

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)

«__» _____ 20__ р.

ЗАВДАННЯ НА КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ

студентові _____ Алешко Кирилу Андрійовичу _____
(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема роботи _____ Розробка моделей для автоматизованого визначення механічної взаємодії роботизованої колісної платформи із зовнішнім середовищем
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 Оцінка механічної взаємодії колісної платформи із зовнішнім середовищем, математична модель колісної платформи
4. Перелік питань, що потрібно опрацювати в роботі:
 - 4.1 Проблема автоматизованого визначення механічної взаємодії колісної робото-технічної платформи із зовнішнім середовищем
 - 4.1.1 Автоматизація вибору режиму руху
 - 4.1.2 Механічна взаємодія із зовнішнім середовищем та її характеристики
 - 4.1.3 Непрямі вимірювання та використання математичних моделей
 - 4.2 Математичні моделі для автоматизованої оцінки механічної взаємодії колісної робото-технічної платформи із зовнішнім середовищем
 - 4.2.1 Схематизація колісної платформи та вимірювальних пристроїв
 - 4.2.2 Математична модель колісної платформи та вимірювальних пристроїв
 - 4.2.3 Оцінка механічної взаємодії платформи із зовнішнім середовищем
 - 4.3 Дослідження можливостей щодо автоматизованого визначення механічної взаємодії роботизованої колісної платформи із зовнішнім середовищем
 - 4.3.1 Моделювання динаміки зв'язаних рухів колісної платформи та чутливих елементів бортових вимірювальних пристроїв
 - 4.3.2 Оцінка проковзування коліс роботизованої мобільної платформи
 - 4.3.3 Оцінка рушійних сил та сил опору руху роботизованої мобільної платформи

5. Перелік графічного матеріалу із зазначенням креслеників, схем, плакатів, комп'ютерних ілюстрацій 5.1 Допоміжна функція для автоматичного форматування графіків (1 аркуш формату А4)

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№	Назва етапів роботи	Термін виконання етапів роботи	Примітка
1	Дослідження та аналіз теми кваліфікаційної роботи	02.09 – 12.09	виконано
2	Автоматизація вибору режиму руху	13.09 – 19.09	виконано
3	Механічна взаємодія із зовнішнім середовищем та її характеристики	20.09 – 29.09	виконано
4	Непрямі вимірювання та використання математичних моделей	30.09 – 5.10	виконано
5	Схематизація колісної платформи та вимірювальних пристроїв	6.10 – 13.10	виконано
6	Математична модель колісної платформи та вимірювальних пристроїв	14.10 – 18.10	виконано
7	Оцінка механічної взаємодії платформи із зовнішнім середовищем	19.10 – 31.10	виконано
8	Моделювання динаміки зв'язаних рухів колісної платформи та чутливих елементів бортових вимірювальних пристроїв	01.11 – 12.11	виконано
9	Оцінка проковзування коліс роботизованої мобільної платформи	13.11 – 26.11	виконано
11	Оцінка рушійних сил та сил опору руху роботизованої мобільної платформи	27.11 – 05.12	виконано
12	Оформлення пояснювальної записки	06.12 – 10.12	виконано
13	Оформлення презентаційних матеріалів комп'ютерного захисту	11.12 – 13.12	виконано
14	Представлення на рецензування	14.12	виконано

Дата видачі завдання 02.09.2021

Студент _____
(підпис)

Алешко К.А.
(прізвище, ініціали)

Керівник роботи _____
(підпис)

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

РЕФЕРАТ

Пояснювальна записка: 103 с., 2 табл., 33 рис., 2 дод., 26 джерел

МОБІЛЬНИЙ РОБОТ, КОЛІСНА ПЛАТФОРМА, АКСЕЛЕРОМЕТР, ТАХОМЕТЕР, ЕЛЕКТРОДВИГУН, ВИМІРЮВАННЯ, ОБРОБКА ДАНИХ, АВТОМАТИЗАЦІЯ, МОДЕЛЮВАННЯ, ЕЛЕКТРОМЕХАНІКА, МЕХАТРОНІКА, ПРОГРАМА-СЦЕНАРІЙ

Мета роботи – розробка та оцінювання математичних моделей для автоматизованого визначення механічної взаємодії роботизованої колісної платформи із зовнішнім середовищем.

Об'єкт розробки – електромеханічні мобільні колісні платформи робототехнічних систем.

Предмет розробки – математичні моделі автоматизованого визначення механічної взаємодії роботизованої колісної платформи із зовнішнім середовищем.

На основі електромеханічних аналогій та рівнянь Лагранжа 2-го роду розроблено математичну модель електромеханічної колісної роботизованої платформи із бортовими вимірювальними приладами та пристроями. Показало, що запропоновані математичні моделі дозволяють із досить високою точністю визначати проковзування коліс платформи, що є важливим показником її взаємодії із навколишнім середовищем. В той же час, оцінка результуючої рушійних сил і сил опору руху мобільної роботизованої колісної платформи значно ускладнюється необхідністю диференціювання наближено визначених функцій.

ABSTRACT

Explanatory note: 103 pages, 2 tables, 33 pictures, 26 sources, 2 applications.

MOBILE ROBOT, WHEEL PLATFORM, ACCELEROMETER, TACHOMETER, ELECTRIC MOTOR, MEASUREMENT, DATA PROCESSING, AUTOMATION, MODELING, MODELING

The purpose of the work is to develop and grading mathematical models for automated determination of mechanical interaction of a robotic wheel platform with the external environment.

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

The subject of development is mathematical models of automated determination of mechanical interaction of a robotic wheel platform with the external environment.

On the basis of electromechanical analogies and Lagrange equations of the 2nd kind the mathematical model of the electromechanical wheeled robotic platform with onboard measuring devices and devices is developed. It was shown that the proposed mathematical models allow determining the slippage of the platform wheels with high accuracy, which is an important indicator of its interaction with the environment. At the same time, the assessment of the resulting driving forces and resistance forces of the mobile robotic wheeled platform is significantly complicated by the need to differentiate approximately defined functions.

ЗМІСТ

Перелік скорочень	7
Вступ	8
1 Проблема автоматизованого визначення механічної взаємодії колісної робото-технічної платформи із зовнішнім середовищем	12
1.1 Автоматизація вибору режиму руху	12
1.2 Механічна взаємодія із зовнішнім середовищем та її характеристики	18
1.3 Непрямі вимірювання та використання математичних моделей ...	28
1.4 Висновки до розділу	34
2 Математичні моделі для автоматизованої оцінки механічної взаємодії колісної робото-технічної платформи із зовнішнім середовищем	36
2.1 Схематизація колісної платформи та вимірювальних пристроїв ...	36
2.2 Математична модель колісної платформи та вимірювальних пристроїв	45
2.3 Оцінка механічної взаємодії платформи із зовнішнім середовищем	52
2.4 Висновки до розділу	62
3 Дослідження можливостей щодо автоматизованого визначення механічної взаємодії роботизованої колісної платформи із зовнішнім середовищем ...	63
3.1 Моделювання динаміки зв'язаних рухів колісної платформи та чутливих елементів бортових вимірювальних пристроїв	63
3.2 Оцінка проковзування коліс роботизованої мобільної платформи .	79
3.3 Оцінка русійних сил та сил опору руху роботизованої мобільної платформи	85
3.4 Безпека життєдіяльності та охорона праці	91
3.5 Висновки до розділу	93

Висновки	95
Перелік джерел посилання	97
Додаток А	100
Додаток Б	102

ПЕРЕЛІК СКОРОЧЕНЬ

MRWP – Mobile Robotic Wheel Platform;

AGS – Automatic Governor State;

BMS – Board Measuring System;

AGM – Automatic Governor Mode;

IM – Indirect Measurement;

PI – Parameters Identification.

ВСТУП

Використання колісних платформ для створення мобільних робототехнічних систем різного призначення однією із основних тенденцій розвитку сучасної робототехніки, що значно розширює можливості її впровадження в різні галузі сучасної індустрії. Зрозуміло, що ефективність використання мобільних робототехнічних систем значно підвищується за рахунок впровадження автоматизованого та автоматичного управління, що вимагає оцінки взаємодії рухомих колісних платформ із навколишнім середовищем для належного інформаційного забезпечення систем автоматизації та автоматики. Таким чином, розробка моделей для автоматизованого визначення механічної взаємодії роботизованої колісної платформи із зовнішнім середовищем є актуальною сучасною проблемою, оскільки її розв'язування сприятиме поширенню можливостей автоматизації робототехнічних систем.

Оцінка сучасного стану об'єкта дослідження. Розробка систем автоматизованого визначення механічної взаємодії роботизованої колісної платформи із зовнішнім середовищем є досить складною проблемою, що не є повністю вирішеною сьогодні, тому цій проблемі приділяється достатньо багато уваги, про що свідчить огляд сучасної наукової періодичної літератури.

Виходячи з цього:

– об'єктом дослідження є електромеханічні мобільні колісні платформи робототехнічних систем;

– предметом оцінювання є математичні моделі автоматизованого визначення механічної взаємодії роботизованої колісної платформи із зовнішнім середовищем.

Сучасні системи автоматизації мобільних колісних платформ робототехнічних систем є досить обмеженими та не забезпечують сьогодні повною мірою можливостей щодо автономного функціонування таких платформ, тому переважна більшість існуючих колісних платформ мобільних робототехнічних систем оснащені ручним дистанційним управлінням по радіо або, навіть, по кабелю. Зрозуміло, що сьогодні відомі впровадження автономних колісних платформ мобільних робототехнічних систем, але такі впровадження є дуже обмеженими та переважно знаходяться лише на стадії дослідницьких та промислових випробувань.

Світові тенденції розв'язання поставлених проблем. Забезпечення автономного функціонування робототехнічних систем, у тому числі мобільних, є основним напрямком подальшого розвитку робототехніки, оскільки можливості підвищення ефективності експлуатації систем з ручним управлінням сьогодні повністю вичерпані. Відсутність універсальних загальноприйнятих підходів щодо забезпечення автономного функціонування робототехнічних систем призводить до створення спеціалізованих систем, призначених для впровадження в окремі галузі для виконання вузькоспеціальних завдань, наприклад для потреб сільського господарства, військових, поліцейських та промислових потреб. Вузька спеціалізація значно спрощує створення відповідних автономних робототехнічних систем, але значною мірою обмежує їхнє використання виконанням відповідних окремих виробничих (військових, поліцейських тощо) задач. Основним шляхом забезпечення автономного функціонування робототехнічних систем є створення належного інформаційного забезпечення, необхідного для прийняття рішень при такому автономному функціонуванні. Зрозуміло, що визначення механічної взаємодії роботизованої колісної платформи із зовнішнім середовищем є важливою складовою інформаційного забезпечення, необхідного для автономного функціонування такої платформи, і таке визначення має бути повністю автоматизованим та здійснюватися відповідними бортовими системами. Сучасні

бортові інформаційні системи колісних платформ оснащені різноманітними датчиками для первинних вимірювань та системи обробки результатів таких вимірювань, у тому числі на основі використання математичних моделей.

Актуальність роботи та підстави для її виконання. Удосконалення систем автоматизованої оцінки механічної взаємодії роботизованої колісної платформи із зовнішнім середовищем дозволить значно розширити можливості інформаційного забезпечення систем її автономного управління, що сприятиме підвищенню ефективності їхньої експлуатації та розширенню можливостей щодо їхнього використання. Зрозуміло, що розробка та використання більш досконалих математичних моделей дозволяє підвищити інформаційну насиченість без суттєвого збільшення датчиків первинних вимірювань, що робить актуальною тему даної роботи, яка присвячена розробці математичних моделей для автоматизованого визначення механічної взаємодії роботизованої колісної платформи із зовнішнім середовищем. Підставою для виконання роботи є її узгодженість із поточними науковими дослідженнями кафедри КІТАМ.

Мета роботи й можливі сфери застосування. Дана робота виконується з метою розробки та оцінювання математичних моделей для автоматизованого визначення механічної взаємодії роботизованої колісної платформи із зовнішнім середовищем. Передбачається використання результатів даної роботи на кафедрі КІТАМ при проектуванні дослідницьких та навчальних макетів; також результати є корисними для проектних організацій, що здійснюють розробку робото технічних систем різного призначення.

Взаємозв'язок з іншими роботами. Тема роботи відповідає напрямкам наукових досліджень кафедри КІТАМ щодо розробки мобільних універсальних робото технічних платформ із розширеними маніпуляційними можливостями.

Для вирішення поставленої мети потрібно вирішити наступні задачі:

- розглянути проблему автоматизованого визначення механічної взаємодії колісної робото-технічної платформи із зовнішнім середовищем;
- провести оцінювання математичних моделей для автоматизованої оцінки механічної взаємодії колісної робото-технічної платформи із зовнішнім середовищем;
- провести оцінювання можливостей щодо автоматизованого визначення механічної взаємодії роботизованої колісної платформи із зовнішнім середовищем.

За результатами роботи опубліковано тези [2] та наукові статті [3, 4].

1 ПРОБЛЕМА АВТОМАТИЗОВАНОГО ВИЗНАЧЕННЯ МЕХАНІЧНОЇ ВЗАЄМОДІЇ КОЛІСНОЇ РОБОТО-ТЕХНІЧНОЇ ПЛАТФОРМИ ІЗ ЗОВНІШНІМ СЕРЕДОВИЩЕМ

Одним із основних загальних трендів щодо розвитку сучасної індустрії є впровадження роботизованих мобільних платформ [2–8], що дозволяють суттєво зменшити безпосередню участь промислового персоналу у виконанні широкого кола операцій для більш ефективного їх виконання та для забезпечення безпеки персоналу. Намагання щодо забезпечення автоматичного управління певними типами мобільних робото-технічних платформ вимагає розв’язування складної проблеми автоматизованого визначення взаємодії колісних робото-технічних платформ із зовнішнім середовищем для автоматизованого вибору режимів їхнього руху.

1.1 Автоматизація вибору режиму руху

Суттєва необхідність щодо забезпечення автоматизації вибору режимів руху притаманна досить специфічним мобільним робото-технічним системам, до яких принципово обмежений або взагалі неможливий безпосередній доступ людини-оператора. Характерний приклад таких робото-технічних систем – це автоматичні мобільні роботи [9–11], призначені для дослідження поверхні астрономічних об’єктів, планет та їх супутників (сателітів) тощо. Використання автоматичних мобільних роботів також є доцільним при виконанні операцій в умовах небезпечного для людини-оператора навколишнього середовища, наприклад, при наявності потужних джерел випромінювання при поводженні із ядерним паливом та під час ліквідації наслідків важких аварій на АЕС [3]. Загальному тренду щодо впровадження повністю автоматичних мобільних

роботів приєє значний ефект від їхнього використання у порівнянні із системами з ручним та напівавтоматичним управлінням.

Розглянемо далі принципові обмеженості традиційних підходів щодо автоматизації управління рухом мобільних роботизованих платформ, що є необхідним для розуміння значущості проблеми автоматизованого визначення механічної взаємодії колісної роботизованої платформи із навколишнім середовищем.

Управління будь-якими об'єктами та й мобільними платформами у тому числі ґрунтується на фундаментальному факті існування залежності (відображення) між управлінням на станом об'єкту [12, 13] (рис. 1.1):

$$u(t) \rightarrow x(t), \quad (1.1)$$

де $u(t)$ – вектор, що визначає управління;

$x(t)$ – вектор, що визначає стан мобільної робото-технічної колісної платформи, які у загальному випадку змінюються протягом часу t .

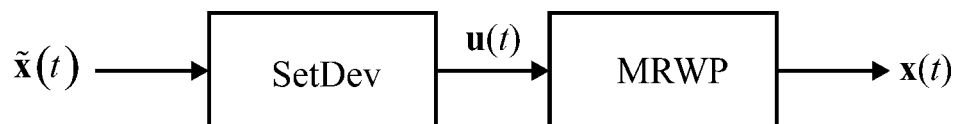


Рисунок 1.1 – Управління станом мобільної робото-технічної колісної платформи (MRWP) за допомогою задатчику (SetDev)

Існування відображення (1.1) дозволяє управляти станом мобільної колісної платформи шляхом належного вибору управління $u(t)$ відповідного до потрібного стану $x(t)$. Найпростіше управління (рис. 1.1) передбачає, що оператор-людина безпосередньо формує управління $u(t)$, або управління формується автоматично відповідно визначеного оператором бажаному стану $\tilde{x}(t)$, за допомогою спеціального пристрою – задатчику SetDev, та сигнал, від-

повідний такому управлінню, одразу ж подається до керованої колісної платформи MRWP. Зрозуміло, що за умов неконтрольованих випадкових впливів на колісну платформу її фактичний стан $x(t)$ не буде відповідати бажаному стану $\tilde{x}(t)$, відповідному сформованому управлінню $u(t)$, і це є вагомим недоліком розімкнутої системи управління, схема якої показана вище на рис. 1.1.

Щоб забезпечити бажаний стан $\tilde{x}(t)$ руху мобільної колісної платформи за умов наявності неконтрольованих випадкових впливів з боку зовнішнього середовища слід виправляти управління $u(t)$ відповідно до різниці між її бажаним $\tilde{x}(t)$ та фактичним $x(t)$ станами. Це може здійснювати оператор шляхом візуальної оцінки фактичного стану $x(t)$ керованої колісної платформи та впливу на бажаний стан $\tilde{x}(t)$ для корегування управління $u(t)$, що формується задатчиком. Зрозуміло, що такий підхід вимагає від оператора неперервного контролювання поточного стану платформи та вдалого корегування управління, а саме такий підхід є сутністю ручного управління, в якому зворотній зв'язок здійснюється оператором.

Недоліки ручного управління мобільними роботизованими платформами обумовлені фізичною обмеженістю можливостей оператору-людини, які вимагають відпочинку через певний час роботи та не дозволяють досить точно оцінювати фактичний стан платформи і формувати корегування управління. Для позбавлення недоліків ручного управління передбачають системи автоматизації із зворотнім зв'язком (рис.1.2) для забезпечення бажаного стану $\tilde{x}(t)$ мобільної платформи протягом її руху. Для цього (рис.1.2) визначають різницю між заданим бажаним станом $\tilde{x}(t)$ та вимірним фактичним станом $x(t)$ і спеціальний пристрій – автоматичний регулятор стану AGS формує корегування $\Delta u(t)$ управління $u(t)$ для компенсації неконтрольованих впливів на мобільну колісну платформу з боку зовнішнього середовища. Зрозуміло, що автоматизоване управління (рис. 1.2) позбавлене недоліків ручного управлін-

ня, обумовлених фізичною обмеженістю людини-оператора та забезпечує відповідність між бажаним та фактичним станом керованої колісної платформи.

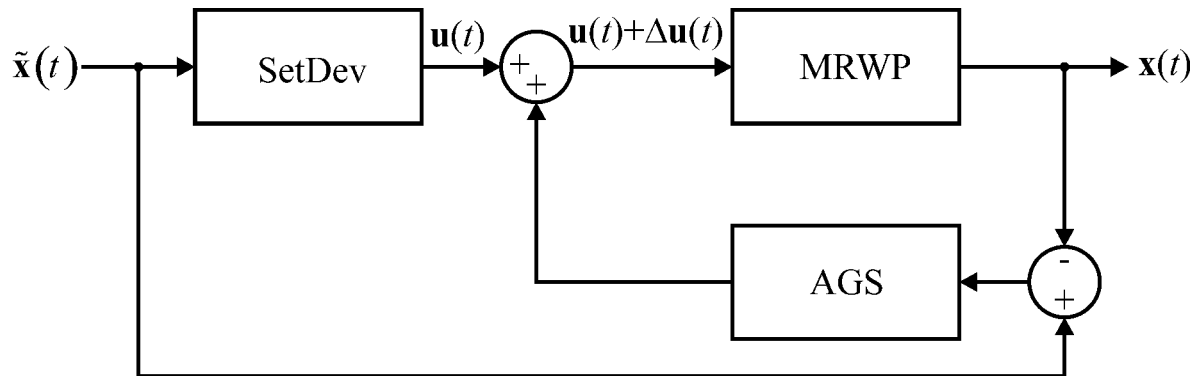


Рисунок 1.2 – Автоматичне регулювання стану мобільної робото-технічної колісної платформи за допомогою автоматичного регулятора (AGS)

Слід зазначити, що вже протягом тривалого часу та сьогодні автоматизація здійснюється переважно саме шляхом використання автоматичних регуляторів із зворотним зв'язком, як показано на рис. 1.2, і такий підхід є найбільш розповсюдженим і загальноприйнятим.

Автоматичне регулювання значно спрощує управління рухом колісної платформи та підвищує його ефективність, але при цьому вимагає певного втручання оператора, принаймні для вибору режиму руху платформи, тобто вектору $\tilde{x}(t)$. Зрозуміло, що вибір режиму руху колісної платформи здійснюється оператором відповідно до умов взаємодії платформи із зовнішнім середовищем, щоб забезпечити показники ефективності та безпеки експлуатації, наприклад щоб забезпечити найбільшу ефективність роботи двигунів та колісного рушія для зберігання заряду акумуляторів або уникнути перекидання колісної платформи через досить високу її швидкість за наявності нерівностей профілю дороги.

Вибір режиму руху роботизованої колісної платформи здійснюється оператором на основі прямих спостережень за станом платформи; зрозуміло,

що оцінка стану платформи та вибір режиму її руху істотно залежить від досвіду оператора. Крім того, в деяких випадках можливості щодо безпосереднього втручання оператора в процес управління колісною платформою є досить обмеженим, як, наприклад, у випадку управління дослідницькими роботами, що рухаються по поверхні астрономічних об'єктів [9–11] на великій відстані від керуючого оператора. Зрозуміло, що забезпечення повної автоматизації управління рухом колісної роботизованої платформи має передбачати автоматизацію вибору режиму руху, тобто автоматизоване формування вектору $\tilde{x}(t)$, що визначає бажаний стан руху. Для цього (рис. 1.3) слід передбачити бортову вимірювальну систему BMS, яка на основі вимірюваних даних про поточний стан $x(t)$ рухомої колісної платформи визначає деякі характеристики стану, у тому числі і характеристики взаємодії із навколишнім середовищем, які представлені вектором $y(t)$, та, крім цього, слід передбачити також автоматичний регулятор режиму AGM, який має для заданого вектору $y(t)$ формувати відповідний бажаний режим руху у вигляді вектору $\tilde{x}(t)$. Така система автоматизації дозволить максимально виключити людину оператора з контуру управління рухом мобільної колісної платформи та звести функції оператора до формування простих команд типу рухатись—зупинитись; крім того, наявність такої системи дозволить створювати повністю автономні мобільні робото-технічні платформи, які будуть відпрацьовувати заздалегідь визначену програму без втручання людини-оператора. Слід підкреслити, що автоматичний регулятор режиму AGM суттєво відрізняється від автоматичного регулятора стану AGS (рис. 1.3), оскільки в такому регуляторі режиму розв'язується значно складніша задача, що вимагає використання досить складних алгоритмів, які можна реалізувати тільки шляхом програмування відповідних електронних пристроїв.

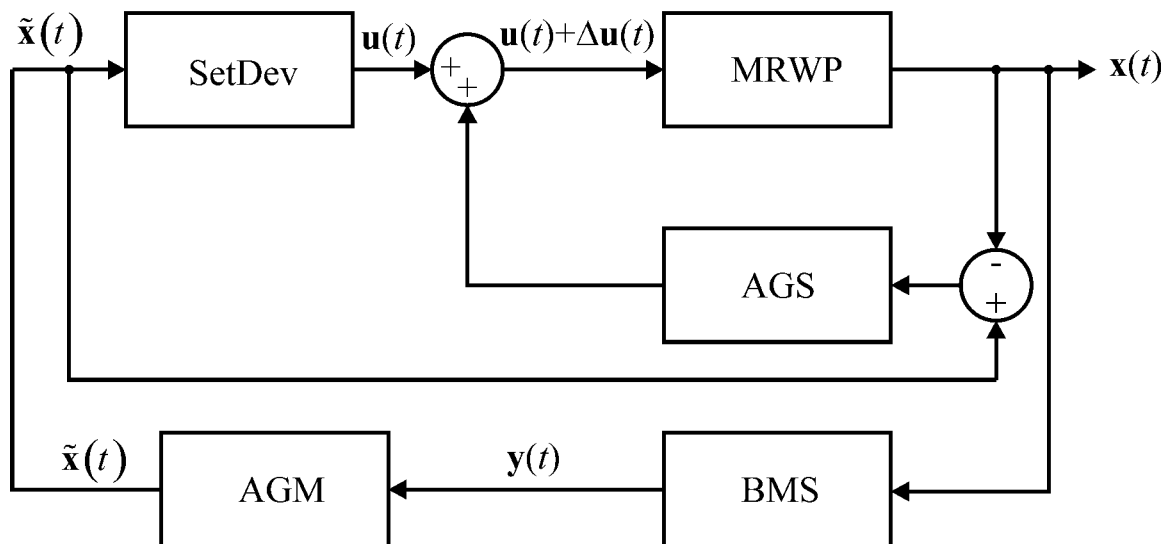


Рисунок 1.3 – Автоматичне управління рухом мобільної робото-технічної платформи за допомогою бортової вимірювальної системи BMS та регулятора режиму руху AGM

Наявність автоматичного регулювання режиму руху мобільної колісної робото-технічної платформи (рис. 1.3) передбачає наявність бортової вимірювальної системи BMS, яка має забезпечувати оцінку у тому числі й характеристик взаємодії рухомої платформи із навколишнім середовищем. Таким чином, розв'язання проблеми автоматизованого визначення механічної взаємодії колісної робото-технічної платформи із зовнішнім середовищем є вкрай важливою складовою щодо створення автономних мобільних робото-технічних платформ різного призначення. Слід підкреслити, що наявність автоматизованого визначення механічної взаємодії колісної робото-технічної платформи із зовнішнім середовищем дозволить значно підвищити ефективність експлуатації робото-технічних мобільних платформ із напівавтоматичним управлінням. Дійсно, на основі інформації від бортової вимірювальної системи можна суттєво спростити роботу керуючого оператора за рахунок забезпечення його більшої інформованості щодо поточного стану платформи та за

рахунок можливостей щодо формування експертних пропозицій оператору щодо вибору режимів руху платформи.

1.2 Механічна взаємодія із зовнішнім середовищем та її характеристики

Оцінка механічної взаємодії мобільної роботизованої колісної платформи із зовнішнім середовищем дозволяє певним чином характеризувати це зовнішнє середовище, що є необхідним для раціонального вибору режиму руху колісної платформи.

Механічна взаємодія із зовнішнім середовищем мобільної роботизованої колісної платформи цілком визначається характером руху її складових, тому розглянемо далі схематизацію рухів колісної платформи та введемо до розгляду міри її взаємодії із зовнішнім оточенням.

Мобільна роботизована колісна платформа представляє собою колісний транспортний засіб, призначений для встановлення на ньому спеціального устаткування (рис. 1.4) для виконання передбачуваних операцій, і основна функція такої мобільної платформи полягає насамперед у перенесенні встановленого на ній устаткування до необхідного місця проведення робіт.

Зрозуміло, що компоновання та конструкція мобільної колісної роботизованої платформи можуть бути досить різними у залежності від призначення та бажаних характеристик, але в той же час, обов'язковими елементами завжди є корпус-шасі та колісний рушій, який може складатися із різної кількості ведучих та ведених коліс. Характерним для мобільних роботизованих платформ є використання електроприводу рушія від акумуляторних батарей, або зовнішнього джерела живлення за допомогою спеціального дроту.

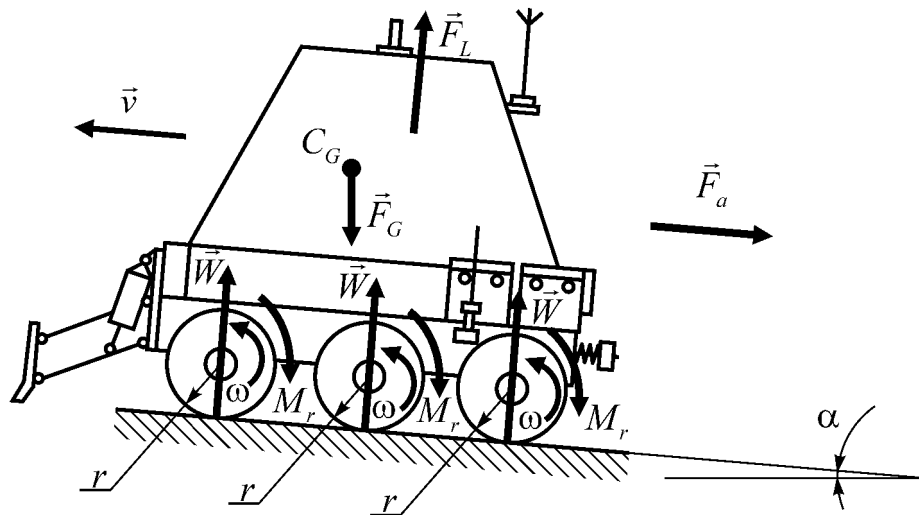


Рисунок 1.4 – Мобільна колісна роботизована платформа, її рухи та взаємодія із зовнішнім середовищем

Природно, що характер взаємодії мобільної роботизованої колісної платформи із зовнішнім середовищем визначається характером руху складових платформи. Зрозуміло, що різним режимам руху платформи, наприклад при її розвороті, при криволінійному, або при прямолінійному русі характер взаємодії платформи із зовнішнім середовищем будуть відповідати різні взаємодії із навколишнім середовищем. Далі розглядатимемо випадок прямолінійного руху колісної платформи зі швидкістю \vec{v} (рис. 1.4).

Прямолінійний рух мобільної роботизованої колісної платформи зі швидкістю \vec{v} забезпечується обертанням коліс платформи із кутовою швидкістю ω (рис. 1.4). В ідеальному випадку відсутності проковзування маємо наступне співвідношення між кутовою швидкістю ω коліс та швидкістю \vec{v} прямолінійного руху колісної платформи (рис. 1.4) [14]:

$$v = \omega \cdot r, \quad (1.2)$$

де $v \equiv |\vec{v}|$; r – радіус колеса.

Зрозуміло, що співвідношення (1.2) практично неможливе через наявність проковзування і його можна розглядати лише у випадку ідеальних умов взаємодії колеса із ґрунтом. Завдяки проковзуванню швидкість \vec{v} прямо-лінійного руху, відповідна кутової швидкості ω є меншою ідеального значення (1.2), а при повному проковзуванні взагалі дорівнюватиме нулю. Отже для врахування проковзування введемо параметр проковзування, значення якого задовольняє подвійній нерівності [14]:

$$0 \leq s_r \leq 1, \quad (1.3)$$

де s_r – параметр проковзування, значення;

$s_r = 0$ якого відповідає відсутності проковзування;

$s_r = 1$ – абсолютному проковзуванню колеса.

З урахуванням параметру (1.3) модифікуємо співвідношення (1.2) для врахування проковзування та представимо його у вигляді [14]:

$$v = \omega \cdot r(1 - s_r). \quad (1.4)$$

Слід зазначити, що співвідношення (1.4) дозволяє ввести до розгляду ефективний радіус r_s кочення колеса [14]:

$$r_s = r(1 - s_r) \Rightarrow 0 \leq r_s \leq r. \quad (1.5)$$

Зрозуміло, що значення радіусу кочення $r_s = r$ відповідає випадку відсутності проковзування, а нульове значення $r_s = 0$ радіусу кочення – випадку повного проковзування. Завдяки визначенню (1.5) можемо представити співвідношення (1.4) у вигляді [14]:

$$v = \omega \cdot r_s. \quad (1.6)$$

Зрозуміло, що встановлення параметру кочення (1.3) є вкрай необхідним для раціонального вибору режиму руху колісної платформи.

Як і усі інші природні та штучні об'єкти, мобільна колісна платформа рухається у оточуючому полі гравітаційних сил. Дію гравітаційних сил на мобільну колісну платформу прийнято характеризувати силою тяжіння (ваги) \vec{F}_G , яка діє вертикально вниз та прикладена в центрі тяжіння (ваги) платформи (див. рис. 1.4). Величина сили ваги мобільної колісної платформи визначається наступним чином:

$$F_G = M \cdot g, \quad (1.7)$$

де $F_G = |\vec{F}_G|$; M – повна маса колісної платформи;

$g = 9,81 \text{ м/с}^2$ – прискорення вільного падіння.

Слід розуміти, що маса мобільної колісної роботизованої платформи та розташування центру її тяжіння може змінюватися протягом експлуатації, наприклад за рахунок встановлення додаткового вантажу, або зміни положення бортового устаткування, маніпуляторів тощо. Таким чином сила ваги колісної платформи може істотно змінюватися протягом її експлуатації, і її бажано визначати для забезпечення ефективного та безпечного управління платформою.

Дія сили ваги колісної платформи компенсується при взаємодії коліс платформи із ґрунтом, по якому рухається платформа. Міру взаємодії ґрунту з колесами колісної платформи можна уявляти у вигляді нормальної реакції \vec{W} , що спрямована перпендикулярно поверхні ґрунту у точці взаємодії з колесами та визначається взаємним розташуванням коліс відносно центру ваги та кутом α нахилу дороги (див. рис. 1.4) та деяких інших факторів. Зрозуміло, що нормальні реакції різних коліс платформи у загальному випадку відрізняються, тобто для колісної платформи, що показана вище на рис. 1.4, нормальне

навантаження на окреме колесо з боку ґрунту внаслідок дії сил ваги визначається так:

$$W = Mgw_k \cos \alpha, \quad (1.8)$$

де w_k – коефіцієнт, що визначає частину ваги, яка діє на окреме колесо;
 α – кут нахилу до горизонталі напрямку прямолінійного руху колісної платформи (див. рис. 1.4).

Цілком зрозуміло, що у загальному випадку коефіцієнт w_k , який визначає частину ваги мобільної платформи на одне колесо, є різним для кожного колеса і істотно залежить від поточного стану (орієнтації) руху колісної платформи та інших багатьох факторів. Разом із тим, внаслідок симетрії (див. рис. 1.4) такий коефіцієнт можна наближено вважати вважається однаковим для усіх коліс платформи та визначати наступним чином:

$$w_k \cong \frac{1}{N}, \quad (1.9)$$

де N – кількість коліс мобільної платформи.

Слід зазначити, що визначення нормального навантаження на окремі колеса платформи є досить важливою задачею, розв'язування якої є необхідним для формування сигналів ефективного та безпечного управління станом колісної платформи, оскільки саме завдяки достатньо великому нормальному навантаженню на колесо забезпечується його зчеплення з ґрунтом та практично мале проковзування.

Зовнішнє середовище – ґрунт, з яким контактують колеса мобільної платформи (див. рис. 1.4), чинить опір обертанню коліс, і такий опір може бути характеризованим моментом тертя-кочення [15]. Момент тертя-кочення зазвичай визначається так [15]:

$$|M_r| \leq M_r^{\max}, \quad M_r^{\max} = f_r W, \quad (1.10)$$

де M_r – момент тертя-кочення;

f_r – коефіцієнт опору коченню.

Величина коефіцієнту f_r опору коченню визначається конструкцією, деформуванням та станом колеса [14, 15] і при цьому істотно залежить також від стану місцевості [15]. Взагалі, величина коефіцієнту f_r опору коченню залежить від швидкості, але у багатьох випадках, у тому числі при розрахунках динаміки руху мобільних колісних платформ, такою залежністю можна нехтувати, та використовувати середнє значення цього коефіцієнту відповідно даним табл. 1.1 [15], що відповідають різним колісним транспортним засобам та характеристикам ґрунту. Зрозуміло, що у залежності від характеристик мобільної роботизованої платформи її можна розглядати і як легковий автомобіль, і як вантажний автомобіль, і як трактор. Осереднення значення коефіцієнту опору коченню істотно спрощує задачу, оскільки оцінка такого тертя зводиться до визначення одного параметра – коефіцієнта f_r . Відповідно виразу (1.10) маємо, що збільшення нормального навантаження на колесо призводитиме до збільшення моменту опору, подолання якого призводитиме до зайвого витрачання потужності тяглових двигунів. В той же час, зменшення нормального навантаження на колесо може привести до проковзування, яке не дозволить колісній платформі рухатися належним чином. Таким чином, маємо, що величини нормальних реакцій коліс мають обов'язково враховуватися для автоматичного вибору режиму руху колісної платформи, оскільки такий вибір істотно залежить від стану взаємодії коліс з ґрунтом.

Таблиця 1.1 – Значення коефіцієнту опору коченню за даними [16]

Вид транспортного засобу	Дорожні умови		
	Бетон	Ґрунт	Пісок
Легкові автомобілі	0,015	0,08	0,30
Вантажні автомобілі	0,012	0,06	0,25
Трактори	0,02	0,04	0,20

При виконанні моделювання руху колісної платформи слід врахувати, також, що момент (1.10) опору коченню кожної її колеса є протилежним напрямку кутової швидкості колеса:

$$M_r = -\text{sign}(\omega) |M_r|, \quad (1.11)$$

де $\text{sign}(\omega)$ – знак кутової швидкості обертання колеса мобільної платформи, що узгоджений із знаком моментів пар сил, які діють на це колесо з боку трансмісії та зовнішнього середовища.

Зовнішнє середовище – повітря атмосфери, в якому розташована мобільна колісна платформа, протидіє руху цієї платформи. Завдяки тій обставині, що мобільні колісні роботизовано платформи здійснюють рухи, що певним чином схожі на рухи автомобілів та тракторів, пропонується для визначення аеродинамічної сили опору повітря використовувати результати з аеродинаміки автомобіля [17]. У загальному випадку мірами протидії руху колісної платформи з боку повітря атмосфери є аеродинамічні сили та моменти, що показані на рис. 1.5, а саме – сила лобового опору P_x , бокова P_y та підйомна P_z сили, а також момент M_x крену, поздовжній, або перекидальний момент M_y та поворотний момент M_z [17].

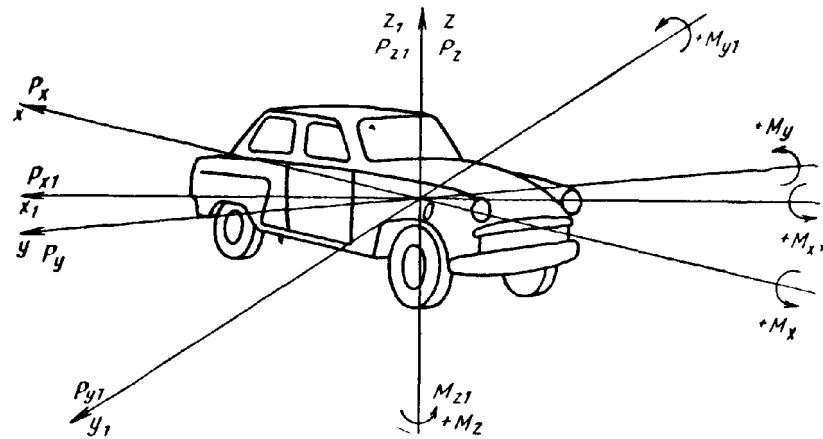


Рисунок 1.5 – Аеродинамічні сили та моменти, що діють на автомобіль

Слід розуміти, що у загальному випадку руху колісної платформи визначення аеродинамічних сил та моментів (рис. 1.5) є досить складною задачею, тому розглядатимемо випадок прямолінійного руху (див. рис. 1.4). Отже, у випадку прямолінійного руху мобільної платформи і мірою такої протидії з боку повітря атмосфери є аеродинамічна сила \vec{F}_D (див. рис. 1.4) опору, яка спрямована протилежно швидкості \vec{v} прямолінійного руху. За цим припущенням, сила опору повітря руху колісної платформи визначається наступним чином [15]:

$$|\vec{F}_D| = c_D \frac{\rho}{2} A_f v^2, \quad (1.12)$$

де c_D – коефіцієнт аеродинамічного (лобового) опору, що істотно визначається формою кузова колісної платформи;

ρ – густина повітря;

A_f – характеристична площа автомобіля, яка визначається, зазвичай, як площа проєкції автомобіля на площину, перпендикулярну вектору \vec{v} його швидкості.

Величина коефіцієнту c_D аеродинамічного опору істотно залежить від форми кузову мобільної платформи; деякі данні щодо значень такого коефіцієнту для транспортних засобів різного типу наведені в табл. 1.2. Досить великі інтервали характерних значень коефіцієнту c_D аеродинамічного опору в межах кожного окремого типу транспортного засобу (табл. 1.2) обумовлені істотною залежністю значення цього коефіцієнту від локальних особливостей форми кузову, що, наприклад, для легкових автомобілів показано на рис. 1.6. Слід враховувати, що величина c_D помітно залежить не тільки від форми кузову колісної платформи, а також від наявності різних виступаючих за габарити кузова елементів [17], наприклад маніпуляторів та різноманітного бортового устаткування, наявність якого притаманна мобільним роботизованим платформам.

Таблиця 1.2 – Значення коефіцієнту аеродинамічного опору за даними [17]

Тип транспортного засобу	Значення c_D
Легковий автомобіль	0,3–0,6
Кабріолет	0,4–0,65
Гоночний автомобіль	0,25–0,3
Автобус	0,60–0,7
Вантажний автомобіль	0,8–1,0
Сідельний автопотяг	0,8–1,3
Мотоцикл з пасажирами	1,8

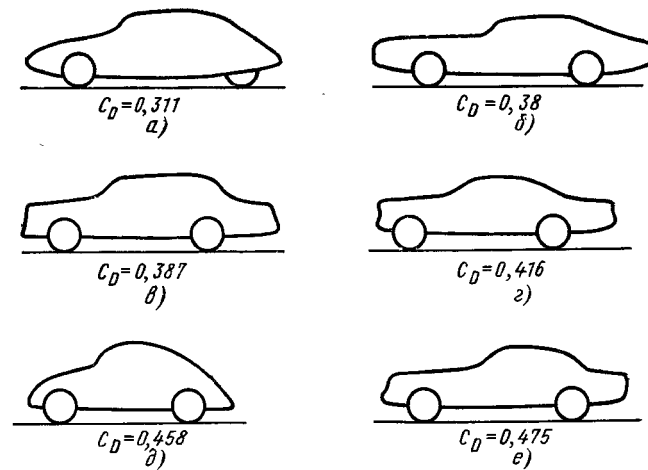


Рисунок 1.6 – Коефіцієнти аеродинамічного опору легкових автомобілів за даними [17]

Як відомо [15, 17], окрім сили опору повітря, на рухомий автомобіль також діє аеродинамічна підйомна сила \vec{F}_L (див. рис. 1.4), що обумовлена різницею тиску на нижню та верхню частини корпусу; зрозуміло, що така підйомна сила діє також і на мобільні колісні роботизовано платформи, які мають досить високу схожість із автомобілями. Величина аеродинамічної підйомної сили залежить від швидкості та від особливостей форми колісної платформи [15]:

$$|\vec{F}_L| = c_L \frac{\rho}{2} A_f v^2, \quad (1.13)$$

де c_L – коефіцієнт аеродинамічного підйому, який визначають для автомобілів за результатами випробувань в аеродинамічній трубці [15].

Типові значення коефіцієнту аеродинамічного підйому становлять $c_L = 0,2 \dots 0,5$. Цілком зрозуміло, що аеродинамічна підйомна сила (1.13) зменшує величину нормального навантаження на колеса, оскільки така сила протидіє силам ваги.

1.3 Непрямі вимірювання та використання математичних моделей

Взаємодія мобільної роботизовано колісної платформи і із зовнішнім середовищем, що розглянута вище у підрозд. 1.2, характеризується досить складним чином і її безпосередні вимірювання є не завжди можливими. За цих умов, для забезпечення інформативності системи автоматизованого управління колісної платформи слід передбачати непрямі вимірювання, що засновані на обробці результатів прямих вимірювань з використанням математичних моделей.

Розглянемо далі питання щодо особливостей забезпечення вимірювань взаємодії колісної платформи із зовнішнім середовищем.

Визначення сил ваги (1.7) та розташування центру ваги мобільної колісної платформи безпосередньо під час її руху є досить важливою задачею, оскільки маса істотно впливає на динамічні характеристики, а положення центру ваги – на стійкість колісної платформи.

Заздалегідь не завжди зручно або взагалі і неможливо точно знати масу та точне розташування додаткового вантажу, встановленого на платформу протягом експлуатації. Цілком зрозуміло, що безпосереднє визначення маси колісної платформи, яка саме й визначає значною мірою сили її ваги (1.8), можливе тільки на спеціальних важелях, використання яких принципово передбачає зупинку колісної платформи у відповідному місці і є неможливим для рухомої платформи. Слід зазначити, що положення центру ваги принципово неможливо визначити шляхом прямого вимірювання, але можна тільки обчислити за допомогою відповідних вихідних даних, одержаних у тому числі шляхом прямих вимірювань. Таким чином, визначення сил ваги та положення центру ваги мобільної колісної платформи під час її руху, що необхідно для ефективного та безпечного управління нею, можна здійснювати лише шляхом непрямих вимірювань, тобто обробкою результатів спеціально організованих вимірювань з використанням спеціально розроблених математичних моделей.

Для визначення сил ваги та положення центру ваги мобільної колісної платформи можна рекомендувати здійснювати інструментальні вимірювання деформацій пружних елементів підвішування платформи на її колеса, яка непрямо оцінює силу \vec{W} нормального навантаження на колесо (див. рис. 1.4). Дійсно, відповідно формулі (1.8) матимемо можливість оцінювати масу платформи за вимірними силами нормального навантаження усіх коліс платформи, але для цього слід визначити також кут α нахилу дороги (див. рис. 1.4). При цьому слід пам'ятати, що деформації пружних елементів підвішування платформи на колесах є результатом впливу не тільки сил ваги, але ж і аеродинамічної підйомної сили (1.13), тобто нормальне навантаження на колесо буде визначатися не формулою (1.8), а так (див. рис.1.4):

$$W = Mgw_k \cos \alpha - F_L w_f, \quad (1.14)$$

де w_L – коефіцієнт, що визначає частину аеродинамічної підйомної сили, що діє на окреме колесо платформи.

Визначення нормального навантаження (1.14) на колеса платформи є досить важливою відносно самостійною задачею, що вкрай необхідна для забезпечення ефективного та безпечного управління платформою, оскільки саме нормальна реакція визначає проковзування та тертя кочення (1.10). Задача дійсно ускладнюється тією обставиною, що навантаження на кожне із коліс платформи взагалі є унікальним та потребує окремого визначення.

Зрозуміло, що визначення нормального навантаження на колесо платформи не може бути виконано прямим вимірюванням, але може бути виконано шляхом обробки результатів прямих інструментальних вимірювань деформацій пружних елементів підвішування платформи на її колеса, наприклад, за допомогою тензодатчиків. Слід розуміти, що при такій організації вимірювань їхнім результатом буде безпосередньо нормальне навантаження (1.14), що визначається силами ваги та аеродинамічної підйомною силою, і саме таке

нормальне навантаження на колесо впливає на проковзування та на опір коченню коліс мобільної платформи. Таким чином вимірювання деформацій пружних елементів підвішування платформи на її колеса, наприклад, за допомогою тензодатчиків дозволить оцінювати вадливу характеристику взаємодії мобільної роботизовано колісної платформи із ґрунтом.

Нормальне навантаження на колесо значною мірою визначає такі важливі характеристики як проковзування та опір коченню коліс, але вони залежать також і від стану ґрунту, або покриття дороги. Таким чином, для формування сигналів ефективного та безпечного управління колісною платформою слід мати оцінки параметру проковзування (1.3) та коефіцієнту тертя кочення, що визначає опір коченню колеса (1.10). Цілком зрозуміло, що параметр проковзування (1.3) та коефіцієнт тертя кочення є параметрами математичної моделі динаміки руху мобільної роботизовано колісної платформи, тому їхнє визначення зводиться до розв'язування відповідної задачі ідентифікації, що потребує застосування відповідних математичних моделей, методів та необхідних інструментальних вимірювань.

Важливість визначення параметру проковзування та коефіцієнту тертя-кочення мобільної роботизованої колісної платформи обумовлена тією обставиною, що стан ґрунту або дорожнього покриття може істотно змінюватися протягом маршруту руху платформи, і це слід враховувати при автоматичному виборі режиму руху.

Аеродинамічна сила опору повітря (1.12) має істотний вплив на динаміку прямолінійного руху колісної платформи, тому її оцінка є вкрай необхідною для забезпечення ефективного управління рухом мобільної роботизованої колісної платформи, особливо для уникнення зайвого витрачання заряду акумуляторів, що живлять тяглові електричні двигуни коліс.

Особливістю мобільних роботизованих колісних платформ є те, що характеристична площа A_f може істотно змінюватися протягом руху за рахунок рухів допоміжного устаткування, у тому числі маніпулятора, встановленого на

платформі. Завдяки цьому для оцінки аеродинамічного опору слід визначати добуток $c_D A_f$, який є параметром математичної моделі динаміки руху мобільної роботизовано колісної платформи, тому його визначення зводиться до розв'язування відповідної задачі ідентифікації, що потребує застосування відповідних математичних моделей і методів, та необхідних інструментальних вимірювань.

Проблема непрямих вимірювань, які необхідні для оцінки взаємодії мобільної роботизованої колісної платформи, досить повно розглянута в роботі [18], тому далі наведемо деякі головні результати цієї роботи.

Зрозуміло, що оцінка взаємодії мобільної роботизовано колісної платформи із зовнішнім середовищем заснована на обробці з використанням математичних моделей результатів прямих вимірювань. Обробка вимірюваних сигналів від бортових датчиків, встановлених на досліджуваній колісній платформі, полягає у визначенні залежного від часу t вектора $x(t)$ стану та вектора $a^{(wp)}$ параметрів колісної платформи для точно заданого вектора $u(t)$ керування, вектора $v(t)$ вимірюваного сигналу та вектора $a^{(ms)}$ параметрів вимірювальної системи. Таким чином, задачу обробки вимірюваних сигналів від бортових датчиків, встановлених на колісній платформі, можна уявити як побудову такого відображення (рис. 1.7):

$$u(t), v(t), a^{(ms)} \rightarrow x(t), a^{(wp)}. \quad (1.15)$$

Для визначення відображення (1.15) необхідно насамперед побудувати математичну модель вимірювальної системи, що забезпечує непряме вимірювання вектора стану досліджуваної колісної платформи за допомогою безпосередньо виміряних сигналів від встановлених бортових датчиків. Ця модель повинна бути представлена в загальному випадку за допомогою наступної початкової задачі:

$$\dot{x} = X^{(m)}(t, x, v; a^{(ms)}), x(t_0) = x^{(0)}, \quad (1.16)$$

де $X^{(m)}$ є деякою функцією, яка принципово не може залежати від вектора параметрів невідомої колісної платформи, щоб мати можливість незалежного вимірювання;

t_0 – початковий момент часу;

$x^{(0)}$ – вектор, що визначає стан колісної платформи у початковий момент часу.

Початкову задачу (1.16), що представляє математичну модель непрямого вимірювання (ІМ на рис. 1.7), можна розв'язати будь-яким типовим відомим числовим методом, таким як Рунге-Кутта, що дозволить визначити вектор $x = x(t)$ стану колісної платформи, відповідний відомому вектору $v = v(t)$ вимірюваного сигналу та вектору $a^{(ms)}$ параметрів вимірювальної системи (рис. 1.7). Наявність відомого вектора $x = x(t)$ стану колісної платформи та вектора $u = u(t)$ управління дозволяє визначити вектор $a^{(wp)}$ параметрів колісної платформи шляхом розв'язування задачі ідентифікації відповідних параметрів (РІ на рис. 1.7). Очевидно, що задача ідентифікації є в принципі складнішою, ніж розв'язання початкової задачі, і ця обставина вимагає звернення до неї. Одним із найбільш загальних підходів до вирішення проблеми ідентифікації є метод найменших квадратів, для використання якого слід мати математичну модель динаміки колісної платформи у вигляді:

$$\dot{x} = X^{(s)}(t, x, v; u; a^{(wp)}, a^{(ms)}), x(t_0) = x^{(0)}, \quad (1.17)$$

де $X^{(s)}$ – деяка задана функція, що визначає математичну модель колісної платформи.

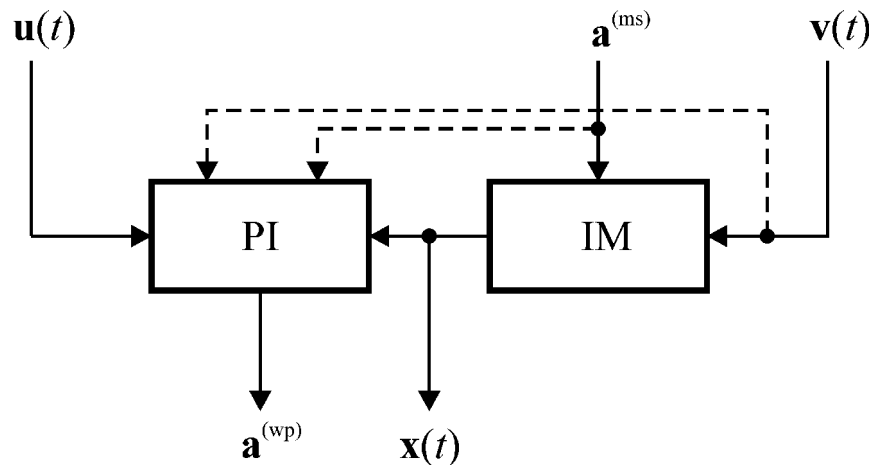


Рисунок 1.7 – Принципова схема обробки за допомогою математичних моделей вимірюваних сигналів відповідно роботі

Щоб отримати рівняння для визначення вектора $\mathbf{a}^{(wp)}$ параметрів колісної платформи необхідно вибрати інтервал часу $[t_1, t_2]$ і представити модель (1.17) у вигляді норми розбіжності диференціальних рівнянь (1.17) на векторі $\mathbf{x}(t)$ стану колісної платформи, визначеному за допомогою числового інтегрування початкової задачі (1.16), що представляє математичну модель непрямого вимірювання, а також на заданому векторі \mathbf{v} вимірюваних сигналів, і векторі \mathbf{u} управління для даного вектора $\mathbf{a}^{(ms)}$ як функцію вектора $\mathbf{a}^{(wp)}$:

$$S_{[t_1, t_2]}(\mathbf{a}^{(wp)}) = \|\dot{\mathbf{x}} - \mathbf{X}^{(s)}(t, \mathbf{x}, \mathbf{v}; \mathbf{u}; \mathbf{a}^{(wp)}, \mathbf{a}^{(ms)})\|_{H, [t_1, t_2]}, \quad (1.18)$$

де $\|\cdot\|_H$ – норма в деякому просторі H .

Норма (1.18) має мати принципову властивість:

$$S_{[t_1, t_2]}(\mathbf{a}^{(wp)}) = 0 \leftrightarrow \dot{\mathbf{x}} - \mathbf{X}^{(s)}(t, \mathbf{x}, \mathbf{v}; \mathbf{u}; \mathbf{a}^{(wp)}, \mathbf{a}^{(ms)}). \quad (1.19)$$

Вектор $\mathbf{a}^{(wp)}$ параметрів колісної платформи в нормі (1.18) невідомий і через властивість (1.19) ми можемо визначити цей вектор приблизно, мінімізуючи норму (1.18):

$$\mathbf{a}^{(wp)} : S_{[t_1, t_2]}(\mathbf{a}^{(wp)}) \rightarrow \min. \quad (1.20)$$

Задача мінімізації (1.20) дозволяє мати рівняння, необхідні для знаходження вектора $\mathbf{a}^{(wp)}$, і ці рівняння можна представити у такому символічному вигляді:

$$\frac{dS_{[t_1, t_2]}}{d\mathbf{a}^{(wp)}} = \mathbf{0}, \quad (1.21)$$

де $\mathbf{0}$ – нульовий вектор відповідного розміру.

Розв'язання рівнянь (1.21) дозволить визначити вектор $\mathbf{a}^{(wp)}$ параметрів колісної платформи, який можна пов'язати з часом $t \in [t_1, t_2]$, тому інтервал $[t_1, t_2]$ повинен бути досить малим, але всередині цього інтервалу необхідно мати багато заходів, щоб обчислити інтегрування при обчисленні норми (1.18). Сучасні вимірювальні системи забезпечують наявність числових даних сигналів з періодом близько 1...10 мс, тому ми можемо мати 100...1000 тактів в секунду і цього дійсно достатньо для інтегрування в такий проміжок часу. Необхідно відзначити, що інтегрування диференціального рівняння (1.17) для розв'язання задачі ідентифікації формально необхідне для наявності необхідних рівнянь для визначення вектора $\mathbf{a}^{(wp)}$ параметрів колісної платформи але сенс інтегрування також тісно пов'язаний з видаленням шумів, природно присутніх у вимірюваних сигналах.

1.4 Висновки до розділу

Було розглянуто принципові обмеженості традиційних підходів щодо автоматизації управління рухом мобільних роботизованих платформ, та роз-

роблена система автоматизації рухомої колісної платформи для взаємодії із зовнішнім середовищем.

Проведено дослідження взаємодії мобільної роботизованої колісної платформи із зовнішнім середовищем, у якому визначено основні фактори впливу на платформу.

Розроблена принципова схема обробки за допомогою математичних моделей вимірюваних сигналів.

2 МАТЕМАТИЧНІ МОДЕЛІ ДЛЯ АВТОМАТИЗОВАНОЇ ОЦІНКИ МЕХАНІЧНОЇ ВЗАЄМОДІЇ КОЛІСНОЇ РОБОТО-ТЕХНІЧНОЇ ПЛАТФОРМИ ІЗ ЗОВНІШНІМ СЕРЕДОВИЩЕМ

Більшість характеристик механічної взаємодії мобільної колісної робото-технічної платформи із зовнішнім середовищем не можуть бути безпосередньо вимірними, і їх можна оцінити тільки шляхом обробки результатів вимірювань за допомогою спеціальних математичних моделей. Такі математичні моделі мають бути розроблені з урахуванням можливостей щодо забезпечення оцінки необхідних характеристик та обов'язково з урахуванням вимог автоматизованої обробки результатів вимірювань, якщо такі вимоги передбачені.

2.1 Схематизація колісної платформи та вимірювальних пристроїв

Математична модель динаміки колісної платформи має відповідним чином враховувати особливості її конструктивного виконання, включаючи компоновку, загальну кількість коліс, кількість рушійних коліс, передачу обертального моменту на рушійні колеса; її характеристики, такі як маса платформи та її складових, розміри платформи та її складових, характеристики рушійних електричних двигунів, а також взаємодію із зовнішнім середовищем, включаючи проковзування, опір котінню коліс та в'язкий опір. Завдяки означеним обставинам цілком розуміло, що математична модель динаміки колісної платформи має бути одержана для конкретного конструктивного виконання колісної платформи для заданих умов її руху та взаємодії із навколишнім середовищем. Далі будемо розглядати математичне моделювання роботизованої колісної платформи-прототипу, що використовується в наукових дослідженнях кафедри КІТАМ (рис. 2.1).

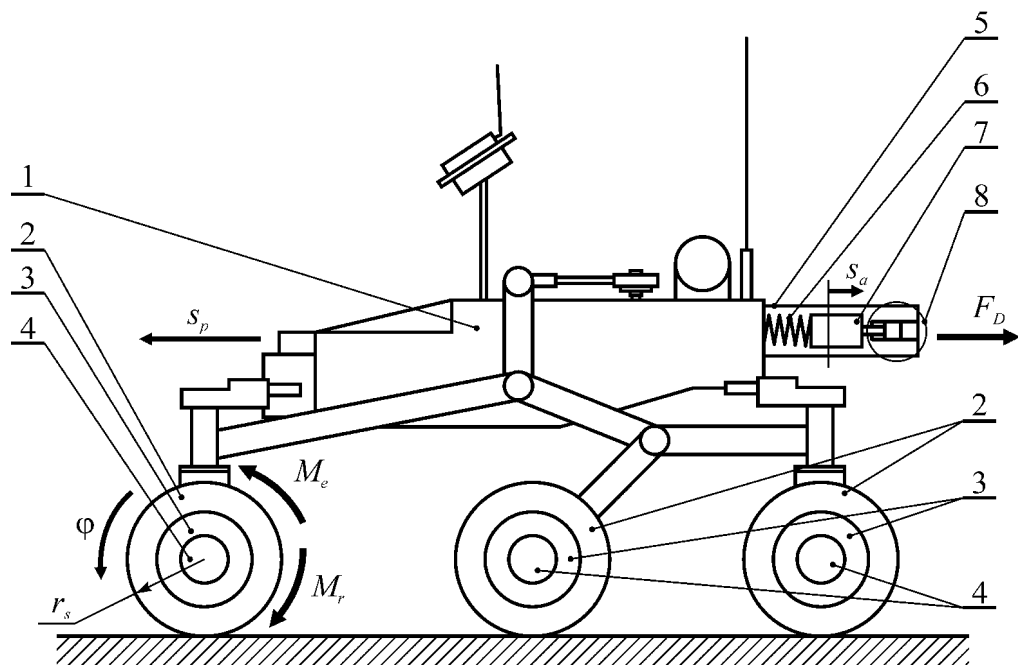


Рисунок 2.1 – Прототип колісної мобільної роботизованої платформи кафедри КІТАМ

Якщо ставиться задача щодо дослідження можливостей автоматизованої оцінки механічної взаємодії колісної платформи із зовнішнім середовищем, на основі математичної обробки вимірювань, то, окрім моделі динаміки власне досліджуваної колісної платформи, також слід мати математичну модель бортових вимірювальних пристроїв (акселерометри, тахометри, та інші), що здійснюють прямі вимірювання. Для обробки результатів вимірювань також слід мати зв'язані моделі динаміки колісної платформи та її бортових вимірювальних пристроїв, оскільки лише саме такі моделі дозволяють встановлювати відповідні зв'язки між вимірюваннями та станом платформи.

Дослідження загального випадку руху прототипу колісної платформи (див. рис. 2.1) є досить складною задачею, тому прийmemo деякі припущення,

що спростять дослідження, але при цьому дозволять виконати їхню мету. Розглядатимемо далі виключно прямолінійний поступальний рух колісної платформи (див. рис. 2.1) уздовж горизонтальної площини (рис. 2.2); виключимо із розгляду вертикальні коливання корпусу платформи відносно її коліс на ресорному підвішуванні. Також вважаємо, що усі колеса платформи є однаковими і вага платформи рівномірно розподілена між ними; кожне із коліс платформи має власний рушійний електричний двигун та тахометричний датчик. Платформа (рис. 2.2) оснащена бортовим акселерометром інерційного типу, що має забезпечувати вимірювання прискорення її прямолінійного поступального руху.



1 – корпус платформи; 2 – колесо; 3 – тягловий електричний двигун;
 4 – бортовий тахометричний датчик; 5 – бортовий акселерометр;
 6 – пружний, 7 – інерційний та 8 – дисипативний елементи акселерометру
 Рисунок 2.2 – Схематизація рухів та взаємодій прототипу колісної платформи

Прямолінійний поступальний рух колісної платформи визначатимемо за допомогою лінійної координати s_p (див. рис. 2.2), яку розглядатимемо як фу-

нкцію $s_p = s_p(t)$ часу $t \geq 0$; за початковий момент часу приймаємо момент, що відповідає $t = 0$. Вважаємо, що прямолінійний поступальний рух платформи забезпечується за рахунок обертання коліс, які визначатимемо за допомогою кута повороту φ (див. рис. 2.2), і цей кут розглядатимемо як функцію $\varphi = \varphi(t)$ часу; також вважатимемо, що кути повороту усіх коліс платформи є однаковими. Зрозуміло, що лінійна координата s_p та кут повороту φ зв'язані між собою залежністю вигляду (1.6), яка дозволить записати рівняння зв'язку досліджуваної колісної платформи:

$$s_p = \varphi \cdot r_s, \quad (2.1)$$

де r_s – ефективний радіус (1.5) кочення колеса досліджуваної платформи.

Завдяки прискоренню \ddot{s}_p прямолінійного руху платформи інерційний елемент її бортового акселерометру (див. рис. 2.2) одержує переміщення відносно положення, яке відповідає недеформованому пружному елементу; таке відносне переміщення визначатимемо відносною лінійною координатою s_a (див. рис. 2.2), яку розглядатимемо як функцію $s_a = s_a(t)$ часу. Зрозуміло, що одразу ж після змінення прискорення платформи інерційна маса її бортового акселерометру буде здійснювати коливання, які протягом часу будуть погашені дисипативним елементом акселерометру і усталене значення s_a відхилення інерційної маси акселерометра відносно положення, яке відповідає його недеформованому пружному елементу, буде пропорційним сталому прискоренню \ddot{s}_p платформи.

Бортові тахометричні датчики, що встановлені на колесах платформи (див. рис. 2.2) будуть вимірювати кутову швидкість коліс:

$$\omega = \dot{\varphi}, \quad (2.2)$$

де ω – кутова швидкість колеса, яка є похідною кута його повороту та, звичайно функцією $\omega = \omega(t)$ часу.

Зрозуміло, що прямолінійний поступальний рух колісної роботизованої платформи (див. рис. 2.2) здійснюється та підтримується за рахунок обертальних моментів M_e від тяглових електродвигунів її коліс. При прямолінійному русі колісна платформа (див. рис. 2.2) взаємодіє із зовнішнім середовищем, що її оточує її і таку взаємодію будемо схематизувати силою опору повітря F_D , а також моментом M_r тертя-кочення.

Електромеханічний момент (див. рис. 2.2) від тяглого електричного двигуна постійного струму визначатимемо наступним чином [18]:

$$M_e = B_e \cdot I_e, \quad (2.3)$$

де B_e – електромеханічний параметр;

I_e – електричний струм ротору електричного двигуна постійного струму.

Момент M_r тертя-кочення (див. рис. 2.2) спрямований протилежно кутовій швидкості коліс платформи та визначається у вигляді (1.10), (1.11) з урахуванням даних табл. 1.1. Вважаємо далі, що вага колісної платформи рівномірно розподілена між її колесами, тобто коефіцієнт w_k із формули (1.8), що визначає частину ваги, яка діє на окреме колесо визначається так:

$$w_k = 1/6. \quad (2.4)$$

Зрозуміло, що у випадку горизонтальної дороги кут $\alpha = 0$ (див. рис. 1.4).

Сила F_D опору повітря (див. рис. 2.2), що спрямована протилежно швидкості поступального руху платформи та визначається у вигляді (1.12) з урахуванням даних табл. 1.2.

Тягловий електродвигун постійного струму, що приводить до руху досліджувану колісну платформу (див. рис. 2.2), сам є досить складно технічною системою. В той же час, для моделювання динаміки колісної платформи не є необхідним враховувати усі особливості такої досить складної конструкції тяглових електродвигунів, а достатньо насправді лише визначати рушійний електромеханічний момент, що створюється такими двигунами. Відповідно до виразу (2.3), для визначення обертального електромеханічного моменту від електродвигуна постійного струму насправді необхідно мати значення B_e електромеханічного параметру, в якому інтегрально представлені особливості конструкції електродвигуна, та силу струму I_e в обмотці.

Для визначення сили струму використовуємо спрощену еквіваленту електричну схему ротору електричного двигуна постійного струму, що показана на рис. 2.3. Відповідно цій схемі (рис. 2.3) обмотку ротору електричного двигуна постійного струму представляємо у вигляді послідовно з'єданого індуктивного та активного опорів, що мають індуктивність L_e та активний опір R_e завдяки напрузі U_e від джерела зовнішнього живлення в обмотці ротору утворюється електричний струм I_e , завдяки якому утворюється обертальний момент (2.3), і ротор починає обертатися із кутовою швидкістю ω в електромагнітному полі статора. Напрузі U_e від джерела зовнішнього живлення якому протидіє електрорушійна сила $B_e\omega$, що утворюється внаслідок обертання обмотки ротору із струмом I_e в електромагнітному полі статора.

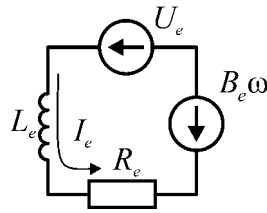


Рисунок 2.3 – Еквівалентна електрична схема ротору електричного двигуна постійного струму

Електромеханічний параметр B_e електричного двигуна постійного струму визначається наступним чином [18]:

$$B_e = \sqrt{\frac{R_e J}{\tau_e}}, \quad (2.5)$$

де J – момент інерції ротору електричного двигуна та приєднаної до ротору механічної системи;

τ_e – часовий параметр, який є паспортною характеристикою електричного двигуна постійного струму.

Еквівалентна схема обмотки ротору електричного двигуна (див. рис. 2.3) та вираз (2.5) дозволяють визначати електричний струм та, завдяки цьому, обертальний момент (2.3).

Бортовий тахометричний датчик, що передбачений для визначення кутової швидкості коліс мобільної платформи (див. рис. 2.2), зазвичай, представляє собою електричний мікро-генератор постійного струму. Зрозуміло, що тахометричний датчик є досить складною системою, але для реалізації мети роботи цілком достатньо використати спрощену модель такого датчику.

Оскільки основним призначенням бортового тахометричного датчику є визначення кутової швидкості коліс мобільної платформи, то з урахуванням мети цього дослідження достатньо розглянути спрощену еквівалентну схему вимірювального ланцюга (рис. 2.4), що включає індуктивний опір L_T та

активний опір R_T обмотки ротору електричного мікродвигуна постійного струму датчику; джерело електрорушійної сили $B_T\omega$, де B_T – електромеханічний параметр електричного мікро-генератора постійного струму датчику, що утворюється внаслідок обертання ротору в електромагнітному полі статора електричного мікро-генератора постійного струму датчику; також вимірювальний ланцюг містить вимірювальний активний опір R_{TM} .

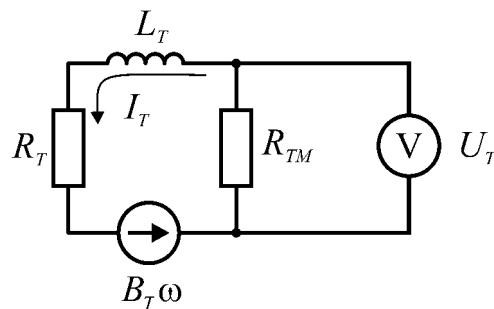


Рисунок 2.4 – Еквівалентна електрична схема тахометричного датчику на основі електричного мікро-генератора постійного струму

Завдяки обертанню із кутовою швидкістю ω ротору, мікро-генератор постійного струму тахометричного датчику буде створювати електричний струм I_T , який, в свою чергу, буде створювати відповідне падіння напруги U_T на вимірювальному активному опорі:

$$U_T = I_T \cdot R_{TM}. \quad (2.6)$$

Оскільки електричний струм ротору мікро-генератора $I_T = I_T(\omega)$, то з урахуванням співвідношення (2.6) матимемо за вимірюваною напругою U_T оцінювати величину кутової швидкості ω ротору, мікро-генератор постійного струму тахометричного датчику, яка дорівнює кутової швидкості колеса мобільної платформи (див. рис. 2.2). Електромеханічний параметр B_T електри-

чного мікро-генератору постійного струму визначається наступним чином [18]:

$$B_T = \sqrt{\frac{R_T J_T}{\tau_T}}, \quad (2.7)$$

де J_T – момент інерції ротору електричного мікро-генератору;

τ_T – часовий параметр, який є паспортною характеристикою електричного мікро-генератору постійного струму.

Бортовий акселерометр інерційного типу, що передбачений для визначення прискорення прямолінійного руху мобільної колісної платформи (див. рис. 2.2), зазвичай, представляє собою електромеханічний або мехатронний прилад [19]. Дійсно, переміщення інерційної маси акселерометру перетворюється у вимірювану напругу відповідного електричного сигналу, саме яка далі безпосередньо вимірюється для оцінки переміщення інерційного елемента та відповідно прискорення колісної платформи.

На рис. 2.5 представлено еквівалентну електричну схему вимірювальної частини акселерометру, в якій оцінка переміщення інерційної маси здійснюється за зміною опору спеціального резистору R_a перемінного опору. В такій схемі передбачене джерело живлення із постійною напругою U_a , що утворює струм I_a , а вимірюється напруга U_{aM} , яка залежить від переміщення s_a інерційної маси (рис. 2.5):

$$U_{aM} = I_a R_a \left(\frac{1}{2} + \frac{s_a}{l_a} \right). \quad (2.8)$$

де R_a та l_a – повний активний опір та загальна довжина резистору змінного опору.

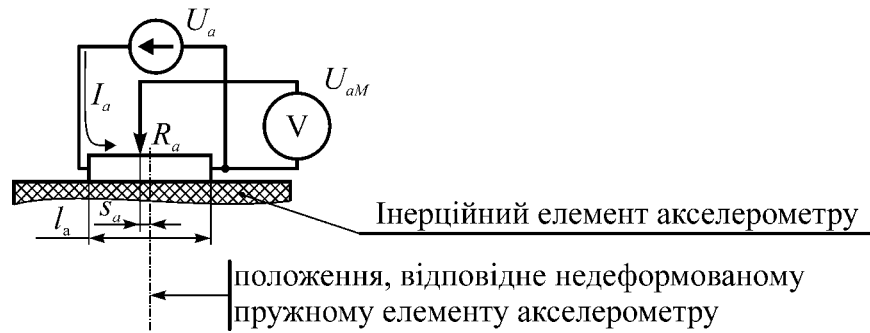


Рисунок 2.5 – Еквівалентна електрична схема вимірювальної частини інерційного акселерометру

2.2 Математична модель колісної платформи та вимірювальних пристроїв

Теоретичною основою моделей автоматизованого визначення взаємодії із зовнішнім середовищем є рівняння динаміки досліджуваної колісної електромеханічної платформи та її бортових вимірювальних пристроїв.

Розглядатимемо насамперед теоретичні основи математичного моделювання голономних механічних систем з використанням рівнянь Лагранжа 2-го роду та електромеханічних аналогій відповідно роботі [18].

Можливості оцінки взаємодії із зовнішнім середовищем електромеханічних колісних платформ на основі вимірювань бортовими датчиками визначаються математичними моделями, які використовуються для обробки сигналів вимірювань. Отже, побудова математичних моделей є найбільш принциповою проблемою для проведення досліджень щодо оцінки взаємодії із зовнішнім середовищем електромеханічних колісних платформ за допомогою встановлених бортових датчиків. Необхідно зазначити, що математичні моделі, необхідні для моделювання та обробки вимірюваних електричних сигналів від бортових датчиків, встановлених на колісній електромеханічній платформі, повинні забезпечувати поєднане врахування механічних та електричних процесів, що відбуваються в колісній платформі, а також електричні процеси у

встановлених бортових датчиках і в електронних частинах їх вимірювальних систем.

Добре відомі [18, 20, 21] електромеханічні аналогії, що передбачають використання рівняння Лагранжа 2-го роду для узагальненого представлення математичних моделей головних електромеханічних систем. Хоча такі підходи використовуються для дослідження електромеханічних систем, як, наприклад, у [20, 21], але ми не можемо знайти широкого використання [18] таких підходів для моделювання пов'язаних досліджуваних електромеханічних об'єктів та їхніх вимірювальних систем, які є також електромеханічними, як колісні електромеханічні платформи та встановлені на них датчики з відповідними електронними приладами допоміжної вимірювальної системи. Отже, електромеханічну аналогію для колісної електромеханічної платформи з встановленими бортовими датчиками та відповідними вимірювальними електронними пристроями можна представити через функцію Лагранжа (кінетичний потенціал), що представляє кінетичну та потенційну енергії, функції Релея, що представляють лінійні сили демпфірування, а також віртуальну роботу, що представляє інші механічні сили та моменти, а також електричні напруги живлення:

$$L = \sum_k \frac{1}{2} m_k \dot{s}_k^2 + \sum_k \frac{1}{2} J_k \dot{\varphi}_k^2 + \sum_k \frac{1}{2} L_k \dot{y}_k^2 - \sum_k \frac{1}{2} C_k s_k^2 - \sum_k \frac{1}{2} D_k y_k^2, \quad (2.9)$$

$$R = \sum_k \frac{1}{2} b_k \dot{s}_k^2 + \sum_k \frac{1}{2} \beta_k \dot{\varphi}_k^2 + \sum_k \frac{1}{2} R_k \dot{y}_k^2, \quad (2.10)$$

$$\delta A = \sum_k F_k \delta s_k + \sum_k M_k \delta \varphi_k + \sum_k U_k \delta y_k, \quad (2.11)$$

де L – функція Лагранжа; m_k і s_k – маси та природні координати поступальних рухомих елементів; J_k і φ_k – моменти інерції та кути повороту елементів, що обертаються; L_k і y_k – індуктивності та заряди в електричних колах; C_k – жорсткість лінійних пружних елементів; D_k – зворотні значення

ємностей електричних конденсаторів; R – функція Релея; b_k і β_k – параметри лінійного в'язкого гасіння поступального та обертального рухів; R_k – електричні опори; δA – віртуальна робота сил, системи, що не є потенціальними та лінійними дисипативними; F_k і M_k – механічні сили та пари; U_k – подані електричні напруги.

Для головних систем зі скінченними ступенями свободи можна ввести скінченну кількість узагальнених координат [20], що дозволить визначити всі трансляційні координати s_k , всі кути повороту φ_k та всі електричні заряди y_k , що беруть участь у співвідношеннях (2.9)–(2.11):

$$s_k = s_k(t, q_1, q_2, \dots, q_n), \quad \varphi_k = \varphi_k(t, q_1, q_2, \dots, q_n), \quad y_k = y_k(t, q_1, q_2, \dots, q_n), \quad (2.12)$$

де q_1, q_2, \dots, q_n – узагальнені координати;

n – число ступенів свободи.

Співвідношення (2.11) можна побудувати з рівнянь механічного зв'язку, а також із еквівалентних співвідношень електричних ланцюгів (правила Кірхгофа). Завдяки співвідношенням (2.12) функцію Лагранжа (2.9), функцію Релея (2.10) і віртуальну роботу (2.11) можна представити у вигляді функцій часу t , узагальнених координат q_1, q_2, \dots, q_n та узагальнених швидкостей $\dot{q}_1, \dot{q}_2, \dots, \dot{q}_n$ [20]:

$$L = L(t, q_1, q_2, \dots, q_n, \dot{q}_1, \dot{q}_2, \dots, \dot{q}_n), \quad R = R(t, q_1, q_2, \dots, q_n, \dot{q}_1, \dot{q}_2, \dots, \dot{q}_n),$$

$$\delta A = \sum_{k=1}^n Q_k(t, q_1, q_2, \dots, q_n, \dot{q}_1, \dot{q}_2, \dots, \dot{q}_n) \delta q_k, \quad (2.13)$$

де $Q_k(t, q_1, q_2, \dots, q_n, \dot{q}_1, \dot{q}_2, \dots, \dot{q}_n)$ – узагальнені сили.

Маючи співвідношення (2.13), математичну модель колісної електромеханічної платформи з встановленими на борту датчиками та відповідними

електронними вимірювальними приладами можна в загальному вигляді представити у вигляді рівнянь Лагранжа 2-го роду [20] з початковими умовами таким чином:

$$\frac{d}{dt} \frac{\partial L}{\partial \dot{q}_k} - \frac{\partial L}{\partial q_k} = -\frac{\partial R}{\partial \dot{q}_k} + Q_k, \quad q_k(t_0) = q_k^{(0)}, \quad \dot{q}_k(t_0) = \dot{q}_k^{(0)}, \quad (2.14)$$

де $k = 1, 2, \dots, n$; $q_k^{(0)}$ і $\dot{q}_k^{(0)}$ – задані значення узагальнених координат та узагальнених швидкостей у початковий момент часу $t = t_0$.

Враховуючи співвідношення (2.12), узагальнені координати в рівняннях (2.14) включають значення, що мають як механічне, так і електричне значення, включаючи вимірювані електричні сигнали. Таким чином, рівняння (2.14) дозволяють побудувати математичні моделі колісної платформи з встановленими бортовими датчиками як для моделювання так і для обробки вимірних електричних сигналів датчиків. Слід зазначити, що колісна платформа в загальному випадку є неголономною системою, тому рівняння Лагранжа 2-го роду не будуть застосовні принаймні для побудови математичних моделей механічних деталей. У той же час велика кількість окремих режимів руху дозволяє розглядати колісну платформу як голономну систему і представляти їх математичні моделі за допомогою рівнянь Лагранжа (2.14). Одним із принципових результатів цього дослідження є узагальнені підходи до моделювання та обробки вимірюваних електричних сигналів від бортових датчиків, встановлених на електромеханічних колісних платформах, і можна обмежитися розглядом лише голономних систем, але з урахуванням колісної електромеханічної платформи як неголономної системи необхідно додатково досліджувати окремо через притаманні їй значні труднощі.

Розглядатимемо далі якого саме вигляду набудуть загальні підходи, при дослідженні мобільної колісної платформи, показаної вище на рис. 2.2 в межах сформульованих в підрозд. 2.1 припущень та схематизації.

Вирази (2.9)–(2.11) кінетичного потенціалу, функції Релея та віртуальної роботи з урахуванням припущень щодо рухів складових колісної платформи (див. п.п. 2.1.1.1), еквівалентної схеми ротору тяглових електродвигунів (див. рис. 2.3), тахометрів (див. рис. 2.4), вимірювальної частини акселерометру (див. рис. 2.5) набуде наступного вигляду:

$$L = \frac{1}{2}(m - m_a) \dot{s}_p^2 + 6 \frac{1}{2} J_k \dot{\varphi}^2 + \frac{1}{2} m_a (\dot{s}_p - \dot{s}_a)^2 + 6 \frac{1}{2} L_e I_e^2 + 6 \frac{1}{2} L_T I_T^2 - \frac{1}{2} c_a s_p^2, \quad (2.15)$$

$$R = \frac{1}{2} b_a \dot{s}_a^2 + 6 \frac{1}{2} R_e I_e^2 + 6 \frac{1}{2} (R_T + R_{TM}) I_T^2 + \frac{1}{2} R_a I_a^2, \quad (2.16)$$

$$\delta A = -F_D \delta s_a + 6(M_e - M_r) \delta \varphi + (U_e - B_e \dot{\varphi}) \delta I_e + B_T \dot{\varphi} \delta I_T + U_a \delta I_a, \quad (2.17)$$

де m та m_a – повна маса платформи та маса інерційного елементу її бортового акселерометра;

J_k – сумарний момент інерції колеса, ротору тяглового електродвигуна та ротору тахометричного датчику;

c_a та b_a – жорсткість пружного та в'язкості дисипативного елементів акселерометру.

Відповідно загальному підходу механіки голономних систем введемо до розгляду узагальнені координати та з урахуванням співвідношення (1.5) і рівняння зв'язку (2.1) запишемо вирази (2.12), відповідні досліджуваній задачі про рух колісної платформи (див. рис. 2.2):

$$\varphi = q_1, s_p = r_s q_1, s_a = q_2, I_e = \dot{q}_3, I_a = \dot{q}_4, I_T = \dot{q}_5, \quad (2.18)$$

де q_1, q_2, q_3, q_4, q_5 – узагальнені координати.

Завдяки співвідношенням (2.18) представимо вирази (2.15)–(2.17) у вигляді, відповідному загальним співвідношенням (2.13):

$$L = \frac{1}{2} J \dot{q}_1^2 - m_a r_s \dot{q}_1 \dot{q}_2 + \frac{1}{2} m_a \dot{q}_2^2 + 6 \frac{1}{2} L_c \dot{q}_3^2 + 6 \frac{1}{2} L_T \dot{q}_5^2 - \frac{1}{2} c_a q_2^2, \quad (2.19)$$

$$R = \frac{1}{2} b_a \dot{q}_2^2 + 6 \frac{1}{2} R_c \dot{q}_3^2 + \frac{1}{2} R_a \dot{q}_4^2 + 6 \frac{1}{2} (R_T + R_{TM}) \dot{q}_5^2, \quad (2.20)$$

$$\delta A = (-F_D r_s + 6(M_c - M_r)) \delta q_1 + (U_c - B_c \dot{q}_1) \delta q_3 + U_a \delta q_4 + B_T \dot{q}_1 \delta q_5, \quad (2.21)$$

де $J = m r_s^2 + 6J_k$ – момент інерції колісної платформи приведений до куту повороту її коліс.

За допомогою рівнянь Лагранжа 2-го роду (2.14) з використанням виразів (2.19)–(2.21) та урахуванням визначень (1.8)–(1.11), (1.12), (2.3), (2.4) та узагальнених координат (2.12) одержимо диференціальні рівняння математичної моделі мобільної колісної електромеханічної роботизованої платформи (див. рис. 2.2) у наступному вигляді:

$$J \ddot{q}_1 - m_a r_s \ddot{q}_2 = \frac{1}{2} (F + |F|), \quad (2.22)$$

$$-m_a r_s \ddot{q}_1 + m_a \ddot{q}_2 + c_a \dot{q}_2 = -b_a \dot{q}_2, \quad (2.23)$$

$$L_c \ddot{q}_3 = -B_c \dot{q}_1 - R_c \dot{q}_3 + U_c, \quad (2.24)$$

$$0 = -R_a \dot{q}_4 + U_a, \quad (2.25)$$

$$L_T \ddot{q}_5 = B_T \dot{q}_1 - (R_T + R_{TM}) \dot{q}_5, \quad (2.26)$$

де $F = 6B_c \dot{q}_3 - \left(c_D \frac{\rho}{2} A_f r_s^3 \dot{q}_1^2 + f_r mg \right) \text{sign}(\dot{q}_1)$ – величина, що спеціально введена для урахування нерівності (1.10) щодо величини моменту тертя кочення.

Слід відзначити, що введені у вигляді (2.18) узагальнені координати, відносно яких записані диференціальні рівняння (2.22)–(2.26), мають різноманітний фізичний сенс таким чином, що одна частина із них є суто механічними (q_1 та q_2), та представляє лінійні координати складових платформи, а друга частина (q_3 , q_4 та q_5) є електричними зарядами, що представляють відповідні електричні струми у ланцюгах двигунів, тахометрів та вимірювальної частини

акселерометру. Різний фізичний сенс узагальнених координат є характерним у тому числі й для електромеханічних систем.

Зрозуміло, що звичайні диференціальні рівняння (2.22)–(2.26), які представляють математичну модель мобільної роботизованої колісної платформи (див. рис. 2.2), необхідно розглядати з урахуванням початкових умов, що визначають стан досліджуваної платформи у початковий момент часу $t = 0$. Вибір таких початкових умов істотно визначається метою дослідження. Таким чином, можна, наприклад, розглядати проблему плавного зрушення з місця колісної платформи, проблеми плавного та екстреного гальмування колісної платформи, проблему щодо зміни режиму руху колісної платформи для прискорення або уповільнення її руху; оцінку механічної взаємодії колісної платформи із зовнішнім середовищем можна розглядати для перелічених проблем, відповідних різним режимам руху платформи. Далі розглядатимемо простіший випадок, що відповідає зрушенню з нерухомого стану колісної платформи, який відповідає нульовим початковим умовам:

$$\begin{aligned} q_1(0) = 0, \quad \dot{q}_1(0) = 0, \quad q_2(0) = 0, \quad \dot{q}_2(0) = 0, \quad q_3(0) = 0, \quad \dot{q}_3(0) = 0, \\ q_4(0) = 0, \quad q_5(0) = 0, \quad \dot{q}_5(0) = 0. \end{aligned} \quad (2.27)$$

Необхідно зазначити, що кількість початкових умов (2.27) є узгодженою із порядком диференціальних рівнянь (2.22)–(2.26). Отже математична модель колісної платформи з бортовими вимірювальними пристроями – акселерометром та тахометрами, відповідна режиму зрушення платформи з місця, одержано у вигляді звичайних диференціальних рівнянь (2.2)–(2.26) з початковими умовами (2.27) та співвідношень (2.6), (2.8).

2.3 Оцінка механічної взаємодії платформи із зовнішнім середовищем

Механічна взаємодія із зовнішнім середовищем характеризується відповідними параметрами, а саме: введеним у виразі (1.5) ефективним радіусом кочення r_s , введеним у виразі (1.10) коефіцієнтом тертя-кочення f_r , а також коефіцієнтом b_D пропорційності між силою аеродинамічного опору та квадратом швидкості, який відповідно формулі (1.12) визначається наступним чином:

$$b_D = c_D \frac{\rho}{2} A_f. \quad (2.28)$$

Усі ці перелічені параметри неможливо визначати шляхом безпосереднього вимірювання їхніх значень, тому для їхнього визначення слід запропонувати спеціальні методи математичної обробки вимірюваних безпосередньо сигналів датчиків бортової вимірювальної системи. В досліджуваній колісній платформі (див. рис. 2.2) передбачені бортовий акселерометр для визначення прискорення поступального руху платформи та тахометричні датчики для визначення кутових швидкостей коліс. Таким чином, бортова вимірювальна система колісної платформи (див. рис. 2.2) надає можливість вимірювати напруження (2.6) тахометричних датчиків та напруження (2.8) сигналу з акселерометру, які вважаємо відомими функціями часу:

$$U_T = U_T(t), U_{aM} = U_{aM}(t). \quad (2.29)$$

Зрозуміло, що функції часу (2.29) насправді представлені у вигляді набору значень через проміжки часу довжиною з крок дискретизації сигналів, що забезпечується приладами бортової вимірювальної системи; вважаємо, що крок дискретизації сигналів (2.29) є досить малим. Отже, задача полягає в тому, щоб за результатами вимірювань (2.29) одержати оцінки введеного у ви-

разі (1.5) ефективного радіусу кочення r_s , введеного у виразі (1.10) коефіцієнту тертя-кочення f_r , а також введеного у виразі (2.28) коефіцієнту b_D пропорційності між силою (1.12) аеродинамічного опору та квадратом швидкості колісної платформи, які характеризують механічну взаємодію досліджуваної колісної платформи із навколишнім середовищем. Слід розуміти, що оцінка характеристик механічної взаємодії колісної платформи із навколишнім середовищем за наявними результатами вимірювань потребує використання спеціально створених математичних моделей. Загальні підходи щодо побудови таких моделей обговорювалися у роботі [18], в якій зазначено, що основою таких моделей можуть бути рівняння динаміки колісної платформи та бортових вимірювальних пристроїв, тобто рівняння (2.22)–(2.26).

Розглянемо вимірювання кутової швидкості коліс за допомогою тахометричного датчику. Основою такого вимірювання є співвідношення (2.6) та диференціальне рівняння (2.26). Дійсно, за допомогою рівняння (2.6) можемо визначити силу струму в ланцюзі тахометричного датчику:

$$I_T = \frac{U_T}{R_{TM}}. \quad (2.30)$$

З урахуванням визначень (2.18) узагальнених координат маємо, що кутова швидкість обертання коліс платформи $\omega = \dot{q}_1$ та сила струму в ланцюзі тахометричного датчику $I_T = \dot{q}_5$, і завдяки цьому можемо представити диференціальне рівняння (2.26) у вигляді:

$$R_{TM} B_T \omega = L_T \dot{U}_T + (R_T + R_{TM}) U_T. \quad (2.31)$$

Співвідношення (2.31) представляє собою математичну модель, яку можна використовувати для обробки результатів вимірювань тахометричного

датчику, та яку можна представити за допомогою передаточної функції наступного вигляду (рис. 2.6):

$$W_T(s) = \frac{L_T s + (R_T + R_{TM})}{R_{TM} B_T}, \quad (2.32)$$

де s – змінна перетворення Лапласу функцій $\omega = \omega(t)$ та $U_T = U_T(t)$ часу кутової швидкості та виміряних напруг.

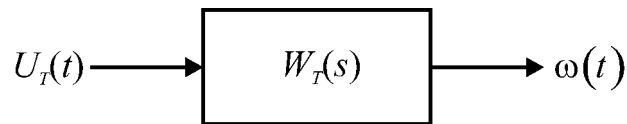


Рисунок 2.6 – Обробка вимірювань тахометричного датчику

Розглянемо вимірювання прискорення та визначення швидкості та координати колісної платформи за допомогою бортового акселерометру (див. рис. 2.2). Основою такого вимірювання є співвідношення (2.8) та диференціальні рівняння (2.23), (2.25). Дійсно, за допомогою співвідношення (2.8) можемо визначити переміщення інерційного елемента акселерометру:

$$s_a = l_a \left(\frac{U_{aM}}{I_a R_a} - \frac{1}{2} \right). \quad (2.33)$$

З урахуванням визначень (2.18) узагальнених координат маємо, що сила струму у вимірювальному ланцюзі акселерометру $I_a = \dot{q}_4$, і, завдяки цьому, з диференціального рівняння (2.5) можемо записати $I_a = U_a / R_a$, та з урахуванням цього співвідношення (2.33) набуде вигляду:

$$s_a = l_a \left(\frac{U_{aM}}{U_a} - \frac{1}{2} \right). \quad (2.34)$$

З урахуванням співвідношення (2.34), та визначень (2.18) узагальнених координат, з яких маємо переміщення інерційного елемента акселерометру $s_a = q_2$, лінійну координату колісної платформи $s_p = r_s q_1$ і силу струму в ланцюзі тахометричного датчику $I_a = \dot{q}_4$, представимо диференціальне рівняння (2.3) наступним чином:

$$m_a \ddot{s}_p = m_a \frac{l_a}{U_a} \ddot{U}_{aM} + b_a \frac{l_a}{U_a} \dot{U}_{aM} + c_a \frac{l_a}{U_a} U_{aM} - c_a \frac{l_a}{2}. \quad (2.35)$$

За допомогою диференціального рівняння (2.35) маємо можливість за результатом вимірювання (2.29) визначати лінійну координату s_p колісної платформи (див. рис. 2.2). Зрозуміло, що звичайне диференціальне рівняння (2.35) другого порядку слід розглядати із двома початковими умовами, які визначають координату s_p та швидкість \dot{s}_p колісної платформи у початковий момент часу; такі початкові умови обиратимемо відповідними початковим умовам (2.27) динаміки колісної платформи:

$$s_p(0) = 0, \quad \dot{s}_p(0) = 0. \quad (2.36)$$

Таким чином, обробка результатів вимірювань (2.29) щодо визначення руху колісної платформи за допомогою бортового акселерометру зводиться до розв'язування задачі Коші (2.35), (2.36).

Для перетворення диференціального рівняння (2.35) до більш зручного для подальшого використання вигляду введемо до розгляду наступну проміжну змінну:

$$U_{aT} = \frac{U_{aM}}{U_a} - \frac{1}{2}, \quad (2.37)$$

де U_{aT} – трансформований сигнал вимірювання з бортового акселерометру.

Завдяки використанню трансформованого сигналу (2.37) представимо диференціальне рівняння (2.35) у більш зручному з точки зору теорії автоматичного управління вигляді:

$$\frac{m_a}{l_a} \ddot{s}_p = m_a \ddot{U}_{aT} + b_a \dot{U}_{aT} + c_a U_{aT}. \quad (2.38)$$

Зрозуміло, що за допомогою диференціального рівняння (2.38) з урахуванням початкових умов (2.36) можемо знайти лінійне прискорення, лінійну швидкість та лінійну координату, які визначають поступальний рух досліджуваної колісної платформи (див. рис. 2.2):

$$\ddot{s}_p = \frac{l_a}{m_a} (m_a \ddot{U}_{aT} + b_a \dot{U}_{aT} + c_a U_{aT}), \quad (2.39)$$

$$\dot{s}_p = \frac{l_a}{m_a} \left(m_a \dot{U}_{aT} + b_a U_{aT} + c_a \int_0^t U_{aT} dt \right), \quad (2.40)$$

$$s_p = \frac{l_a}{m_a} \left(m_a U_{aT} + b_a \int_0^t U_{aT} dt + c_a \int_0^t \left(\int_0^t U_{aT}(\tau) d\tau \right) dt \right). \quad (2.41)$$

Слід особливо зазначити, що обробку результатів вимірювань акселерометру з використанням трансформованого сигналу (2.37) та формул (2.39)–(2.41) можна представити за допомогою поняття про передаточну функцію (рис. 2.7). На рис. 2.7 представлені аналогові пристрої, що реалізують перетворення (2.37) вимірюного сигналу, а також бачимо передаточні функції, що реалізують перетворення (2.39 – 2.41):

$$W_{a2}(s) = \frac{m_a s^2 + b_a s + c_a}{m_a / l_a}, \quad (2.42)$$

$$W_{a1}(s) = \frac{m_a s^2 + b_a s + c_a}{(m_a / l_a) s}, \quad (2.43)$$

$$W_{a0}(s) = \frac{m_a s^2 + b_a s + c_a}{(m_a / l_a) s^2}. \quad (2.44)$$

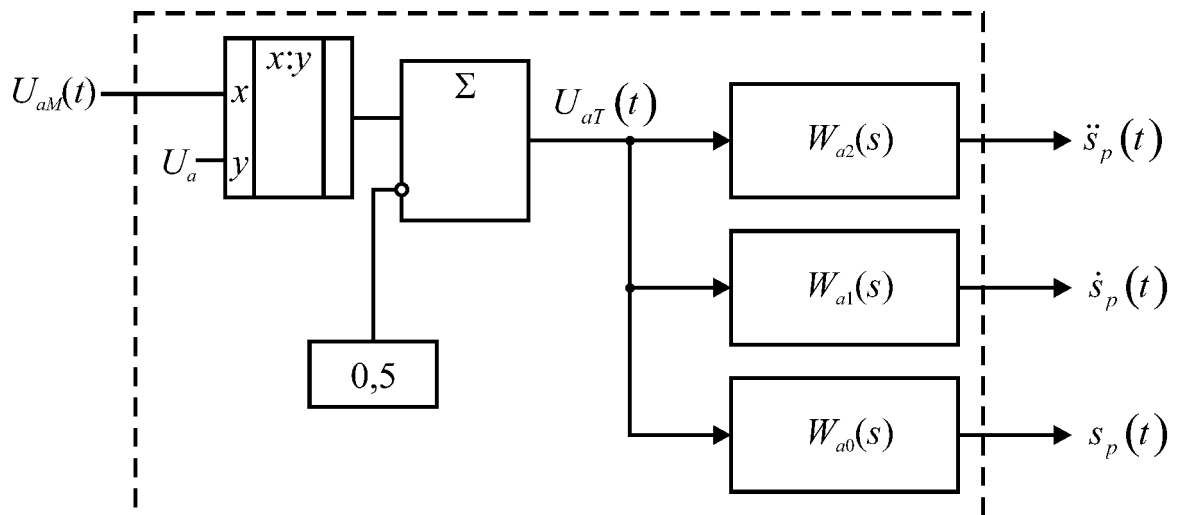


Рисунок 2.7 – Обробка вимірювань бортового акселерометру

Розглянемо визначення ефективного радіусу кочення (1.5) коліс платформи, який характеризує взаємодію коліс платформи із ґрунтом за результатами вимірювань (2.29). Для цього використовуватимемо співвідношення (2.1), яке дозволить записати:

$$r_s = \frac{\dot{s}_p}{\omega}, \quad (2.45)$$

де використане позначення $\omega = \dot{\phi}$ кутової швидкості коліс.

Кутову швидкість ω обертання коліс платформи для використання формули (2.45) можемо знайти за допомогою співвідношення (2.31) та одержимо наступний результат:

$$\omega = \frac{L_T}{B_T R_{TM}} \dot{U}_T + \frac{R_T + R_{TM}}{B_T R_{TM}} U_T. \quad (2.46)$$

Для визначення швидкості \dot{s}_p поступального руху колісної платформи, що необхідна для розрахунку за формулою (2.46), використовуватимемо співвідношення (2.40). Таким чином, співвідношення (2.45), (2.46) та (2.40) дозволяють оцінювати ефективний радіус кочення (1.5) коліс платформи:

$$r_s = \frac{\frac{l_a}{m_a} \left(m_a \dot{U}_{aT} + b_a U_{aT} + c_a \int_0^t U_{aT} dt \right)}{\frac{L_T}{B_T R_{TM}} \dot{U}_T + \frac{R_T + R_{TM}}{B_T R_{TM}} U_T}. \quad (2.47)$$

На рис. 2.8 показано функціональну схему системи автоматизованої оцінки ефективного радіусу кочення (1.5) коліс платформи на основі використання формули (2.47). Слід зазначити, що зв'язок (2.47) між результатами вимірювань (2.29) та результатом ефективного радіусу кочення (1.5) коліс платформи є суттєво нелінійним і досить складним, тому його неможливо представити у вигляді однієї передаточної функції. Крім цього, зрозуміло, що використання формули (2.47) має суттєве обмеження і можливе лише при виконанні наступної умови

$$\frac{L_T}{B_T R_{TM}} \dot{U}_T + \frac{R_T + R_{TM}}{B_T R_{TM}} U_T \neq 0. \quad (2.48)$$

Отже, для забезпечення нормальної роботи системи автоматизованої оцінки ефективного радіусу кочення (1.5) коліс платформи на основі використання формули (2.47) слід передбачити перевірку виконання умови (2.48), щоб уникнути ділення на нуль, а така перевірка передбачає сумісне використання аналогових (вимірювані сигнали) та цифрових електронних приладів.

Зрозуміло, що означені обставини певним чином ускладнюють апаратну частину системи автоматизованої оцінки ефективного радіусу кочення (1.5) коліс платформи, але така схема насправді містить лише типові елементи аналогової та цифрової техніки.

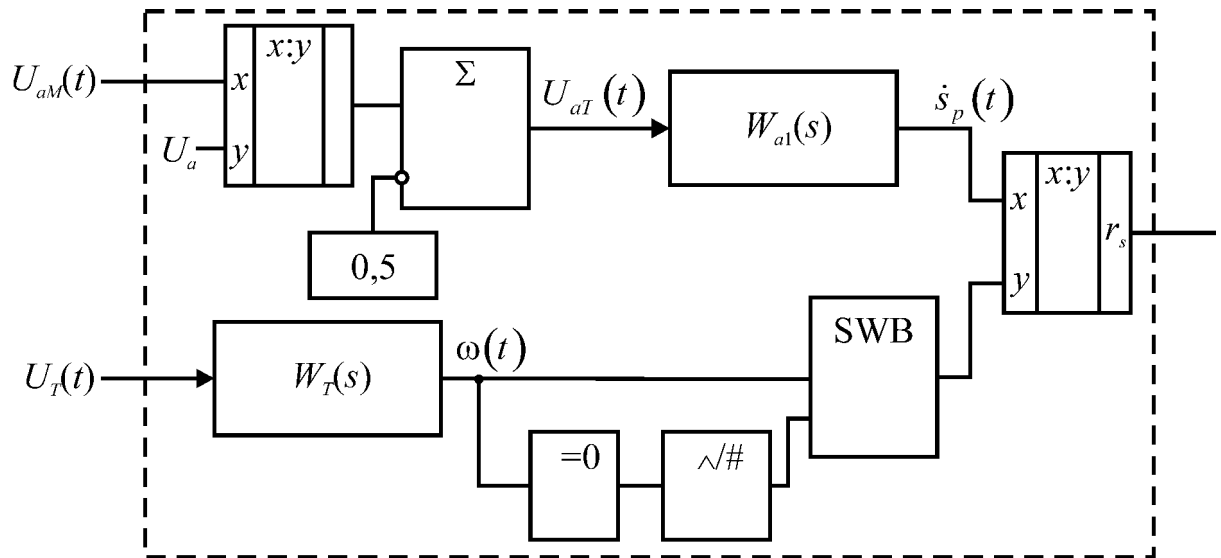


Рисунок 2.8 – Схема системи для автоматизованої оцінки ефективного радіусу кочення коліс платформи

Розглянемо визначення за результатами вимірювань (2.29) введеного у виразі (1.10) коефіцієнту тертя-кочення f_r , а також введеного у виразі (2.28) коефіцієнту b_D пропорційності між силою (1.12) аеродинамічного опору та квадратом швидкості колісної платформ, які характеризують механічну взаємодію досліджуваної колісної платформи із навколишнім середовищем. Для цього використовуватимемо диференціальне рівняння (2.22), яке розглядатимемо для випадку $\dot{q}_1 > 0$, $F > 0$, та з урахуванням виразу (2.28) запишемо у вигляді:

$$\left(m r_s^2 + 6 J_k \right) \ddot{q}_1 - m_a r_s \ddot{q}_2 = 6 B_c \dot{q}_3 - \left(b_D r_s^3 \dot{q}_1^2 + f_r m g \right). \quad (2.49)$$

Для подальшого використання співвідношення (2.49) в ньому слід врахувати визначення узагальнених координат (2.18), відповідно до яких кутова швидкість обертання коліс платформи $\omega = \dot{q}_1$, переміщення інерційного елемента акселерометру $s_a = q_2$, та сила струму в ланцюзі тяглових електродвигунів $I_e = \dot{q}_3$, а також співвідношення (2.34) та (2.46). В результаті співвідношення (2.49) набуде вигляду:

$$\begin{aligned} & \left(mr_s^2 + 6J_k \right) \left(\frac{L_T}{B_T R_{TM}} \ddot{U}_T + \frac{R_T + R_{TM}}{B_T R_{TM}} \dot{U}_T \right) - m_a r_s \frac{l_a}{U_a} \ddot{U}_{aM} = \\ & = 6B_e I_e - \left(b_D r_s^3 \left(\frac{L_T}{B_T R_{TM}} \dot{U}_T + \frac{R_T + R_{TM}}{B_T R_{TM}} U_T \right)^2 + f_r mg \right). \end{aligned} \quad (2.50)$$

Представимо співвідношення (2.50) у більш зручному вигляді, в якому ліва частина має містити шукані невідомі, а права частина – відомі складові. При цьому вважаємо, що сила струму в ланцюгах тяглових електродвигунів є відомою, оскільки вона може бути безпосередньо виміряна за допомогою амперметра. Також вважаємо, що ефективний радіус r_s кочення коліс платформи є заздалегідь визначеним за допомогою формули (2.47) (див. рис. 2.8); масу m платформи також вважаємо відомою. Отже, з урахуванням означених обставин співвідношення (2.50) набуде наступного вигляду:

$$\begin{aligned} & b_D r_s^3 \left(\frac{L_T}{B_T R_{TM}} \dot{U}_T + \frac{R_T + R_{TM}}{B_T R_{TM}} U_T \right)^2 + f_r mg = \\ & = 6B_e I_e + m_a r_s \frac{l_a}{U_a} \ddot{U}_{aM} - \left(mr_s^2 + 6J_k \right) \left(\frac{L_T}{B_T R_{TM}} \ddot{U}_T + \frac{R_T + R_{TM}}{B_T R_{TM}} \dot{U}_T \right). \end{aligned} \quad (2.51)$$

Таким чином, відповідно співвідношенню (2.51) маємо, що задача визначення за результатами вимірювань (2.29) введеного у виразі (1.10) коефіцієнту тертя-кочення f_r , а також введеного у виразі (2.28) коефіцієнту b_D

пропорційності між силою (1.12) аеродинамічного опору та квадратом швидкості колісної платформи, зводиться до розв'язування відповідної задачі ідентифікації [22–23], причому така задача має розглядатися для нелінійної системи, що значно ускладнює її розв'язування. Розв'язування такої задачі можна здійснювати, наприклад, методом найменших квадратів. Окремо слід підкреслити, що розв'язування задачі ідентифікації на основі співвідношення (2.51) суттєво ускладнюється використанням попередньо наближено одержаних результатів щодо визначення ефективний радіус r_s кочення коліс платформи за допомогою формули (2.47) (див. рис. 2.8): зрозуміло, що похибки такого визначення можуть мати досить помітний вплив на результати розв'язування задачі ідентифікації щодо визначення коефіцієнтів f_r та b_D з використанням співвідношення (2.51). Також слід зазначити про необхідність визначення першої та другої похідних вимірюваних сигналів, що містяться у співвідношенні (2.51), оскільки такі визначення, зрозуміло, будуть здійснюватися наближено і приводити до похибок результатів розв'язування задачі ідентифікації щодо визначення коефіцієнтів f_r та b_D з використанням співвідношення (2.51).

Як свідчить співвідношення (2.51) оцінка механічної взаємодії колісної платформи із навколишнім середовищем потребує даних про масу m колісної платформи, і основні складності полягають в тому, що маса платформи може змінюватися протягом її руху, наприклад за рахунок маси прийнятого вантажу. Цілком зрозуміло, що масу колісної платформи можна визначити на основі відомостей про сили ваги; слід зазначити також, що у загальному випадку маємо постійно змінюваний розподіл сил ваги між колесами платформи, що істотно впливає на умови взаємодії кожного із коліс із ґрунтом.

Запропонована модель мобільної колісної роботизованої платформи, що показана вище на рис. 2.2, не дозволяє розглядати визначення сил ваги та відповідно маси колісної платформи, отже вище було зроблено припущення, що маса m колісної платформи є заздалегідь відомою. Така схематизація є цілком

виправданою, оскільки оцінка сил ваги та їхнього розподілу серед коліс мобільної платформи є цілком окремою та самостійною задачею, розв'язування якої потребує окремої схематизації колісної платформи, що істотно відрізняється від розглянутої вище на рис. 2.2. Також слід підкреслити, що визначення сил ваги, їхнього розподілу серед коліс та маси досліджуваної колісної платформи здійснюється попереду окремо від оцінки проковзування її коліс, обробки результатів вимірювань бортового акселерометру та визначення коефіцієнтів f_r та b_D . Таким чином, відповідно щодо мети даного дослідження даному дослідженні дійсно можна не розглядати визначення сил ваги, їхнього розподілу серед коліс та маси досліджуваної колісної платформи, а вважати, що таке визначення вже було здійснено та данні щодо маси платформи та розподілу ваги між її колесами уявляти як результати такого визначення.

2.4 Висновки до розділу

Досліджено схематизацію колісної платформи та вимірювальних пристроїв, еквівалентну електричну схему ротору електричного двигуна постійного струму, еквівалентну електричну схему тахометричного датчику на основі електричного мікро-генератора постійного струму та еквівалентну електричну схему вимірювальної частини інерційного акселерометру.

Розглянуто математичні моделі колісної платформи та вимірювальних пристроїв із використанням рівняння Лагранжа 2-го роду для узагальненого представлення математичних моделей головних електромеханічних систем.

Виявлена оцінка механічної взаємодії платформи із зовнішнім середовищем, завдяки якій були представлені аналогові пристрої, що реалізують перетворення виміряного сигналу бортового акселерометру та схема системи для автоматизованої оцінки ефективного радіусу кочення коліс платформи.

3 ДОСЛІДЖЕННЯ МОЖЛИВОСТЕЙ ЩОДО АВТОМАТИЗОВАНОГО ВИ- ЗНАЧЕННЯ МЕХАНІЧНОЇ ВЗАЄМОДІЇ РОБОТИЗОВАНОЇ КОЛІСНОЇ ПЛАТФОРМИ ІЗ ЗОВНІШНІМ СЕРЕДОВИЩЕМ

Розробка системи автоматизованого визначення механічної взаємодії колісної платформи із зовнішнім середовищем є досить складною задачею, що вимагає впровадження комплексних заходів, які мають включати як безпосередні вимірювання і обробку аналогових сигналів, у тому числі їхнє перетворення до цифрового вигляду, так і обробку цифрованих сигналів з використанням математичних моделей. Зрозуміло, що функціонування за призначенням таких автоматизованих систем засновано на певних принципах, реалізація яких саме і забезпечує певні можливості щодо визначення механічної взаємодії колісної платформи із зовнішнім середовищем. Отже, дослідження можливостей щодо автоматизованого визначення механічної взаємодії колісної платформи із зовнішнім середовищем є досить важливою задачею, результати розв'язування якої мають істотний вплив на подальше проектування відповідних автоматизованих систем.

3.1 Моделювання динаміки зв'язаних рухів колісної платформи та чутливих елементів бортових вимірювальних пристроїв

Зрозуміло, що можливості безпосереднього вимірювання досліджуваних величин датчиками є досить обмеженими і більшість вимірювань фактично є непрямими. З урахуванням цієї обставини, розширення можливостей щодо оцінки механічної взаємодії колісної платформи із зовнішнім середовищем можливе, насамперед, за рахунок впровадження удосконалених математичних моделей для математичної обробки результатів вимірювань. Таким чином, дослідження можливостей щодо автоматизованого визначення механічної

взаємодії колісної платформи із зовнішнім середовищем зводиться частково до дослідження можливостей моделювання такої платформи та встановлених на ній вимірювальних приладах та пристроях.

Математична модель колісної платформи одержана у вигляді диференціальних рівнянь (2.22)–(2.26) і дозволяє визначати як характеристики її механічного руху, так і процеси в її бортових вимірювальних приладах та пристроях. Дійсно, узагальнені координати (2.18), які використовувалися при побудові диференціальних рівнянь, містять механічні за змістом параметри – кут повороту коліс платформи та координату положення інерційного елемента акселерометру, а також електричні за змістом параметри – заряди, що визначають сили струму у силових ланцюгах рушійних електродвигунів та вимірювальних ланцюгах бортових датчиків. Отже, визначення узагальнених координат (2.18) шляхом інтегрування диференціальних рівнянь (2.22)–(2.26) з урахуванням відповідних початкових умов, наприклад (2.27), дозволяє визначати координату, швидкість та прискорення поступального руху платформи, кут повороту, кутову швидкість та кутове прискорення обертання коліс платформи, а також положення інерційного елемента акселерометру, силу струму у силових ланцюгах рушійних електродвигунів та вимірювальних ланцюгах бортових датчиків.

Узагальнені координати (2.18) дозволяють також визначати вимірювані електричні напруги (2.29), що є досить важливим та буде використовуватися у подальшому для дослідження можливостей щодо автоматизованого визначення механічної взаємодії колісної платформи із зовнішнім середовищем.

З урахуванням співвідношення (2.6), що визначає вимірювану електричну напругу від тахометру, та визначень (2.18) узагальнених координат маємо, що сила струму у вимірювальному ланцюзі тахометру $I_T = \dot{q}_5$. Завдяки цьому можемо представити співвідношення (2.6) у наступному вигляді в термінах відповідної узагальненої координати (2.18):

$$U_T = \dot{q}_5 R_{TM}. \quad (3.1)$$

Одержаний результат (3.1) свідчить, що математична модель колісної платформи, що одержана у вигляді диференціальних рівнянь (2.22)–(2.26), дозволяє визначати також вимірювану електричну напругу бортових тахометричних датчиків цієї платформи.

З урахуванням співвідношення (2.8), що визначає вимірювану електричну напругу від акселерометру, та визначень (2.18) узагальнених координат маємо, що координата інерційного елементу акселерометру $s_a = q_2$ та сила струму у вимірювальному ланцюзі акселерометру $I_a = \dot{q}_4$. Завдяки цьому можемо представити співвідношення (2.6) у наступному вигляді в термінах відповідної узагальненої координати (2.18):

$$U_{aM} = \dot{q}_4 R_a \left(\frac{1}{2} + \frac{q_2}{l_a} \right). \quad (3.2)$$

Одержаний результат (3.2) свідчить, що математична модель колісної платформи, що одержана у вигляді диференціальних рівнянь (2.22)–(2.26), дозволяє визначати також вимірювану електричну напругу бортового акселерометру.

Диференціальні рівняння (2.22)–(2.26) математичної моделі колісної платформи із бортовими вимірювальними пристроями доцільно певним чином спростити, якщо є така можливість, оскільки це, зрозуміло, відповідним чином спростить і подальші дослідження.

Можливості певного спрощення диференціальних рівнянь (2.22)–(2.26) заснована на тому, що узагальнена координата q_4 міститься тільки в диференціальному рівнянні (2.25), а в інші рівняння не входить, що дозволяє розглянути рівняння (2.25) окремо від інших рівнянь:

$$R_a \dot{q}_4 = U_a, \quad (3.3)$$

Також слід врахувати, що насправді узагальнена координата q_4 не представляє практичного інтересу, оскільки відповідно виразу (3.2) для визначення вимірюваної електричної напруги акселерометру потрібна похідна \dot{q}_4 . Таким чином, завдяки окремому рівнянню (3.3) можемо представити вираз (3.2) у наступному вигляді:

$$U_{aM} = U_a \left(\frac{1}{2} + \frac{q_2}{l_a} \right). \quad (3.4)$$

Вираз (3.3) свідчить, що замість п'яти диференціальних рівнянь (2.22)–(2.26) достатньо розглядати чотири рівняння, а саме (2.22)–(2.24) та (2.26).

Комп'ютерне моделювання колісної платформи із її бортовими вимірювальними пристроями зводиться до інтегрування диференціальних рівнянь (2.22)–(2.24) і (2.26) із відповідною кількістю початкових умов (2.27), та визначення електричних напруг у вимірювальних ланцюгах за формулами (3.1) та (3.4). Відомо, що загальні обчислювальні методи інтегрування звичайних диференціальних рівнянь із початковими умовами пристосовані, насамперед, щодо розв'язування систем диференціальних рівнянь першого порядку, які записані в канонічній формі. Таким чином, використання обчислювальних методів потребує попереднього перетворення звичайних диференціальних рівнянь (2.22)–(2.24) і (2.26) другого порядку.

Щоб записати звичайні диференціальні рівняння (2.22)–(2.24) і (2.26) другого порядку в канонічному вигляді системи звичайних диференціальних рівнянь першого порядку, введемо до розгляду нові змінні:

$$x_1 = q_1, x_2 = q_2, x_3 = q_3, x_4 = q_5, x_5 = \dot{q}_1, x_6 = \dot{q}_2, x_7 = \dot{q}_3, x_8 = \dot{q}_5. \quad (3.5)$$

Завдяки новим змінним (3.5) диференціальні рівняння (2.22)–(2.24) та (2.26) набудуть наступного вигляду:

$$\left\{ \begin{array}{l} \dot{x}_1 = x_5, \\ \dot{x}_2 = x_6, \\ \dot{x}_3 = x_7, \\ \dot{x}_4 = x_8, \\ J\dot{x}_5 - m_a r_s \dot{x}_6 = \frac{1}{2}(F + |F|), \\ -m_a r_s \dot{x}_5 + m_a \dot{x}_6 = -c_a x_2 - b_a x_6, \\ \dot{x}_7 = -\frac{B_e}{L_e} x_5 - \frac{R_e}{L_e} x_7 + \frac{U_e}{L_e}, \\ \dot{x}_8 = \frac{B_T}{L_T} x_5 - \frac{R_T + R_{TM}}{L_T} x_8, \end{array} \right. \quad (3.6)$$

де $F = 6B_e x_7 - \left(c_D \frac{\rho}{2} A_f r_s^3 x_5^2 + f_r mg \right) \text{sign}(x_5)$.

Слід відзначити, що п'яте та шосте диференціальні рівняння (3.6) мають неканонічний вигляд, тому розглянемо далі ці рівняння окремо:

$$\left\{ \begin{array}{l} J\dot{x}_5 - m_a r_s \dot{x}_6 = \frac{1}{2}(F + |F|), \\ -m_a r_s \dot{x}_5 + m_a \dot{x}_6 = -c_a x_2 - b_a x_6. \end{array} \right. \quad (3.7)$$

Щоб записати диференціальні рівняння (3.7) у канонічному вигляді слід розглянути їх як систему лінійних алгебраїчних рівнянь відносно похідних \dot{x}_5 та \dot{x}_6 параметрів їхнього стану. Для спрощення подальших аналітичних перетворень запишемо таку систему лінійних алгебраїчних рівнянь у матрично-векторній формі:

$$\begin{pmatrix} J & -m_a r_s \\ -m_a r_s & m_a \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \dot{x}_5 \\ \dot{x}_6 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \frac{1}{2}(F + |F|) \\ -c_a x_2 - b_a x_6 \end{pmatrix}. \quad (3.8)$$

Щоб уникнути складних перетворень, далі розв'яжемо систему (3.8) лінійних алгебраїчних рівнянь відносно \dot{x}_5 та \dot{x}_6 за допомогою добре відомого в лінійній алгебрі правила Крамера:

$$\dot{x}_5 = \frac{\begin{vmatrix} \frac{1}{2}(F + |F|) & -m_a r_s \\ -c_a x_2 - b_a x_6 & m_a \end{vmatrix}}{\begin{vmatrix} J & -m_a r_s \\ -m_a r_s & m_a \end{vmatrix}}, \quad \dot{x}_6 = \frac{\begin{vmatrix} J & \frac{1}{2}(F + |F|) \\ -m_a r_s & -c_a x_2 - b_a x_6 \end{vmatrix}}{\begin{vmatrix} J & -m_a r_s \\ -m_a r_s & m_a \end{vmatrix}}. \quad (3.9)$$

Перетворення співвідношень (3.9) є відносно нескладними та зводяться до визначення відповідних детермінантів і дозволяють одержати необхідні вирази, які остаточно представимо у наступному вигляді:

$$\dot{x}_5 = \frac{\frac{1}{2}(F + |F|) - c_a r_s x_2 - b_a r_s x_6}{J - m_a r_s^2}, \quad (3.10)$$

$$\dot{x}_6 = \frac{r_s \frac{1}{2}(F + |F|) - (J/m_a) c_a x_2 - (J/m_a) b_a x_6}{J - m_a r_s^2}. \quad (3.11)$$

Співвідношення (3.10) та (3.11), зрозуміло, є наслідками диференціальних рівнянь (3.7), і навпаки, диференціальні рівняння (3.7) є наслідками співвідношень (3.10), (3.11). Ці обставини дозволяють замість диференціальних рівнянь (3.7) розглядати їх еквівалентне представлення (3.10), (3.11). Таким чином, маємо можливість замість п'ятого та шостого рівняння (3.6) розглядати рівняння (3.10), (3.11) та завдяки цьому представити систему звичайних диференціальних рівнянь першого порядку (3.6) у канонічному вигляді:

$$\left\{ \begin{array}{l} \dot{x}_1 = x_5, \\ \dot{x}_2 = x_6, \\ \dot{x}_3 = x_7, \\ \dot{x}_4 = x_8, \\ \dot{x}_5 = \frac{\frac{1}{2}(F + |F|) - c_a r_s x_2 - b_a r_s x_6}{J - m_a r_s^2}, \\ \dot{x}_6 = \frac{r_s \frac{1}{2}(F + |F|) - (J/m_a) c_a x_2 - (J/m_a) b_a x_6}{J - m_a r_s^2}, \\ \dot{x}_7 = -\frac{B_e}{L_e} x_5 - \frac{R_e}{L_e} x_7 + \frac{U_e}{L_e}, \\ \dot{x}_8 = \frac{B_T}{L_T} x_5 - \frac{R_T + R_{TM}}{L_T} x_8, \end{array} \right. \quad (3.12)$$

де $F = 6B_e x_7 - \left(c_D \frac{\rho}{2} A_f r_s^3 x_5^2 + f_r mg \right) \text{sign}(x_5)$.

Диференціальні рівняння (3.12) першого порядку розглядатимемо із початковими умовами (2.27), які з урахуванням нових змінних (3.5) набудуть наступного вигляду, відповідного порядку диференціальних рівнянь (3.12):

$$\left. \begin{array}{l} x_1(0) = 0, x_2(0) = 0, x_3(0) = 0, x_4(0) = 0, \\ x_5(0) = 0, x_6(0) = 0, x_7(0) = 0, x_8(0) = 0. \end{array} \right\} \quad (3.13)$$

Співвідношення (3.1) та (3.4), що дозволяють визначати вимірювані електричні напруги, з урахуванням нових змінних (3.5) запишуться наступним чином:

$$U_T = x_8 R_{TM}. \quad (3.14)$$

$$U_{aM} = U_a \left(\frac{1}{2} + \frac{x_2}{l_a} \right). \quad (3.15)$$

Таким чином, моделювання колісної платформи із бортовими вимірювальними приладами та пристроями зведене до інтегрування системи звичайних диференціальних рівнянь (3.12) з урахуванням початкових умов (3.13) та використання одержаного розв'язку для визначення вимірюваних напруг (2.29) за допомогою формул (3.14), (3.15).

При виконанні комп'ютерного моделювання колісної платформи із її бортовими вимірювальними пристроями, яке зведене до інтегрування звичайних диференціальних рівнянь (3.12) з урахуванням початкових умов (3.13) та використання одержаного розв'язку для визначення вимірюваних напруг (2.29) за допомогою формул (3.14), (3.15), використовуватимемо у подальшому наступні вихідні данні:

$$m = 1200 \text{ кг}, \quad J_k = 0,15 \text{ кг} \cdot \text{м}^2, \quad (3.16)$$

$$c_D = 0,45, \quad \rho = 1,2 \frac{\text{кг}}{\text{м}^3}, \quad A_f = 0,2 \text{ м}^2, \quad r_s = 0,15 \text{ м}, \quad f_r = 0,015,$$

$$m_a = 0,05 \text{ кг}, \quad c_a = 75 \frac{\text{Н}}{\text{м}}, \quad b_a = 2,5 \frac{\text{кг}}{\text{с}}, \quad U_a = 6 \text{ В}, \quad l_a = 0,03 \text{ м}, \quad (3.17)$$

$$R_e = 1,18 \text{ Ом}, \quad L_e = 2,6 \text{ мГн}, \quad \tau_e = 0,0168 \text{ с}^{-1}, \quad U_e = 60 \text{ В}, \quad (3.18)$$

$$R_T = 36 \text{ Ом}, \quad L_T = 1,6 \text{ мГн}, \quad B_T = 0,06 \frac{\text{кг} \cdot \text{м}^2}{\text{А} \cdot \text{с}^2}, \quad R_{TM} = 1000 \text{ Ом}. \quad (3.19)$$

Прийняті значення (3.16)–(3.19) вихідних даних є орієнтовними та відповідають існуючим колісним платформам відповідної ваги. Зрозуміло, що відповідний вибір значень вихідних даних дозволяє розглядати різноманітні колісні платформи (див. рис. 2.1), схожого компонування, яке відповідає прийнятій схематизації (див. рис. 2.2). При цьому слід підкреслити, що розроблена математична модель у вигляді диференціальних рівнянь (3.12) із поча-

тковими умовами (3.13) дозволяє досліджувати тільки прямолінійні рухи колісної платформи по горизонтальній площині із нерухомого початкового стану.

Для комп'ютерного моделювання колісної платформи із бортовими вимірювальними приладами використовуємо середовище Simulink комп'ютерної системи математичних обчислень Matlab, що зводиться до визначення за допомогою відповідних блоків Simulink диференціальних рівнянь (3.12) з урахуванням початкових умов (3.13) та використання одержаного розв'язку для визначення вимірюваних напруг (2.29) за допомогою формул (3.14), (3.15).

Введення вихідних даних для комп'ютерного моделювання здійснюватимемо автоматизовано з використанням принципу програмного управління. Текст відповідної програми-сценарію показаний на рис. 3.1. Вихідні данні для подальших розрахунків та моделювання формуються у вигляді змінних системи Matlab (рис. 3.1), що можуть біти використаними у подальшому також і в середовищі Simulink.

```

1 - m=1200; Jk=0.15; cD=0.45; ro=1.2; Af=0.2; rs=0.15; fr=0.015;
2 - J=m*rs^2+6*Jk;
3 - ma=0.05; ca=75; ba=2.5; Ua=6; la=0.03;
4 - Re=1.18; Le=2.6E-3; taue=0.0168; Ue=60; Be=sqrt(Re*Jk/taue);
5 - RT=36; LT=1.6E-3; BT=0.06; RTM=1000;
6 - A=1/(J-ma*rs^2);

```

Рисунок 3.1 – Введення вихідних даних для комп'ютерного моделювання

Слід підкреслити, що автоматизація досліджень на основі програмного управління дозволяє створювати програми-сценарії (рис. 3.1), відповідні різним етапам досліджень. Завдяки такій автоматизації досліджень значно спрощується повторне виконання, зміна та створення нових сценаріїв виконання досліджень; значно скорочується час підготовки звітної документації щодо результатів досліджень за рахунок автоматизації відображення їхніх результатів

у потрібному для звітування вигляді. У подальшому будемо використовувати принцип програмного управління для автоматизації досліджень.

Інтегрування системи звичайних диференціальних рівнянь (3.12) першого порядку із початковими умовами (3.13) та формування результатів такого інтегрування для подальшого дослідження показано на рис. 3.2. Підкреслимо, що результати моделювання Simulink експортуються до системи Matlab у вигляді відповідних змінних (рис. 3.2), у тому числі для забезпечення можливостей автоматизації їхньої подальшої обробки на основі програмного управління.

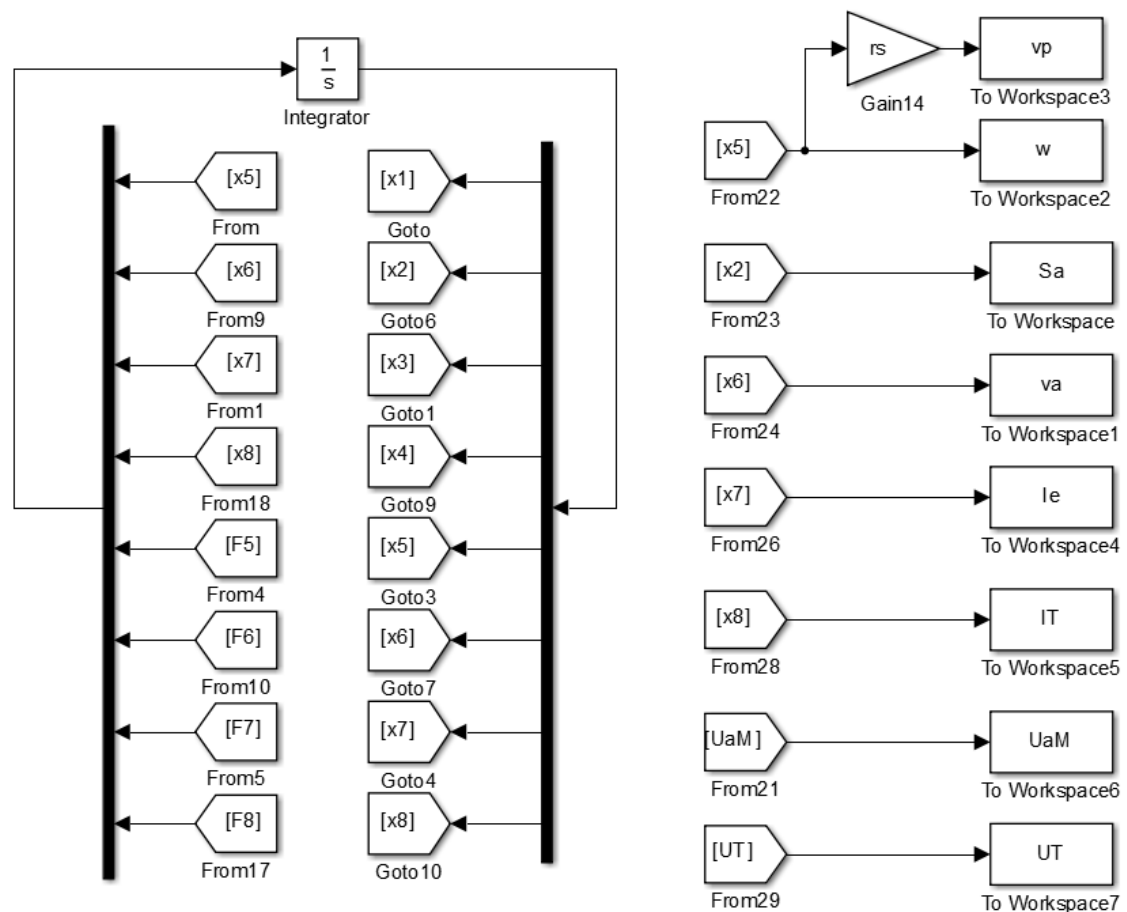


Рисунок 3.2 – Інтегрування диференціальних рівнянь та обробка результатів

Слід зазначити, що побудова системи диференціальних рівнянь (3.12), що, зрозуміло, необхідна для їхнього інтегрування відповідно схемі, показаної

на рис. 3.2, через громіздкість оформлена окремо та показана на рис. 3.3. Така побудова (рис.3.3) зводиться до визначення похідних відповідних параметрів стану (рис. 3.2 та рис. 3.3), які є досить громіздкими виразами та зручно оформлювати окремо із використанням необхідного обміну даними. Визначення вимірюваних електричних напруг за допомогою формул (3.14), (3.15) також здійснюється окремо та показано на рис. 3.4.

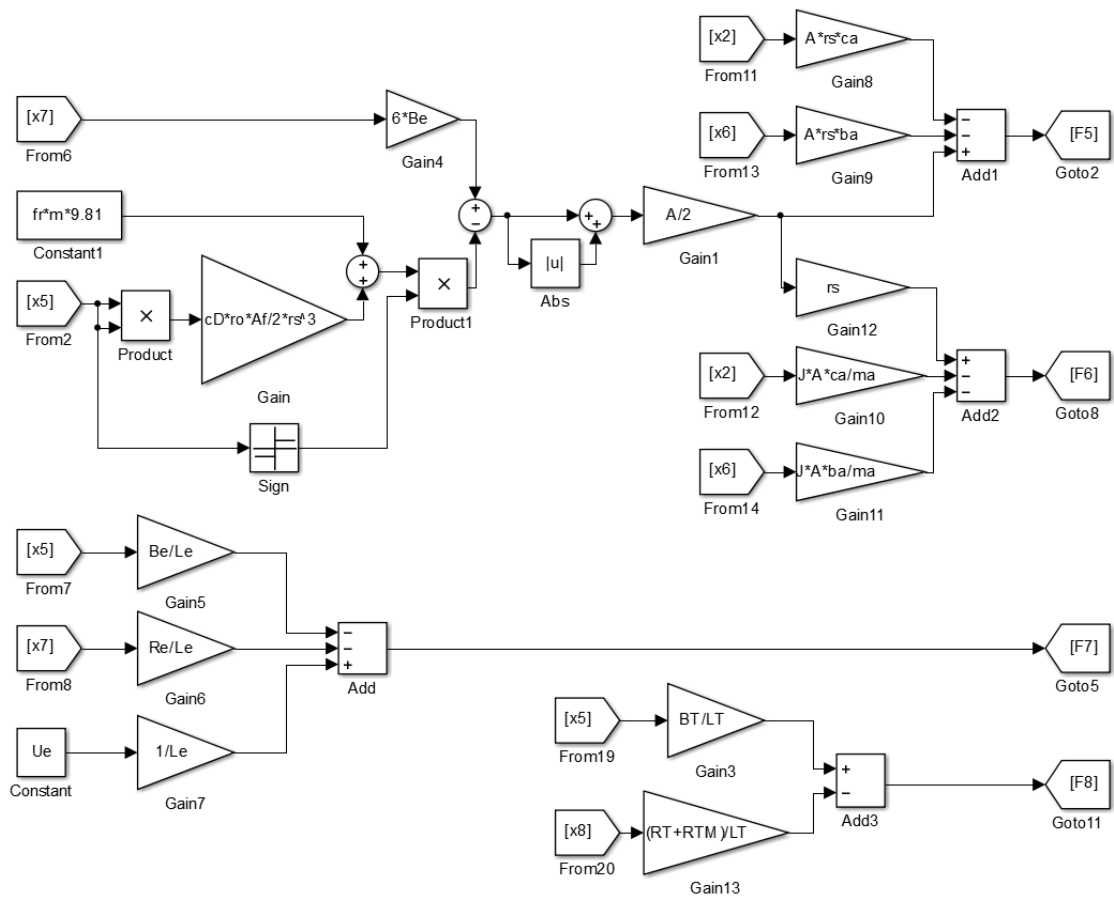


Рисунок 3.3 – Формування системи диференціальних рівнянь

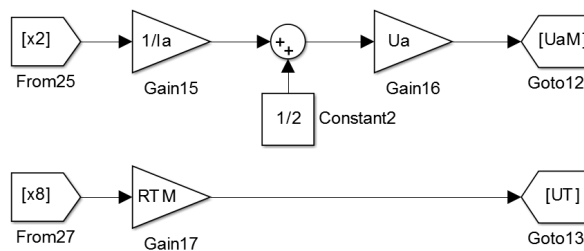


Рисунок 3.4 – Обчислення вимірюваних напруг

Виконання досліджень на основі комп'ютерного моделювання з використанням вихідних даних (див. рис. 3.1) та створених моделей Simulink (рис. 3.2–3.4) виконаємо шляхом розробки програми-сценарію (рис. 3.5), в якій передбачимо ініціалізацію вихідних даних, моделювання із використанням моделі Simulink, а також обробку даних, побудову та форматування необхідних графіків. Слід підкреслити, що для форматування графіків в тексті програми-сценарію, що показаний на рис. 3.5, вісім разів використовується відповідна допоміжна функція, яка обговорюється в додатку А; використання такої функції дозволило значно скоротити текст програми на рис. 3.5.

```

1 –   al_data;|
2 –   sim('al_model_A',10);
3 –   figure('Color','w');
4 –   subplot(2,1,1);
5 –   plot(w.time,w.data,'-','Color','black','LineWidth',2);
6 –   FormatCharts('$t,\text{r}{s}$','$\omega(t), \text{r}{s}^{-1}$','');
7 –   subplot(2,1,2);
8 –   plot(vp.time,vp.data,'-','Color','black','LineWidth',2);
9 –   FormatCharts('$t,\text{r}{s}$','$\dot{s}_p(t), \text{r}{m/s}$','');
10 –  figure('Color','w');
11 –  subplot(2,1,1);
12 –  plot(Sa.time,1000*Sa.data,'-','Color','black','LineWidth',2);
13 –  FormatCharts('$t,\text{r}{s}$','$s_a(t), \text{r}{mm}$','');
14 –  subplot(2,1,2);
15 –  plot(va.time,1000*va.data,'-','Color','black','LineWidth',2);
16 –  FormatCharts('$t,\text{r}{s}$','$\dot{s}_a(t), \text{r}{mm/s}$','');
17 –  figure('Color','w');
18 –  subplot(2,1,1);
19 –  plot(Ie.time,Ie.data,'-','Color','black','LineWidth',2);
20 –  FormatCharts('$t,\text{r}{s}$','$I_e(t), \text{r}{A}$','');
21 –  subplot(2,1,2);
22 –  plot(IT.time,1000*IT.data,'-','Color','black','LineWidth',2);
23 –  FormatCharts('$t,\text{r}{s}$','$I_T(t), \text{r}{mA}$','');
24 –  figure('Color','w');
25 –  subplot(2,1,1);
26 –  plot(UaM.time,UaM.data,'-','Color','black','LineWidth',2);
27 –  FormatCharts('$t,\text{r}{s}$','$U_{aM}(t), \text{r}{V}$','');
28 –  subplot(2,1,2);
29 –  plot(UT.time,UT.data,'-','Color','black','LineWidth',2);
30 –  FormatCharts('$t,\text{r}{s}$','$U_T(t), \text{r}{V}$','');

```

Рисунок 3.5 – Програма-сценарій дослідження колісної платформи

Завдяки розробленим моделям Simulink (див. рис. 3.2–3.4) та програмам-сценаріям (див. рис. 3.1 та див. рис. 3.5), що реалізують необхідні дослідження одержано досить великі обсяги даних щодо зміни стану колісної платформи та її бортових вимірювальних приладів та пристроїв.

На рис. 3.6 показані результати моделювання руху колісної платформи у вигляді залежності від часу кутової швидкості її коліс та швидкості поступального руху самої платформи. Одержані результати (рис. 3.6) узгоджуються із загальновідомими властивостями колісних платформ щодо існування граничної швидкості їхнього руху, яка відповідає урівноваженості рушійних сил та сил опору.

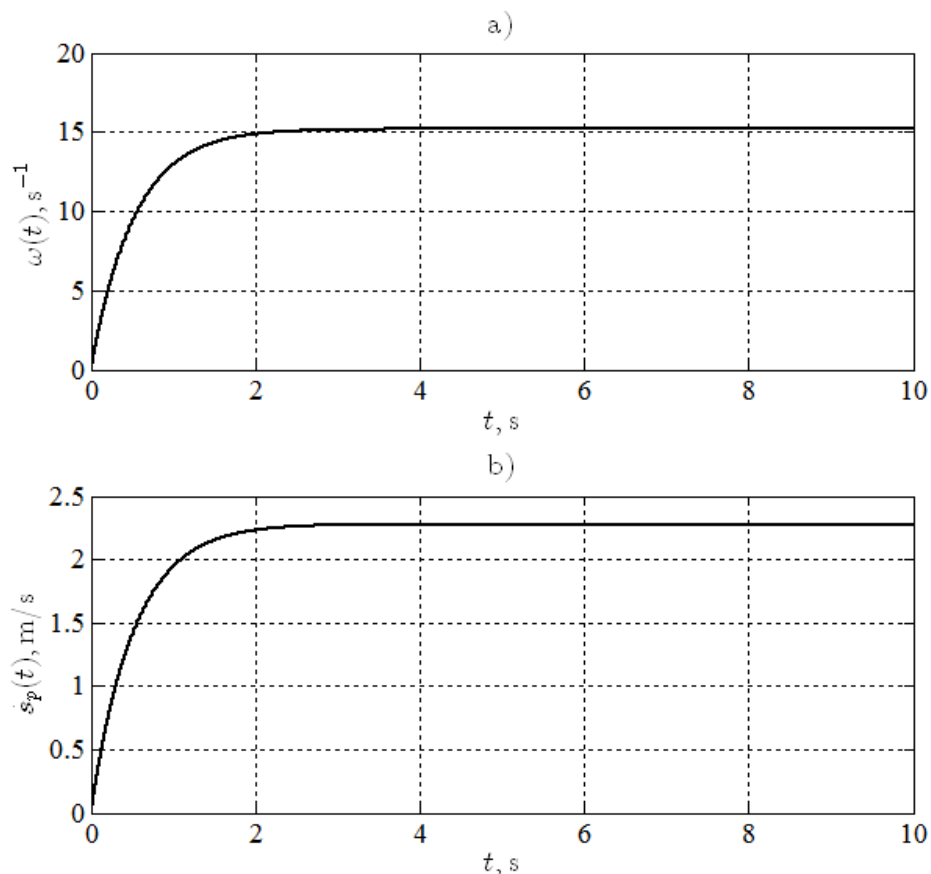


Рисунок 3.6 – Кутова швидкість обертання коліс (а) та швидкість поступального руху (б) платформи

На рис. 3.7 показані результати моделювання руху інерційної маси бортового акселерометру колісної платформи у вигляді залежностей від часу переміщення та швидкості цієї інерційної маси. Одержані результати (рис. 3.7) свідчать, що після 4-х перших секунд від початку руху колісної платформи переміщення інерційної маси дорівнює нулю, тобто прискорення поступального руху платформи також має дорівнювати нулю. Це повністю узгоджується із попередньо одержаними результатами щодо швидкості поступального руху колісної платформи (див. рис. 3.6b); бачимо також (рис. 3.7), що найбільші прискорення відбуваються на початку руху колісної платформи.

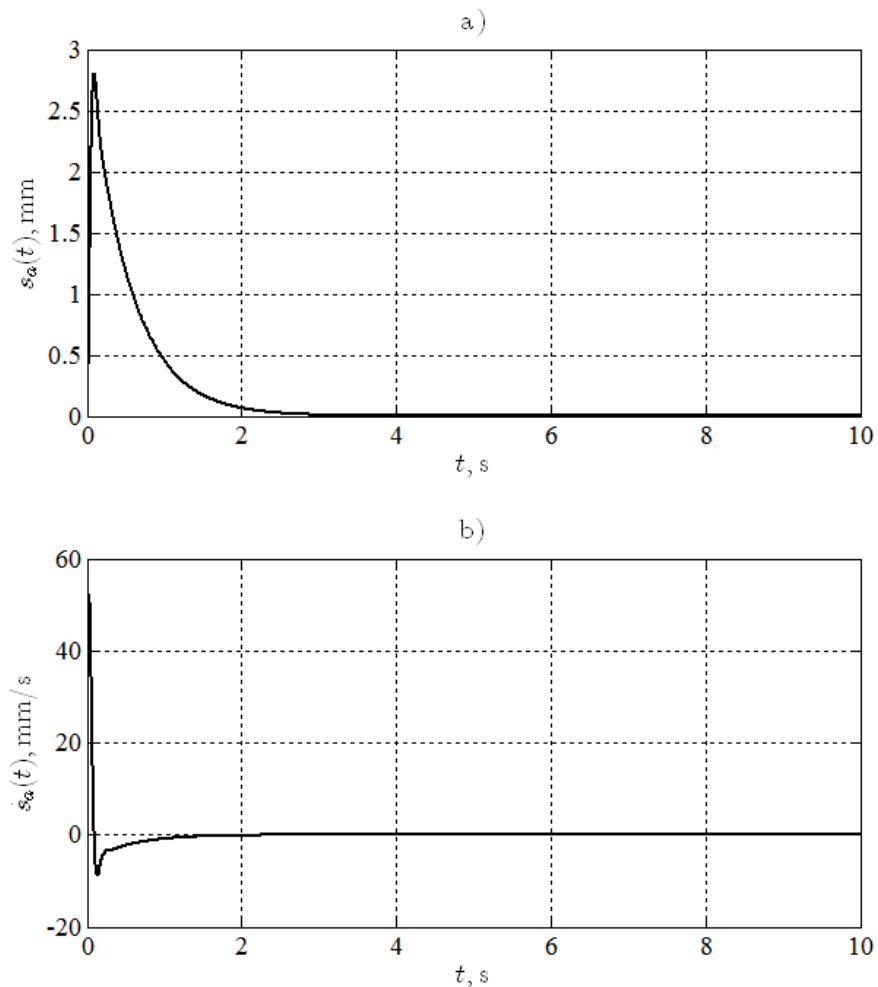


Рисунок 3.7 – Переміщення (а) та швидкість руху (b) інерційної маси бортового акселерометру колісної платформи

На рис. 3.8 показані результати моделювання силових та вимірювальних ланцюгів досліджуваної електромеханічної колісної платформи у вигляді залежностей від часу сил струму в ланцюгах тяглових електродвигунів та тахометричних датчиків. Одержані результати розрахунків (рис. 3.8) є відповідним чином узгодженими із показаним раніше (див. рис. 3.6) результатами щодо рухів складових досліджуваної колісної платформи. Бачимо, що найбільша сила струму в ланцюгах тяглових електродвигунів колісної платформи має місце при зрушенні платформи з місця (рис. 3.8а).

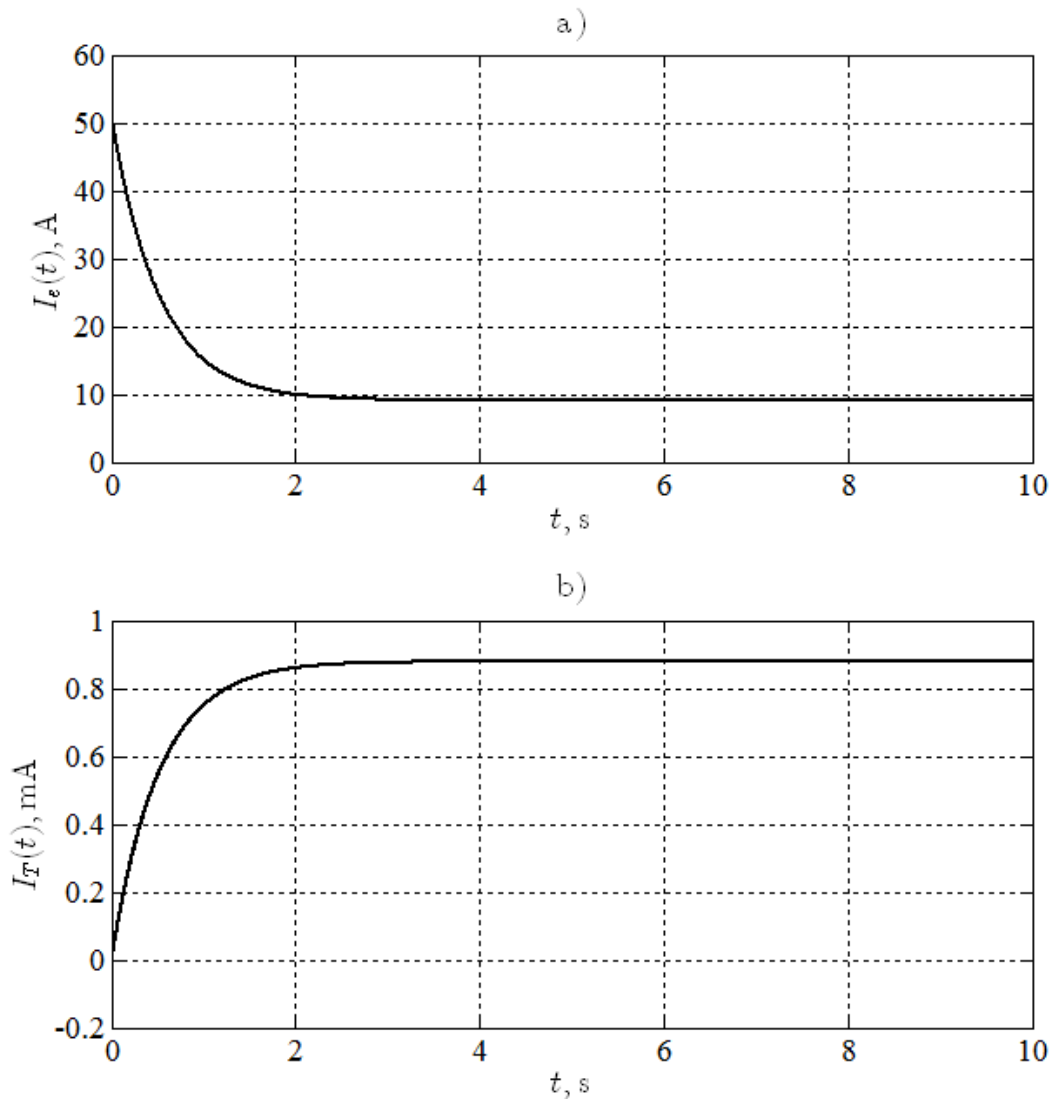


Рисунок 3.8 – Сила струму в ланцюгах тяглових електродвигунів (а) та тахометрах (b) колісної платформи

На рис. 3.9 показані результати моделювання напруження у вимірювальних ланцюгах бортового акселерометру та тахометрів колісної платформи у вигляді залежностей від часу відповідних напружень. Одержані результати розрахунків (рис. 3.9) є повністю узгодженими із попередньо одержаними результатами щодо швидкості поступального руху колісної платформи (див. рис. 3.6). Завдяки такій узгодженості, маємо підтвердження щодо можливостей автоматизованого визначення характеристик руху платформи та її взаємодії із навколишнім середовищем шляхом обробки відповідних вимірювань.

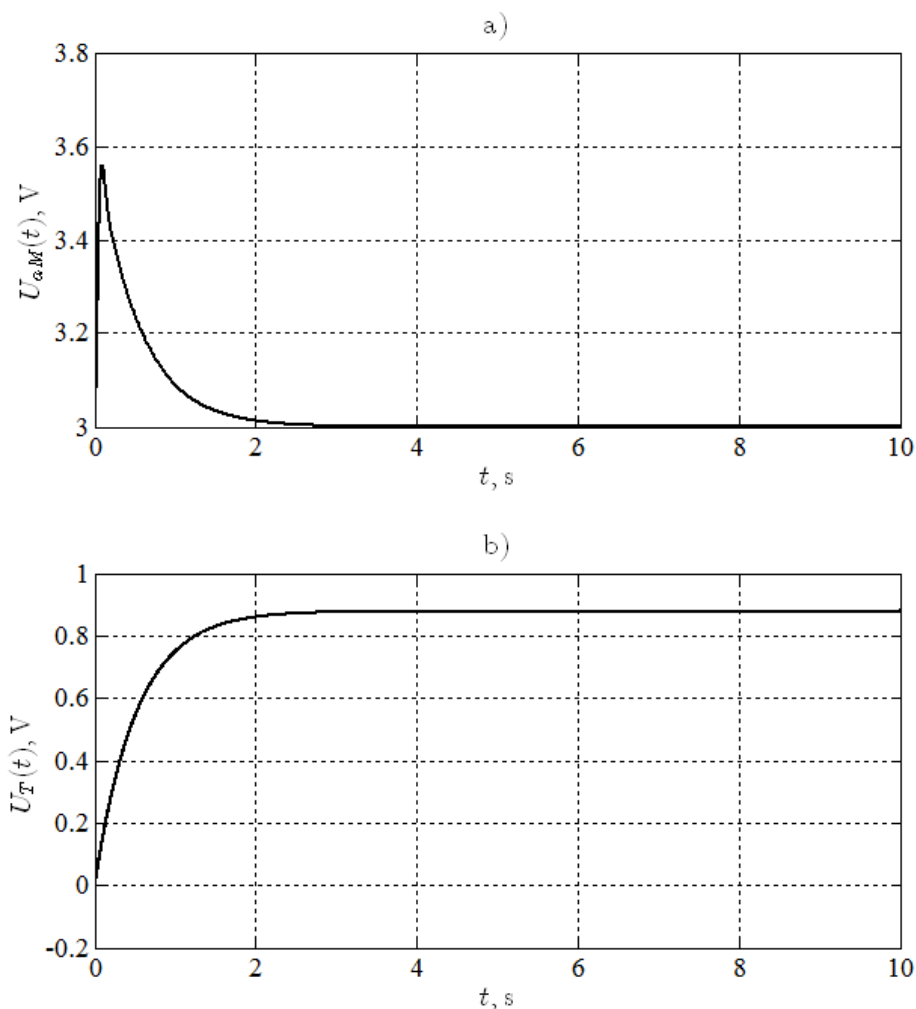


Рисунок 3.9 – Напряга у вимірювальних ланцюгах бортового акселерометру (а) та тахометрів коліс (б) платформи

3.2 Оцінка проковзування коліс роботизованої мобільної платформи

Зрозуміло, що вибір належного режиму руху мобільних колісних платформ має здійснюватися з урахуванням стану дороги (покриття або ґрунту), який оцінюється у тому числі й проковзуванням коліс. Таким чином, автоматизація вибору режимів руху роботизованої мобільної колісної платформи вимагає у тому числі автоматизованої оцінки проковзування її коліс.

Проковзування коліс платформи можна та зручно оцінювати ефективним радіусом кочення (1.5), оскільки саме ця величина встановлює зв'язок між кутовою швидкістю обертання коліс та швидкістю (1.6) поступального руху платформи. Складність оцінки значення радіусу кочення (1.5) коліс мобільної платформи обумовлена тією обставиною, що його неможливо вимірювати безпосередньо, а можна оцінювати тільки шляхом обробки результатів вимірювань стану платформи з використанням відповідних математичних моделей. У випадку досліджуваної колісної платформи, бортові вимірювальні пристрої, – акселерометр та тахометр, – надають можливість вимірювати напруження (2.29) у відповідних вимірювальних ланцюгах, що дозволяють оцінювати поступальний рух колісної платформи та обертання її коліс. Для оцінки радіусу кочення коліс в цьому випадку доцільно використовувати співвідношення (2.47), в якому міститься перетворений сигнал (2.37) акселерометру; при цьому слід враховувати умову (2.48), яка обмежує відповідним чином використання формули (2.47).

Досить цікавим є та обставина, що чисельник формули (2.47) можна уявляти як ПД-регулятор, а знаменник цієї формули – як пропорційно-диференціальний регулятор із відповідними параметрами. Саме цей було використано при розробці бортової автоматизованої системи визначення радіусу кочення коліс (рис. 3.10). Слід зазначити, що перевірка умови (2.48), яка обмежує використання формули (2.47), здійснюється в розробленій системі (рис. 3.10) шляхом обмеження модулю відповідної величини:

$$\left| \frac{L_T}{B_T R_{TM}} \dot{U}_T + \frac{R_T + R_{TM}}{B_T R_{TM}} U_T \right| \leq \varepsilon, \quad (3.20)$$

де прийняте значення $\varepsilon = 0,0001$.

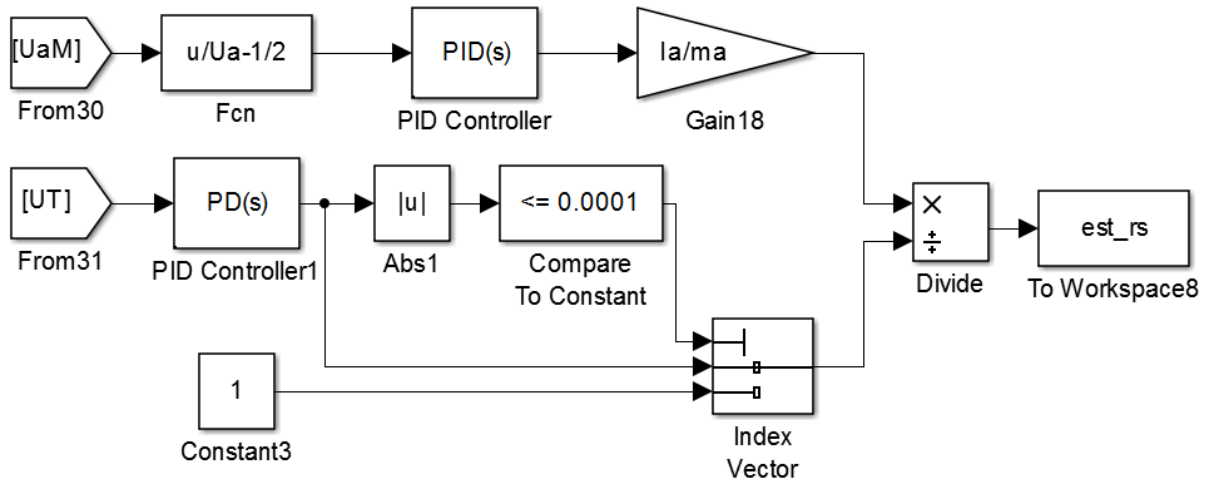


Рисунок 3.10 – Модель бортової автоматизованої системи визначення радіусу кочення коліс мобільної роботизованої платформи

Виконання досліджень щодо можливостей автоматизованої оцінки радіусу кочення коліс виконаємо на основі комп'ютерного моделювання з використанням вихідних даних (див. рис. 3.1) та створених моделей Simulink (див. рис. 3.2–3.4, рис. 3.10) шляхом розробки програми-сценарію (рис. 3.11). В цій програмі (рис. 3.10) передбачено ініціалізацію вихідних даних, виконання моделювання мобільної колісної платформи із бортовими вимірювальними приладами та бортовою системою автоматизованого визначення проковзування коліс, та побудови результатів дослідження у вигляді відповідних графіків і форматування цих графіків у належному вигляді, у тому числі із використанням відповідної допоміжної функції (Додаток А).

```

1 –   al_data;
2 –   sim('al_model_A',10);
3 –   figure('Color','w');
4 –   plot(est_rs.time,est_rs.data,'-','Color','black','LineWidth',2);
5 –   FormatCharts('$t,\text{r}_s(t)$','$r_s(t), \text{r}_s(t)$','');
6 –   figure('Color','w');
7 –   subplot(2,1,1);
8 –   plot(est_rs.time,est_rs.data,'-','Color','black','LineWidth',2);
9 –   xlim([0,0.1]);
10 –  FormatCharts('$t,\text{r}_s(t)$','$r_s(t), \text{r}_s(t)$','a');
11 –  subplot(2,1,2);
12 –  plot(est_rs.time,est_rs.data,'-','Color','black','LineWidth',2);
13 –  xlim([0,0.005]);
14 –  FormatCharts('$t,\text{r}_s(t)$','$r_s(t), \text{r}_s(t)$','b');
15 –  figure('Color','w');
16 –  subplot(2,1,1);
17 –  plot(est_rs.time,est_rs.data,'-','Color','black','LineWidth',2);
18 –  xlim([1,1.001]);
19 –  FormatCharts('$t,\text{r}_s(t)$','$r_s(t), \text{r}_s(t)$','a');
20 –  subplot(2,1,2);
21 –  plot(est_rs.time,est_rs.data,'-','Color','black','LineWidth',2);
22 –  xlim([9,9.001]);
23 –  FormatCharts('$t,\text{r}_s(t)$','$r_s(t), \text{r}_s(t)$','a');

```

Рисунок 3.11 – Програма-сценарій дослідження бортової автоматизованої системи оцінки проковзування коліс мобільної роботизованої платформи

Розглянемо результати досліджень щодо можливостей автоматизованої оцінки радіусу кочення коліс мобільної платформи на основі її комп'ютерного моделювання з використанням вихідних даних (див. рис. 3.1) та створених моделей Simulink (див. рис. 3.2–3.4, див. рис. 3.10) з використанням програми-сценарію, показаної на рис. 3.11.

Результати оцінки радіусу кочення коліс платформи за допомогою розробленої автоматизованої бортової системи, модель якої показана вище на рис. 3.10, представлені на рис. 3.11. Одержані результати є узгодженими із вихідними даними (3.16) щодо радіусу кочення коліс, що свідчить про відсутність помилок будови у запропонованій автоматизованій системі обробки вимірювань (див. рис. 3.10). В той же час, маємо певні неточності у визначенні

радіусу кочення коліс мобільної платформи протягом половини першої секунди руху при зрушенні платформи із нерухомого стану (рис. 3.11). Такі неточності можуть бути обумовлені обмеженістю використовуваної формули (2.47) через умову (2.48) та її наближення (3.20), які, зрозуміло, задовольняється у початковий момент руху платформи через прийняті нульові початкові умови (3.13).

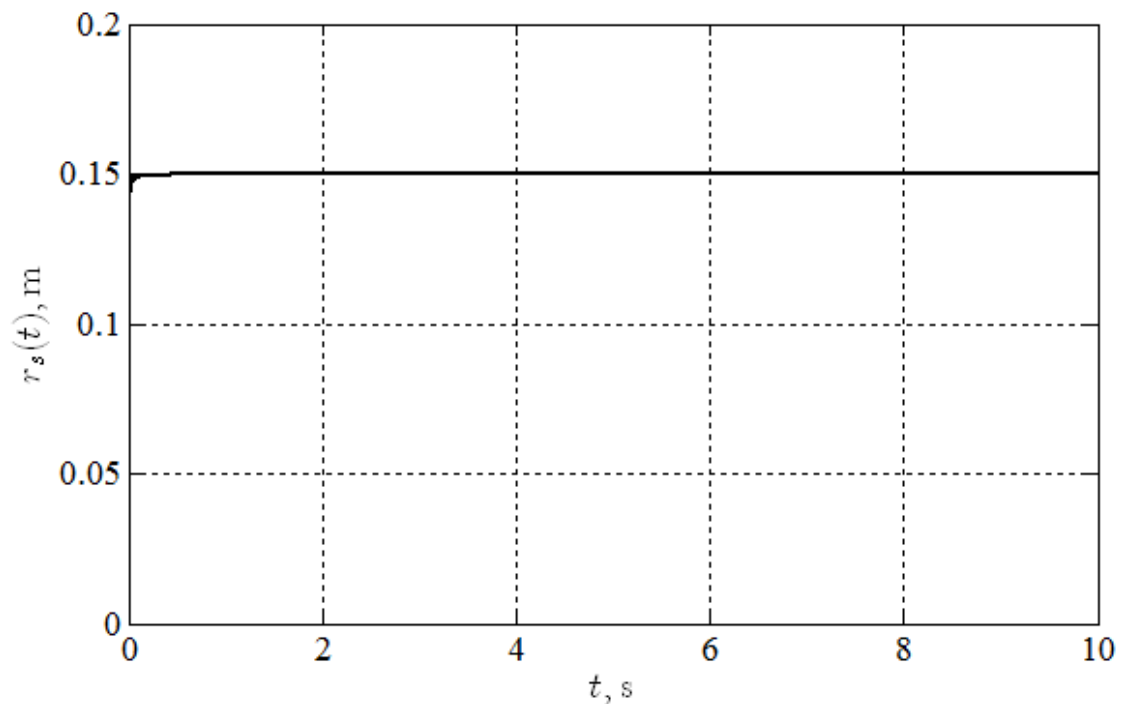


Рисунок 3.12 – Результати оцінки радіусу кочення коліс мобільної платформи протягом перших 10 секунд її руху

Для дослідження помилок результатів оцінки радіусу кочення коліс мобільної платформи за допомогою розробленої автоматизованої бортової системи, модель якої показана вище на рис. 3.10, розглянемо одержувані оцінки у перші миті з початку руху платформи (рис. 3.12). Результати моделювання (рис. 3.12а) свідчать, що похибки оцінки радіусу кочення коліс мобільної платформи проявляються насправді лише протягом перших 0,05 секунд з початку руху платформи. Подальше зменшення часового інтервалу дослідження (рис. 3.12b) результатів оцінки радіусу кочення коліс мобільної платформи свідчить

про наявність високочастотних (приблизно 50 кГц) складових у результатах обробки вимірюваних сигналів. Зрозуміло, що такі високочастотні складові не мають фізичного сенсу з точки зору змісту вимірюваної величини радіусу кочення коліс мобільної платформи.

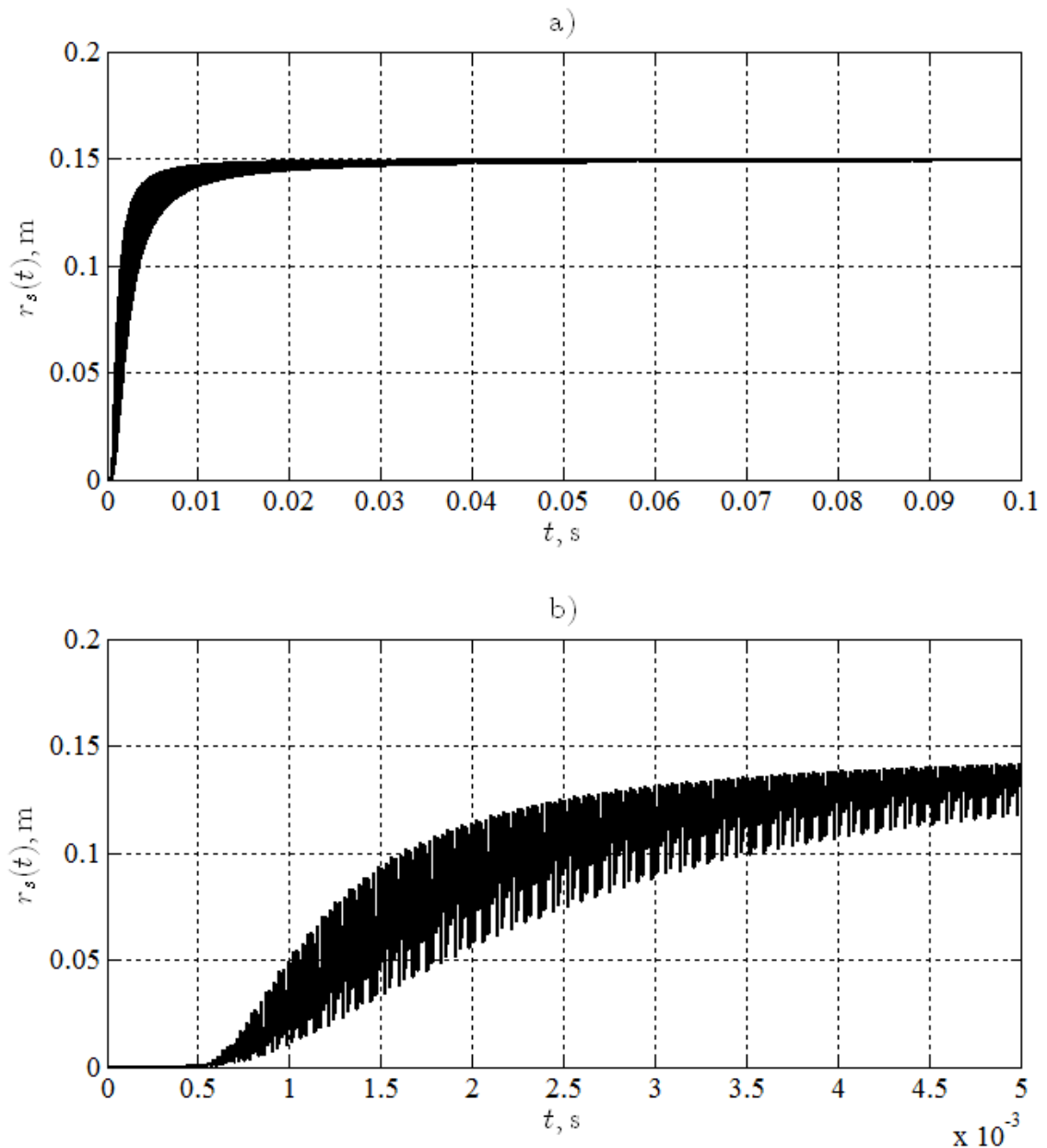


Рисунок 3.13 – Результати оцінки радіусу кочення коліс мобільної платформи протягом 0,1 секунди (а) та протягом 0,005 секунд (б) з початку її руху

Виконаємо дослідження щодо наявності високочастотних складових у результатах оцінки радіусу кочення коліс мобільної платформи, що одержані у більш пізніші моменти її руху за допомогою розробленої автоматизованої бортової системи, модель якої показана вище на рис. 3.11. Для цього розглянемо результати моделювання у пізніші моменти руху платформи протягом досить малих інтервалів часу (рис. 3.13). Одержані результати свідчать про наявність високочастотних складових, які неможливо було спостерігати у масштабі вище наведеного рис. 3.12. Зрозуміло, що такі високочастотні складові не мають фізичного сенсу з точки зору змісту вимірюваної величини радіусу кочення коліс мобільної платформи.

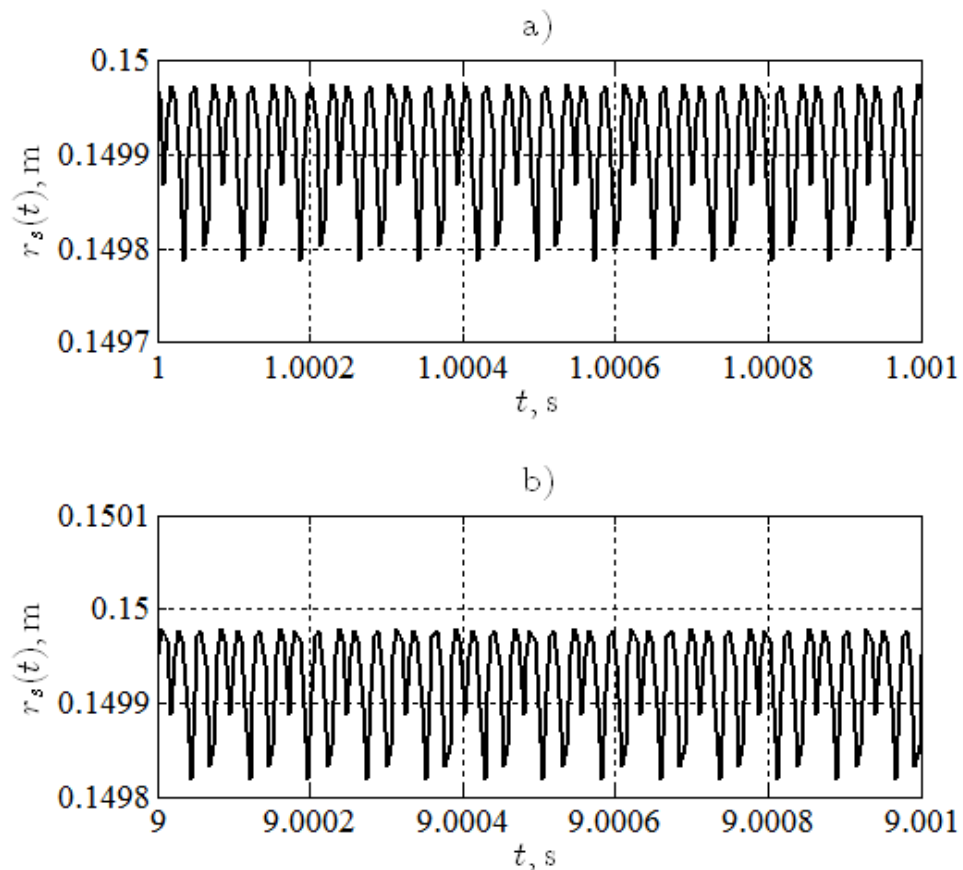


Рисунок 3.14 – Результати оцінки радіусу кочення коліс мобільної платформи у пізніші моменти її руху протягом малих інтервалів часу

3.3 Оцінка рушійних сил та сил опору руху роботизованої мобільної платформи

Автоматичне управління автономними мобільними колісними платформами вимагає оцінки рушійних сил та сил опору руху. Як свідчать результати, оцінка сил опору зводиться до розв'язування досить складної задачі ідентифікації суттєво нелінійної систем, що вимагає виконання окремого досить складного дослідження. З урахуванням означеної обставини розглянемо далі більш простішу задачу оцінки результуючої рушійних сил та сил опору руху мобільної колісної платформи, яка відповідно диференціальному рівнянню (2.22) для випадку $F > 0$ запишеться у вигляді:

$$F = J\ddot{q}_1 - m_a r_s \ddot{q}_2, \quad (3.21)$$

де $F = 6B_e x_7 - (c_D \rho A_f r_s^3 x_5^2 / 2 + f_r mg)$ – результуюча рушійних сил та сил опору руху мобільної колісної платформи, в якій враховані визначення (3.5).

Оцінка величини (3.21) має здійснюватися за допомогою вимірюваних сигналів (2.29). Для визначення величини \ddot{q}_1 використаємо сигнал U_T тахометру, що вимірює кутову швидкість коліс мобільної платформи, та врахуємо визначення узагальнених координат (2.18), відповідно до яких кутова швидкість коліс платформи $\omega = \dot{q}_1$; завдяки цьому та виразу (2.46) отримаємо:

$$\ddot{q}_1 = \frac{d}{dt} \left(\frac{L_T}{B_T R_{TM}} \dot{U}_T + \frac{R_T + R_{TM}}{B_T R_{TM}} U_T \right). \quad (3.22)$$

Для визначення величини \ddot{q}_2 використаємо сигнал U_{aM} акселерометру, що вимірює прискорення поступального руху мобільної колісної платформи, та врахуємо визначення узагальнених координат (2.18), відповідно до яких ку-

това переміщення інерційного елемента акселерометру $s_a = q_2$; завдяки цьому та виразу (2.34) отримаємо:

$$\ddot{q}_2 = \frac{l_a}{U_a} \ddot{U}_{aM}. \quad (3.23)$$

Підстановка виразів (3.22) та (3.23) до співвідношення (3.21) дозволить одержати шукану результуючу рушійних сил та сил опору руху мобільної колісної платформи шляхом обробки вимірюваних сигналів (2.29) у наступному вигляді:

$$F = J \frac{d}{dt} \left(\frac{L_T}{B_T R_{TM}} \dot{U}_T + \frac{R_T + R_{TM}}{B_T R_{TM}} U_T \right) - m_a r_s \frac{l_a}{U_a} \ddot{U}_{aM}. \quad (3.24)$$

Слід зазначити, що формула (3.24) містить радіус кочення r_s коліс платформи та узагальнений момент інерції $J = m r_s^2 + 6J_k$, який визначається масою платформи та моментами інерції її складових, що здійснюють обертання. Зрозуміло, що величини r_s та $J = m r_s^2 + 6J_k$ можуть змінюватися при експлуатації колісної платформи, і їхнє визначення є повністю необхідним для використання формулою (3.24). Вважаємо далі, що величини r_s та $J = m r_s^2 + 6J_k$ були визначені із досить високою точністю, як, наприклад, на показано вище рис. 3.11 для величини r_s . З урахуванням означеної обставини комп'ютерну модель автоматизованої системи для визначення результуючої рушійних сил та сил опору руху мобільної колісної платформи шляхом обробки вимірюваних сигналів (2.29) за формулою (3.24) представимо як показано на рис. 3.14, де передбачено також визначення кутової швидкості коліс мобільної платформи за результатами вимірювань бортових тахометричних датчиків. Для оцінки можливої похибки при роботі запропонованої бортової автоматизованої си-

стеми (рис. 3.14) передбачимо також незалежне визначення результуючої рушійних сил і сил опору руху мобільної роботизованої платформи, як показано на рис. 3.15 відповідно виразу, який міститься у поясненні до співвідношення (3.21). Порівняння результатів, одержаних за допомогою моделі з рис. 3.14, із результатами моделювання відповідно моделі з рис. 3.15, дозволить оцінити похибки бортової автоматизованої системи щодо визначення результуючої рушійних сил і сил опору руху мобільної роботизованої платформи.

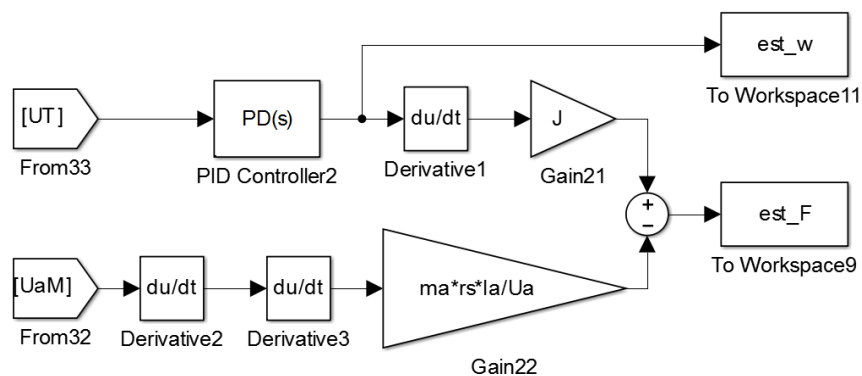


Рисунок 3.15 – Модель бортової автоматизованої системи визначення кутової швидкості коліс та результуючої рушійних сил і сил опору руху мобільної роботизованої платформи

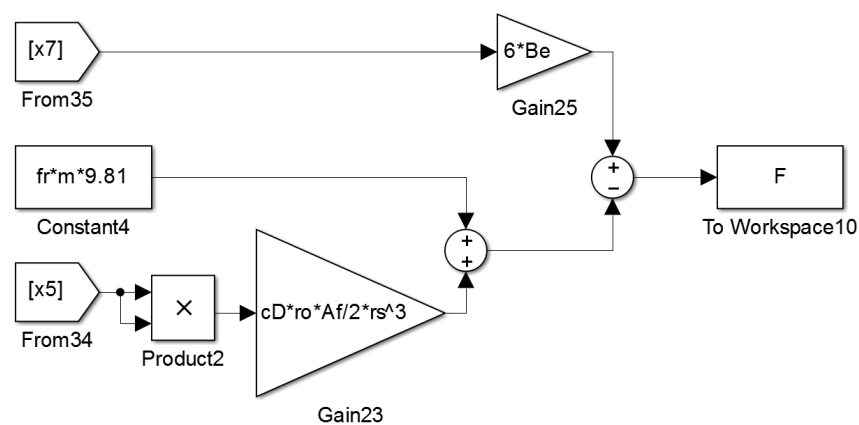


Рисунок 3.16 – Визначення результуючої рушійних сил і сил опору руху мобільної роботизованої колісної платформи за рівняннями її руху

Виконання досліджень щодо можливостей автоматизованої оцінки кутової швидкості коліс та результуючої рушійних сил і сил опору руху мобільної роботизованої платформи (див. рис. 3.14) виконаємо на основі комп'ютерного моделювання з використанням вихідних даних (див. рис. 3.1) та створених моделей Simulink (див. рис. 3.2–3.4, див. рис. 3.10, див. рис. 3.14 та див. рис. 3.15) шляхом використання попередньо розробленої програми-сценарію (рис. 3.16). В цій програмі-сценарію (рис. 3.16) передбачено ініціалізацію вихідних даних для моделювання, виконання моделювання мобільної роботизованої колісної платформи із бортовими вимірювальними приладами та бортовою системою автоматизованого визначення кутової швидкості коліс та результуючої рушійних сил і сил опору руху платформи, а також побудову результатів дослідження у вигляді відповідних графіків і автоматичного форматування цих графіків у належному вигляді для подальшого включення до звіту, у тому числі із використанням відповідної допоміжної функції, що обговорюється у дод. А.

```

1   al_data;
2   sim('al_model_A',10);
3   figure('Color','w');
4   subplot(2,1,1);
5   plot(est_F.time,est_F.data,'','Color','black','LineWidth',2);
6   xlim([1,1.001]);
7   FormatCharts('$t, \text{rm{s}}$', '$F(t), \text{rm{N}} \cdot \text{rm{m}}$', 'a');
8   subplot(2,1,2);
9   plot(F.time,F.data,'-', 'Color','black','LineWidth',2);
10  xlim([1,1.001]);
11  FormatCharts('$t, \text{rm{s}}$', '$F(t), \text{rm{N}} \cdot \text{rm{m}}$', 'b');
12  figure('Color','w'); hold on;
13  plot(est_w.time,est_w.data,':', 'Color','black','LineWidth',2);
14  plot(w.time,w.data,'-', 'Color','black','LineWidth',2);
15  xlim([1,1.001]);
16  FormatCharts('$t, \text{rm{s}}$', '$\omega(t), \text{rm{s}}^{-1}$', '');
17  legend('measured signals','differential equations'); hold off;

```

Рисунок 3.17 – Програма-сценарій дослідження бортової автоматизованої системи визначення кутової швидкості коліс та результуючої рушійних сил і сил опору руху мобільної роботизованої платформи

Результати оцінки результуючої рушійних сил і сил опору руху мобільної роботизованої колісної платформи показані на рис. 3.18. Одержані результати свідчать, що запропонована бортова автоматизована система (див. рис. 3.14) не забезпечує можливості визначення результуючої рушійних сил і сил опору руху мобільної роботизованої колісної платформи, оскільки одержані результати не узгоджені із оцінкою (див. рис. 3.15) цієї результуючої за рівняннями руху відповідно формулі, що міститься у поясненні до співвідношення (3.21). Цілком зрозуміло, що причини наявності таких великих похибок мають бути ретельно дослідженими, оскільки такі великі похибки унеможливають оцінку результуючої рушійних сил і сил опору руху мобільної роботизованої колісної платформи.

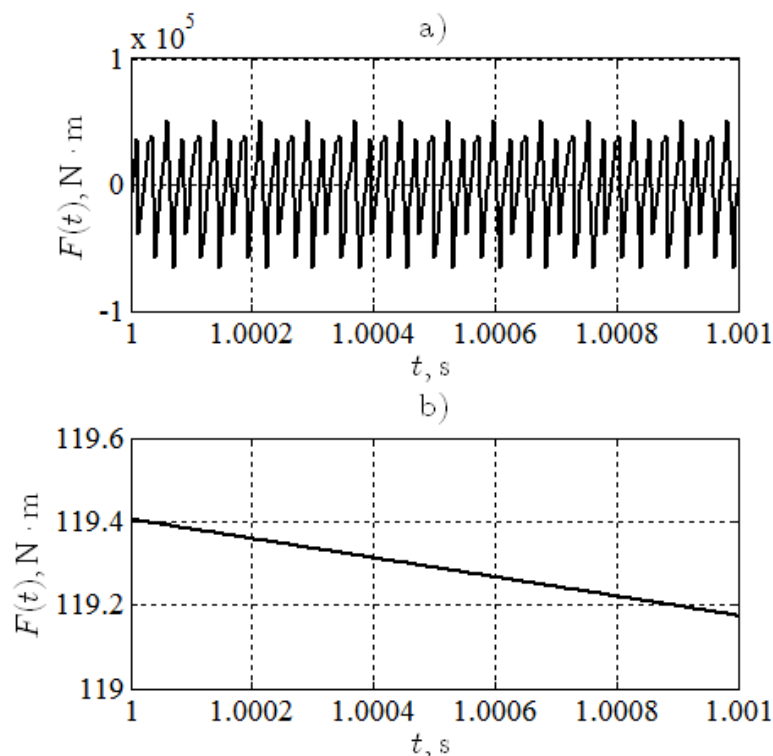


Рисунок 3.18 – Результати оцінки результуючої рушійних сил і сил опору руху мобільної роботизованої колісної платформи за допомогою бортової автоматизованої системи (a) та точно за допомогою рівнянь руху (b)

Для встановлення причин похибок запропонованої вище на рис. 3.14 бортової автоматизованої системи оцінки результуючої рушійних сил і сил опору руху мобільної роботизованої колісної платформи розглянемо результати моделювання кутової швидкості безпосередньо за результатами розв'язування диференціальних рівнянь (3.12) математичної моделі колісної платформи та шляхом обробки результатів вимірювань (2.29) за допомогою співвідношення (2.46), що реалізовано в моделі, яка показана вище на рис. 3.14, за допомогою пропорційно-диференціального регулятора. Результати моделювання (рис. 3.19) свідчать, що обробка результатів відмірювань призводить до певних похибок, які проявляються у наявності високочастотних складових. Хоча відносна похибка визначення частоти обертання є дуже малою і становить приблизно 0,15%, але наявність високочастотних складових призводить до значних похибок визначення похідної кутової швидкості, яка саме і використовується для оцінки результуючої рушійних сил і сил опору руху мобільної роботизованої колісної платформи за допомогою співвідношення (3.24).

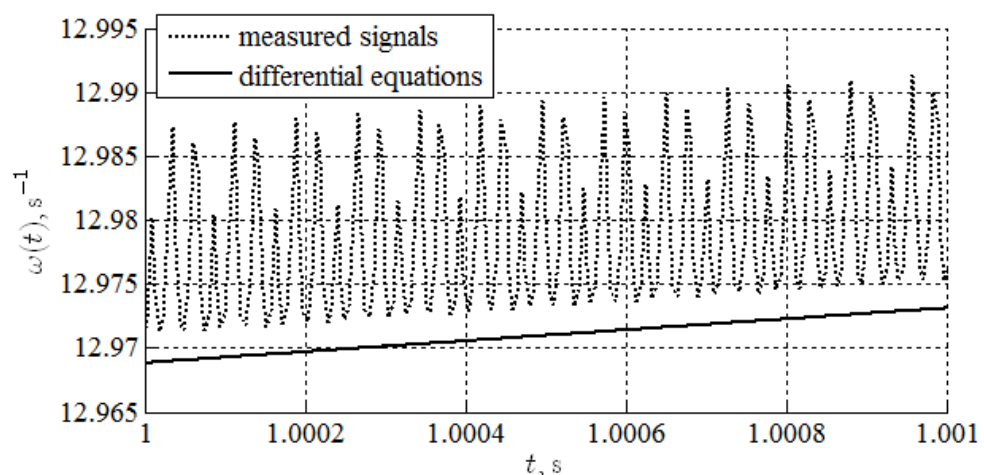


Рисунок 3.19 – Результати моделювання кутової швидкості коліс мобільної роботизованої платформи з використанням диференціальних рівнянь руху та обробки модельованих вимірюваних сигналів

3.4 Безпека життєдіяльності та 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 про-

стір 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 місць – 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 [34].

Розрахункова формула методу розрахунку освітлення:

$$W = \frac{W_{\Sigma}}{S}, \quad (3.25)$$

де W – питома потужність, Вт/м²;

S – площа приміщення, м²;

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

$$W_{\Sigma} = W_{cv} * n_{cv}, \quad (3.26)$$

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

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

$$W_{\Sigma} = 110 * 4 = 440 \text{ (Вт)}; \quad (3.27)$$

$$W_{\Sigma} = \frac{440}{18} = 24,4 \text{ (Вт/м}^2\text{)}. \quad (3.28)$$

Питома потужність у 24,4 Вт/м² відповідає освітленості в 350 лк. при мінімальній допустимій освітленості 300 лк.

Таким чином, створюються сприятливі зорові умови в лабораторії.

3.5 Висновки до розділу

Виконано моделювання динаміки зв'язаних рухів колісної платформи та чутливих елементів бортових вимірювальних пристроїв, результатом яких є кутова швидкість обертання коліс та швидкість поступального руху, переміщення та швидкість руху інерційної маси бортового акселерометру, сила

струму в ланцюгах тяглових електродвигунів та тахометрах, напруга у вимірювальних ланцюгах бортового акселерометру та тахометрів коліс платформи.

Отримано оцінки проковзування коліс роботизованої мобільної платформи, після проведення дослідження отриманого ПД-регулятора, у вигляді результатів оцінки радіусу кочення коліс мобільної платформи протягом перших 10 секунд її руху, результатів оцінки радіусу кочення коліс мобільної платформи протягом 0,1 секунди (а) та протягом 0,005 секунд (b) з початку її руху і результати оцінки радіусу кочення коліс мобільної платформи у пізніші моменти її руху протягом малих інтервалів часу.

Отримано оцінки рушійних сил та сил опору руху роботизованої мобільної платформи, після роботи над моделями бортової автоматизації платформи, у вигляді результатів оцінки результуючої рушійних сил і сил опору руху мобільної роботизованої колісної платформи за допомогою бортової автоматизованої системи (а) та точно за допомогою рівнянь руху (b) та результати моделювання кутової швидкості коліс мобільної роботизованої платформи з використанням диференціальних рівнянь руху та обробки модельованих вимірних сигналів.

Додано відомості про безпеку життєдіяльності та охорону праці у приміщенні.

ВИСНОВКИ

В роботі із загальних позицій розглянуто актуальну задачу розробки та дослідження математичних моделей для автоматизованого визначення механічної взаємодії роботизованої колісної платформи із зовнішнім середовищем, яка є досить важливою для створення автономних мобільних робото-технічних систем. Одержані при виконанні досліджень результати дозволяють зробити наступні висновки.

Наявність автоматичного регулювання режиму руху мобільної колісної робото-технічної платформи передбачає наявність бортової вимірювальної системи, яка має забезпечувати оцінку у тому числі й характеристик взаємодії рухомої платформи із навколишнім середовищем. Оцінка механічної взаємодії мобільної роботизованої колісної платформи із зовнішнім середовищем дозволяє певним чином характеризувати це зовнішнє середовище, що є необхідним для раціонального вибору режиму руху колісної платформи. Взаємодія мобільної роботизованої колісної платформи із зовнішнім середовищем характеризується досить складним чином і її безпосередні вимірювання є не завжди можливими. Для забезпечення інформативності системи автоматизованого управління колісної платформи слід передбачати непрямі вимірювання, що засновані на обробці результатів прямих вимірювань з використанням математичних моделей.

Більшість характеристик механічної взаємодії мобільної колісної робото-технічної платформи із зовнішнім середовищем не можуть бути безпосередньо виміряними, і їх можна оцінити тільки шляхом обробки результатів вимірювань за допомогою спеціальних математичних моделей. Такі математичні моделі мають бути розроблені з урахуванням можливостей щодо забезпечення оцінки необхідних характеристик та обов'язково з урахуванням вимог автоматизованої обробки результатів вимірювань, якщо такі вимоги

передбачені. Математична модель динаміки колісної платформи має відповідним чином враховувати особливості її конструктивного виконання, включаючи компоновку, загальну кількість коліс, кількість рушійних коліс, передачу обертального моменту на рушійні колеса; її характеристики, такі як маса платформи та її складових, розміри платформи та її складових, характеристики рушійних електричних двигунів, а також взаємодію із зовнішнім середовищем, включаючи проковзування, опір коченню коліс та в'язкий опір. Теоретичною основою моделей автоматизованого визначення взаємодії із зовнішнім середовищем є рівняння динаміки досліджуваної колісної електромеханічної платформи та її бортових вимірювальних пристроїв.

Дослідження можливостей математичних моделей для автоматизованого визначення механічної взаємодії роботизованої колісної платформи із зовнішнім середовищем показало, що запропоновані математичні моделі дозволяють із досить високою точністю визначати проковзування коліс платформи, що є важливим показником її взаємодії із навколишнім середовищем. В той же час, оцінка результуючої рушійних сил і сил опору руху мобільної роботизованої колісної платформи значно ускладнюється необхідністю диференціювання наближено визначених функцій.

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. Alyokhina S., Nevliudov I., Romashov Yu., Aleshko K., Bakanov D. Mathematical Modelling of Electromechanical Wheeled Robotic Platforms as Automation Objects // Виробництво & Мехатронні Системи 2021: матеріали V-ої Міжнародної конференції, Харків, 21-22 жовтня 2021 р.: тези доповідей / [редкол. І.Ш. Невлюдов (відповідальний редактор)]. – Харків: [електронний друк], 2021. – 180 с. – р. 21-23.

3. Алешко К.А. Математична модель електромеханічної колісної платформи мобільного роботу із бортовими вимірювальними пристроями // АВТОМАТИЗАЦІЯ ТА ПРИЛАДОБУ-ДУВАННЯ («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. Алешко К.А. Проблема автоматизованого визначення механічної взаємодії колісної робототехнічної платформи із зовнішнім середовищем // 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.

5. Alyokhina S., Nevliudov I., Romashov Y. Safe Transportation of Nuclear Fuel Assemblies by Means of Wheeled Robotic Platforms // Ядерна та радіаційна безпека. – 3(91). – 2021. – р. 43-50. Doi: 10.32918/nrs.2021.3(91).05.

6. Roshanianfard A., Noguchi N., Okamoto H., Ishii K. A review of autonomous agricultural vehicles (The experience of Hokkaido University) // Journal of Terramechanics. – vol. 91. – 2020. – р. 155-183.

7. Tsitsimpelis I., Taylor C.J., Lennox B., Joyce M.J. A review of ground-based robotic systems for the characterization of nuclear environments // Progress in Nuclear Energy. – vol. 111. – 2019. – 109-124.

8. Banos A., Hayman J., Wallace-Smith T., Bird B., Lennox B., Scott T.B. An assessment of contamination pickup on ground robotic vehicles for nuclear surveying application // Journal of Radiological Protection. – vol. 41(2). – 2021. – р. 179-186.

9. Робототехнічні системи та комплекси: Навч. посібник для вузів/І.І. Мачульський, В.П. Зап'ятий, Ю.П. Майоров та ін; за ред. І.І. Мачульського. – Київ: Транспорт, 1999. – 446 с.

10. Динаміка планетоходу/Є.В. Авотін, І.С. Болховітінов, А.Л. Кемурджіан та ін – Київ: Наука, Головна редакція фізико-математичної літератури, 1979. – 440 с.

11. Планетоходи/О.Л. Кемурджіан, В.В. Громов, І.Ф. Кажукало та ін. під ред. А.Л. Кемурджіана. – 2-ге вид., Перероб. та дод. – Харків: Машинобудування, 1993. – 400 с.

12. Агейкін Я.С. Всюдихідні колісні та комбіновані рушії. - Київ: Машинобудування, 1972. – 184 с.

13. Ким Д. П. Теория автоматического управления. Т. 1. Линейные системы. – М.: ФИЗМАТЛИТ, 2003. – 288 с.

14. Ким Д. П. Теория автоматического управления. Т. 2. Многомерные, нелинейные, оптимальные и адаптивные системы: Учеб. пособие. – М.: ФИЗМАТЛИТ, 2004. – 464 с.
15. Вонг Дж. Теорія наземних транспортних засобів: Пер. з англ. – Харків: Машинобудування, 1982. – 284 с.
16. Левін М.А., Фуфаєв Н.А. Теорія кочення колеса, що деформується. – Харків: Наука, 1989. – 272 с.
17. Михайлівський Є.В. Аеродинаміка автомобіля. – Київ: Машинобудування, 1973. – 224 с.
18. Mamalis A.G., Nevliudov I., Romashov Yu. An approach for numerical simulating and processing of measured electrical signals from board sensors installed on wheeled electro-mechanical platforms // Journal of Instrumentation. – vol. 16 (10). – 2021. – P10006. doi: 10.1088/1748-0221/16/10/P10006
19. Аш Ж. Датчики вимірювальних систем: у 2-х кн. / Ж. Аш, П. Андре, Ж. Бофрон та ін – Кн. 1. – Київ: Світ, 1992. – 480 с.
20. Аш Ж. Датчики вимірювальних систем: у 2-х кн. / Ж. Аш, П. Андре, Ж. Бофрон та ін – Кн. 1. – Київ: Світ, 1992. – 424 с.
21. Гантмахер Ф.Р. Лекції з аналітичної механіки. – Харків: Наука, 1966. – 300 с.
22. A.S. Poznyak, 12 - Collection of electromechanical models, Editor(s): A.S. Poznyak, Classical and Analytical Mechanics, Elsevier, 2021, Pages 383-485. <https://doi.org/10.1016/B978-0-32-389816-4.00023-5>.
23. Boutalis Y., Theodoridis D., Kottas T., Christodoulou M.A. System Identification and Adaptive Control. Theory and Applications of the Neurofuzzy and Fuzzy Cognitive Network Models. Cham Heidelberg New York Dordrecht London: Springer, 2014. 313 p.