення довжин плечей отримаємо:

$$I_y \frac{d\dot{\omega}}{dt} = \begin{pmatrix} N_1 \frac{a_1 \cos(\varphi+a_1)}{\sin a_1} + N_2 \frac{a_2 \cos(\varphi-a_2)}{\sin a_2} + \\ + N_3 \frac{a_2 \cos(\varphi+a_3)}{\sin a_3} + N_4 \frac{a_1 \cos(\varphi-a_4)}{\sin a_4} \end{pmatrix}; \quad (2.53)$$

Відносно осі OX:

$$I_x \frac{d\dot{\omega}}{dt} = N_1 l_x^1 + N_2 l_x^2 + N_3 l_x^3 + N_4 l_x^4; \quad (2.54)$$

Підставляючи у формулу значення довжин плечей отримаємо:

$$I_x \frac{d\dot{\omega}}{dt} = \begin{pmatrix} N_1 \frac{a_1 \sin(\varphi+a_1)}{\sin a_1} + N_2 \frac{a_2 \sin(\varphi-a_2)}{\sin a_2} + \\ + N_3 \frac{a_2 \sin(\varphi+a_3)}{\sin a_3} + N_4 \frac{a_1 \sin(\varphi-a_4)}{\sin a_4} \end{pmatrix}. \quad (2.55)$$

Для спрощення системи рівнянь прийемо сили реакції постійними (це можливо, коли центр мас системи знаходиться в площині XOY). Тоді отримуємо систему з 3-х рівнянь:

Рух вздовж осі OX:

$$m\ddot{x} = \begin{pmatrix} F_{TP_1}^{x_1} \cos \varphi + F_{TP_2}^{x_1} \cos \varphi + F_{TP_3}^{x_1} \cos \varphi + F_{TP_4}^{x_1} \cos \varphi - \\ -F_{TP_1}^{y_1} \sin \varphi - F_{TP_2}^{y_1} \sin \varphi + F_{TP_3}^{y_1} \sin \varphi + F_{TP_4}^{y_1} \sin \varphi \end{pmatrix}; \quad (2.56)$$

Рух вздовж осі OY:

$$m\ddot{y} = \begin{pmatrix} F_{TP_1}^{x_1} \sin \varphi + F_{TP_2}^{x_1} \sin \varphi + F_{TP_3}^{x_1} \sin \varphi + F_{TP_4}^{x_1} \sin \varphi + \\ +F_{TP_1}^{y_1} \cos \varphi + F_{TP_2}^{y_1} \cos \varphi - F_{TP_3}^{y_1} \cos \varphi - F_{TP_4}^{y_1} \cos \varphi \end{pmatrix}; \quad (2.57)$$

Обертання щодо OZ₁:

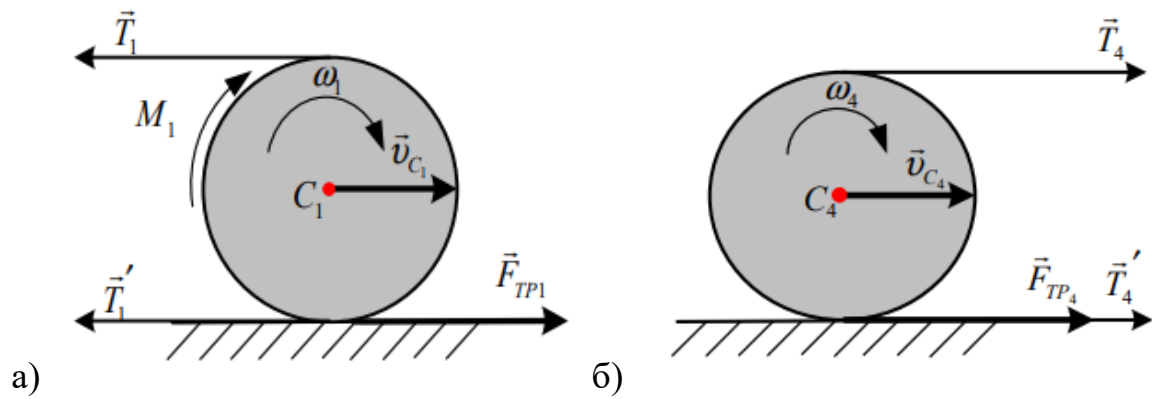
$$I_Z \frac{d\dot{\omega}}{dt} = \begin{pmatrix} F_{TP_1}^{x_1} a_1 - F_{TP_2}^{x_1} a_2 - F_{TP_3}^{x_1} a_2 + F_{TP_4}^{x_1} a_1 - \\ -F_{TP_1}^{y_1} a_3 - F_{TP_2}^{y_1} a_3 - F_{TP_3}^{y_1} a_4 - F_{TP_4}^{y_1} a_4 \end{pmatrix}. \quad (2.58)$$

На підставі теореми про проекцію швидкостей можна стверджувати, що $\vec{v}_{K_1}^{x_1} = \vec{v}_{K_2}^{x_1}$, $\vec{v}_{K_3}^{x_1} = \vec{v}_{K_4}^{x_1}$, $\vec{v}_{K_1}^{y_1} = \vec{v}_{K_4}^{y_1}$, $\vec{v}_{K_2}^{y_1} = \vec{v}_{K_3}^{y_1}$, це означає, що сили тертя $F_{TP_1}^{x_1}$ та $F_{TP_2}^{x_1}$, $F_{TP_3}^{x_1}$ та $F_{TP_4}^{x_1}$, $F_{TP_1}^{y_1}$, $F_{TP_2}^{y_1}$, $F_{TP_3}^{y_1}$ та $F_{TP_4}^{y_1}$ спрямовані попарно однаково. Виконавши деякі перетворення, отримуємо [20]:

$$\begin{cases} m\ddot{x} = F_{TP_{12}}^{x_1} \cos \varphi + F_{TP_{34}}^{x_1} \cos \varphi - F_{TP_{14}}^{y_1} \sin \varphi + F_{TP_{23}}^{y_1} \cos \varphi \\ m\ddot{y} = F_{TP_{12}}^{x_1} \sin \varphi + F_{TP_{34}}^{x_1} \sin \varphi + F_{TP_{14}}^{y_1} \cos \varphi - F_{TP_{23}}^{y_1} \cos \varphi; \\ I_Z \ddot{\phi} = F_{TP_{12}}^{x_1} a_1 - F_{TP_{34}}^{x_1} a_2 - F_{TP_{14}}^{y_1} a_3 - F_{TP_{23}}^{y_1} a_4 \end{cases} \quad (2.59)$$

де $F_{TP_{12}}^{x_1} = F_{TP_1}^{x_1} + F_{TP_2}^{x_1}$, $F_{TP_{34}}^{x_1} = F_{TP_3}^{x_1} + F_{TP_4}^{x_1}$, $F_{TP_{14}}^{y_1} = F_{TP_1}^{y_1} + F_{TP_4}^{y_1}$, $F_{TP_{23}}^{y_1} = F_{TP_2}^{y_1} + F_{TP_3}^{y_1}$ згідно теореми про проекції швидкостей двох точок твердого тіла[15].

Розглянемо плоску схему руху пов'язаних коліс роботизованої платформи, яка зображена на рисунку 2.11.



а – провідне колесо, колесо 1, б – ведене колесо 4

Рисунок 2.11 – Схема коліс роботизованої системи:

Для ведучого колеса справедливий вираз:

$$J_K \dot{\omega}_1 = M_1 - (\vec{T}_1 - \vec{T}'_1) R_k - \vec{F}_{TP1} R_k; \quad (2.60)$$

де J_K – момент інерції колеса;

ω_1 – кутова швидкість опорного колеса;

$M_{ДВ}$ – крутний момент, що передається ведучому колесу від двигуна-редуктора;

R_k – радіус колеса.

Для веденого колеса:

$$J_K \dot{\omega}_4 = (\vec{T}_4 - \vec{T}'_4) R_k - \vec{F}_{TP4} R_k. \quad (2.61)$$

Звернемо увагу, що сила натягу гнучкого зв'язку $T_1 = T_4$, $\vec{T}'_1 = \vec{T}'_4$. У разі коли $\vec{v}_{C1} = \vec{v}_{C4}$, напрямки сил тертя також будуть однаковими: $sign(\vec{F}_{TP1}) = sign(\vec{F}_{TP4})$.

З рівнянь (2.61):

$$(\vec{T}_4 - \vec{T}'_4)R_k = J_K \ddot{\Psi}_4 \dot{\omega}_4 + F_{TP_4} R_k; \quad (2.62)$$

Замінюючи $(\vec{T}_4 - \vec{T}'_4)R_k$ в рівнянні (2.61) отримаємо:

$$J_K \dot{\omega}_1 = M_1 - J_K \dot{\omega}_4 - \vec{F}_{TP_4} R_k - \vec{F}_{TP_1} R_k; \quad (2.63)$$

$$\vec{F}_{TP_{14}} = \vec{F}_{TP_1} + \vec{F}_{TP_4}; \quad (2.64)$$

$$J_K(\dot{\omega}_1 + \dot{\omega}_4) = M_1 - \vec{F}_{TP_{14}} R_k; \quad (2.65)$$

$$(\dot{\omega}_1 = \dot{\omega}_4); \quad (2.66)$$

$$2J_K \dot{\omega}_1 = M_1 - \vec{F}_{TP_{14}} R_k. \quad (2.67)$$

Аналогічно можна записати для іншої пари коліс. У результаті отримуємо рівняння [21]:

$$2J_K \dot{\omega}_{14} = M_{ДВ_{14}} - F_{TP_{14}}^{y_1} R_k; \quad (2.68)$$

$$2J_K \dot{\omega}_{23} = M_{ДВ_{23}} - F_{TP_{23}}^{y_1} R_k. \quad (2.69)$$

Звернемо увагу, що на схемі вказані сили тертя, що діють тільки в точках дотику коліс електромеханічної платформи з поверхнею, тертям самого гнучкого зв'язку з поверхнею – нехтуємо. Гнучкий зв'язок використовується для передачі обертання на пасивну пару коліс мобільної електромеханічної системи.

2.4 Моделювання динаміки електроприводів

Для вивчення особливостей динамічної поведінки системи враховуючи властивості електроприводів, розглянемо їх динаміку більш докладно. У випадку робота двигуна постійного струму описується двома рівняннями: перше є закон рівноваги моментів на валу електродвигуна, друге рівняння – другий закон Кірхгофа для ланцюга якоря електродвигуна [22]:

$$C_M i - M_n - J \frac{d^2 \psi}{dt^2}; \quad (2.70)$$

$$L \frac{di}{dt} + ri + C_B \frac{d\psi}{dt}; \quad (2.70)$$

де L – індуктивність якоря,
 i – струм у якорному ланцюзі,
 r – активне опір якоря,
 C_e – електрична постійна якоря двигуна,
 U – напруга, додана до обмотки якоря,
 C_M – електромеханічна постійна двигуна,
 J – момент інерції, наведений до валу двигуна.

На нелінійній характеристиці залежності кутової швидкості валу електродвигуна від керуючого напруги електромеханічного приводу існує деяка область значень, за яких можливе регулювання кутової швидкості в межах до деякого максимального значення кутової швидкості (ця величина визначається типом електродвигуна, його конструктивними особливостями та навантаженням на його валу), то регулюючи величину керуючої напруги, можна змінити кутову швидкість. У загальному випадку характеристика електроприводу є нелінійною [23]. Приклад залежності кутовий швидкості від керуючого напруги представлений на рисунку 2.12.

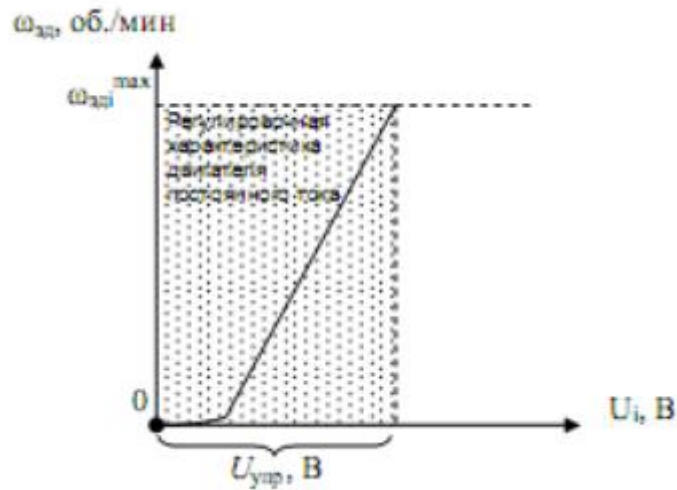


Рисунок 2.12 – Характеристика залежності кутової швидкості валу електродвигуна від керуючої напруги [24]

Залежність Кулонової сили сухого тертя від швидкості точки контакту представлено на рисунку 2.13 і справедлива для тертя як у поздовжньому, так і в поперечному напрямку [24]:

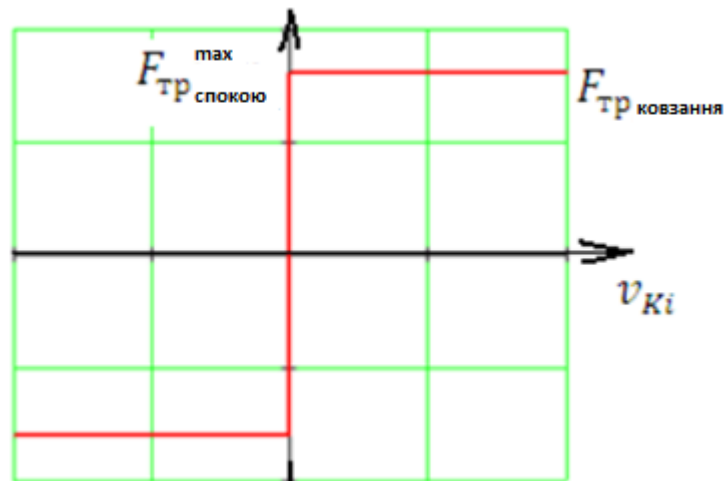


Рисунок 2.13 – Залежність сили тертя від швидкості точки контакту

Таким чином, рух пристрою описується за допомогою 7 рівнянь, три з яких є диференціальними рівняння 2 порядку, 4 - диференціальні рівняння 1 порядку. Система рівнянь є нелінійним і не може бути вирішена аналітично.

2.5 Висновки до другого розділу

За результатом дослідження кінематичних і динамічних особливостей руху колісної роботизованої платформи було розроблено математичну модель кінематики роботизованої електромеханічної платформи. Отримано результати моделювання руху по прямолінійній та криволінійній траєкторії. Вироблено оцінку величину прослизання коліс пристрою під час руху по криволінійній траєкторії. Також розроблено математичну модель динаміки керованого руху мобільної електромеханічної системи з кінематично зв'язаними колесами, що відрізняється урахуванням взаємодії пристрою з шорсткою поверхнею, динаміки електроприводів, сил опору руху.

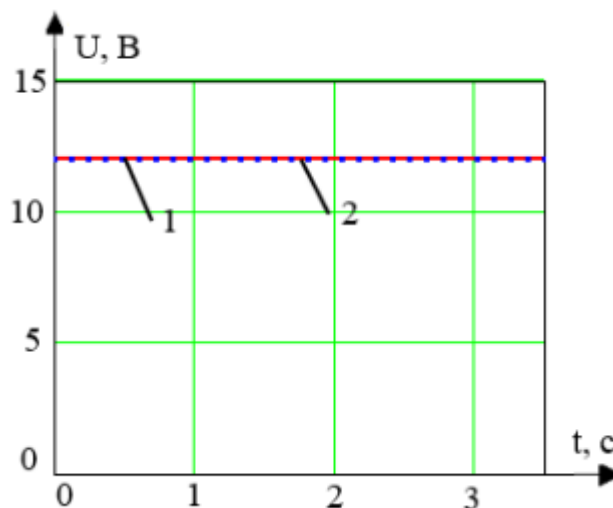
3 МОДЕЛЮВАННЯ ДИНАМІКИ КОЛІСНОЇ РОБОТИЗОВАНОЇ СИСТЕМИ

3.1 Дослідження прямолінійного руху платформи при типових керуючих впливах

Для моделювання руху системи використовуємо програмний пакет Mathcad, що дозволяє використовувати вбудовані алгоритми диференціювання, і реалізовувати власні.

На першому етапі будемо використовувати модель сухого кулонівського тертя, описаного рівнянням (2.72-2.73), в якій сила тертя ковзання дорівнює максимальній силі тертя спокою [25].

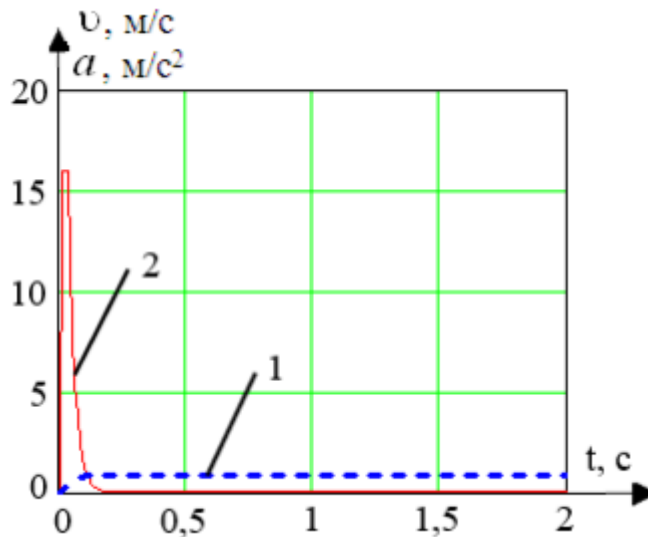
Проведемо моделювання руху платформи при однаково постійній напрузі, що дорівнює 12 В, що подається на двигуни (параметри електроприводів обрані відповідно до експериментального зразка), яке зображено на рисунку 3.1.



1 – напруга U_1 ; 2 – напруга U_2

Рисунок 3.1 – Керуючі напруги

Отримані закони зміни швидкості та прискорення центру мас пристрою від часу при максимально можливому коефіцієнті тертя з поверхнею (прийmemo його рівним 0,8), що відповідає таким поверхням, як асфальт, зображені на рисунку 3.2.

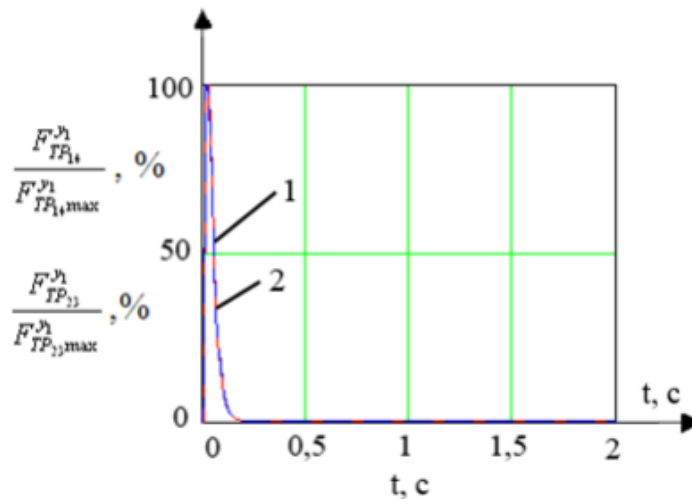


1 – швидкість центру мас роботизованої платформи;

2 – прискорення центру мас роботизованої платформи

Рисунок 3.2 Тимчасові характеристики швидкості та прискорення колісної роботизованої платформи

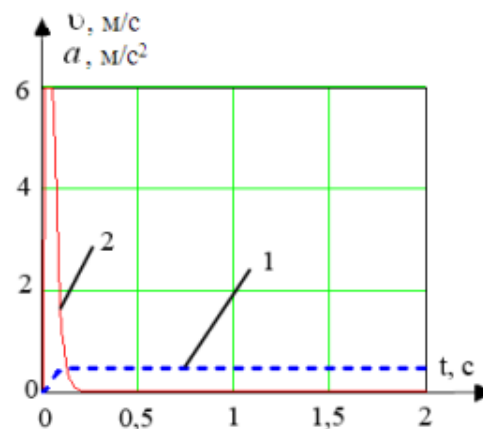
За отриманою характеристикою видно, що за відсутністю сил опору максимальна швидкість, що розвивається пристроєм, становить близько 0,85 м/с, час розгону до максимальної швидкості – приблизно 0,2 секунди. Обмеження максимальної швидкості руху обумовлено характеристикою вибраних електроприводів [26]. При цьому сила тертя в точках контакту не перевищує максимальної сили тертя спокою та рух відбувається без прослизання як у поздовжньому, як зображено на рисунку 3.3, так і поперечному напрямі.



1 – сила тертя $F_{TP_{14}}^{y_1}$, 2 - сила тертя $F_{TP_{23}}^{y_1}$

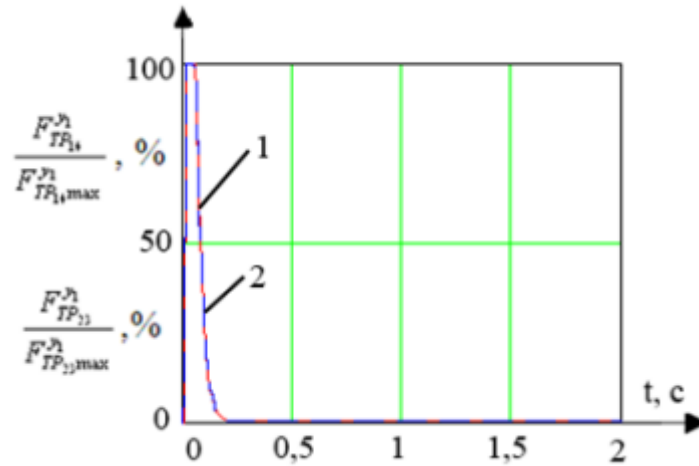
Рисунок 3.3 – Поздовжні сили тертя у точках контакту
(у % від максимальною)

При зменшенні максимальної величини коефіцієнта тертя спокою (поверхні: лінолеум, мокра ґрунтова дорога) швидкість руху падає до 0,5 м/с, що зображено на рисунку 3.4, а період прослизання при розгоні незначно збільшується, як зображено на рисунку 3.5.



1 – швидкість центру мас роботизованої платформи;
2 – прискорення центру мас роботизованої платформи

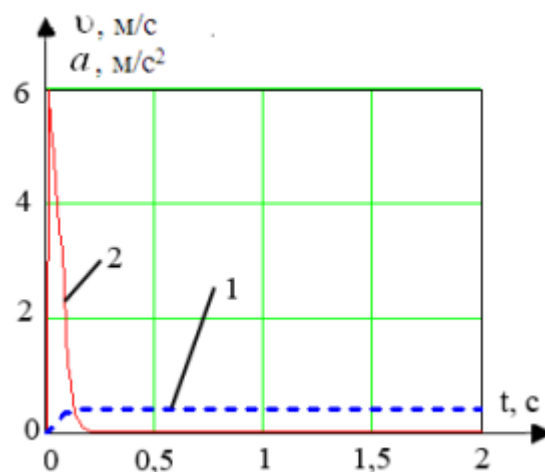
Рисунок 3.4 – Тимчасові характеристики швидкості
та прискорення мобільної платформи



1 – сила тертя $F_{TP_{14}}^{y_1}$, 2 - сила тертя $F_{TP_{23}}^{y_1}$

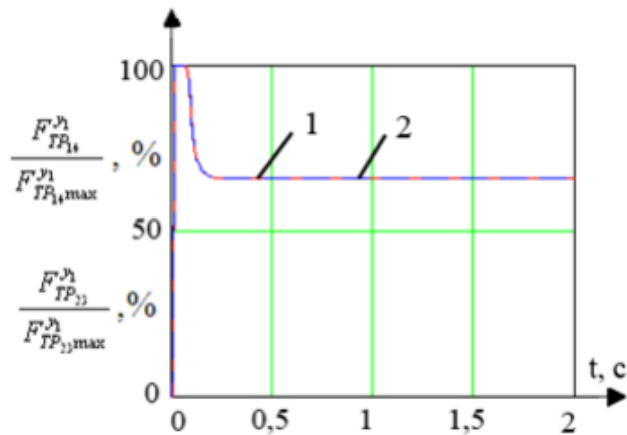
Рисунок 3.5 – Поздовжні сили тертя у точках контакту
(у % від максимальною)

Для моделювання руху мобільного електромеханічного системи у в'язких середовищах, таких як сніг та пісок, введемо силу опору, пропорційну швидкості. При цьому отримуємо такі результати: швидкість руху зменшується до 0,4 м/с, збільшується період прослизання при початку руху [26].



1 – швидкість центру мас роботизованої платформи;
2 – прискорення центру мас роботизованої платформи

Рисунок 3.6 – Тимчасові характеристики швидкості та прискорення роботизованої платформи



1 – сила тертя $F_{TP_{14}}^{y_1}$, 2 - сила тертя $F_{TP_{23}}^{y_1}$

Рисунок 3.7 – Поздовжні сили тертя у точках контакту
(в % від максимальною)

Залежність середньої швидкості платформи від коефіцієнта тертя при різних керуючих напругах представлена на рисунку 3.8. По отриманим залежностям можна зробити висновок про те, що при зменшенні величини керуючого напруження коефіцієнт тертя надає менший вплив на середню швидкість руху, що зумовлено тим, що при зменшенні керуючої напруги і внаслідок крутного моменту електроприводів система переходить в режим руху без прослизання, і величина максимального тертя спокою в процесі не досягається [26].

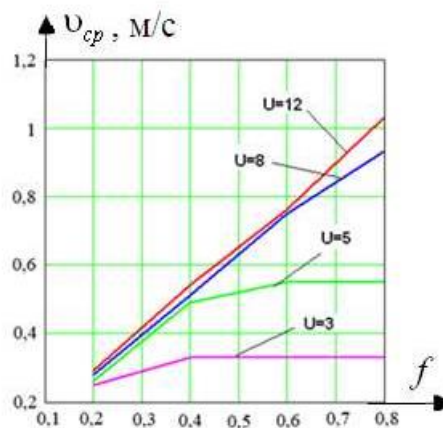


Рисунок 3.8 – Залежність середньої швидкості пристрою
від коефіцієнта тертя при різних керуючих напругах

В силу того, що керування параметрами руху, зокрема, швидкістю системи, відбувається за допомогою зміни напруги живлення приводів, розглянемо залежність середньої швидкості платформи від керуючої напруги за різних коефіцієнтів тертя, що зображена на рисунку 3.9.

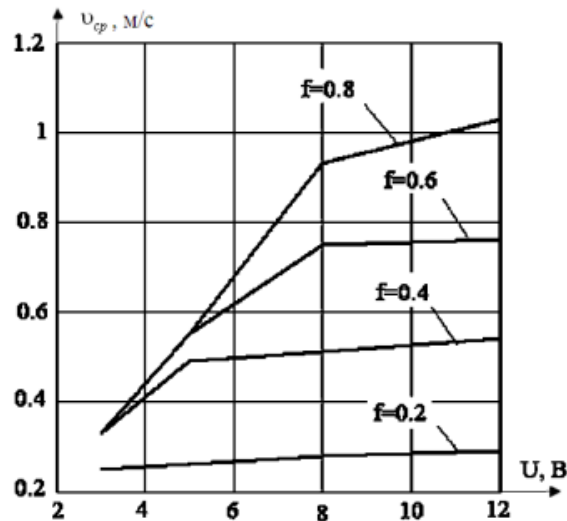


Рисунок 3.9 Залежність середньої швидкості прямолінійного руху від величини керуючої напруги при різних коефіцієнтах тертя

За отриманими графіками видно, що можна виділити дві області: на першій ділянці графіка залежність лінійна, на другій – швидкість практично не залежить від напруги живлення, що пояснюється переходом коліс у режим прослизання. Чим вищий коефіцієнт тертя, тим більша швидкість може бути досягнута і тим більша ділянка, на якій можна проводити регулювання швидкості зміною напруги живлення [25].

Потрібно зазначити, що експериментальним шляхом встановлено відмінність характеристики сухого тертя у реальних умовах: у разі виникнення прослизання величина коефіцієнта тертя значно нижча, ніж максимальне значення тертя спокою, тобто, залежність сили тертя від швидкості точки контакту виглядає так:

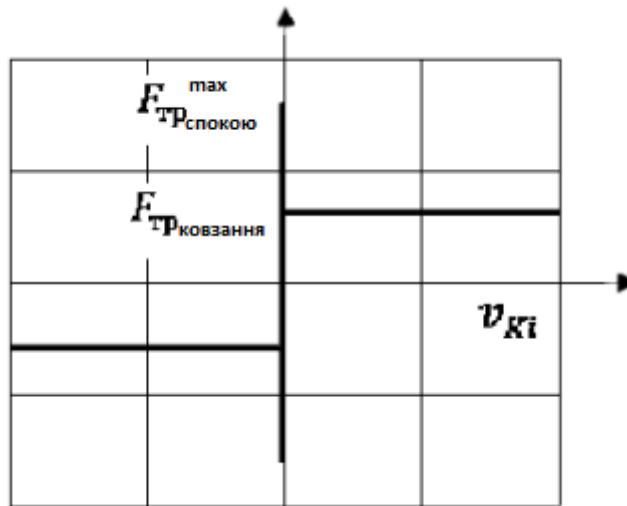
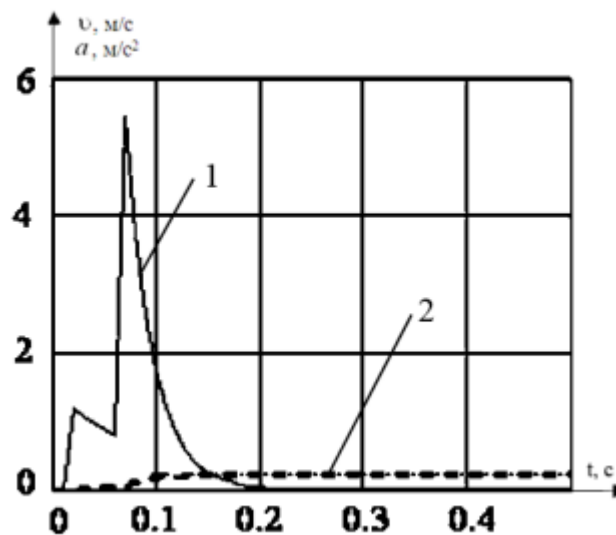


Рисунок 3.10 – Залежність сили тертя від швидкості точки контакту

При цьому на ділянці розгону з'являється спеціальна ділянка характеристики, що характеризується зменшенням прискорення внаслідок переходу в режим прослизання, а швидкість падає до 0,25 м/с:

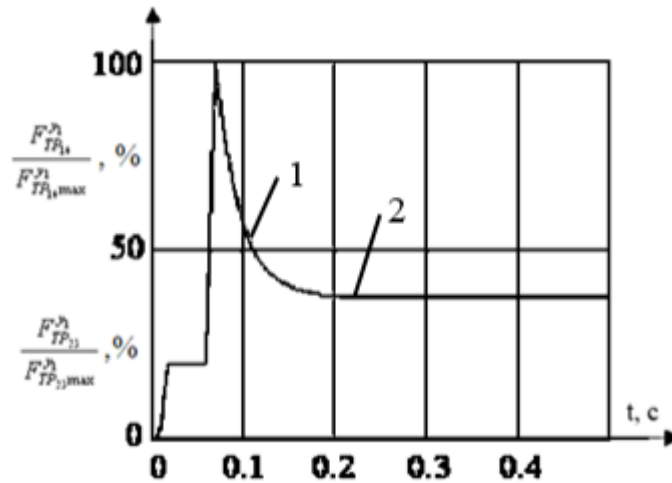


1 – прискорення центру мас роботизованої платформи;

2 – швидкість центру мас роботизованої платформи

Рисунок 3.11 – Тимчасові характеристики швидкості та прискорення центру мас роботизованої платформи

На тимчасовій характеристиці сил тертя також утворюється ділянка розгону, що відповідає прослизу коліс, після чого платформа продовжує рух без прослизання [26].



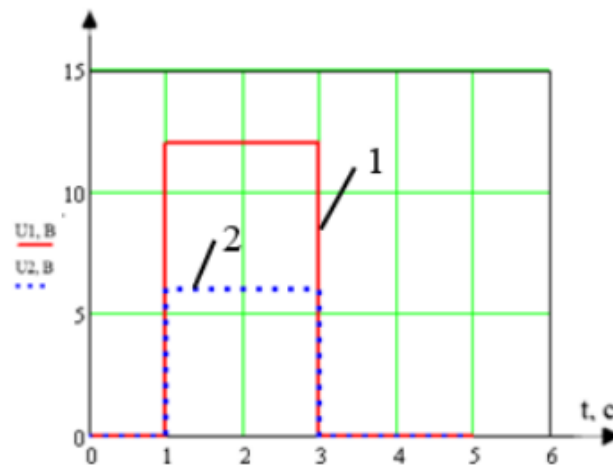
1 – сила тертя $F_{TP_{14}}^{y_1}$, 2 – сила тертя $F_{TP_{23}}^{y_1}$

Рисунок 3.12 – Поздовжні сили тертя у точках контакту
(в % від максимальною)

Таким чином, при співвідношенні керуючих напруг 2:1 один з двигунів перестає впливати на швидкість поступального руху платформи, а при подальшому збільшенні цього співвідношення починає надавати на неї негативний вплив. Аналогічний ефект досягається при подачі однакових керуючих напруг у ситуації, коли коефіцієнти тертя для пар коліс суттєво відрізняються за величину.

3.2 Дослідження динаміки колісної роботизованої системи при русі по криволінійній траєкторії

Розглянемо рух пристрою, у якому різниця моментів, створюваних приводами, така, що платформа починає рухатися по криволінійній траєкторії. Керуюча напруга, що діє на електроприводи зображено на рисунку 3.13.



1 – напруга U_1 ; 2 – напруга U_2

Рисунок 3.14 – Керуюча напруга

При цьому платформа переміщається по криволінійній траєкторії, як показано на рисунку 3.14.

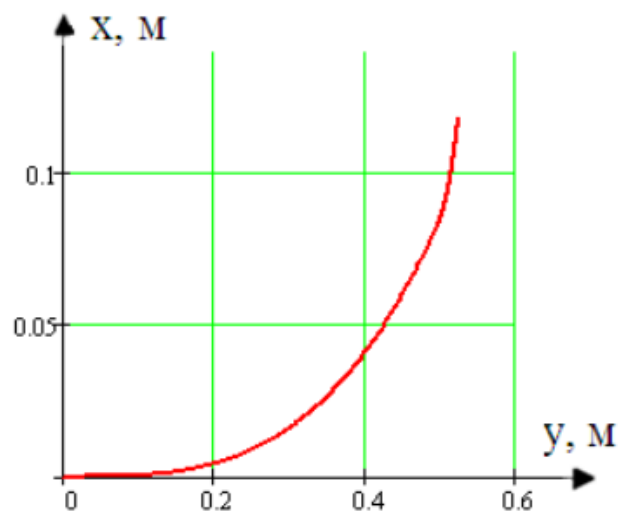


Рисунок 3.14 – Траєкторія переміщення центру мас платформи

Сили тертя, які при цьому діють кінематично пов'язані колеса показані на рисунку 3.15. видно, що сила тертя, що діє на відстаючу (переміщувану по внутрішньому діаметру) пару, близька до нуля.

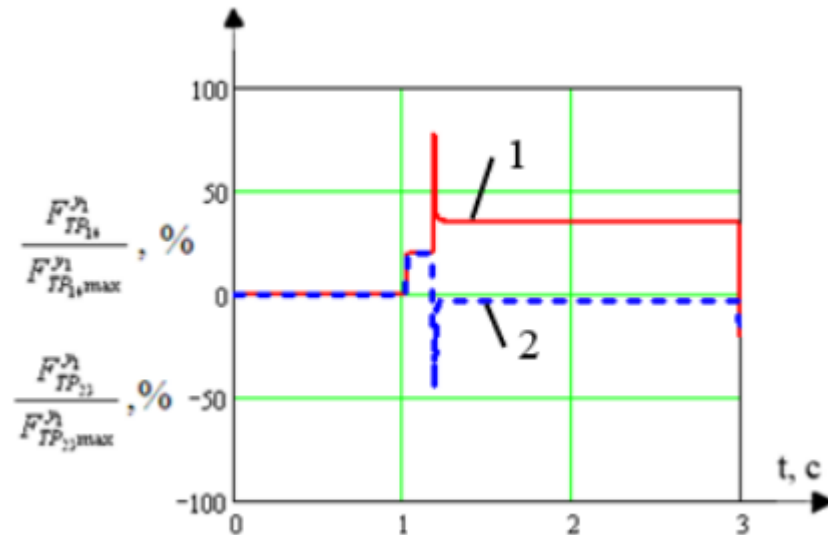


Рисунок 3.15 – Поздовжні сили тертя у точках контакту (в % від максимальної).

Особливий інтерес представляє рух роботизованої платформи при різних коефіцієнтах тертя кожної з пари коліс.

При заданих керуючих напругах та зміні коефіцієнтів тертя для пар коліс у всьому діапазоні допустимих значень, визначимо середню швидкість руху платформи, а також середню величину кутового прискорення корпусу системи. Діаграми залежності цих величин від обох коефіцієнтів тертя представлені на рисунках 3.16-3.17.

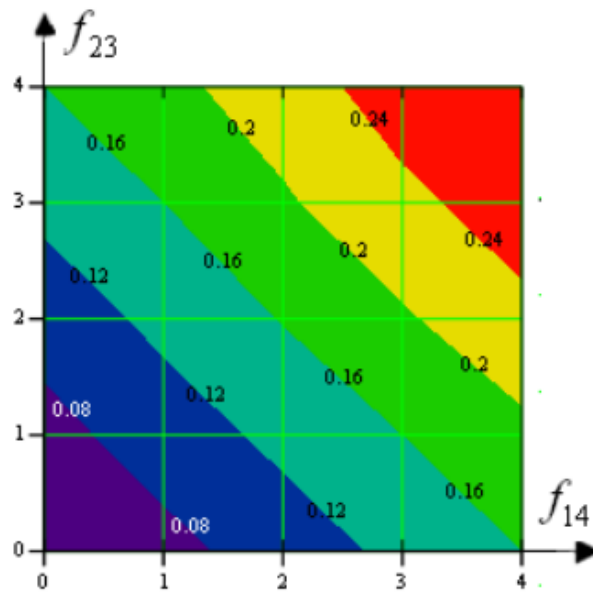


Рисунок 3.16 – Залежність середньої швидкості платформи від коефіцієнтів тертя для кожної з пар коліс

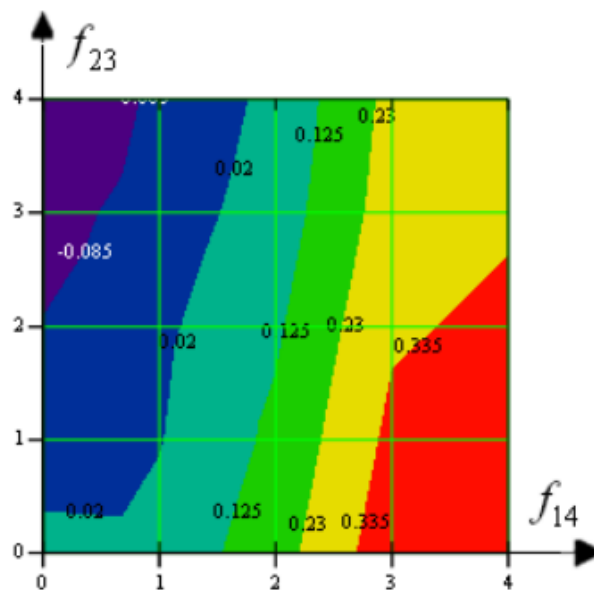


Рисунок 3.17 – Залежність середнього кутового прискорення корпусу платформи від коефіцієнтів тертя для кожної з пар коліс

Дослідження показали, що при зміні коефіцієнта тертя для пари коліс, що рухається по внутрішньому радіусу, форма траєкторії центру мас пристрою практично не змінюється, а при зменшенні сили тертя для пари коліс, що рухається по зовнішньому радіусу, відповідно зменшується і швидкість

повороту корпусу щодо вертикальної осі [27]. Швидкість переміщення центру мас платформи та кутове прискорення його корпусу залежать як від співвідношення керуючих напруг, так і від співвідношення коефіцієнтів тертя, що зображено на рисунку 3.18.

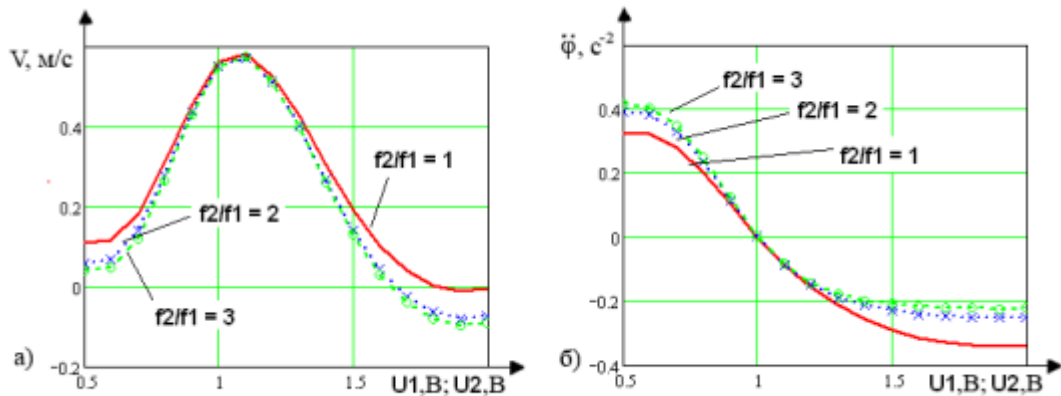
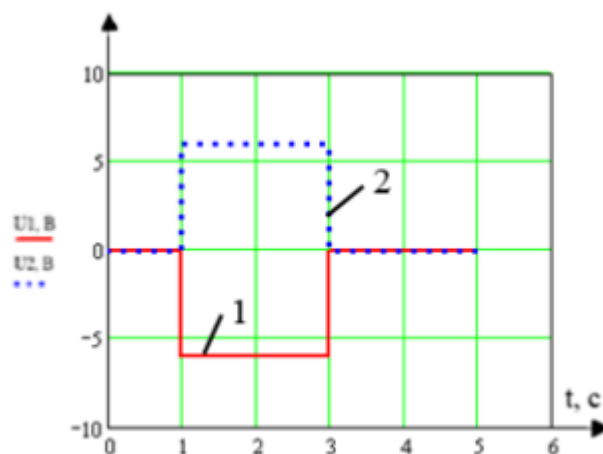


Рисунок 3.18 – Залежність середньої швидкості (а) та кутового прискорення (б) корпусу від величини керуючої напруги при різних коефіцієнтах тертя

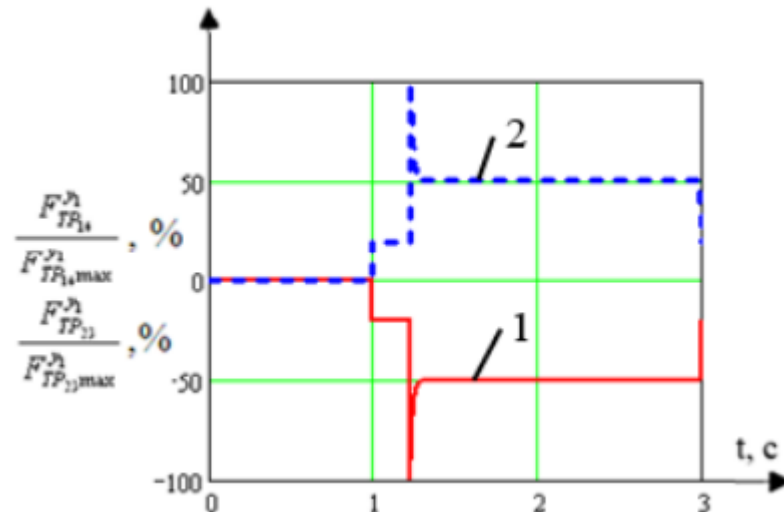
Як тестове завдання поставимо однакові по амплітуді, але протилежні за знаком керуючі напруги, що зображено на рисунку 3.19.



1 – напруга U_1 ; 2 – напруга U_2

Рисунок 3.19 – Керуюча напруга

При цьому сили тертя, що діють на пари коліс, протилежні за напрямом, але однакові за величиною, що зображено на рисунку 3.20, швидкість центру мас дорівнює 0, що зображено на рисунку 3.21, кут повороту корпусу змінюється практично лінійному закону, як зображено на рисунку 3.22, що може бути підтвердженням адекватності математичної моделі.



1 – сила тертя $F_{TP_{14}}^{y_1}$, 2 – сила тертя $F_{TP_{23}}^{y_1}$

Рисунок 3.20 – Поздовжні сили тертя в точках контакту (% від максимальною)

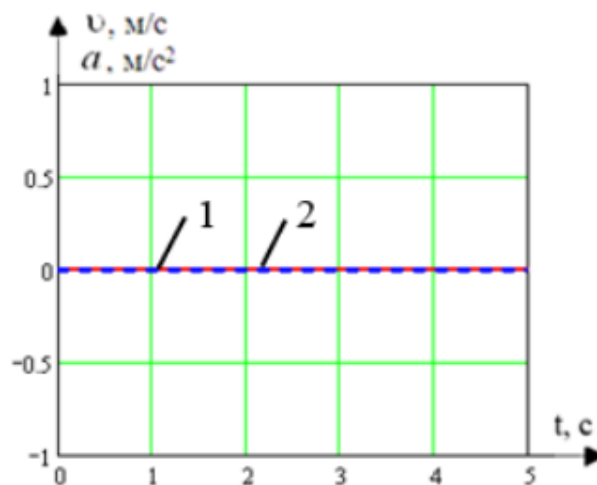


Рисунок 3.21 – Тимчасові характеристики швидкості (1) та прискорення (2) центру мас платформи



Рисунок 3.22 – Залежність кута повороту корпусу платформи від часу

3.3 Інструментальні засоби проектування колісних роботизованих електромеханічних систем

Розроблена методика математичного моделювання динаміки колісної роботизованої платформи, що дозволяє підібрати раціональні параметри конструкції в залежності від умов використання платформи. Розраховані параметри системи управління для різної траєкторії руху.

Алгоритми моделювання різних режимів функціонування системи наведені у другому розділі цієї роботи, дозволили розробити комплекс прикладних програм, які відповідають вимогам інструментальних засобів проектування мобільних електромеханічних систем.

На рисунку 3.23, та 3.24 показано вікно програми MathCAD з реалізованими алгоритмами розрахунку.

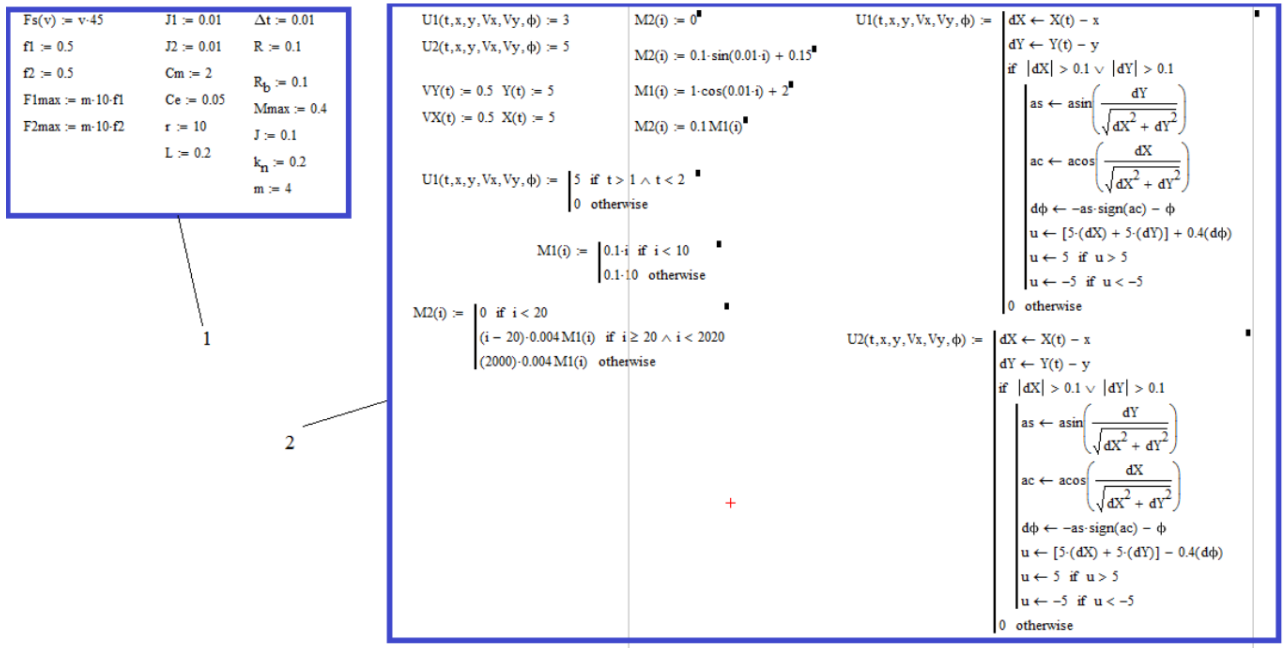


Рисунок 3.23 – Програма для розрахунку параметрів конструкції колісної платформи: 1 – завдання параметрів моделі;

2 – постановка задачі моделювання

Програма для розрахунку параметрів конструкції та математичного моделювання колісної роботизованої платформи, фрагменти листингу якої показані на рисунках, дозволяє, задаючи параметрами поверхні, синтезувати параметри конструкції для відпрацювання необхідних законів руху робота.

Система також дозволяє, використовуючи параметри системи, отримати розрахункові траєкторії переміщення, швидкість руху, параметри маневреності для досліджуваних типів поверхні. Використання розробленого продуктів дозволяє скоротити витрати на проектування роботів, за рахунок отримання попередніх результатів методом математичного моделювання.

```

for i ∈ 0..2000
  Ai+1,23 ← Ai,23 +  $\left( \frac{U1(i \cdot \Delta t, A_{i,16}, A_{i,14}, A_{i,17}, A_{i,15}, A_{i,6}) - C_e \cdot A_{i,6} - r \cdot A_{i,23}}{L} \right) \cdot \Delta t$ 
  Ai+1,24 ← Ai,24 +  $\left( \frac{U2(i \cdot \Delta t, A_{i,16}, A_{i,14}, A_{i,17}, A_{i,15}, A_{i,6}) - C_e \cdot A_{i,8} - r \cdot A_{i,24}}{L} \right) \cdot \Delta t$ 
  -----
  Ai,25 ← U1(i · Δt, Ai,16, Ai,14, Ai,17, Ai,15, Ai,6)
  Ai,26 ← U2(i · Δt, Ai,16, Ai,14, Ai,17, Ai,15, Ai,6)
  M1(i) ← Cm · Ai,23
  M2(i) ← Cm · Ai,24
  Ai,3 ←  $\frac{(M1(i) + M2(i) - F_s(A_{i,2}) \cdot R) \cdot R}{m \cdot R^2 + J1 + J2}$ 
  Ai,4 ←  $\frac{M1(i) - J1 \cdot \frac{A_{i,3}}{R}}{R}$ 
  Ai,5 ←  $\frac{M2(i) - J2 \cdot \frac{A_{i,3}}{R}}{R}$ 
  Ai,7 ←  $\frac{A_{i,3}}{R}$ 
  Ai,9 ←  $\frac{A_{i,3}}{R}$ 
  Ai,18 ← 1

```

Рисунок 3.24 – Фрагмент листингу програми для моделювання руху колісної платформи

Звернемо увагу, що інструментальні засоби проектування, реалізовані у вигляді набору програм для моделювання у середовищі MathCAD, не використовують вкладені засоби розрахунку системи, отже, можуть бути реалізовані у вигляді програми мовою високої рівня.

3.4 Висновки до третього розділу

Проведено чисельне моделювання руху електромеханічної системи, встановлені залежності середньої швидкості руху корпусу від коефіцієнтів тертя кожної пари коліс, отримано результати порівняння різних моделей сухого тертя.

Досліджено рух пристрою по криволінійній траєкторії, отримані залежності швидкості від співвідношення коефіцієнтів тертя та величин керуючої напруги. Дослідження показали, що при зміні коефіцієнта тертя для пари коліс, що рухається по внутрішньому радіусу, форма траєкторії центру мас пристрою практично не змінюється, а при зменшенні сили тертя для пари коліс, що рухається по зовнішньому радіусу, відповідно зменшується і швидкість повороту корпусу щодо вертикальної осі. Швидкість переміщення центру мас платформи та кутове прискорення його корпусу залежать як від співвідношення керуючих напруг, так і від співвідношення коефіцієнтів тертя.

4 ОХОРОНА ПРАЦІ

Робота в приміщенні проводиться сидячи і не вимагає фізичної напруги. Тому вона відноситься до категорії Ia (легкі фізичні роботи, енерговитрати до 120 ккал/год). З метою забезпечити комфортні умови для працівників та відповідно до ДСН 3.3.6.042-99 в лабораторії встановлені наступні метеорологічні параметри для холодного періоду:

- температура повітря від 22 °С до 24 °С;
- вологість повітря від 40 % до 60 %;
- швидкість руху повітря $\leq 0,1$ м/с.

А для теплого періоду року:

- температура повітря від 23 °С до 25 °С;
- вологість повітря від 40 % до 60 %;
- швидкість руху повітря $\leq 0,1$ м/с.

Нормалізація мікрокліматичних умов здійснюється за рахунок раціонального планування приміщення і оптимального розміщення в ньому обладнання, а також приладів регулювання тепловиділення, холодовиділення і вологовиділення.

До роботи з ПК допускаються працівники, які не мають медичних протипоказань, пройшли інструктаж з питань охорони праці. Особи, що працюють з ПК більше 50 % робочого часу, повинні проходити обов'язкові попередні при вступі на роботу і періодичні медичні огляди в установленому порядку. Організація робочого місця з ПК повинна враховувати вимоги безпеки, зручність положення, рухів і дій працівника. Робочий стіл з урахуванням характеру виконуваної роботи повинен мати достатній розмір для раціонального розміщення монітора, клавіатури, іншого використовуваного обладнання і документів, поверхню, що володіє низькою здатністю, що відображає. Клавіатура розташовується на поверхні столу таким чином, щоб простір перед клавіатурою було достатнім для опори рук працівника (на

відстані не менше ніж 300 мм від краю, зверненого до працівника). Щоб забезпечувалося зручність зорового спостереження, швидке і точне зчитування інформації, площина екрану монітора розташовується нижче рівня очей працівника переважно перпендикулярно до нормальної лінії погляду працівника (нормальна лінія погляду – 15 градусів. Вниз від горизонталі). Для виключення впливу підвищених рівнів електромагнітних випромінювань відстань між екраном монітора і працівником повинна становити не менше 500 мм. Робочий стілець (крісло) повинен бути стійким, місце сидіння має регулюватися по висоті, а спинка сидіння по висоті, кутах нахилу, а також відстані спинки від переднього краю сидіння. Регулювання кожного параметра має бути незалежною, легко здійснюваною плюс надійну фіксацію.

Лабораторія, де виконується розробка конструкції модуля, має наступні характеристики:

- площа приміщення 18 м^2 ($6 \text{ м} \times 3 \text{ м}$);
- висота 2,5 м;
- кількість робочих міст – 2;
- обладнання – стіл з ПК і периферією – 2 шт.

Приміщення, відповідно до ДНАОП 0.00-1.31-99, має забезпечувати 6 м^2 площі і 20 м^3 об'єму на одне окреме робоче місце з ПК. Фактичне значення корисної площі приміщення сягає 18 м^2 , а об'єм складає 45 м^3 таким чином видно, що вимоги щодо площі та об'єму робочого місця виконано.

Приміщення з ПК повинні мати природне і штучне освітлення відповідно до ДБН В.25-28-2006 «Природне і штучне освітлення». Природне світло повинно проникати через бічні світлові прорізи, зорієнтовані, як правило, на північ або північний схід, і забезпечувати коефіцієнт природної освітленості не нижче 1,5 %.

Рівень загального штучного освітлення приміщення можна перевірити за допомогою методу питомої потужності, викладеної в.

Розрахункова формула методу розрахунку освітлення:

$$W = \frac{W_{\Sigma}}{S}, \quad (3.1)$$

де W – питома потужність, Вт/м²;

S – площа приміщення, м²;

W_{Σ} – загальна потужність освітлювальної установки Вт, яка розраховується за формулою:

$$W_{\Sigma} = W_{CB} * n_{CB}, \quad (3.2)$$

де W_{CB} – потужність одного світильника, Вт;

n_{CB} – кількість світильників в приміщенні, шт.

$$W_{\Sigma} = 105 * 4 = 420 \text{ (Вт)}; \quad (3.3)$$

$$W_{\Sigma} = \frac{420}{18} = 23,3 \text{ (Вт)}. \quad (3.4)$$

Питома потужність у 23,3 Вт/м² відповідає освітленості в 350 лк. при мінімальній допустимій освітленості 290 лк.

Таким чином, створюються сприятливі зорові умови в лабораторії.

ВИСНОВКИ

Одержані при виконанні кваліфікаційної роботи результати дозволяють зробити наступні висновки.

Під час виконання кваліфікаційної роботи була представлена загальна структура систем управління, були порівняні автоматичні і автоматизовані системи управління. Також розглянуті основні характеристики та завдання автоматичних систем управління, та проведено огляд життєвого циклу автоматизованої системи, і розглянуто усі стадії, які необхідно виконати для впровадження автоматизованої СУРП, та складено базові вимоги до тягового електроприводу колісної роботизованої платформи.

У галузі мобільних транспортних систем виявлено перспективне напрям застосування колісного рушія роботизованої платформи.

Розроблено математичну модель, що описує динаміку керованого руху електромеханічної системи у різних режимах функціонування, що відрізняється урахуванням взаємодії коліс з шорсткою поверхнею, динамічних процесів, що протікають у електроприводі обмеженої потужності, сил опору руху пристрою.

Розроблено алгоритм та методики отримання чисельного розрахунку динаміки керованого руху електромеханічної системи та складено математичну модель системи конструкції та розроблений метод її чисельного вирішення, що дозволяє визначити величину сил нормальної реакції. Встановлено, що зміна нормальних реакцій при розгоні пристрою не перевищує 5% встановленого значення.

Досліджено динамічні особливості керованого руху електромеханічної системи, отримані характеристики переміщення для різних властивостей поверхні та параметрів конструкції мобільної платформи. Дослідження показали, що при зміні коефіцієнта тертя для пари коліс, що рухається по внутрішньому радіусу, форма траєкторії центру мас пристрою практично не

змінюється, а при зменшенні сили тертя для пари коліс, що рухається по зовнішньому радіусу, відповідно зменшується і швидкість повороту корпусу щодо вертикальної осі. Швидкість переміщення центру мас платформи та кутове прискорення його корпуси залежать як від співвідношення керуючих напруг, так і від співвідношення коефіцієнтів тертя.

ПЕРЕЛІК ДЖЕРЕЛ ПОСИЛАННЯ

1. Невлюдов І. Ш. Методичні вказівки з підготовки й оформлення кваліфікаційної роботи здобувачами другого (магістерського) рівня вищої освіти спеціальності 151 Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології, освітньо-професійних програм: «Автоматизоване управління технологічними процесами», «Комп'ютерно-інтегровані технологічні процеси і виробництва», «Комп'ютеризовані та робототехнічні системи» / Упоряд. І. Ш. Невлюдов, Р. В. Артюх, Н. П. Демська, В. В. Євсєєв, О. І. Филипенко, О. М. Цимбал. – Харків: ХНУРЕ, 2021. – 50 с.

2. Баканов Данііл Юхимович. Математична модель роботизованої колісної платформи із тяговими електричними двигунами // АВТОМАТИЗАЦІЯ ТА ПРИЛАДОБУДУВАННЯ («Automation and Development of Electronic Devices» ADED-2020) [Електронний ресурс] : збірник студентських наукових статей / Харківський національний університет радіоелектроніки; [редкол.: І.Ш. Невлюдов та ін.]. – Харків : ХНУРЕ, 2021. – Вип. 2.

3. Баканов Данііл Юхимович. Моделювання динаміки колісної роботизованої системи // автоматизація та приладобудування («Automation and Development of Electronic Devices» ADED-2020) [Електронний ресурс]: збірник студентських наукових статей / Харківський національний університет радіоелектроніки; [редкол.: І.Ш. Невлюдов та ін.]. – Харків: ХНУРЕ, 2021. – Вип. 2.

4. Невлюдов І. Ш. Дипломне проектування для студентів усіх форм навчання спеціальностей 151 «Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології» / І. Ш. Невлюдов, А. О. Андрусевич, О. В. Токарева, Г. В. Пономарьова. – Київ-58, пр. Космонавта Комарова, 1, 2018. – 320 с.

5. ДСТУ 3008-15. Документація. Звіти у сфері науки і техніки. структура і правила оформлення. – Введ. 2015-06-22. – К. Держстандарт України, 2017 – 29 с.

6. Логвиненко Д. Я. Математична модель колісної платформи мобільного роботу з акселерометром для інерціального позиціонування // Автоматизація та приладобудування («Automation and Development of Electronic Devices» ADED2020) [Електронний ресурс]: збірник студентських наукових статей / Харківський національний університет радіоелектроніки; [редкол.: І. Ш. Невлюдов та ін.], – Харків: ХНУРЕ, 2021. – Вип. 1. – С. 36-39.

7. Веселова В. А. Космічні роботизовані комплекси. Ленінградська СПб.: БДТУ «Военмех» ім. Д. Ф. Устінова; ЛК "Адмірал", 2016. – 200 с.

8. David Ardayfio. Fundamentals of robot technology: an introduction to industrial robots – London: CRC Press, 2019. – 244 p.

9. Козирєв Ю. Г. Промислові роботи: Довідник. – 2-ге вид., Пере-раб. та дод. – Київ: Машинобудування, 2009. – 392 с.

10. Мачульський І. І. Робототехнічні системи та комплекси: Навч. посібник для вузів / В. П. Комою, Ю. П. Майоров та ін; за ред. І. І. Мачульського. – Москва: Транспорт, 1999. – 446 с.

11. Кім Д. П. Теорія автоматичного управління. Т. 2. Багатомірні, нелінійні, оптимальні та адаптивні системи: Навч. допомога. – М.: ФІЗМАТЛІТ, 2005. – 464 с.

12. Челпанов І. Б. Пристрій промислових роботів: Підручник для учнів приладобудівних технікумів. – 2-ге вид., Перероб. та дод. – СПб.: Політехніка, 2010. – 203 с.

13. Angeles J. Fundamentals of robotic mechanical systems. – New York: Springer-Verlag New York, Inc, 2014. – 290 p.

14. Siciliano B. Robotics: Modelling, Planning and Control / L. Sciavicco, L. Villani, G. Oriolo. – London: Springer-Verlag London Limited. – 2013. – 632 p.

15. Fazlollahtabar H. *Autonomous Guided Vehicles Methods and Models for Optimal Path Planning* / Saidi-Mehrabad M. – Cham Heidelberg New York Dordrecht London: Springer, 2015. – 203 p.
16. Adouane L. *Autonomous Vehicle Navigation: From Behavioral to Hybrid Multi-Controller Architectures*. – Boca Raton, CRC Press, 2019. – 214 p.
17. Bizon N. *Autonomous Vehicles Intelligent Transport Systems and Smart Technologies* / Dascalescu L., Tabatabaei N.M. (ed.). – New York: Nova Science Publishers, Inc., 2014. – 544 p.
18. Fahimi F. *Autonomous Robots. Modeling, Path Planning, and Control*. – New York: Springer Science+Business Media, LLC, 2016. – 318 p.
19. Fossen T.I. *Sensing and Control for Autonomous Vehicles. Applications to Land, Water and Air Vehicles* / Pettersen K.Y., Nijmeijer H. – Cham: Springer International Publishing AG, 2017. – 518 p.
20. Gharehgozli A. Robot scheduling for pod retrieval in a robot-ic mobile fulfillment system // *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review* / Zaerpour N. – Vol. 142, 2020. – 102087. doi: 10.1016/j.tre.2020.102087.
21. Zheng W. Adaptive robust finite-time control of mobile robot systems with unmeasurable angular velocity via bioin-spired neurodynamics approach // *Engineering Applications of Artificial Intelligence* / Wang H., Zhang Z., Wang H. – Vol. 82, 2019. – P. 330-344. doi: 10.1016/j.engappai.2019.04.009.
22. Merschformann M. Decision rules for robotic mobile fulfillment systems // *Operations Research Perspectives* / Lamballais T., de Koster M.B.M., Suhl L. – Volume 6, 2019. – 100128. doi: 10.1016/j.orp.2019.100128.
23. Токарева О. В. Комплекс навчально-методичного забезпечення навчальної дисципліни "Теорія автоматичного управління" підготовки бакалаврів спеціальності 151 – Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології [Електронний ресурс] : освітньої програми "Системна інженерія" / ХНУРЕ ; розроб. – Харків, 2017. – 1125 с.

24. Роберт Букарєв. Основи робототехніки 3-тє вид. – Харків, 2010. – 360 с.
25. Самарський А. А. Математичне моделювання: Ідеї. Методи. Приклади / Михайлов А. П. – Запоріжжя: ФІЗМАТЛІТ, 2005. – 320 с.
26. Вонг Дж. Теорія наземних транспортних засобів: Пер. з англ. – Київ: Машинобудування, 2010. – 284 с.
27. Дзюндзюк Б. В. Методичні вказівки до виконання розділу «Охорона праці» у випускних роботах ОКР усіх форм навчання [Текст] / В. А. Айвазов, Т. Є. Стиценко. – Харків: ХНУРЕ, 2012. – 26 с.