

Вінницький національний технічний університет

(повне найменування вищого навчального закладу)

Факультет інтелектуальних інформаційних технологій та автоматизації

(повне найменування інституту, назва факультету (відділення))

Кафедра комп'ютерних систем управління

(повна назва кафедри (предметної, циклової комісії))

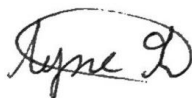
МАГІСТЕРСЬКА КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА

на тему:

«Розробка моделі автоматизованого управління самохідним візком»

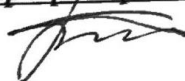
Виконав: магістр 2 курсу, групи 2АКІТР-23м
спеціальності 174 - Автоматизація,
комп'ютерно-інтегровані технології та
робототехніка»

(шифр і назва напрямку підготовки, спеціальності)



Ярослав ЛУЖИНЕЦЬКИЙ
(ім'я ПРИЗВИЩЕ)

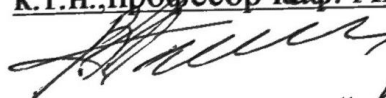
Керівник: к.т.н., професор каф. КСУ



Микола БИКОВ
(ім'я ПРИЗВИЩЕ)

« 4 » 12 2024 р.

Опонент: к.т.н., професор каф. АІІТ



Володимир ПАПІНОВ
(ім'я ПРИЗВИЩЕ)

« 4 » 12 2024 р.

Допущено до захисту
Завідувач кафедри КСУ

Вячеслав КОВТУН

(ім'я та ініціали)

« 4 » грудня 2024 року

Вінниця ВНТУ – 2024 рік

Вінницький національний технічний університет
Факультет інтелектуальних інформаційних технологій та автоматизації
Кафедра комп'ютерних систем управління
Рівень вищої освіти другий (магістерський)
Галузь знань – 17 Електроніка, автоматизація та електронні комунікації
Спеціальність - 174 Автоматизація, комп'ютерно-інтегровані технології та робототехніка
Освітньо-професійна програма - Інтелектуальні комп'ютерні системи

ЗАТВЕРДЖУЮ

Завідувач кафедри КСУ

Вячеслав КОВТУН

«14» жовтня 2024 року

ЗАВДАННЯ
НА МАГІСТЕРСЬКУ КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ СТУДЕНТУ
Лужинецькому Ярославу Юрійовичу

(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема роботи «Розробка моделі автоматизованого управління самохідним візком»

керівник роботи Биков Микола Максимович, к. т. н., доцент
(прізвище, ім'я, по батькові, науковий ступінь, вчене звання)

затверджені наказом ВНТУ від «17» вересня 2024 року № 310

2. Строк подання студентом роботи «1» грудня 2024 року

3. Вихідні дані до роботи: об'єкт управління – самохідний візок на двохколісній осі з вантажем у вигляді перевернутого маятника; регульовані параметри – кут нахилу осі маятника до вертикалі; параметри, що оптимізуються в моделі – радіус колеса, довжина і маса маятника; середовище моделювання - Матлаб.

4. Зміст текстової частини: Вступ; Аналіз предметної області та обґрунтування вибраного методу управління самохідним візком; Розробка моделі автоматизованого управління; Розробка алгоритму і програмної моделі; Машинний експеримент; Економічний розділ.

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

1. Структурна схема системи візок- перевернутий маятник – 1 аркуш;
2. Математична модель маятничкової системи – ПД, 2 аркуші;
3. Структурна схема блоку управління – 1 аркуш;
4. Програмна модель в середовищі Матлаб – 1 аркуш;
5. Результати моделювання – 1 аркуш;
6. UML діаграма використання – 1 аркуш.

6. Консультанти розділів роботи

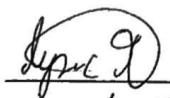
Розділ змістової частини роботи	Прізвище, ініціали та посада консультанта	Підпис, дата	
		завдання видав	завдання прийняв
Розділ 4	Кавецький В.В. – доцент кафедри економіки підприємства і виробничого менеджменту	 16.11.2024	 18.11.2024

7. Дата видачі завдання “ 14 ” жовтня 2024 року

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

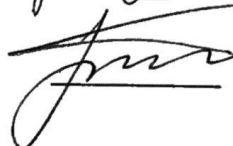
№ з/п	Назва та зміст етапу	Термін виконання		При- мітка
		початок	закінчення	
1	Аналіз предметної області і обґрунтування обраного методу моделювання	07. 09. 2024 р.	14.09.2024 р.	
2	Розробка моделі руху самохідного візка з перевернутим маятником	15.09.2024 р.	16.09.2024 р.	
3	Розробка моделі нечіткого регулятора	17.09.2024 р.	24.09.2024 р.	
4	Розробка програмної моделі руху візка	25.09.2024 р.	02.11.2024 р.	
5	Тестування розроблених моделей	03.11.2024 р.	15.11.2024 р.	
6	Підготовка економічної частини	16.11.2024 р.	19.11.2024 р.	
7	Апробація і публікація результатів роботи	20.11.2024 р.	24.11.2024 р.	
8	Оформлення текстової частини пояснювальної записки	19.11.2024 р.	30.11.2024 р.	
9	Графічні матеріали структурна схема моделі системи схема алгоритму управління UML- діаграма використання результати машинного експерименту плакати демонстраційні	22.11.2024 р. 24.11.2024 р. 26.11.2024 р. 28.11.2024 р. 29.11. 2024 р.	23.11.2024 р. 25.11.2024 р. 27.11.2024 р. 29.11.2024 р. 30.11.2024 р.	
10	Попередній захист	01 грудня 2024 р.		
11	Остаточний захист	09 грудня 2024 р.		

Студент



Ярослав ЛУЖИНЕЦЬКИЙ

Керівник роботи



Микола БИКОВ

АНОТАЦІЯ

УДК 62.529

Лужинецький Я. Ю. Розробка моделі автоматизованого управління самохідним візком. Магістерська кваліфікаційна робота зі спеціальності 174 – автоматизація, комп'ютерно-інтегровані технології та робототехніка, освітня програма – інтелектуальні комп'ютерні системи. Вінниця: ВНТУ, 2024. - 120 с.

На укр. мові. Бібліогр.: 44, назв; рис.: 36; табл. 11.

Метою магістерської кваліфікаційної роботи є підвищення ефективності руху транспортних засобів за рахунок розробки удосконаленої моделі автоматизованого управління рухомим перевернутим маятником, що враховує можливість використання потенціальної енергії маятника.

В роботі проведено огляд принципів побудови сучасних двоколісних транспортних платформ у вигляді перевернутого маятника, принципів стабілізації їх руху і проаналізовано методи управління ними, їх недоліки і переваги. Сформульовано завдання розробки моделі енергоефективного управління самохідним двоколісним візком.

В теоретичній частині сформульовано вимоги до моделювання та розроблено математичну модель автоматизованого енергоефективного управління рухом транспортної двоколісної платформи.

У розділі програмного забезпечення розроблено програмну модель автоматизованого управління рухом візка з перевернутим маятником, проведено тестування її тестування в середовищі MATLAB/Simulink.

Графічна частина містить 10 плакатів і креслень з ілюстрацією результатів роботи.

Ключові слова: моделювання, система автоматизованого управління, транспортна платформа, перевернутий маятник.

ABSTRACT

UDK 62.529

Luzhynetskyi Ya. Yu. Development of a model of automated control of a self-propelled cart. Master's qualification work in the specialty 174 - automation, computer-integrated technologies and robotics, educational program - intelligent computer systems. Vinnytsia: VNTU, 2024. - 120 p.

In Ukrainian. Bibliography: 44, titles; fig.: 36; table. 11.

The purpose of the master's qualification work is to increase the efficiency of vehicle movement by developing an improved model of automated control of a moving inverted pendulum, which takes into account the possibility of using the potential energy of the pendulum.

The work reviews the principles of construction of modern two-wheeled transport platforms in the form of an inverted pendulum, the principles of stabilizing their movement and analyzes the methods of controlling them, their disadvantages and advantages. The task of developing a model of energy-efficient control of a self-propelled two-wheeled cart is formulated.

In the theoretical part, the requirements for modeling are formulated and a mathematical model of automated energy-efficient control of the movement of a transport two-wheeled platform is developed.

In the software section, a software module for automated control of the movement of a cart with an inverted pendulum is developed, its testing is carried out in the MATLAB/Simulink environment.

The graphic part contains 10 posters and drawings illustrating the results of the work.

Keywords: modeling, automated control system, transport platform, inverted pendulum.

ЗМІСТ

ВСТУП.....	4
 1 АНАЛІЗ СТАНУ ПРОБЛЕМИ УПРАВЛІННЯ РУХОМ КОЛІСНИМИ ПЛАТФОРМАМИ У ВИГЛЯДІ ПЕРЕВЕРНУТОГО МАЯТНИКА.....	7
1.1 Суть науково-технічної проблеми, що виникла на даному етапі..	7
1.2 Огляд методів і моделей управління рухом невірноважених колісних платформ.....	13
1.3 Схематичний опис об'єкта і обґрунтування вибору моделі	20
1.4 Висновки до розділу.....	22
 2 АНАЛІЗ І ПОБУДОВА МОДЕЛІ ПЕРЕВЕРНУТОГО МАЯТНИКА НА САМОХІДНОМУ ВІЗКУ	23
2.1 Класифікація моделей і основні вимоги до моделювання	23
2.2 Побудова моделі рухомого візка з перевернутим маятником	34
2.3 Розробка моделі енергоефективного управління	43
2.4 Модель нечіткого управління рухом візка.....	56
2.5 Висновки до розділу.....	64
3 ПРОГРАМНА МОДЕЛЬ.....	65
3.1 Вибір і обґрунтування середовища моделювання.....	65
3.2 Моделювання системи в середовищі MATLAB/Simulink.....	68
3.3 Результати тестування моделі	72
3.4 Висновки до розділу	73
 4 ЕКОНОМІЧНА ЧАСТИНА.....	74
4.1 Оцінювання наукового ефекту	74
4.2 Розрахунок витрат на здійснення науково-дослідної роботи	78
4.3 Оцінювання важливості та наукової значимості науково-дослідної роботи	90

4.5 Висновки до розділу.....	92
ВИСНОВКИ.....	93
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ.....	94
ДОДАТКИ	
ДОДАТОК А (обов'язковий). Протокол перевірки кваліфікаційної роботи на наявність текстових запозичень.....	99
ДОДАТОК Б (обов'язковий). Технічне завдання	100
ДОДАТОК В (довідковий). Лістинги програм.....	104
ДОДАТОК Г (обов'язковий). Ілюстративна частина	107

ВСТУП

Актуальність теми. Зростання в сучасних умовах розвитку суспільства попиту на робототехніку, автономні транспортні засоби та системи стабілізації обумовлює необхідність у розробці точних математичних моделей та алгоритмів управління. Це актуально для таких галузей, як логістика, охорона здоров'я, виробництво та військова техніка.

Розробка моделі управління транспортними засобами, що представляють собою двоколісну пасажирську у вигляді самохідного візка є важливим завданням у сфері робототехніки, автоматизації та сучасних транспортних технологій. Така платформа є яскравим прикладом нестабільної системи у вигляді зворотного маятника, що вимагає розробки точних алгоритмів стабілізації, адаптації та маневрування. Її дослідження має значний вплив як на теоретичні аспекти, так і на практичне застосування в різних галузях. Двоколісна платформа з перевернутим маятником має нелінійну динаміку, яка об'єднує завдання стабілізації перевернутого маятника та одночасного управління рухом платформи. Проблема її стабілізації вирішена, наприклад, в таких самобалансованих транспортних засобах, як Segway [1, 2]. Однак таке рішення не відповідає сучасним вимогам до зменшення затрат енергії під час використання подібних транспортних засобів. Дані вимоги можуть бути виконані шляхом урахування в моделі керування того факту, що вантажу у вигляді зворотного маятника притаманна потенціальна енергія, яка може бути використана для потреб руху в разі виконання визначених умов управління.

Тому тема магістерської кваліфікаційної роботи, присвячена розробці моделі автоматизованого управління самохідним візком з вантажем у вигляді перевернутого маятника, яка покращує енергетичні характеристики транспортних засобів, є **досить актуальною**.

Метою роботи є підвищення ефективності руху транспортних засобів за рахунок розробки удосконаленої моделі автоматизованого управління

перевернутим маятником, що враховує можливість використання потенціальної енергії маятника для зменшення загальних енергозатрат на рух транспортного засобу.

Для досягнення поставленої мети потрібно розв'язати низку таких задач:

- Провести аналіз недоліків існуючих двоколісних платформ у вигляді перевернутого маятника і обрати метод автоматизованого управління рухом, яка дозволяє їх усунути;
- Обрати тип моделювання двоколісного самохідного візка з вантажем у вигляді перевернутого маятника та розробити математичну модель енергоефективного автоматизованого управління для нього;
- Для підтвердження адекватності моделі провести альтернативне моделювання управління візком відомими нечіткими методами;
- Розробити програмну модель в середовищі MATLAB/Simulink і провести її тестування.

Об'єктом дослідження є процеси управління двоколісним самохідним візком з вантажем у вигляді перевернутого маятника з урахуванням використання його потенціальної енергії для потреб руху.

Предметом дослідження є моделі перевернутого маятника.

Науковою новизною роботи є удосконалена модель управління перевернутим маятником, в якій, на відміну від існуючих, введено таке обмеження на межі кута відхилення маятника від положення рівноваги, яке дає можливість використати потенціальну енергію маятника для зменшення витрат енергоресурсів на рух колісної платформи.

Практична цінність. Розроблена удосконалена модель і алгоритми управління на її основі дозволяють конструювати транспортні засоби з меншими енергозатратами на їх рух.

Особистий внесок здобувача. Здобувачем розроблена модель і алгоритми управління.

Впровадження. Результати бакалаврської роботи використовуються в наукових дослідженнях кафедри КСУ, а також у викладанні навчальних дисциплін з автоматизації технологічних процесів і виробництв.

Апробація. Результати досліджень доповідались на міжнародній науково-технічній конференції молодих науковців Вінницького національного технічного університету «Молодь в науці; дослідження, проблеми, перспективи» (МН-2025).

Публікації. Автором за результатами доповіді на конференції «МН-2025» опубліковані тези доповіді «Модель автоматизованого управління самохідним візком». Режим доступу - <https://conferences.vntu.edu.ua/index.php/mn/mn2025/author> .

1 АНАЛІЗ СТАНУ ПРОБЛЕМИ УПРАВЛІННЯ РУХОМ КОЛІСНИМИ ПЛАТФОРМАМИ У ВИГЛЯДІ ПЕРЕВЕРНУТОГО МАЯТНИКА

1.1 Суть науково-технічної проблеми, що виникла на даному етапі

Робототехніка почала розвиватися в 60-х роках ХХ століття, коли стрімкий розвиток промисловості та електроніки дозволив створити автоматизовані системи для конвеєрного складання споживчих товарів. Відтоді сфери застосування роботів значно розширилися, вийшовши далеко за межі виробничих процесів. На початку нового тисячоліття робототехніка активно інтегрувалася у різні аспекти людської діяльності, включаючи повсякденне життя.

Традиційні роботи, що взаємодіють із людьми, зазвичай мають широку основу і переміщуються з невеликими прискореннями, щоб забезпечити стійкість. У таких мобільних колісних роботів центр мас розташовують ближче до поверхні руху, а їхня стійкість досягається наявністю як мінімум трьох точок опори [3].

Балансуючі роботи на двох колесах мають компактнішу основу завдяки відсутності вимоги до статичної стійкості. Колісна конструкція дозволяє їм розвертатися на місці, забезпечуючи високу мобільність. Крім того, такі роботи характеризуються зниженим енергоспоживанням.

Зміщення центру тяжіння дає змогу двоколісним роботам утримувати рівновагу, одночасно переміщуючи свої частини, наприклад, маніпулятори.

Такі роботи можуть виконувати функції мобільних помічників, оснащених інструментами для виконання допоміжних завдань за командою оператора через системи доповненої реальності. Вони можуть бути використані як дистанційно керовані навантажувачі, для картографування небезпечних зон, виконання охоронних функцій (наприклад, як мобільні відеокамери), у вигляді інвалідних візків або як персональні засоби пересування [4].

Методи та засоби управління двоколісними балансуючими роботами мають ключове значення для практичної робототехніки, оскільки на їх основі можна створювати системи автоматичного керування для будь-яких мехатронних пристроїв [5-12].

Розглянемо основні конструктивні, структурно-функціональні характеристики та сфери застосування сучасних балансуючих двоколісних роботів.

Сучасні колісні роботи відрізняються різноманітністю конструкцій, високою функціональністю та адаптивністю до виконання завдань у різних умовах. Розглянемо характеристики тільки тих колісних роботів, що виконують функцію транспортування аналогічно самохідному колісному візку, що розглядається в даній роботі. До таких пристроїв в першу чергу відносяться промислові та сервісні роботи таких типів:

- KUKA KMP 1500: мобільна платформа для автоматизації складських процесів.
- Omron LD Series: автономні мобільні роботи для логістики.
- MiR (Mobile Industrial Robots): роботи для транспортування вантажів у виробничих та складських умовах.
- Starship Technologies: роботи для доставки їжі або товарів у міських умовах.
- Relay (Saviioke): роботи для готелів і лікарень, що доставляють предмети або ліки.
- Segway PT: персональний транспорт для коротких поїздок.
- EN-V (Segway + GM): двоколісний концепт автомобіля для міського транспорту.
- Handle (Boston Dynamics): робот з колесами для транспортування важких вантажів.

Для управління вказаними роботами використовуються системи керування різного типу, в яких використовуються різні типи контролерів: пропорційно-інтегрально-диференціальні (PID), лінійно-квадратичні

регулятори, нечітка логіка. Для сучасних роботів характерним є використання алгоритмів штучного інтелекту для автономного прийняття рішень та адаптації до змін середовища та використання фільтрів (наприклад, Калмана) для покращення точності датчиків. В залежності від призначення вони забезпечуються датчиками різного типу, такими як акселерометри, гіроскопи, енкодери, камери, ультразвукові й інфрачервоні датчики, лідари. Багатьм з них притаманне використання різних систем навігації, що надає їм здатність будувати карти місцевості, уникати перешкод і визначати своє місцезнаходження (SLAM — одночасна локалізація та побудова карти).

Робот **nBot** (рис. 1.1) використовує гіроскоп для отримання швидкості зміни кута нахилу та акселерометр для отримання значення кута нахилу [13,14]. Сигнали з обох сенсорів об'єднуються за допомогою фільтра Вінера (Weiner). Управління двигунами здійснюється шляхом подачі напруги, яка пропорційна таким параметрам, як кут нахилу, кутова швидкість, положення шасі та його швидкість [13,14]. Повороти реалізуються за рахунок різниці напруги між двигунами: до одного додається значення, а з іншого віднімається. Завдяки цьому робот може змінювати напрямок, зберігаючи рівновагу. Рух по прямій забезпечується шляхом зміни кута балансу [15].

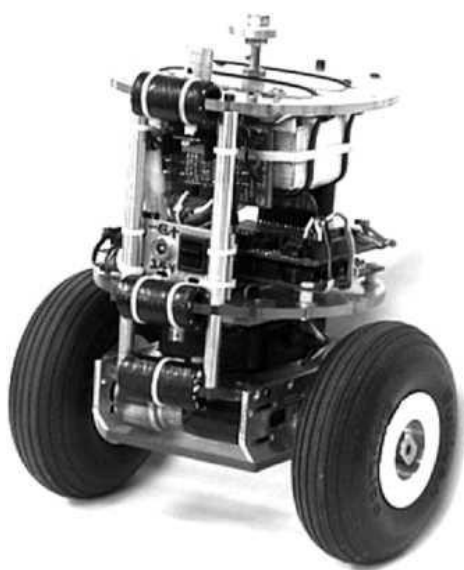


Рисунок 1.1 – Колісний робот nBot

Робот **JOE** (рис. 1.2) створений як мініатюрний прототип транспортного засобу для перевезення людей [16,17]. Стабілізація забезпечується регулятором простору станів, який обробляє дані з гіроскопа та енкодерів двигунів [18].

Цей робот, розроблений Пітером Міллером, визначає положення шасі за допомогою енкодерів, а швидкість обчислюється шляхом диференціювання значення положення. Для точного визначення кута нахилу та швидкості використовуються гіроскоп і акселерометр, об'єднані за допомогою фільтра Калмана. Це дозволяє уникнути втрати точності з часом. Керування JOE здійснюється через нелінійну систему на базі нечіткої логіки, яка розподіляє керуючі сигнали між двигунами кожного колеса [19].



Рисунок 1.2 – Робот JOE

Ballbot (рис. 1.3) — це робот, який утримує рівновагу, балансуючим на кулі. Він був розроблений для безпечної та ефективної взаємодії з людьми. Система керування роботом (рис. 1.4) побудована на двох контурах: внутрішній контур використовує РІ-регулятор, а зовнішній — лінійно-квадратичний регулятор [20,21,22,23].

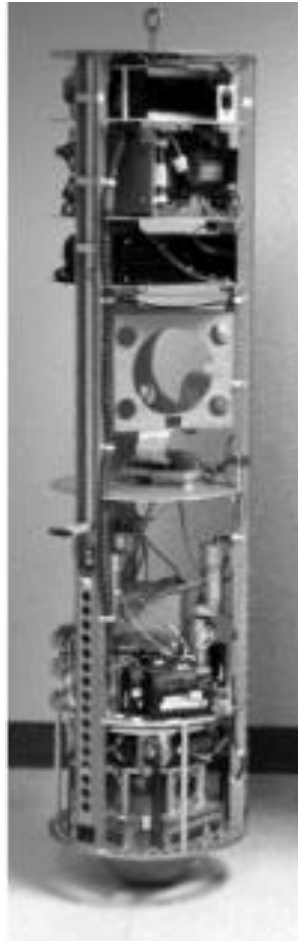


Рисунок 1.3 –Робот Ballbot

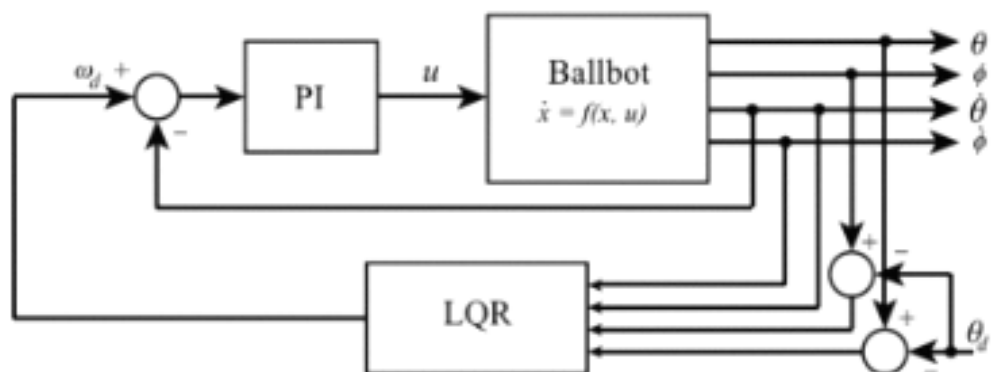


Рисунок 1.4 – Схема системи управління роботом Ballbot

Segway це комерційна платформа, показана на рис. 1.5, що використовується як засіб транспортування на відносно короткі відстані. Її застосовують у різних сферах, таких як туризм та поліцейські патрулі [24].



Рисунок 1.5 – Двохколісний робот Segway

Роботизована платформа **EN-V** (рис. 1.6) — модель двоколісного автомобіля, розроблена компанією Segway у співпраці з General Motors. Відмінністю цього транспортного засобу від інших нестійких двоколісних роботів є спосіб управління: воно здійснюється шляхом зміщення центру тяжіння через переміщення вантажу відносно осі коліс [25,26].

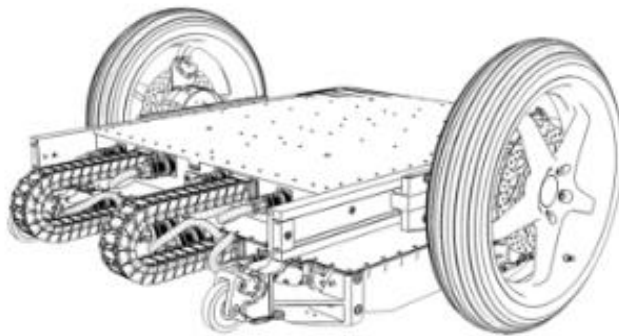


Рисунок 1.6 – Роботизована платформа EN-V

Основною проблемою цих роботів є значні затрати енергії на забезпечення руху, вирішення якої пропонується в даній роботі за рахунок використання потенціальної енергії вантажу.

1.2 Огляд методів і моделей управління рухом неврівноважених колісних платформ

Модельовану в магістерській роботі механічну систему у вигляді самохідного двоколісного візка з вантажем на борту можна розглядати як рухомий перевернутий маятник [[27-31].

Перевернутий маятник на колісній платформі (або балансувальний робот) є класичною моделлю нелінійної динамічної системи, що широко використовується для дослідження алгоритмів управління. Ця задача є викликом для систем управління через нестабільний характер системи, велику чутливість до зовнішніх збурень і нелінійності.

Нижче розглянуто основні підходи до моделювання і розробки систем управління перевернутим маятником на колісній платформі, огляд яких наведено в роботах [32, 33]. Ці джерела покривають різні аспекти мобільних роботів на колісних платформах, від кінематичного моделювання до алгоритмів керування і застосувань.

Однією з центральних проблем теорії управління є стабілізація руху неврівноважених колісних платформ.

Управління з метою стабілізації руху є однією з ключових проблем у теорії управління рухом. Традиційний підхід до її вирішення базується на застосуванні достатніх умов асимптотичної стійкості руху. Використання відповідної функції Ляпунова дозволяє не лише забезпечити стійкість, але й оцінити якість перехідних процесів. Завдання стабілізації стало важливим стимулом для розвитку сучасної теорії управління, включаючи теорію оптимального управління, яка за понад півстоліття зазнала значного прогресу.

Виникає природне питання: які можливості теорія оптимального управління надає для вирішення класичних задач регулювання, які залишаються актуальними й сьогодні? Тривалий час її застосування у сфері

стабілізації обмежувалося через відсутність ефективних методів синтезу оптимальних систем.

Класичне завдання регулювання полягає у побудові зворотного зв'язку, що переводить динамічну систему з околу одного стану рівноваги до околу іншого, забезпечуючи стабілізацію відносно нового стану рівноваги. Перша частина цього завдання слугувала основою для створення сучасної теорії оптимального управління, тоді як друга розглядається у межах теорії стабілізації. З появою математичної теорії оптимальних процесів стало можливим створення оптимальних стабілізуючих зворотних зв'язків.

В цій галузі перші результати були досягнуті Р. Калманом і А.М. Летовим, які показали, що оптимальні зворотні зв'язки для лінійно-квадратичної задачі з нескінченним горизонтом є лінійними і стабілізуючими. Для задач із кінцевим горизонтом аналогічні підходи були використані у [34]. Проте ці методи спиралися на аналітичні рішення задач оптимального управління і не враховували прямих геометричних обмежень на стабілізуючі впливи.

На сьогодні загальновизнано, що такі геометричні обмеження є типовими для сучасних систем управління і повинні враховуватися при розробці стабілізуючих зворотних зв'язків.

При використанні результатів теорії оптимального управління та стабілізації для вирішення задач регулювання виникають певні складнощі. Насамперед, завдання точного переведення системи в околицю нового стану рівноваги за визначений час не завжди є природним для систем, що продовжують функціонувати після досягнення мети та перебувають під впливом постійних збурень.

Також важко визначити точний момент переходу від задачі оптимального управління до задачі стабілізації. У теорії оптимального управління зазвичай розглядаються процеси з кінцевою тривалістю, основні результати яких формуються як обмежені програмні управління. Ці управління не є типовими для теорії стабілізації чи класичної теорії

автоматичного регулювання, які орієнтуються на створення стабілізуючих зворотних зв'язків. Водночас теорії стабілізації та автоматичного регулювання розглядають процеси необмеженої тривалості, проте часто не враховують обмежень на управління чи вимог до якості перехідних процесів.

Метод введення обмежених стабілізуючих зворотних зв'язків було запропоновано в [35]. Він ґрунтувався на реалізації оптимальних зворотних зв'язків, описаних у [34]. Пізніше цей підхід було узагальнено для стабілізації лінійних систем, використовуючи позиційні рішення лінійно-квадратичних задач оптимального управління. У подальшому виникла необхідність розширення досліджень на задачі стабілізації нелінійних систем.

Щодо нечіткого управління, існує багато науково-технічної літератури, зокрема зосередженої в Японії, США та країнах Європи. Праці з цієї тематики зазвичай коротко викладають основи нечіткої логіки, а потім переходять до аспектів нечіткого управління. Наприклад, робота «Нейронні мережі, генетичні алгоритми та нечіткі системи» авторів Д. Рутковської, М. Пілінського і Л. Рутковської присвячена «інтелектуальним обчисленням». Вона містить базові знання про генетичні алгоритми, еволюційне програмування, нечіткі системи та їх взаємозв'язок із нейронними мережами.

Kevin M. Passino та Stephen Yurkovich в своїй роботі описують основні поняття нечіткого управління та нечітких (fuzzy) адаптивних систем, зокрема способи їх оцінки, синтезу та ідентифікації. Вони наводять приклади як простих форм нечіткого управління, так і більш складних «інтелектуальних» систем управління. Крім того, автори розглядають методи налагодження нечітких ПД-регуляторів і апроксимації даних

У своїй роботі Н. П. Деменков досліджує питання застосування нечіткого управління для розв'язання складних, неформалізованих задач оптимізації в технічних системах. Він детально описує методи розробки автоматизованих систем управління технологічними процесами (АСУ ТП), базуючись на теорії нечіткого управління та відповідності міжнародним стандартам. Особливу увагу приділено аналізу існуючих програмних пакетів,

таких як MATLAB, Concept і Трейс Моуд, що підтримують реалізацію нечіткого управління.

С. Д. Штовба у своїй роботі зосереджується на проектуванні нечітких систем за допомогою пакета Fuzzy Logic Toolbox у середовищі MATLAB. Він надає необхідну базову інформацію про нечіткі множини, нечітку логіку та детально викладає теоретичні аспекти проектування нечітких систем.

Л. Д. Певзнер у своїй роботі також розглядає основні поняття нечіткої логіки, нечітких множин, операцій над ними та нечітких відносин.

Сучасні методи управління виробничими процесами, засновані на комп'ютерних технологіях, широко використовуються на більшості промислових підприємств. З 80-х років минулого століття до сьогодні інтелектуальні системи управління, включаючи системи нечіткого управління (по іншому "fuzzy control"), стали популярними в різних галузях науки та техніки. Цей термін перекладається як «нечітке (розмите, неясне) управління».

Актуальність підходу нечіткого управління визначається двома ключовими чинниками:

- Зростання складності математичних моделей реальних систем і процесів управління. Це пов'язано з прагненням підвищити точність моделей, враховуючи дедалі більше факторів, що впливають на процес ухвалення рішень.

- Неефективність традиційних методів моделювання у випадках, коли вихідні дані проблеми є завідомо неточними або неповними.

Зважаючи на ці аспекти, доцільним є використання підходів, які спеціально орієнтовані на створення моделей, здатних враховувати неточність і неповноту вихідних даних.

Що стосується стабілізації маятника, то цей ефект був відкритий ще у 1908 році. Стефенсон довів, що верхній стан рівноваги маятника з підвісом, який здійснює вертикальні осциляції, може бути стабілізований. У своїх дослідженнях він розглядав випадок маятника, підвіс якого отримує серію

імпульсів, забезпечуючи рух із постійною швидкістю уздовж лінії, що утворює малий кут зі стрижнем маятника. Автор роботи визначив середній рух, який залишається стійким, і сформулював умови стабільності верхнього стану рівноваги маятника за умови швидких вертикальних гармонійних коливань підвісу. Подібним чином він описав умови стійкості систем із двома або трьома стрижнями, з'єднаними на кінцях, у випадку швидких вертикальних коливань точки підвісу.

У цій задачі теорія рівняння Мат'є була використана в роботах Ван дер Поля та Стретта. Вони дослідили стійкість рішень рівняння Мат'є, побудували діаграму стійкості в площині двох параметрів і проаналізували умови, за яких осциляційний вплив може стабілізувати систему, яка початково була нестійкою.

Гірш зосередився на задачі руху маятника, точка підвісу якого здійснює малі коливання високої частоти в площині маятника. Вичерпне дослідження малих коливань маятника з підвісом, що періодично вібрує, провів Ерде у 1934 році, врахувавши загасання і застосувавши рівняння Хілла та теорію Флоке.

У 1932 році Ловенстерн вивчив вплив високочастотних коливань малої амплітуди на певний клас динамічних систем і вперше отримав результати узагальненого характеру. Він вивів рівняння руху для загальних лагранжевих систем, що зазнають швидких коливань, а також рівняння для малих відхилень поблизу станів рівноваги. При цьому Ловенстерн розглядав виключно періодичні збудження.

Аналіз задачі стійкості верхнього стану рівноваги перевернутого маятника з підвісом, що здійснює лінійні рухи, був представлений у виданні 1950 року.

Капіца вивчив задачу руху маятника з підвісом, що коливається, в нелінійній постановці. Він дослідив стійкість перевернутого маятника, використовуючи концепцію ефективного потенціалу, ним запропоновану. Подібні результати отримані Ландау та Ліфшицем. Капіца також

запропонував застосовувати метод вібраційної стабілізації до інших механічних об'єктів, наприклад, великих молекул.

Строгий математичний доказ стійкості верхнього стану рівноваги маятника з вертикально осцилюючим підвісом отримав Боголюбов. У своїх дослідженнях він припустив, що амплітуда вібрацій мала, а частота — висока. Його метод базується на цікавому перетворенні, яке дозволяє застосувати перше наближення методу усереднення для отримання результатів.

Результати робіт Ловенстерна узагальнив Богданов, розглянувши вплив малих, швидких параметричних квазіперіодичних збуджень. Проте його аналіз обмежується випадком лінійних рівнянь. У співпраці з Сітроном вони експериментально продемонстрували в поведінці маятника з осцилюючим підвісом різні ефекти.

Дослідженню нелінійних динамічних систем із параметричними збудженнями присвячені роботи Хемп і Сетна. Вони проаналізували вплив швидких параметричних збуджень, а також вивчили одночасний вплив швидких і повільних параметричних збуджень. Особливу увагу було приділено випадкам, коли частоти швидких збуджень є близькими одна до одної.

Бурд висвітлив у своїх роботах питання біфуркації для майже періодичних коливань із верхнього стану рівноваги обернутого маятника з вертикальним підвісом, що осцилює. Також він дослідив біфуркації майже періодичних коливань із верхнього та нижнього станів рівноваги, коли рух підвісу описується майже періодичною функцією з двома близькими частотами.

Доведення про можливість стабілізації верхнього стану рівноваги маятника з вертикально осцилюючим підвісом запропонував в своїх роботах Леві. Він також надав просте фізичне пояснення цього явища, вказуючи, що основою стабілізації є прості геометричні факти, приховані за стандартною процедурою усереднення. Цей підхід також було використано для відкриття

стійких π -кінків у рівнянні синус-Гордона під впливом швидко осцилюючої сили.

Ідея утримання заряджених частинок у осцилюючому електричному полі, відома як "пастка Пола", була запропонована в 1958 році. За це відкриття Вольфганг Пол отримав Нобелівську премію у 1989 році. Виникненню цієї технології передувала концепція сильного фокусування в синхротронах.

В свій час стабілізаційні механізми, подібні до тих, що використовуються в пастці Пола, знайшли нове застосування у створенні яскравих солітонів у двовимірному конденсаті Бозе-Ейнштейна. Яскравий солітон — це стійка відокремлена хвиля, щільність якої перевищує щільність навколишнього конденсату.

Серед інших важливих досліджень слід відзначити роботи Зеньковської, Симоненка та Шлейкеля, які вивчали вплив високочастотних вібрацій на виникнення конвекції в рідині.

Робота Блехмана *"Вібраційна механіка"* присвячена опису дивовижних явищ, які виникають під впливом вібрацій у нелінійних механічних системах. Автор розглядає такі явища, як зміна стану системи під дією швидких вібрацій, модифікація фізико-механічних властивостей і характеристик, трансформація положень рівноваги (їх стабілізація або дестабілізація), зміна частот вільних коливань, вібраційне підтримання обертання та самосинхронізація неврівноважених роторів. Блехман запропонував загальний підхід для аналізу цих явищ, назвавши його "вібраційною механікою".

Останнім часом відновився інтерес до застосування високочастотних вібрацій для управління низькочастотними властивостями структур, зокрема їх рівноважними станами, стійкістю, ефективними власними частотами та амплітудами коливань.

Важливими в даному напрямку є також роботи Юдовіча, що присвячені вібраційній динаміці систем зі зв'язками, та робота Стрижака, яка присвячена опису методів дослідження маятникових систем.

1.3 Схематичний опис об'єкта і обґрунтування вибору моделі

Конструкція самохідного візка з балансуєчим роботом у вигляді перевернутого маятника є досить простою, що надає їй низку переваг. Спрощений варіант такої конструкції показаний на рисунку 1.7. Використання двох коліс зменшує розміри пристрою, підвищує його надійність, а окреме керування кожним колесом (завдяки двигунам постійного струму) забезпечує високу маневреність. Завдяки цьому платформа може повертати в русі або розвертатися на одному місці. Головним недоліком є нестійкість платформи: при вимкненні двигунів вона втрачає рівновагу і падає. Для забезпечення стійкості використовується система автоматичного керування. Замкнений контур управління, який постійно вимірює кут відхилення, дозволяє з високою частотою генерувати керуючі сигнали, що коригують положення платформи.

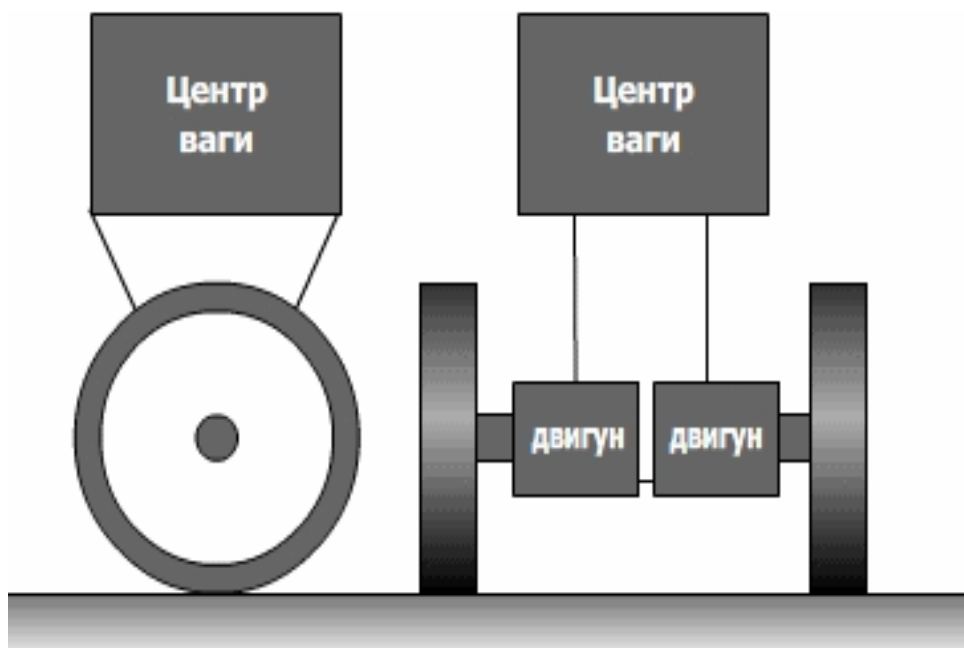


Рисунок 1.7 – Балансуєчий робот на самохідному візку

Ідея підтримки балансу досить проста. Конструкція має єдину точку рівноваги коли центр мас вантажу знаходиться безпосередньо над віссю обертання. Якщо центр ваги конструкції відхиляється убік, то сила тяжіння частково передається через опору до землі, а інша її складова створює момент обертання конструкції, який прагне повалити конструкцію на бік.

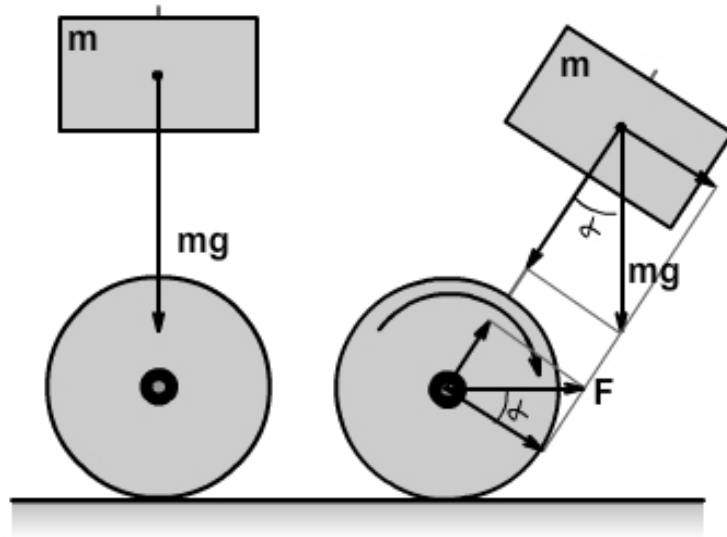


Рисунок 1.8 – Фізична модель візка з перевернути маятником

Для компенсації цього моменту система повинна почати рух із прискоренням у бік падіння. При цьому сила F , що виникає внаслідок прискорення, також розподіляється: одна складова діє в напрямку опори, а інша створює зворотний момент, який утримує конструкцію від падіння, що показано на рисунку 1.8.

Таким чином, процес підтримки рівноваги можна умовно поділити на два етапи: визначення кута нахилу конструкції щодо стану рівноваги та керування обертанням коліс залежно від величини відхилення, щоб створити силу, яка компенсує падіння.

На відміну від представлених моделей роботів, які використовують енергію двигунів для керування обертанням коліс, розроблювана в роботі модель застосовує додатково потенціальну енергію маятника. Це дозволяє

знизити енергетичні витрати на рух транспортного засобу, що є її головною перевагою перед іншими концепціями.

1.4 Висновки до розділу

В даному розділі було визначено суть проблеми автоматизованого енергоефективного управління самохідним двоколісним візком, проведено огляд принципів побудови сучасних у вигляді транспортних платформ з перевернутим маятником і методів управління ними, проведено огляд і аналіз робіт, в яких вирішуються задачі моделювання нестійких систем і їх стабілізації. Також було наведено схематичний опис об'єкта управління і сформульовано завдання розробки моделі енергоефективного управління даним об'єктом.

2 АНАЛІЗ І ПОБУДОВА МОДЕЛІ ПЕРЕВЕРНУТОГО МАЯТНИКА НА САМОХІДНОМУ ВІЗКУ

2.1 Класифікація моделей і основні вимоги до моделювання

2.1.1 Класифікація моделей

Модель (від лат. *modulus* – міра, норма, зразок) – це реальний або уявний об'єкт, який замінює оригінал у процесі дослідження, зберігаючи основні риси, важливі для вивчення. Процес створення і застосування моделі називається моделюванням [36, 37].

Для розуміння суті розроблених в магістерській роботі моделей наведемо спочатку їх класифікацію за ознакою «спосіб реалізації моделі» (рис. 2.1).

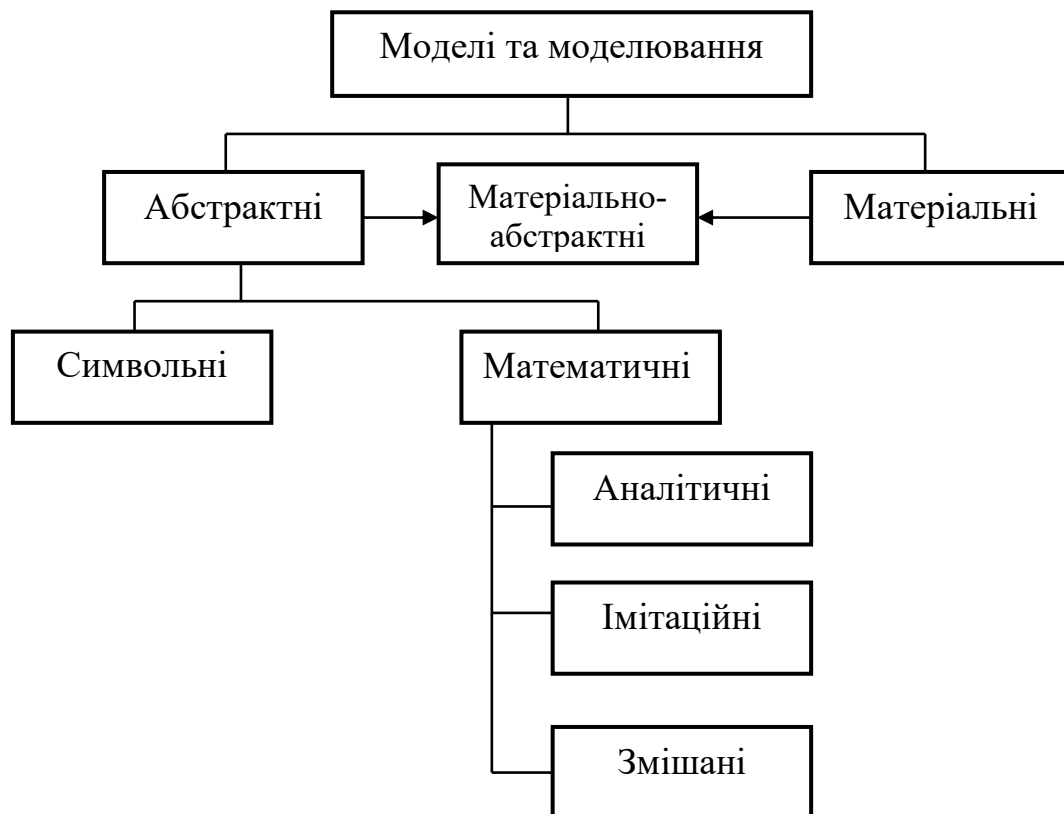


Рисунок 2.1 - Класифікація моделей за їх способом реалізації

Залежно від способу реалізації, моделі поділяються на дві основні групи:

- абстрактні (уявні) моделі;
- матеріальні моделі.

У практиці моделювання часто зустрічаються змішані, абстрактно-матеріальні моделі.

Абстрактні моделі є конструкціями, створеними за допомогою загальноприйнятих символів, нанесених на папір, інші носії або представлених у вигляді комп'ютерної програми. Залежно від особливостей, абстрактні моделі можна розділити на:

- символічні;
- математичні.

Символічна модель – це логічний об'єкт, що замінює реальний процес і відображає його основні властивості через систему знаків або символів. До таких моделей належать слова природної мови (вербальні моделі), спеціалізовані терміни, графіки, діаграми тощо. Вербальні моделі передбачають опис об'єкта словами і часто використовуються на початкових етапах моделювання в технічних сферах. Символічна модель може мати самостійне значення, але зазвичай слугує першим етапом у процесі створення інших видів моделей.

Математичне моделювання передбачає зіставлення модельованого об'єкта з математичною конструкцією, яка називається математичною моделлю. Подальше вивчення цієї моделі дозволяє отримати характеристики реального об'єкта.

Математичні моделі поділяються на:

- аналітичні;
- імітаційні;
- змішані (аналітико-імітаційні).

Аналітичні моделі представляють об'єкт моделювання через систему математичних співвідношень, таких як алгебраїчні, диференціальні, інтегро-

диференціальні рівняння або логічні умови. Наприклад, рівняння Максвелла описують електромагнітне поле, а закон Ома – електричне коло.

Для складних систем побудова аналітичної моделі, яка б точно відображала реальний процес, часто виявляється складною або навіть неможливою. Проте існують процеси, наприклад, марковські, для яких ефективність використання аналітичних моделей підтверджена практикою.

Імітаційне моделювання передбачає створення моделі у вигляді алгоритму або комп'ютерної програми, що імітує зміну станів системи. Виконання цього алгоритму на комп'ютері дозволяє відтворити поведінку модельованої системи. Сам процес розробки й тестування таких моделей називають імітаційним моделюванням, а створений алгоритм – імітаційною моделлю.

Відмінності між імітаційними та аналітичними моделями достатньо суттєві:

- Аналітичні моделі використовуються для виконання обчислень на ЕОМ як потужному арифмометрі. Рішення аналітичної моделі виконується безпосередньо на комп'ютері.

- Імітаційні моделі є програмами, які реалізуються на ЕОМ для імітації функціонування системи.

Імітаційне моделювання значно краще враховує вплив випадкових факторів, що створює труднощі для аналітичних моделей. У таких випадках результати отримують шляхом багаторазових прогонів імітаційної моделі з подальшим статистичним аналізом отриманих даних. Через це імітаційне моделювання процесів із випадковими факторами часто називають статистичним моделюванням.

Якщо об'єкт дослідження важко моделювати лише аналітичними або імітаційними методами, застосовують змішане (аналітико-імітаційне) моделювання. У цьому випадку об'єкт розбивають на підпроцеси: для частини з них створюють аналітичні моделі, а для інших – імітаційні.

Матеріальні моделі – це реальні технічні конструкції, які відтворюють об'єкт або його елементи. Вони можуть бути реалізовані у такому вигляді:

- Натурне моделювання – безпосереднє використання об'єкта або його частин.

- Аналогове моделювання – застосування пристроїв іншої фізичної природи, які мають аналогічні математичні закономірності. Наприклад, коливання антени супутникового зв'язку під впливом вітру можна змодельовати за допомогою електричного кола.

У змішаних матеріально-абстрактних моделях одна частина процесу відтворюється матеріально, а інша – абстрактно. Наприклад, під час командно-штабних навчань робота штабів моделюється як натурний експеримент, тоді як дії військ відображаються у вигляді документів.

2.1.2 Основні вимоги до моделювання

В даній магістерській роботі для розробки моделі автоматизованого управління самохідним візком буде використовуватись математичне моделювання.

Моделі використовують, коли проведення експерименту на реальному об'єкті є небезпечним, надто дорогим, незручним через масштаб простору чи часу (наприклад, експеримент дуже тривалий, короткочасний або просторово великий), неможливим, одноразовим чи важким для аналізу.

Розглянемо приклади:

- Дорогий експеримент: перед впровадженням ідеї в економіці країни її варто перевірити на математичній чи імітаційній моделі, прорахувавши всі можливі наслідки.

- Небезпечний експеримент: при роботі в агресивному середовищі замість людини використовують її макет, як, наприклад, місяцехід.

- Короткочасний процес: аналіз деталей обробки металів вибухом ефективніше виконувати на моделі, адже такий процес є миттєвим.

– Довготривалий процес: вивчення корозії, яка триває десятиліттями, зручніше проводити на моделі.

– Мікроскопічний: для аналізу взаємодії атомів доцільно використовувати їх моделі.

– Просторово протяжний процес: дослідження космогонічних процесів доцільніше проводити на математичних моделях, оскільки реальні польоти до зірок поки неможливі

– Непрозорий: модель дозволяє дослідити деталі процесу та його проміжні стадії. При її створенні дослідник змушений описати причинно-наслідкові зв'язки, що дає змогу зрозуміти логіку роботи системи. Модель допомагає розкласти систему на елементи, пояснити механізми взаємодії та причини явищ.

– Нemoжливий: часто об'єкт дослідження ще не існує, оскільки він знаходиться на стадії проектування. У цьому випадку важливо не лише уявити майбутній об'єкт, а й перевірити його віртуальну модель, щоб виявити та усунути дефекти до створення реального прототипу. Процес моделювання тісно пов'язаний із проектуванням. Спочатку створюється проект, потім його перевіряють, вносять зміни й повторюють цикл до досягнення відповідності заданим вимогам. Цей процес має циклічний характер і нагадує спіраль: з кожним повтором проект вдосконалюється, модель стає детальнішою, а її опис – точнішим.

– Неповторний: у рідкісних випадках експеримент не можна повторити, і модель стає єдиним способом дослідження. Наприклад, історичні події неможливо відтворити, але їх можна моделювати.

Моделювання – це заміна одного об'єкта іншим з метою отримання інформації відносно найважливіших властивостей оригіналу. Процес моделювання включає етапи:

- 1) Перехід із реальної області у віртуальну через формалізацію.
- 2) Дослідження моделі (власне моделювання).

3) Інтерпретацію отриманих результатів, що забезпечує зворотний перехід із віртуальної області в реальну.

Такий підхід замінює безпосереднє вивчення об'єкта в реальній області, тобто лобове чи інтуїтивне розв'язання задачі. Таким чином,, в самому простому випадку технологія моделювання має на увазі 3 етапи: формалізація задачі, безпосереднє моделювання, інтерпретація (рис.2.2).

Моделювання застосовують для реалізації наступних цілей:

1 – розуміння устрою конкретного об'єкта, тобто: яка його структура, основні властивості, внутрішні зв'язки, закони саморозвитку, розвитку та взаємодії з оточуючим середовищем;

2 – навчання керувати процесом чи об'єктом, визначення оптимальних способів управління при заданих критеріях та цілях;

3 – прогнозування опосередкованих та прямих наслідків реалізації прийнятих форм і способів дії на об'єкт.

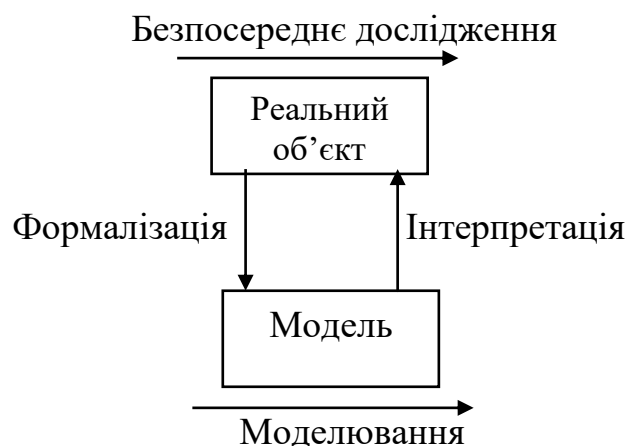


Рисунок 2.2 – Узагальнена схема процесу моделювання

Всяка модель розробляється для вирішення окремо поставленої проблеми, проте всі моделі мають задовільняти певним загальноприйнятим вимогам [36,38].

Модель має бути достовірною, тобто результати моделювання не повинні викликати сумніву. Ця вимога взаємопов'язана з поняттями точності і адекватності.

Модель також має бути актуальною, що означає, що вона повинна бути націлена на задачі, які є важливими для осіб, які відповідають за прийняття рішень.

Модель має бути результативною. Це означає, що результати, отримані під час моделювання, зможуть отримати успішне застосування. Для реалізації даної вимоги важливим є виключно правильне формулювання потрібного результату.

Для переходу від дослідження об'єкта до дослідження моделі і подальшого перенесення результатів на об'єкт дослідження необхідною вимогою є вимога адекватності об'єкта і моделі [37]. Якщо дана вимога до моделі не виконується, то з такої моделі не можна отримати достовірних результатів. Адекватність полягає у відтворенні моделлю з необхідною повнотою усіх тих властивостей об'єкта, які є важливими для поставлених цілей даного дослідження.

Під час моделювання складної системи зазвичай використовується набір декількох моделей, які відповідають певним критеріям адекватності. Системи чи підсистеми можна представляти різними способами, що відрізняються за рівнем складності та деталізації. У процесі дослідження зазвичай створюється кілька різних моделей однієї й тієї ж системи, і залежно від рівня аналізу прості моделі поступово замінюються більш складними.

Оскільки модель завжди є спрощенням реального об'єкта, неможливо досягти повної відповідності між ними. Тому ступінь подібності моделі до оригіналу оцінюється за точністю або відмінностями. Визначення відмінностей натрапляє на значні труднощі, адже зазвичай неможливо повністю охопити реальну систему для порівняння.

Точність математичної моделі відображає ступінь збігу прогнозованих характеристик із фактичними значеннями, отриманими експериментально. Точність визначається похибкою: чим менша похибка, тим вища точність.

Модель повинна бути універсальною, тобто здатною до аналізу широкого класу однотипних об'єктів або функціонування в різних режимах. Недостатня універсальність робить використання автоматизованих методів малоефективним.

Модель має бути економічною, тобто ефективність використання результатів моделювання повинна перевищувати витрати на її аналіз та побудову. Економічність моделі залежить від ресурсів, зокрема від витрат машинного часу, а також від кількості внутрішніх параметрів. Зі збільшенням параметрів зростає потреба в машинній пам'яті та обсягах роботи для отримання їхніх значень.

Вказані вимоги (їх називають зовнішніми) можуть бути виконані при умові, що модель має необхідні внутрішні властивості.

Модель повинна відповідати таким критеріям:

- 1) Простота: зручність у вивченні та використанні, а також легкість розрахунків на комп'ютері.
- 2) Суттєвість: здатність розкривати суть поведінки системи, включаючи неочевидні та нетривіальні аспекти.
- 3) Потужність: можливість отримання широкого спектра важливих даних про систему.
- 4) Відкритість: можливість її модифікації для подальшого вдосконалення.

Етапи розробки моделі.

Під час створення моделі автоматизованого управління самохідним візком із балансуєчим роботом на його платформі (у вигляді перевернутого маятника) дотримуватимемося стандартних етапів моделювання [39]:

1. Дослідження об'єкта моделювання та постановка технічного завдання: аналіз об'єкта, визначення основних параметрів і факторів, збір та перевірка експериментальних даних, аналітичний огляд літератури, формулювання задачі.

2. Концептуальна та математична постановка задачі: визначення ключових принципів і створення математичного опису.

3. Якісний аналіз і перевірка коректності моделі: оцінка моделі на предмет відповідності об'єкту.

4. Вибір і обґрунтування методів вирішення задачі: підбір оптимальних методів для розрахунків.

5. Пошук рішення: використання аналітичних методів для вирішення задачі.

6. Розробка алгоритму рішення: створення алгоритму, оцінка його властивостей і реалізація на ЕОМ.

7. Перевірка адекватності моделі: оцінка точності моделі порівняно з реальним об'єктом.

8. Практичне використання моделі: застосування моделі для вирішення практичних завдань.

Дослідження об'єкта моделювання та формулювання технічного завдання

Цей етап включає:

- Детальне обстеження об'єкта для визначення основних факторів, механізмів та параметрів, що описують його поведінку.

- Збір та перевірку експериментальних даних про подібні об'єкти; при необхідності проведення додаткових експериментів.

- Огляд літератури, аналіз і порівняння існуючих моделей аналогічних об'єктів.

- Узагальнення зібраного матеріалу, створення плану і розробка математичної моделі.

- Формулювання технічного завдання, яке містить усю зібрану інформацію, постановку задачі моделювання та вимоги до моделі.

Концептуальна постановка задачі – це опис у термінах відповідної наукової дисципліни (хімії, фізики, геології, біології, тощо), який включає

перелік тих основних питань, які цікавлять замовника, а також гіпотези про поведінку та властивості об'єкта, що підлягає моделюванню.

Під математичною постановкою задачі моделювання розуміють формалізацію у вигляді математичних співвідношень, які описують властивості та поведінку об'єкта моделювання, визначаючи тип оператора моделі.

Для забезпечення правильності математичної постановки необхідно виконати такі перевірки:

- Контроль розмірностей: перевірка відповідності розмірностей фізичних величин – операції дозволені лише між величинами однакової розмірності; розрахунки виконуються в одній системі одиниць.

- Контроль порядків величин: груба оцінка порядків величин для виключення малозначущих параметрів.

- Контроль характеру залежностей: перевірка, чи відповідають напрямки та швидкість змін параметрів моделі їх фізичному сенсу.

- Контроль екстремальних ситуацій: оцінка поведінки моделі при наближенні параметрів до граничних значень, наприклад, до нуля чи нескінченності.

- Контроль граничних умов: перевірка коректності накладання та використання граничних умов у процесі побудови рішення, а також відповідності вихідних параметрів цим умовам.

- Контроль фізичного сенсу: оцінка змістовності вихідних і проміжних математичних співвідношень, які виникають під час побудови моделі.

- Контроль математичної замкнутості: перевірка, чи забезпечує система рівнянь однозначне вирішення задачі (наприклад, кількість рівнянь має відповідати кількості невідомих).

Коректність математичної моделі вважається підтвердженою, якщо всі перелічені перевірки пройдені успішно. Модель є коректною, якщо задоволені вимоги до розмірності, порядків величин, залежностей, граничних умов, екстремальних ситуацій, фізичного сенсу та математичної замкнутості.

Вибір та обґрунтування методу розв'язання задачі полягає у визначенні способу знаходження залежностей між шуканими величинами та вихідними параметрами моделі. Методи поділяються на:

- Аналітичні методи, які зручні для подальшого аналізу, проте застосовуються лише до відносно простих моделей.
- Алгоритмічні методи, що зазвичай є наближеними чисельними методами. Ці методи належать до обчислювальної математики й застосовуються лише до коректно сформульованих задач, що обмежує їх використання в моделюванні. Спільною рисою чисельних методів є зведення задачі до скінченновимірної, зазвичай шляхом дискретизації. У результаті отримують наближене розв'язання з певною похибкою.

Реалізація математичної моделі у вигляді програми включає створення програмного забезпечення, яке розбивається на кілька етапів:

- 1) Розробка технічного завдання (ТЗ) для програмного комплексу.
- 2) Проектування структури програмного забезпечення.
- 3) Написання коду відповідно до алгоритму.
- 4) Тестування та налагодження.
- 5) Експлуатація та супровід.

Технічне завдання (ТЗ) оформлюється у вигляді специфікації, що зазвичай включає такі розділи:

- 1 - Назва завдання – короткий опис задачі, назва програмного комплексу, система програмування, вимоги до апаратного забезпечення.
- 2 - Опис – математична постановка задачі, опис математичної моделі (для обчислювальних задач) або методи обробки даних (для нечислових задач).
- 3 - Керування режимами роботи програми – основні вимоги до взаємодії користувача з програмою (інтерфейс).
- 4 - Вхідні дані – характеристика вхідних даних, включаючи їхні допустимі межі, заборонені значення тощо.

5 - Вихідні дані – формат представлення результатів (числовий, графічний, текстовий), вимоги до точності, способи зберігання.

6 - Помилки – опис потенційних помилок користувача, методи їх діагностики, способи захисту та реакція програми на помилкові дії.

7 - Тестові завдання – приклади тестових даних для налагодження та перевірки програми в найпростіших випадках.

Перевірка адекватності моделі означає оцінку того, наскільки результати, отримані за допомогою моделі, відповідають даним експериментів або тестових задач. Цей процес має дві основні цілі:

- 1) Перевірити обґрунтованість гіпотез, сформульованих під час концептуальної та математичної постановок, а також провести тестування методів вирішення задач, комплексне налагодження програмного забезпечення та усунути всі помилки й конфлікти, пов'язані з ним.
- 2) Переконатися, що точність результатів відповідає вимогам, визначеним у технічному завданні.

Ці етапи виконуються в процесі розробки моделі автоматизованого управління самохідним візком із перевернутим маятником на платформі.

2.2 Побудова моделі рухомого візка з перевернутим маятником

2.2.1 Модель руху в статиці

З урахування поставленої мети використання потенціальної енергії перевернутого маятника введемо обмеження на його модель, виходячи з умов потреби руху [40]. Розглянемо для цього статичну модель маятника (рис. 2.3).

На перевернутий маятник, який має зосереджену масу m , діє сила земного тяжіння $F = mz_m$. Включиною z_m позначено висоту маятника над поверхнею Землі. Силу F розкладемо на дві складові - силу штовхання F_p і силу обертання F_o .

Наявність у маятника потенціальної енергії $W = mgz_m$, що спричиняється силою земного тяжіння, породжує ідею можливості її використання для зменшення затрат енергії на рух двоколісного самохідного візка.

Для цього введемо обмеження, щоб сила F_o , яка породжує момент обертання, була в два рази менша сили F_p , що породжує штовхання колеса, тобто $F_o/F_p = 0.5$, при цьому $\tan \psi_d = 0.5$.

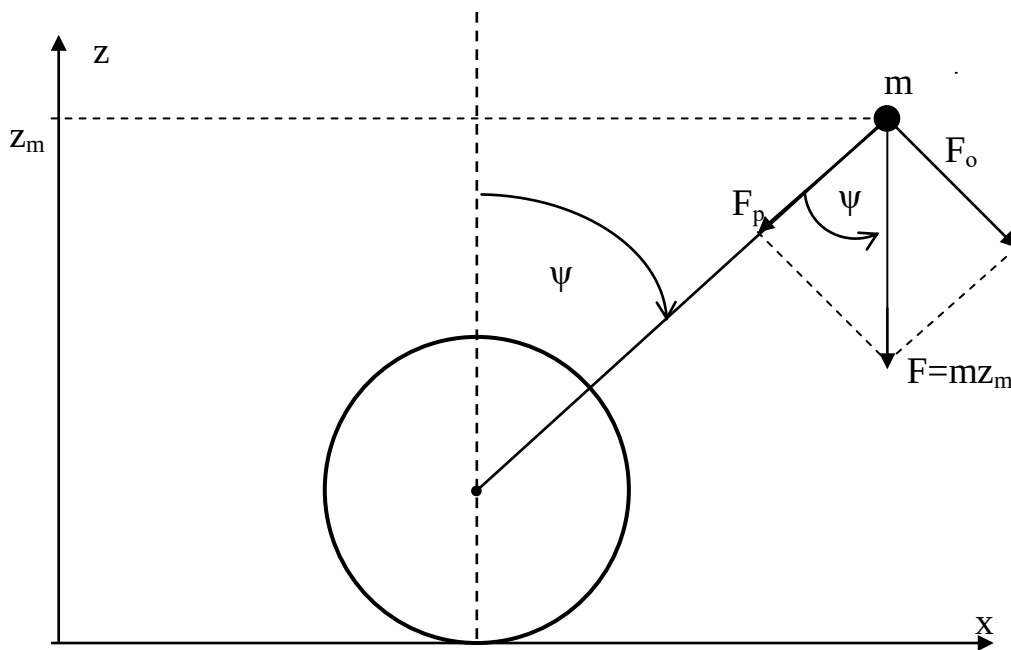


Рисунок 2.3 – Схема моделі перевернутого маятника в статиці

Останній вираз використаємо для знаходження встановленим обмеженням допустимої межі кута відхилення маятника ψ_d від вертикальної осі:

$$\psi_d = \arctg(0.5) = 26^\circ$$

Після визначення даного обмеження перейдемо до розгляду динамічної моделі руху перевернутого маятника на самохідному двоколісному візку.

2.2.2 Модель руху в динаміці

Інтерес до класичної задачі стабілізації положення перевернутого маятника з рухомою точкою опори поновився в зв'язку з розробкою сучасних

транспортних засобів, які побудовані у вигляді двоколісного пасажирського візка типу Seqway [1, 41].

Схема модельованого пристрою показана на рис. 2.4.

Під час моделювання будемо використовувати такі позначення:

- L – відстань від центру мас маятника до точки підвісу;
- R – радіус кола;
- (X_m, Z_m) – координати центру мас маятника;

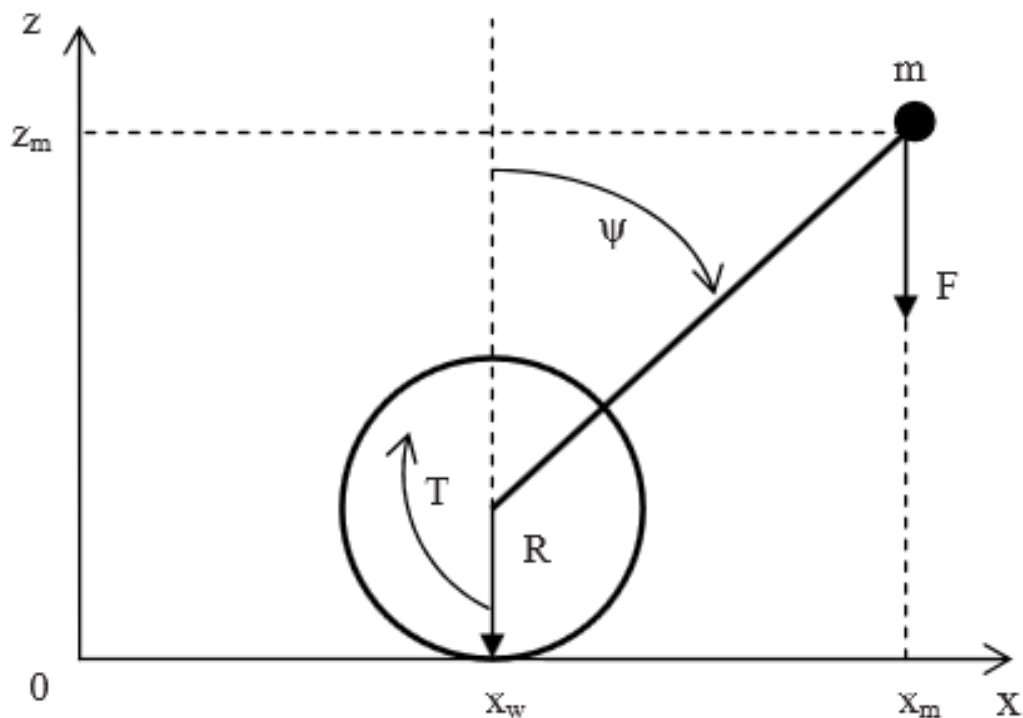


Рисунок 2.4 – Схема моделі перевернутого маятника в динаміці

- (X_w, R) – координати на площині центру колеса;
- $F = -mg$ – сила тяжіння, прикладена до маятника.
- T – момент обертання, прикладений до колеса;

За динамічні параметри системи приймемо:

- m – маса маятника;
- m_w – маса колеса.
- ϑ кут повороту колеса;
- J_w – момент інерції колеса;

Як узагальнені координати модельованої механічної системи доцільно вибрати ψ — кут відхилення маятника від вертикалі, і кут повороту колеса ϑ . Припустимо, що колесо рухається повздовж осі координат x без прослизання, а вплив сил тертя у системі можна не враховувати. У такому разі координати маятника і колеса можуть бути виражені узагальненими координатами:

$$\begin{cases} x_w = R \cdot \vartheta; \\ x_m = x_w + L \sin \psi = R \cdot \vartheta + L \sin \psi; \\ z_m = R + L \cos \psi, \end{cases} \quad (2.1)$$

Тоді в узагальнених координатах рух системи можна описати рівняннями Лагранжа:

$$\left\{ \frac{d}{dt} \frac{\partial T}{\partial \dot{\vartheta}} - \frac{\partial T}{\partial \vartheta} = \frac{\delta A_{\vartheta}}{\delta \vartheta} \right. \quad (2.2)$$

$$\left\{ \frac{d}{dt} \frac{\partial T}{\partial \dot{\psi}} - \frac{\partial T}{\partial \psi} = \frac{\delta A_{\psi}}{\delta \psi}, \right. \quad (2.3)$$

У рівняннях (2.2) і (2.3) через $T(\psi, \vartheta, \dot{\psi}, \dot{\vartheta})$ позначена кінетична енергія системи, а через δA_{ϑ} та δA_{ψ} позначені елементарні роботи зовнішніх сил M_w та F по координатах ϑ та ψ відповідно. Крапками над символами змінних позначаються похідні по часу. Кінетична енергія рухомої системи визначається як сума енергії руху маятника $T_m = \frac{1}{2} m [\dot{x}_m^2 + \dot{z}_m^2]$ та енергії руху колеса $T_w = \frac{1}{2} [J_w \dot{\vartheta}^2 + m_w \dot{x}^2]$. З урахуванням (2.1) сума цих доданків дасть:

$$T_w = \frac{1}{2} [J_w \dot{\vartheta}^2 + m_w R^2 \dot{\vartheta}^2 + m R^2 \dot{\vartheta}^2 + mL^2 \dot{\psi}^2 + 2mLR \dot{\psi} \dot{\vartheta} \cos \psi]. \quad (2.4)$$

Запишемо вирази для елементарних робіт сил, що прикладаються зовні:

$$\begin{cases} \delta A_g = M_w \delta \vartheta; \\ \delta A_\psi = -mg \delta z_m = mgL \delta \psi \sin \psi \end{cases} \quad (2.5)$$

Підставимо (2.4) і (2.5) в (2.2) і (2.3) та вирішимо отримані рівняння відносно похідних другого порядку, дістанемо рівняння руху системи:

$$\begin{cases} \ddot{\psi} = \frac{(J_w + m_w R^2 + mR g \sin \psi - (M_w + mLR\psi^2 \sin \psi)R \cos \psi)}{L(J_w + m_w R^2 + mR^2 \sin^2 \psi)} \\ \ddot{\vartheta} = \frac{M_w + mLR\psi^2 \sin \psi - mRg \sin \psi \cos \psi}{J_w + m_w R^2 + m R^2 \sin^2 \psi}. \end{cases} \quad (2.6)$$

З урахуванням введених позначень з виразу (2.6) можна записати компактну форму рівнянь руху модельованої системи:

$$\begin{cases} \ddot{\psi} = f_1(\psi, \dot{\psi}) + f_2(\psi)M_w; \\ \ddot{\vartheta} = f_3(\psi, \dot{\psi}) + f_4(\psi)M_w. \end{cases} \quad (2.7)$$

2.2.3 Управління положенням маятника

Визначимо управління положенням маятника як його переведення в заданий стан ψ_{ref} з поточного стану $\psi(t)$ і утримання його, при необхідності, в цьому стані. Для реалізації такого управління в якості впливу на описану механічну систему будемо використовувати прикладений до колеса момент обертання M_w як єдиний управляючий параметр.

Очевидно, що для вирішення нашої задачі можна обрати різні закони зміни моменту M_w , який вирішує нашу задачу, і, отже, різноманітні траєкторії

переміщення маятника в визначене положення. на бажаній траєкторії, що описується рівнянням:

$$\dot{\psi} + K \cdot (\psi - \psi_{ref}) = 0. \quad (2.8)$$

Рух маятника за цією траєкторією гарантує його аперіодичне переміщення до заданого стану.

Однак певний момент часу t кут $\psi(t)$ може відхилитися від умов рівняння (2.8). У такому випадку необхідно, змінюючи момент M_w , скоригувати систему на траєкторію (2.8) і утримувати на ній до досягнення кінцевої точки $\psi = \psi_{ref}$.

Для оцінки відхилення системи від траєкторії (2.8) використовуємо функцію

$$S(t) = \dot{\psi}(t) + K(\psi(t) - \psi_{ref}) \quad (2.9)$$

і задаємо виконання необхідної для цього умови

$$\frac{d}{dt}(S^2(t)) \leq 0, \quad (2.10)$$

У виразі (2.10) знак рівності справедливий тільки при $S(t) = 0$. Дотримання умови (2.10) забезпечує переведення модельованої системи на задану траєкторію (2.8) та її утримання її на вказаній траєкторії.

Умова (2.10) допускає певну свободу у виборі моменту M_w . Тому уточнимо її, посиливши вимогу до виконання рівності:

$$\frac{d}{dt}(S^2(t)) = -2\alpha \cdot S^2(t). \quad (2.11)$$

У цьому рівнянні параметр α визначає швидкість зближення розв'язку рівняння (2.11) до нуля:

$$S^2(t) = S^2(t_0) \exp(-2\alpha t), \quad (2.12)$$

де $t=t_0$ – момент початку процесу управління.

Варто зазначити, що за умови виконання рівняння (2.11) функція $S^2(t)$ відповідає критеріям Ляпунова, що забезпечує експоненційно стійкий перехід системи на траєкторію, описану рівнянням (2.8).

Тепер необхідно визначити момент $M_w(\psi, \dot{\psi})$, який забезпечує виконання рівняння (2.11). З урахуванням рівнянь (2.11) та (2.9) отримаємо вираз для $\dot{\psi} = -\alpha S - K\dot{\psi}$. Підставивши його у перше рівняння системи (2.7), отримаємо потрібний закон зміни моменту $M_w = M_w(\psi, \dot{\psi})$:

$$M_w(\psi, \dot{\psi}) = -\frac{\alpha S(\psi, \dot{\psi}) + K\dot{\psi} + f_1(\psi, \dot{\psi})}{f_2(\psi)} \quad (2.13)$$

Насправді, підставлення виразу (2.13) в перше рівняння системи (2.7) дає в результаті лінійне диференціальне рівняння другого порядку

$$\ddot{\psi} + (\alpha + K)\dot{\psi} + \alpha K\psi = \alpha K\psi_{ref}, \quad (2.14)$$

Що має власні значення $\lambda_1 = -\alpha$, $\lambda_2 = -K$.

Очевидно, момент $M_w(\psi, \dot{\psi})$ можна розглядати як зворотній нелінійний зв'язок, який перетворює початкову систему в стійку лінійну систему 2-го порядку. До даного моменту припускалося, що значення M_w не мають обмежень. Проте з рівнянь (2.6) і (2.13) видно, що за умови $\psi \rightarrow \pm \frac{\pi}{2}$ отримуємо $f_2(\psi) \rightarrow 0$ і $M_w \rightarrow \pm \infty$. Звідси виходить, що в разі обмежень на

величину моменту M_w необхідно враховувати допустимий діапазон значень кута ψ .

У відповідності до рівняння (2.14) система наближається до точки рівноваги $\psi = \psi_{ref}$ з нульовою швидкістю. Тому для утримання маятника в положенні $\psi = \psi_{ref}$ необхідно згідно з рівнянням (2.13) забезпечити момент M_w :

$$M_w = \frac{f_1(\psi_{ref}, 0)}{f_2(\psi_{ref})} = \frac{g}{R} (J_w + m_w R^2 + m R^2) \cdot \operatorname{tg} \psi_{ref} \quad (2.15)$$

Якщо обмежити величиною M_w^0 абсолютне значення моменту M_w , тобто $|M_w| \leq M_w^0$, тоді максимально допустиме абсолютне значення кута ψ можна визначити з рівняння (2.15):

$$|\psi| \leq \operatorname{arctg} \left(\frac{R \cdot M_w^0}{g(J_w + m_w R^2 + m R^2)} \right). \quad (2.16)$$

Для забезпечення монотонного перехідного процесу доцільно використовувати біноміальну форму характеристичного полінома рівняння (2.14), приймаючи $\alpha = K = \gamma$. В такому випадку $\tau_n = \frac{\tau_{n1}}{\gamma}$, де τ_n – потрібний час перехідного процесу, γ – коефіцієнт масштабування часу перехідного процесу, $\tau_{n1} = 4,8\text{с}$ – час перехідного нормованого процесу при $\gamma = 1$.

2.2.4 Побудова моделі управління рухомим візком з маятником

З виразу (2.15) випливає, що при $\psi_{ref} \neq 0$ момент M_w не дорівнює 0 і для підтримки умови $\psi = \psi_{ref}$ платформа рухається прискорено. Задача

стабілізації швидкості платформи в даному випадку полягає в розгоні або гальмуванні платформи до моменту досягнення швидкості обертання колеса $\dot{\vartheta} = \dot{\vartheta}_{ref}$ та підтриманні заданої швидкості.

Визначимо лінійні швидкість та прискорення платформи у вигляді $v = R\dot{\vartheta}$ та $\dot{v} = R\ddot{\vartheta}$, а бажане значення лінійної швидкості як $v_{ref} = R\dot{\vartheta}_{ref}$. Оцінимо при цьому значення M_w при $\psi = \psi_{ref}$ і $\dot{\psi} = 0$, для чого помножимо друге рівняння з виразу (2.7) на R та підставимо значення $\psi = \psi_{ref}$ і $\dot{\psi} = 0$ та значення моменту M_w з виразу (2.15). Після нескладних перетворень маємо

$$\dot{v}(\psi_{ref}, 0) = g \cdot t \psi_{ref}. \quad (2.17)$$

Для стабілізації положення маятника єдиний управляючий параметр M_w вже використаний. Проте із (2.17) випливає, що швидкістю платформи можна керувати шляхом зміни значення ψ_{ref} . Зазначимо що $\text{sgn } \dot{v}(\psi_{ref}, 0) = \text{sgn}(\psi_{ref})$ та введемо зворотний зв'язок за швидкістю в вигляді

$$\psi_{ref} = \beta(v_{ref} - v) \quad (2.18)$$

В результаті з виразів (2.14) і (2.18) отримаємо систему рівнянь

$$\begin{cases} \ddot{\psi} + (\alpha + K)\dot{\psi} + \alpha K\psi + \alpha\beta Kv = \alpha\beta Kv_{ref} \\ \dot{v} = g \cdot tg(\beta(v_{ref} - v)) \end{cases}. \quad (2.19)$$

Описана в (2.19) система має очевидну точку рівноваги

$$v = v_{ref}, \psi = \dot{\psi} = \ddot{\psi} = 0. \quad (2.20)$$

Також видно, що $\text{sgn}(\dot{v}) = \text{sgn}(v_{ref} - v)$, що означає, що швидкість v прямує до точки рівноваги. Проте стійкість всієї системи (2.19) вимагає перевірки.

Для цього друге рівняння в системі (2.19) лінеаризуємо при $\beta(v_{ref} - v) \rightarrow 0$ та приведемо до системи диференціальних рівнянь першого порядку:

$$\begin{cases} \dot{\psi} = \omega \\ \dot{\omega} = -(\alpha + K)\psi - \alpha K\psi - \alpha\beta Kv + \alpha\beta Kv_{ref} \\ \dot{v} = -g\beta v + gbv_{ref} \end{cases} \quad (2.21)$$

Можна визначити, що матриця коефіцієнтів системи (2.21) має власні значення $p_1 = g \cdot \beta$, $p_2 = -\alpha$, $p_3 = -K$, тобто система (2.21) є експоненціально стійкою і має характеристичний поліном у вигляді:

$$H(p) = p^2 + (\alpha + K + g\beta)p^2 + (\alpha K + \alpha \cdot g \cdot \beta + K \cdot g \cdot \beta) \quad (2.22)$$

Коефіцієнти полінома для отримання монотонного перехідного процесу варто підпорядкувати умові

$$\alpha = K = \beta g = \gamma \quad (2.23)$$

В такому випадку $\tau = \frac{6,3}{\gamma}$.

2.3 Розробка моделі енергоефективного управління

2.3.1 Модель руху з урахуванням впливу потенціальної енергії

Розглянемо модель самохідного візка з перевернутим маятником, точка підвісу якого розташована в центрі O колеса (рис. 2.5). У процесі моделювання управління його рухом враховується вплив потенціальної

енергії маятника, що сприяє зменшенню енергоспоживання під час руху платформи.

Колесо, симетричне відносно своєї осі O , може котитися без ковзання по горизонтальній поверхні вздовж прямої лінії, залишаючись у вертикальній площині. Позначимо масу колеса через M , його радіус – через R , а радіус інерції відносно центра O – через r . Кут φ повороту проти годинникової стрілки якогось фіксованого радіуса колеса, який спочатку орієнтований уздовж горизонтальної осі X , позначимо через φ . Переміщення центра мас O уздовж горизонтальної прямої позначимо через x , причому $\dot{x} = \dot{\varphi} R$.

Кут відхилення маятника від вертикалі позначимо через β , його масу – через m , відстань від точки підвісу O до центра мас маятника – через b , а радіус інерції маятника відносно точки O – через r . Припустимо, що на осі колеса встановлено електродвигун, статор якого жорстко закріплений із колесом, а ротор – із маятником. Позначимо через L момент, створюваний двигуном, який повертає маятник проти годинникової стрілки.

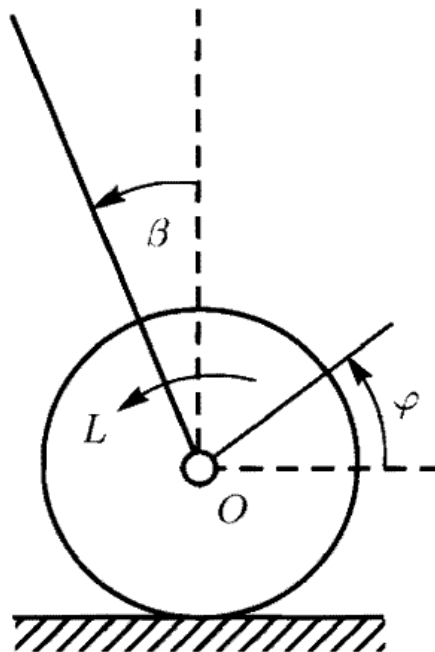


Рисунок 2.5 – Маятник з рухомою точкою підвісу

Кінетична енергія описаної системи двох тіл має вигляд

$$T = \frac{1}{2}(\alpha_{11}\dot{\varphi}^2 + 2\alpha_{12}\cos\beta\cdot\dot{\varphi}\cdot\dot{\beta} + \alpha_{22}\dot{\beta}^2), \quad (2.24)$$

де

$$\alpha_{11} = M \cdot (R^2 + p^2) + m \cdot R^2, \quad \alpha_{12} = m \cdot R \cdot b, \quad \alpha_{22} = m \cdot r^2, \quad (2.25)$$

Всі коефіцієнти (2.2) позитивні. Потенціальна енергія Π і елементарна робота δW мають вигляд

$$\Pi = mgb\cos\beta, \quad \delta W = L(\delta\beta - \delta\varphi). \quad (2.26)$$

Використовуючи метод Лагранжа другого роду [5, 21], складемо за допомогою виразів (2.24), (2.25) рівняння руху системи

$$\begin{aligned} \alpha_{11}\dot{\omega} + \alpha_{12}\sin\beta\cdot\ddot{\beta} - \alpha_{12}\sin\beta\cdot\dot{\beta}^2 &= -L \\ \alpha_{12}\cos\beta\cdot\dot{\omega} + \alpha_{22}\ddot{\beta} - m\cdot g\cdot\sin\beta &= L \end{aligned} \quad (2.27)$$

Розглянемо, що $\omega = \dot{\varphi}$ – це кутова швидкість колеса. Дана механічна система має два ступені свободи. Проте, оскільки кут повороту колеса φ є циклічною змінною, для опису руху можна використовувати систему рівнянь (2.27) третього порядку. Інтегруючи рівняння $\dot{x} = -\omega R$ за відомої функції $\omega(t)$, можна визначити зміну координати x колеса.

Варто зазначити, що при підсумовуванні рівнянь (2.27) отримуємо рівняння, яке описує зміну моменту кількості руху системи відносно точки контакту колеса з поверхнею.

Рівняння (2.27) можна розв'язати відносно старших похідних і представити у наступній формі:

$$(\alpha_{11}\alpha_{22} - \alpha_{12}^2 \cos^2 \beta) \ddot{\beta} + \alpha_{12}^2 \beta^2 \sin \beta \cos \beta - \alpha_{11} m g b \sin \beta =$$

$$= (\alpha_{11} + \alpha_{12} \cos \beta) L, \quad (2.28)$$

$$(\alpha_{11}\alpha_{22} - \alpha_{12}^2 \cos^2 \beta) \dot{\omega} - \alpha_{12} \alpha_{22} \dot{\beta}^2 \sin \beta + \alpha_{12} m g b \sin \beta \cos \beta =$$

$$= (\alpha_{22} + \alpha_{12} \cos \beta) L. \quad (2.29)$$

Коефіцієнт при старших похідних у рівняннях (2.28) і (2.29) є додатним для будь-якого значення кута β , оскільки він визначається визначником додатно визначеної матриці кінетичної енергії E системи (формула (2.24)).

Якщо врахувати силу опору кочення колеса, яка залежить від швидкості $\dot{X}$, то в рівняннях (2.27) з'являться не тільки кутове прискорення $\ddot{\omega}$, але й кутова швидкість ω . Крім того, кутова швидкість ω також буде врахована у рівняннях (2.27), якщо в моменті L , створюваному електроприводом, врахувати проти-ЕРС, яка є пропорційною різниці $\dot{\beta} - \omega$ [40]. У таких випадках неможливо виділити рівняння типу (2.28), яке б описувало лише коливання маятника.

Ввівши безрозмірний час τ і момент μ за формулами (1.3), рівняння (2.28) і (2.29) можна перетворити до такого вигляду:

$$(1 - d^2 \cos^2 \beta) \ddot{\beta} + d^2 \dot{\beta}^2 \sin \beta \cos \beta - \sin \beta = (1 + e^2 \cos \beta) \mu, \quad (2.30)$$

$$(1 - d^2 \cos^2 \beta) \dot{\sigma} - c^2 \dot{\beta}^2 \sin \beta + c^2 \sin \beta \cos \beta = -c^2 \left(\frac{e^2}{d^2} + \cos \beta \right) \mu. \quad (2.31)$$

Тут $\sigma = \varphi'$ – безрозмірна кутова швидкість колеса,

$$d^2 = \frac{\alpha_{12}^2}{\alpha_{12}\alpha_{22}} = \frac{mR^2 b^2}{r^2 (M(R^2 + p^2) + mR^2)} < 1$$

$$e^2 = \frac{\alpha_{12}}{\alpha_{11}} = \frac{mRb}{M(R^2 + p^2) + mR^2}.$$

Нерівність $d^2 < 1$ можна довести безпосередньо; її справедливість також випливає з того, що визначник додатньо визначеної матриці кінетичної енергії (формула (2.24)), будучи додатним при всіх значеннях β , залишається додатним і за $\beta=0$. Система рівнянь (2.30), (2.31) містить лише два безрозмірних параметри d і e .

Рівняння (2.30), яке описує коливання маятника з точкою підвісу в центрі колеса, включає кут β і його дві перші похідні, але не містить кутової швидкості ω колеса. Таким чином, рівняння (2.30) можна відокремити від системи (2.30), (2.31). Проте геометричні й інерційні характеристики колеса впливають на рівняння (2.30), змінюючи поведінку маятника при будь-якому управлінні $\mu(\tau)$. Це пояснюється тим, що прикладання моменту до маятника створює момент протилежного знаку на колесі, а рух колеса, у свою чергу, впливає на маятник. Якщо цікавить лише динаміка маятника, а рух колеса не має значення, рівняння (2.30) можна аналізувати окремо від рівняння (2.31). Однак, рівняння (2.30) має значно складніший вигляд, ніж рівняння, що описує маятник із нерухомою точкою підвісу.

У математичній моделі маятника, шарнірно закріпленого на візку, також є циклічна координата (що визначає положення візка на горизонтальній прямій). З цієї моделі можна виділити рівняння, аналогічне рівнянню (2.30). Однак, на відміну від правої частини рівняння (2.30), права частина цього рівняння не залежить від кута відхилення маятника β , а містить лише прикладений управляючий момент у шарнірі.

Для $\mu=0$ рівноважне положення $\beta = 0$, $\dot{\beta} = 0$, описане рівнянням (2.30), є нестійким. Розглянемо задачу стабілізації цього стану рівноваги. Побудуємо область управління для лінеаризованого рівняння (2.30) і стабілізуючий закон управління, при якому область притягання співпадає з областю управління, забезпечуючи її максимальний розмір. Порівняємо цю область із областю управління для маятника з нерухомою точкою підвісу.

Лінеаризоване рівняння (2.30) поблизу рівноважного стану $\beta = 0$, $\dot{\beta} = 0$, має вигляд:

$$\begin{aligned} a^2 \cdot \ddot{\beta} - \beta &= c \cdot \mu, \\ a^2 &= 1 - d^2 > 0, \\ c &= 1 + e^2 > 1. \end{aligned} \quad (2.32)$$

У відсутності управління, тобто при $\mu = 0$ одне власне значення рівняння (2.32) позитивне ($1/a$), інше від'ємне ($-1/a$).

Приведемо рівняння (2.32) другого порядку до системи двох рівнянь першого порядку в жордановій формі

$$\dot{y} = \frac{y}{a} + \frac{c}{a} \mu; \quad y = \beta + a\dot{\beta} \quad (2.33)$$

$$\dot{z} = -\frac{z}{a} - \frac{c}{a} \mu; \quad z = \beta - a\dot{\beta}. \quad (2.34)$$

Диференціальне рівняння (2.32) описує поведінку «нестійкої» змінної y , що відповідає додатньому власному значенню $1/a$, а рівняння (2.34) – поведінку «стійкої» змінної z , що відповідає від'ємному власному значенню ($-1/a$).

2.3.2 Визначення області керованості

Нехай $W = \{\mu(\tau) : |\mu(\tau)| \leq \mu_0\}$. Позначимо далі через P множину початкових станів, для кожного з яких існує таке управління $\mu(\tau) \in W$, що вирішення рівняння (2.32) системи (2.33), (2.34) з цим управлінням приходить в рівновагу $\beta = 0$, $\dot{\beta} = 0$. Ця область керованості P , описується [42] нерівністю

$$|y| < c\mu_0, \quad \text{або} \quad |\beta + a\dot{\beta}| < c\mu_0. \quad (2.35)$$

Область керованості P в площині змінних $\beta, \dot{\beta}$ показана на рис. 2.6.

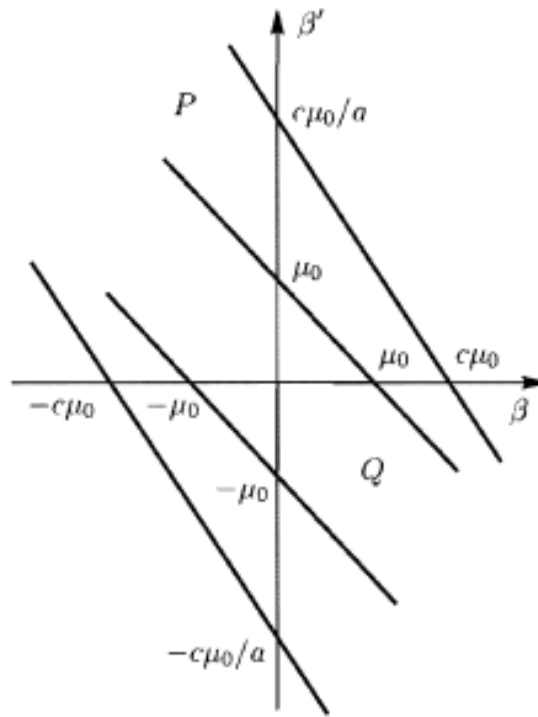


Рисунок 2.6 – Ілюстрація області керованості Q для маятника з нерухомою точкою підвісу і P для маятника з точкою підвісу на колесі

Якщо початкова швидкість $\dot{\beta}(0) = 0$, то обмеження початкового кута, при якому можливе приведення маятника в стан рівноваги $\beta = 0$, $\dot{\beta} = 0$, має вигляд

$$|\dot{\beta}(0)| < c\mu_0. \quad (2.36)$$

Якщо ж початковий кут $\beta(0) = 0$, то обмеження початкової швидкості, при якій можливе приведення маятника в рівновагу $\beta = 0$, $\dot{\beta} = 0$, має вигляд

$$|\dot{\beta}(0)| < \frac{c}{a} \mu_0. \quad (2.37)$$

Повертаючись в виразі (2.35) до початкових параметрів системи, отримуємо нерівність

$$\left| \beta + \sqrt{1 - \frac{m(Rb)^2}{r^2[M(R^2 + p^2) + mR^2]}} \dot{\beta} \right| < \left[1 + \frac{mRb}{M(R^2 + p^2) + mR^2} \right] \frac{L_0}{mgb}. \quad (2.38)$$

В вихідних змінних нерівності (2.36), (2.37) записуються так

$$\begin{aligned} |\beta(0)| &< \left[1 + \frac{mRb}{M(R^2 + p^2) + mR^2} \right] \frac{L_0}{mgb}, \\ |\dot{\beta}(0)| &< \frac{\left[1 + \frac{mRb}{M(R^2 + p^2) + mR^2} \right] \frac{L_0}{mgb}}{\sqrt{1 - \frac{m(Rb)^2}{r^2[M(R^2 + p^2) + mR^2]}}} \dot{\beta}. \end{aligned} \quad (2.39)$$

Порівняймо області керованості Q і P , побудовані для маятника з нерухомою та рухомою точками підвісу відповідно (рис. 2.6).

Зазначимо, що область P є ширшою за область Q , оскільки $c > 1$ і $0 < a < 1$ (дивись рисунок 2.6). Таким чином, можна сказати, що область P більша, хоча площі обох областей є нескінченними. Проте, область Q не повністю належить області P , оскільки прямі, що обмежують область Q , мають менший нахил до осі абсцис, ніж ті, що обмежують область P .

Варто пам'ятати, що області Q і P побудовані для лінійних рівнянь, а лінеаризація є прийнятною лише для малих значень кута β та кутової швидкості $\dot{\beta}$. Проте при достатньо малих значеннях цих параметрів область Q повністю лежить всередині області P .

Таким чином, область керованості маятника з нерухомою точкою підвісу в певному сенсі менша за область керованості маятника з рухомою точкою підвісу. Це означає, що маятник із точкою підвісу на колесі легше стабілізувати. Це очікуваний результат, оскільки у другому випадку момент, що створює двигун, впливає не лише на маятник, але й на колесо, забезпечуючи точці підвісу O (центру колеса) прискорення, яке сприяє стабілізації маятника.

2.3.3 Оцінка енергетичних витрат

Рівняння руху плоского фізичного маятника має вигляд

$$mr^2\ddot{\alpha} + mgb\sin \alpha = L \quad (2.40)$$

Тут m – маса маятника, b – відстань від точки підвісу O маятника до його центру мас C , r – радіус інерції маятника відносно точки O , α – кут відхилення відрізка OC від напрямку того ж відрізка, коли маятник знаходиться в нижньому положенні рівноваги, цей кут відраховується проти годинникової стрілки. Момент L прикладений в точці підвісу.

Введемо безрозмірний час τ і безрозмірний момент μ

$$\tau = \frac{t\sqrt{gb}}{r}, \quad \mu = \frac{L}{mgb}. \quad (2.41)$$

Тоді рівняння (2.40) набуває простого вигляду

$$\ddot{\alpha} + \sin \alpha = \mu. \quad (2.42)$$

Штрих ' означає диференціювання по безрозмірному часу.

При $L = 0$ маємо $\mu = 0$ і маятник має положення рівноваги в станах

$$\alpha = \pi \cdot k, \alpha = 0, \quad (k = 0, \pm 1, \pm 2, \dots) \quad (2.43)$$

Парним значенням індексу k відповідає стійке (нижнє) положення рівноваги, непарним – нестійке (верхнє) положення рівноваги.

Далі розглядатимемо задачу про приведення маятника за допомогою управляючого моменту μ в положення рівноваги з заданий (безрозмірний) час $T > 0$.

Якість управління будемо оцінювати функціоналом

$$J(0, T) = \int_0^T |\mu(\tau) \dot{\alpha}(\tau)| d\tau. \quad (2.44)$$

Якби у виразі (2.44) були відсутні знаки абсолютної величини, то цей вираз характеризував би механічну роботу управляючого моменту $\mu(\tau)$ в загально прийнятому сенсі. Функціонал (2.44) характеризує витрати механічної енергії у випадку, коли дія приводу, що розвиває керуючий вплив, є незворотною, тобто, його робота викликає використання енергії, незалежно від того направлений управляючий момент в напрямку руху маятника чи проти нього. Подібний функціонал розглядається в монографіях [10, 79] для оцінки витрат енергії на управління ходьбою двоногого крокуючого механізму.

Розіб'ємо відрізок часу $[0, T]$ на k відрізків $[\tau_0, \tau_1], [\tau_1, \tau_2], \dots, [\tau_{n-1}, \tau_n], \dots, [\tau_{k-1}, \tau_k]$, (початкове значення $\tau_0=0$), на кожному із яких підінтегральна функція (2.44) не міняє знак. Тоді інтеграл (2.44) можна представити у вигляді

$$\begin{aligned} J(0, T) &= \int_0^T |\mu(\tau) \dot{\alpha}(\tau)| d\tau = \sum_{n=1}^{n=k} \int_{\tau_{n-1}}^{\tau_n} |\mu(\tau) \dot{\alpha}(\tau)| d\tau = \\ &= \sum_{n=1}^{n=k} \int_{\tau_{n-1}}^{\tau_n} |\mu(\ddot{\alpha} + \sin \alpha) \cdot \dot{\alpha}(\tau)| d\tau = \sum_{n=1}^{n=k} \int_{\tau_{n-1}}^{\tau_n} \left| \frac{d}{d\tau} \left(\frac{1}{2} \dot{\alpha}^2 - \cos \alpha \right) \right| d\tau = \\ &= \int_0^T \frac{dE(\alpha, \dot{\alpha})}{d\tau} = \sum_{n=1}^{n=k} |\Delta E_n|. \end{aligned} \quad (2.45)$$

У виразі (2.45)

$$E(\alpha, \dot{\alpha}) = \frac{1}{2} \dot{\alpha}^2 - \cos \alpha. \quad (2.46)$$

Повна енергія маятника – кінетична плюс потенціальна, а

$$\begin{aligned} \Delta E_n &= E(\alpha_n, \dot{\alpha}_n) - E(\alpha_{n-1}, \dot{\alpha}_{n-1}) = \frac{1}{2} \dot{\alpha}_n^2 - \cos \alpha_n - \frac{1}{2} \dot{\alpha}_{n-1}^2 + \cos \alpha_{n-1} = \\ &= \frac{1}{2} (\dot{\alpha}_n^2 - \dot{\alpha}_{n-1}^2) + \cos \alpha_{n-1} - \cos \alpha_n \end{aligned} \quad (2.47)$$

де α_n і $\dot{\alpha}_n$ – кут відхилення маятника і його кутова швидкість в момент τ_n .

Інтеграл (2.44) можна оцінити знизу наступним чином:

$$\begin{aligned} J(0, T) &= \int_0^T |\mu(\tau) \dot{\alpha}(\tau)| d\tau \geq \int_0^T \mu(\tau) \dot{\alpha}(\tau) d\tau = \int_0^T \mu(\ddot{\alpha} + \sin \alpha) \cdot \dot{\alpha}(\tau) d\tau = \\ &= \int_0^T \frac{d}{d\tau} \left(\frac{1}{2} \dot{\alpha}^2 - \cos \alpha \right) d\tau = \int_0^T \frac{dE(\alpha, \dot{\alpha})}{d\tau} = E[(\alpha(T), \dot{\alpha}(T))] - E[(\alpha(0), \dot{\alpha}(0))]. \end{aligned} \quad (2.48)$$

Допустимо, що управління $\mu(\tau)$ являється імпульсним

$$\mu(\tau) = I \cdot \delta(\tau - \theta), \quad (2.49)$$

де $\delta(\tau - \theta)$ – дельта-функція Дірака, що дорівнює нулю при $\tau \neq \theta$. Постійна величина I характеризує інтенсивність і напрямок імпульсного впливу (удару).

При імпульсному управлінні (2.49) кут відхилення маятника від вертикалі α не змінюється, а що стосується швидкості $\dot{\alpha}$, то вона відчуває стрибок $[\dot{\alpha}(\theta)]$ який обчислюється за допомогою рівняння (2.42)

$$[\dot{\alpha}(\theta)] = \dot{\alpha}(\theta^+) - \dot{\alpha}(\theta) = I \quad (2.50)$$

де $\dot{\alpha}(\theta)$ – кутова швидкість маятника до імпульсного впливу (до удару), $\dot{\alpha}(\theta^+)$ – кутова швидкість «зразу» після імпульсного впливу, θ і θ^+ – моменти часу до і після імпульсного впливу відповідно.

Нехай знак швидкості $\dot{\alpha}(\theta^+)$ маятника після імпульсного впливу (2.49) співпадає зі знаком швидкості $\dot{\alpha}(\theta^+) \cdot \dot{\alpha}(\theta) \geq 0$ до цього імпульсного впливу, тобто $\dot{\alpha}(\theta^+) \cdot \dot{\alpha}(\theta) \geq 0$. Тоді у відповідності з формулами (2.45) – (2.47) отримуємо

$$J(\theta, \theta^+) = \int_0^{\theta^+} |\mu(\tau) \dot{\alpha}(\tau)| d\tau = \frac{1}{2} |[\dot{\alpha}(\theta^+)]^2 - [\dot{\alpha}(\theta)]^2|. \quad (2.51)$$

Рівність (2.51) залишається справедливою, якщо $\dot{\alpha}(\theta) = 0$ або $\dot{\alpha}(\theta^+) = 0$. Рівність (2.51) можна довести безпосередньо, якщо розподілити імпульсне управління (2.49) на малому відрізку часу з початком в точці θ і потім стягувати цей відрізок до нуля [39, 41].

Нехай тепер $\dot{\alpha}(\theta^+) \cdot \dot{\alpha}(\theta) < 0$, тобто швидкості $\dot{\alpha}(\theta)$ і $\dot{\alpha}(\theta^+)$ мають різні знаки, тоді

$$J(\theta, \theta^+) = \int_0^{\theta^+} |\mu(\tau) \dot{\alpha}(\tau)| d\tau = \frac{1}{2} |[\dot{\alpha}(\theta^+)]^2 + [\dot{\alpha}(\theta)]^2| \quad (2.52)$$

Дійсно, розіб'єм один імпульсний вплив на два, які прикладаються до маятника один за іншим «зразу» так, що при першому впливі швидкість α' зі значенням $\dot{\alpha}(\theta)$ стрибком змінюється до нуля, а при другому – з нуля до

величини $\dot{\alpha}(\theta^+)$. Тоді, у відповідності зі співвідношеннями (2.45) – (2.47), при першому впливі витрачається енергія $\frac{1}{2}[\dot{\alpha}(\theta)]^2$, а при другому – енергія $\frac{1}{2}[\dot{\alpha}(\theta^+)]^2$. В результаті витрачається енергія, яка наведена в виразі (2.52). Скориставшись формулами (2.51) і (2.52), отримуємо наступний вираз для затрат енергії при імпульсному управлінні (2.49)

$$O(\theta, \theta^+) = \frac{1}{2} \left\{ \begin{aligned} & \left| [\dot{\alpha}(\theta^+)]^2 - [\dot{\alpha}(\theta)]^2 \right| \text{ при } \dot{\alpha}(\theta^+) \dot{\alpha}(\theta) \geq 0, \\ & \left| [\dot{\alpha}(\theta^+)]^2 + [\dot{\alpha}(\theta)]^2 \right| \text{ при } \dot{\alpha}(\theta^+) \dot{\alpha}(\theta) < 0 \end{aligned} \right\}. \quad (2.53)$$

З останнього рівняння випливає, що для енергоефективного управління самохідним візком з вантажем у вигляді перевернутого маятника необхідне двох імпульсне управління, при якому перший імпульс подається при крайньому лівому значенні кута відхилення θ , а другий – при крайньому правому значенні цього кута.

В роботах [31,35] задача синтезу оптимального управління з точки зору мінімізації енергетичних затрат розглядалась у вигляді задачі приведення маятника в верхнє нестійке положення рівноваги, яке мінімізує функціонал (2.44). Задача синтезу оптимального управління розглянута у фазовому просторі в циліндричних координатах. З множини допустимих управлінь відшукувалось таке, яке приводило до мінімальних затрат механічної енергії. В результаті теж отримано висновок, що оптимальне з точки зору витрат енергії управління шляхом приведення перевернутого маятника у верхнє положення рівноваги за будь-яких початкових умов можна реалізувати у вигляді двох імпульсів, перший з яких подається на початку руху, а другий – в кінці.

2.4 Модель нечіткого управління рухом візка

Побудуємо відклик системи на імпульсний вплив (імпульсну функцію) (рис. 2.7) та кореневий годограф (рис 2.8).

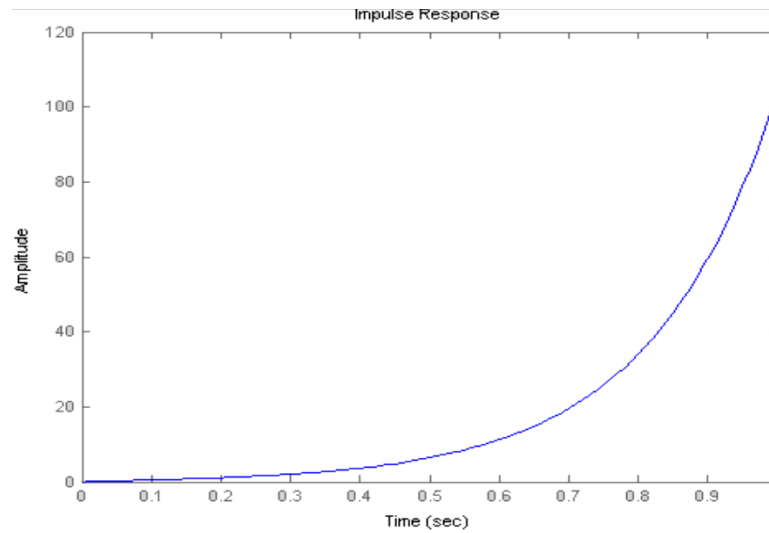


Рисунок 2.7 – Імпульсна функція

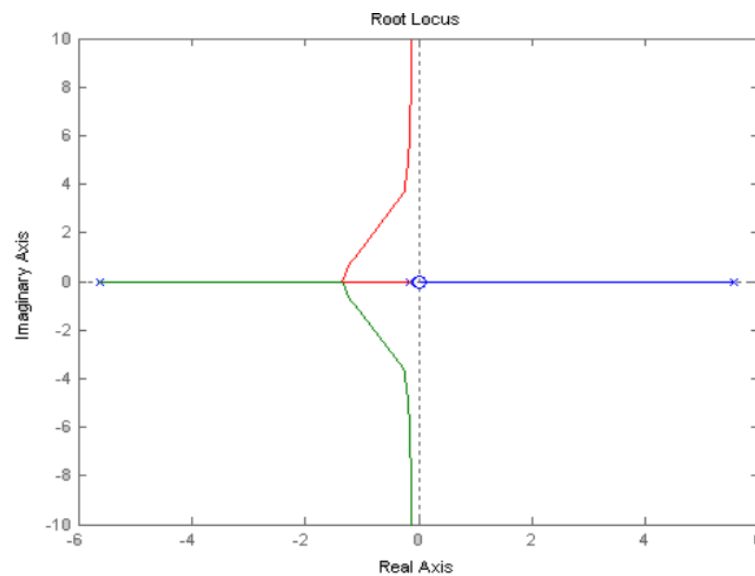


Рисунок 2.8 – Кореневий годограф

Як видно з графіків, один полюс системи рухається в позитивній частині комплексної площини, і це свідчить про те, що наша система без управління являється нестійкою.

Побудуємо графік фазифікації, що відповідає функціям належності (рис. 2.9).

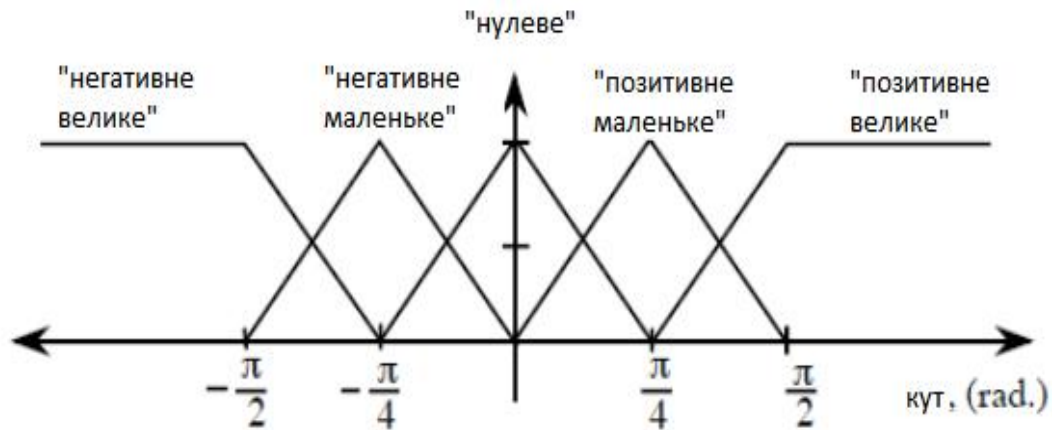


Рисунок 2.9 – Функції належності вхідних змінних

Тепер словесно опишемо послідовність дій людини, коли вона, наприклад, в ручну намагається удержати маятник на візку в рівновазі (рис. 2.10).

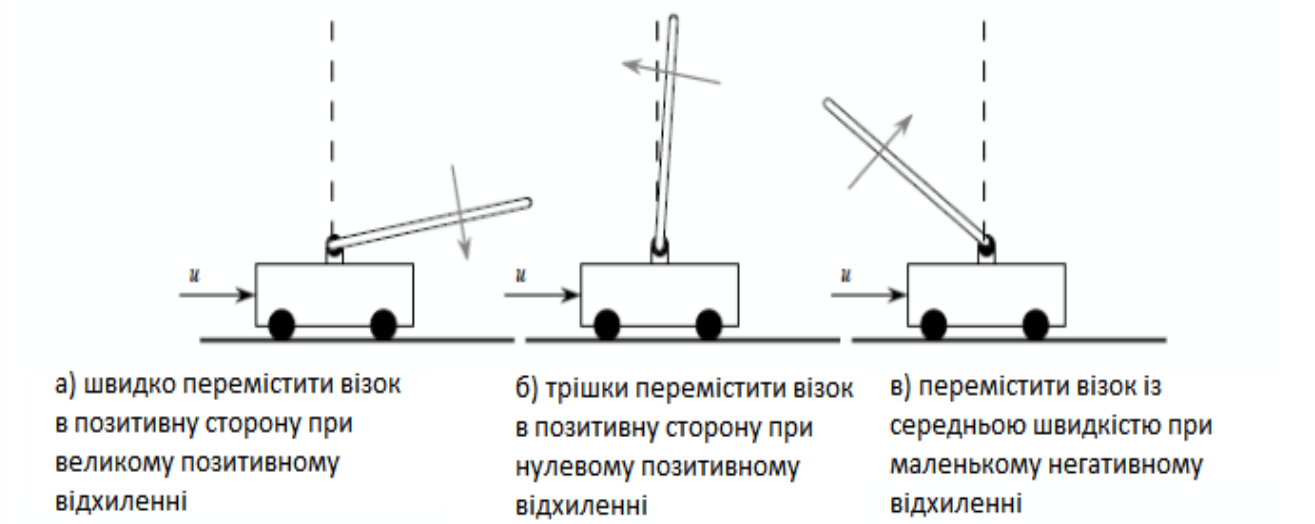


Рисунок 2.10 – Управління перевернутим маятником людиною

Функція належності рівняння представлена на рисунку 2.7.

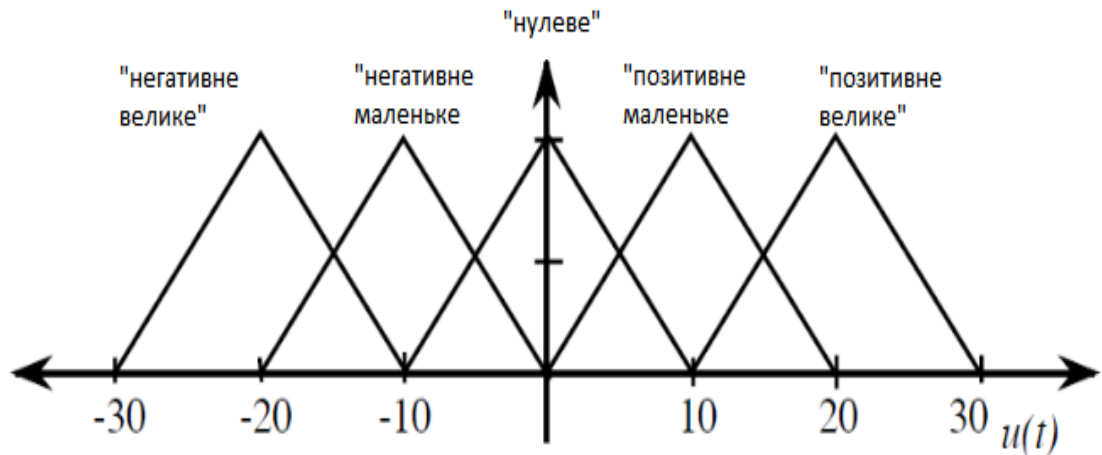


Рисунок 2.11 – Функції належності рівняння

Після створення нечіткого регулятора в пакеті Fuzzy Logic Toolbox, зберемо безпосередньо схему моделювання (рис. 2.12).

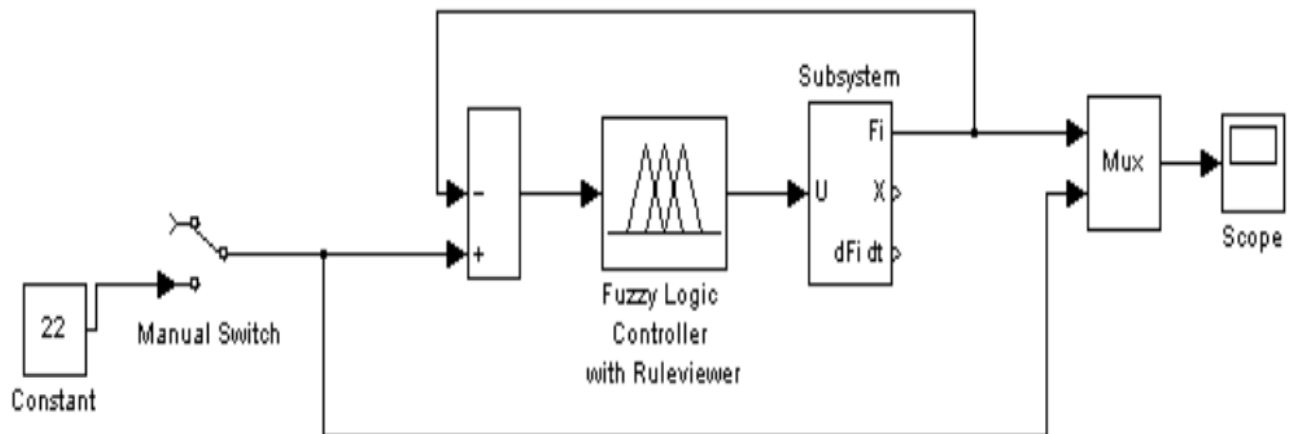


Рисунок 2.12 – Схема моделювання

Подаючи різні відхилення кута, отримуємо наступні результати моделювання (рис. 2.13 – 2.16).

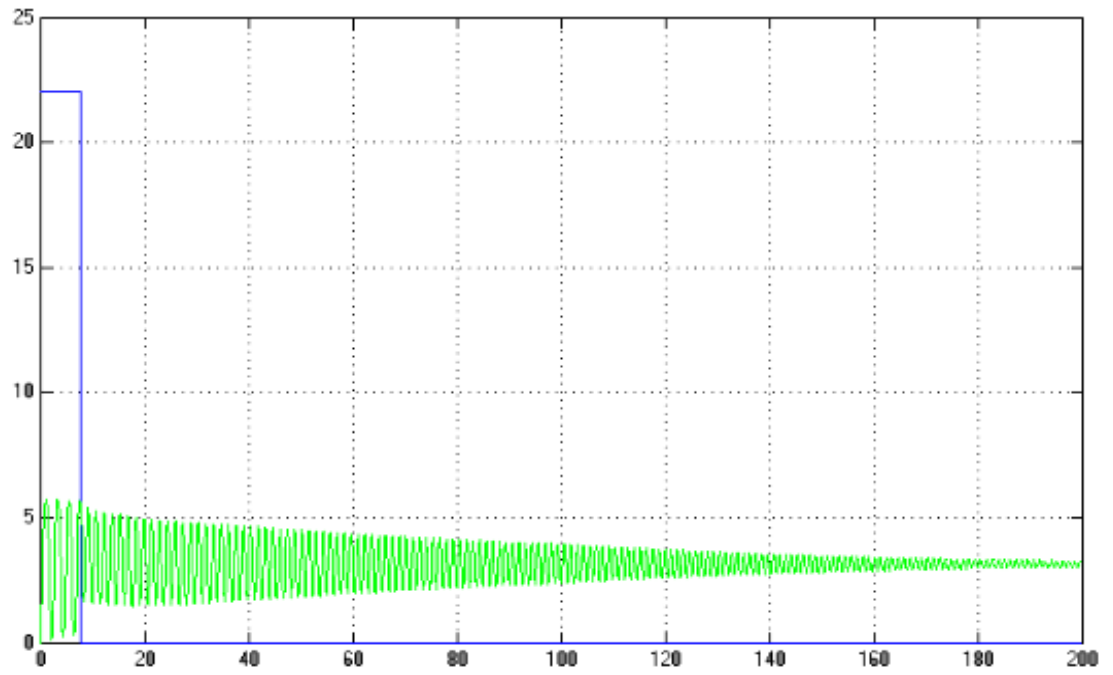


Рисунок 2.13 – Реакція системи на одиничне відхилення в 22 градуси

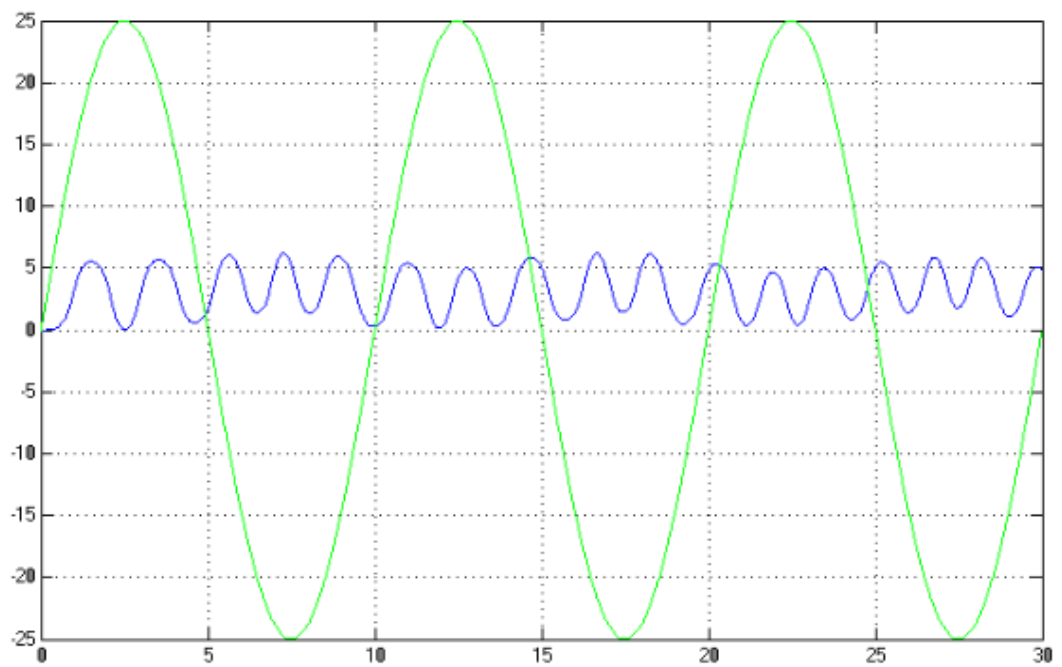


Рисунок 2.14 – Реакція системи на гармонічну зміну вхідного параметра

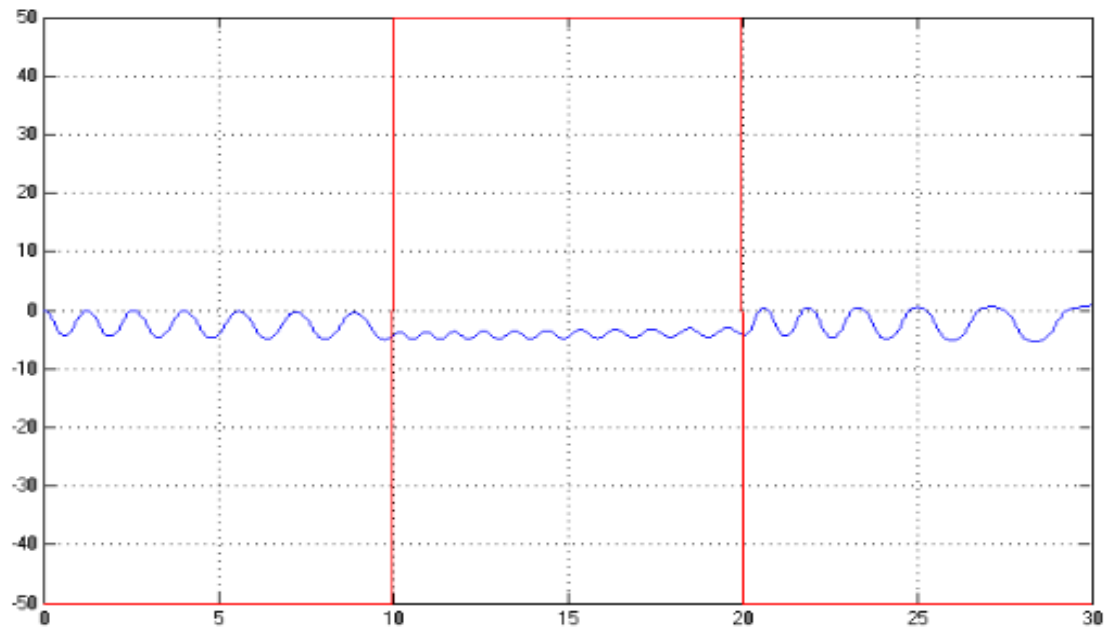


Рисунок 2.15 – Реакція системи на прямокутну зміну вхідного параметра

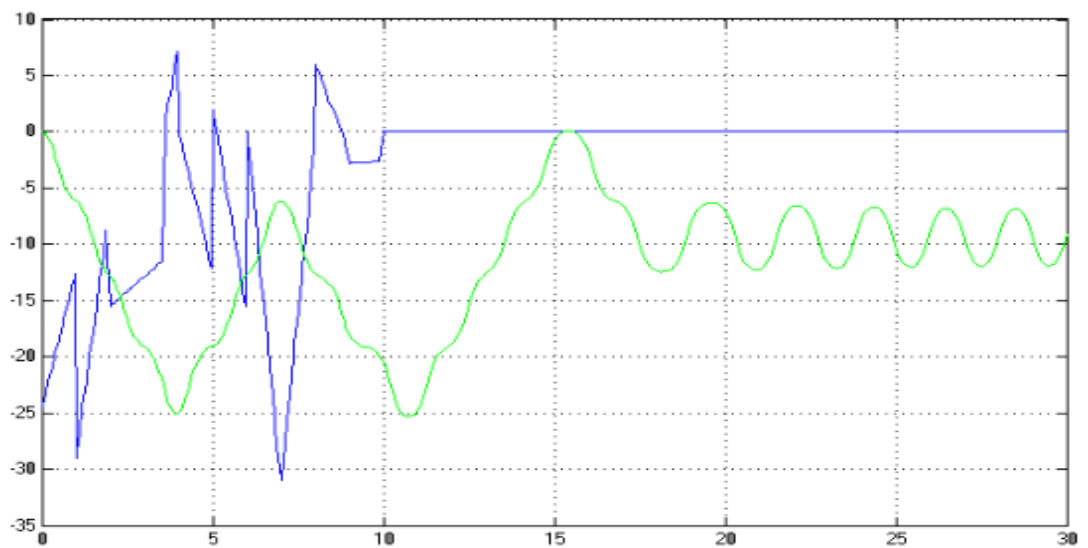


Рисунок 2.16 – Реакція системи на стохастичну зміну вхідного параметра

В процесі моделювання було виявлено, що стержень не падає, але за декілька десятків секунд візок маятника теоретично переміщується на декілька метрів. Тому в систему був введений нечіткий регулятор по положенню.

Створимо схему моделювання, що складатиметься з математичної моделі самого маятника та двох нечітких регуляторів по куту та по положенню (рис. (2.18)).

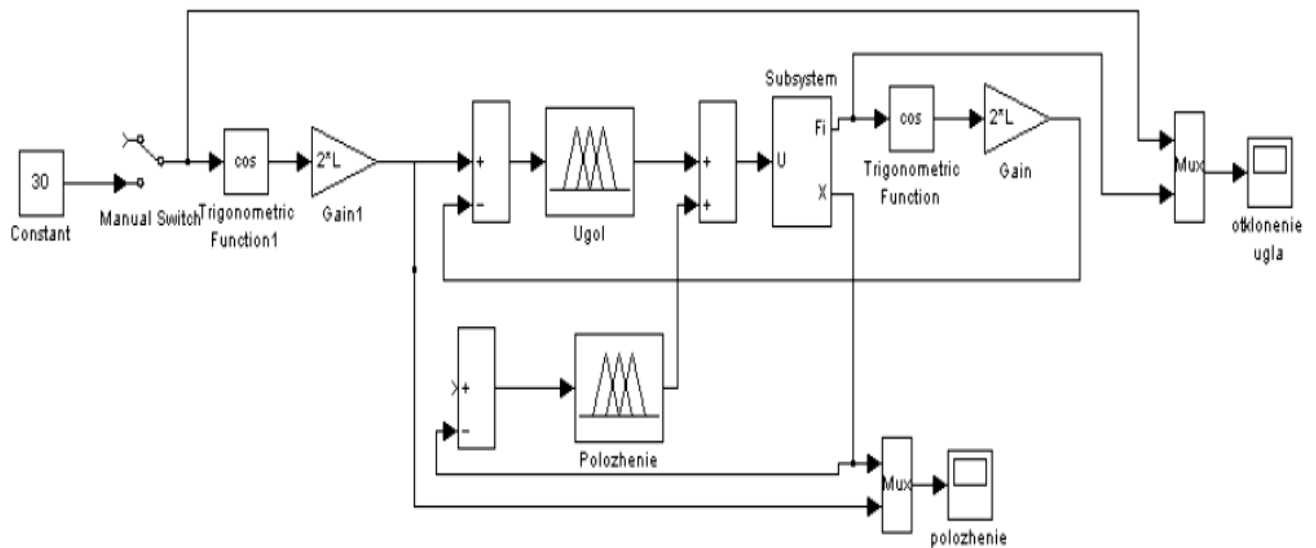


Рисунок 2.18 – Схема моделювання

Подаючи різні відхилення кута, отримаємо наступні результати моделювання (рис. 2.19 – 2.23).

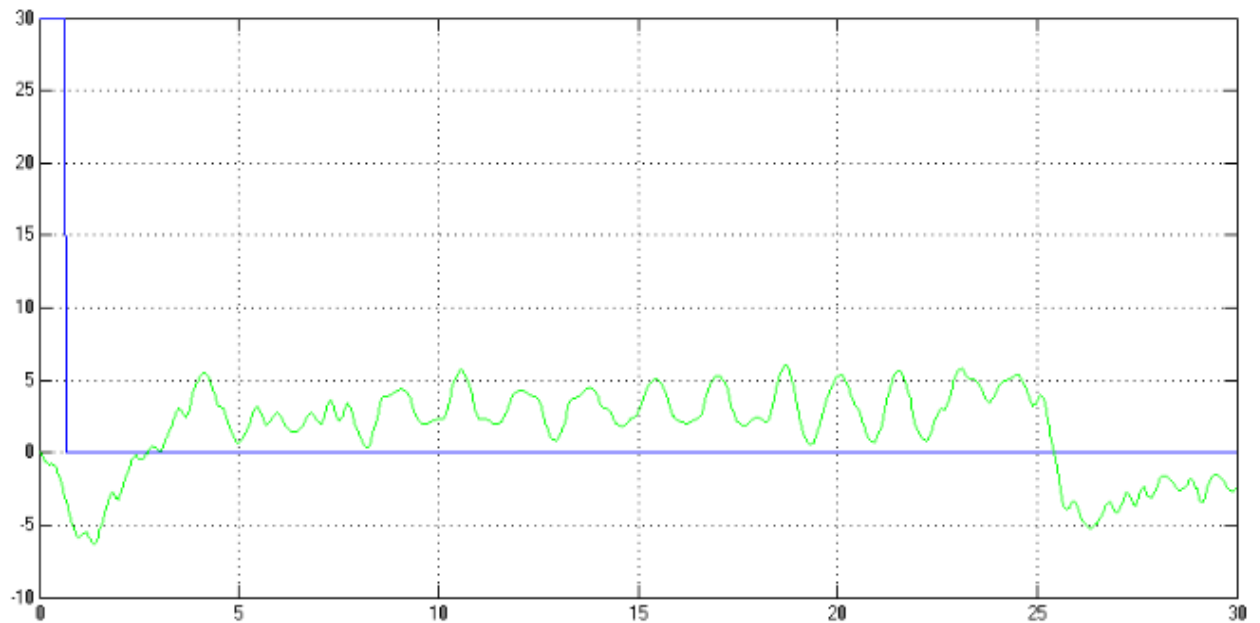


Рисунок 2.19 – Залежність вихідного значення кута від входу

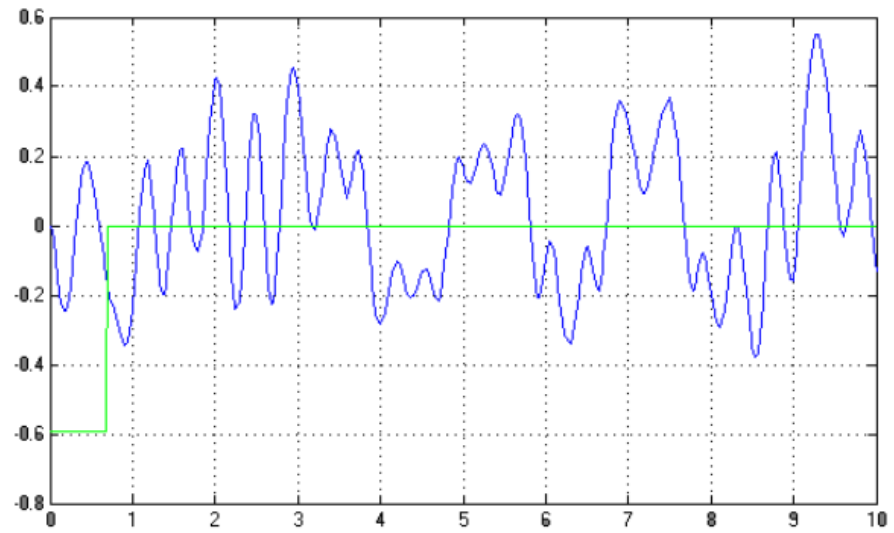


Рисунок 2.20 – Зміна положення координати візка

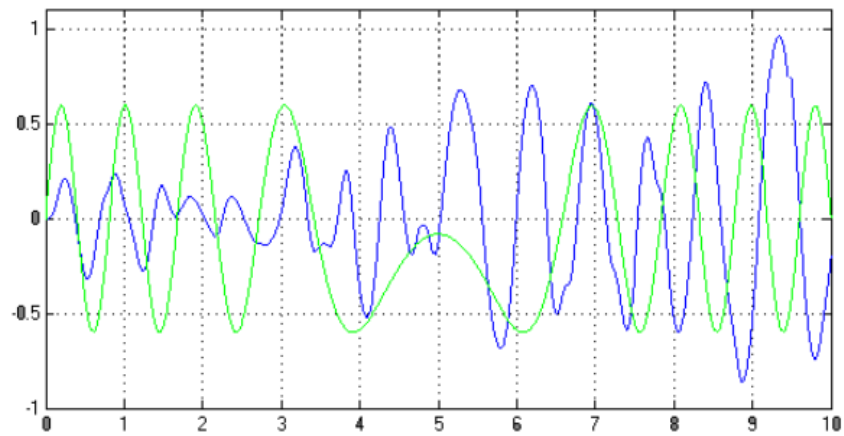


Рисунок 2.21 – Переміщення візка при гармонічній зміні кута

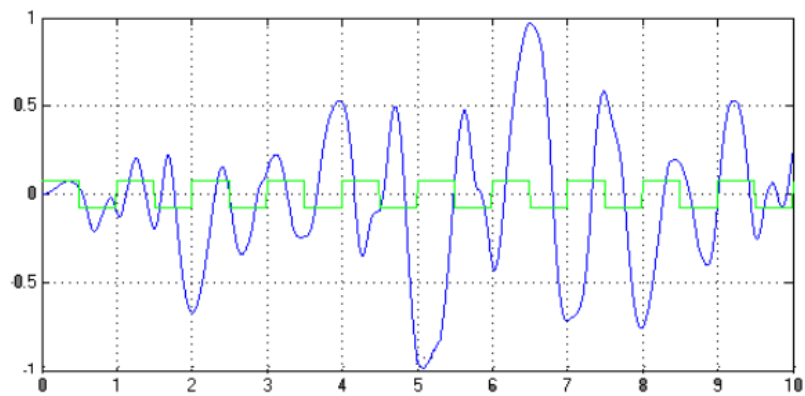


Рисунок 2.22 – Переміщення візка при прямокутній зміні кута

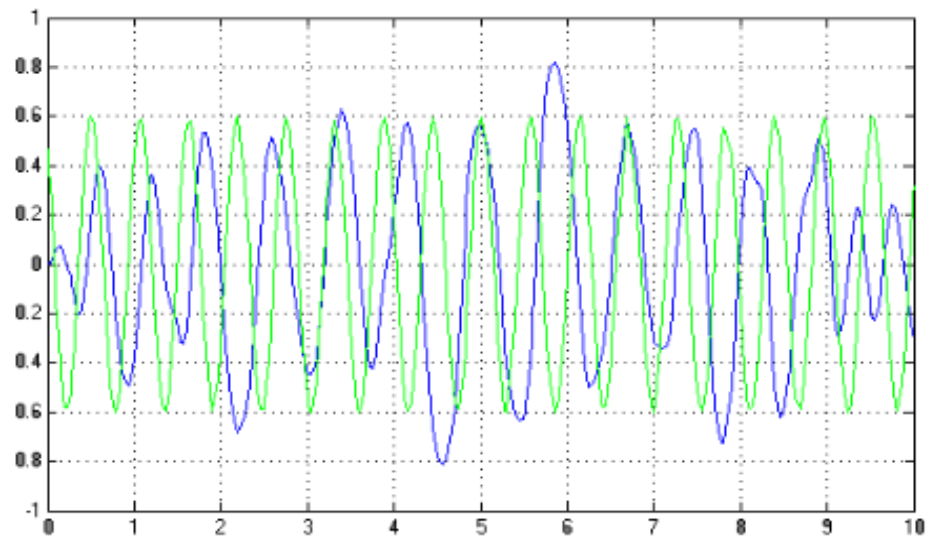


Рисунок 2.23 – Переміщення візка при пилоподібній зміні кута

На основі результатів всіх попередніх пунктів сформуємо алгоритм управління об'єктом типу перевернутий маятник (рис. 2.24).

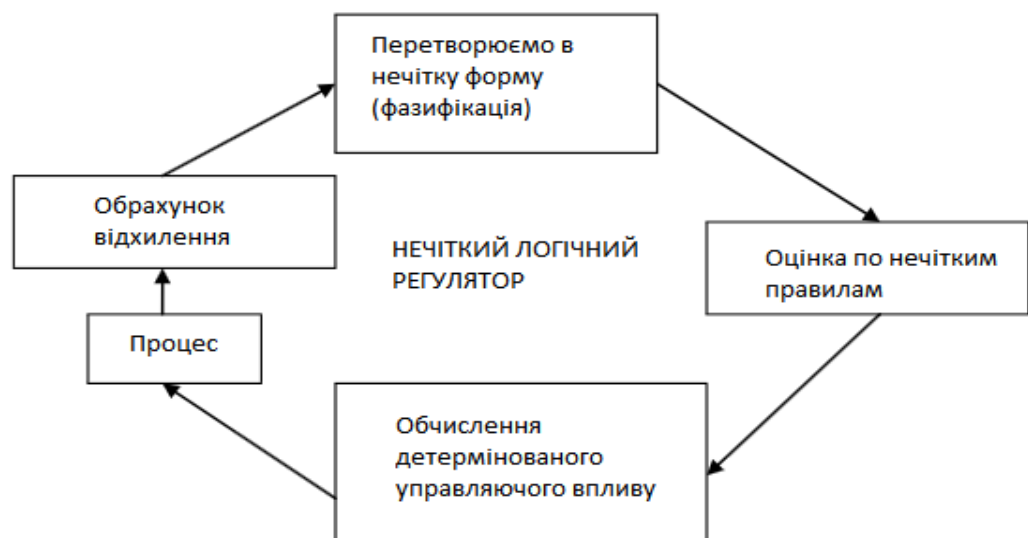


Рисунок 2.24 – Графічне представлення алгоритму нечіткого управління об'єктами типу перевернутий маятник

Визначення основних управляючих впливів складається з чотирьох основних етапів:

- 1) Отримання відхилення.
- 2) Перетворення значення відхилення до нечіткого виду, такому як «великий», «середній» і т. д.
- 3) Оцінка вхідного значення по сформульованим правилам прийняття рішення за допомогою композиційного правила виводу.
- 4) Обчислення детермінованого виходу, необхідного для регулювання процесу.

Даний алгоритм дозволяє створити необхідний нечіткий регулятор по визначеним заздалегідь вхідним величинам.

2.5 Висновки до розділу

В даному розділі було проведено класифікацію моделей, які використовуються для моделювання об'єктів і процесів різної природи, сформульовано основні вимоги до них, розроблені математичні моделі руху колісного візка з вантажем у вигляді перевернутого маятника, отримано вираз для енергоефективного управління рухомої платформи. На основі отриманого співвідношення зроблено висновок, що оптимальне з точки зору витрат енергії управління шляхом приведення перевернутого маятника у верхнє положення рівноваги за будь-яких початкових умов можна реалізувати у вигляді двох імпульсів, перший з яких подається на початку руху, а другий – в кінці. Проведено альтернативне моделювання автоматизованого управління рухом візка нечіткими методами.

3 ПРОГРАМНА МОДЕЛЬ

3.1 Вибір і обґрунтування середовища моделювання

До основних платформ, які можна використати як середовища моделювання досліджуваної системи у вигляді двоколісного візка з вантажем у вигляді перевернутого маятника, можна віднести MATLAB/Simulink, Webots, Gazebo, CoppeliaSim, AnyLogic, PyBullet, OpenModelica.

Webots є професійною платформою для 3D-моделювання робототехнічних систем із великою бібліотекою роботів і сенсорів. Підтримує розробки для багатьох платформ, має зручний графічний інтерфейс і легко інтегрує програмне забезпечення управління на Python, C++, MATLAB. Основним недоліком є те, що для використання потрібно купувати ліцензію.

Gazebo є стандартним інструментом для 3D-симуляції робототехніки у складі ROS (Robot Operating System) і використовується для точного моделювання з використанням фізичних рушіїв.. До її недоліків відносяться високі обчислювальні ресурси і відносно складна конфігурація.

CoppeliaSim є потужним середовищем для моделювання та тестування роботів із підтримкою фізичних рушіїв і інструментів автоматизації. До переваг середовища відносяться гнучка інтеграція через API (Python, Lua, C++), підтримка складних динамічних моделей (наприклад, перевернутого маятника), до недоліків - менша популярність у порівнянні з іншими платформами.

Середовище PyBullet має бібліотеку фізики на Python, яка підходить для симуляції роботів із простою динамікою. До її переваг відносяться легка інтеграція в середовища машинного навчання, висока швидкість симуляції, простота використання для двовимірних і тривимірних сценаріїв. В якості недоліка можна відзначити обмежену підтримку складних сенсорів і складного середовища.

Система моделювання AnyLogic що дозволяє створювати як фізичні, так і логічні моделі роботів. Переваги: можливість комбінувати дискретні й безперервні моделі, візуалізація складних сценаріїв. Недоліки: застосовується в основному в бізнес-процесах, а не робототехнічного середовища.

Для тестування моделей, розроблених в даній магістерській роботі, було обрано середовище MATLAB інструмент Simulink [42, 43].

MATLAB/Simulink є потужним середовищем для моделювання динамічних систем, і має низку переваг для задачі моделювання руху перевернутого маятника на двоколісній платформі. До основних з них відносяться такі.

Інтуїтивно зрозуміле середовище моделювання - Simulink використовує графічний інтерфейс, де користувач може створювати блок-схеми, що представляють фізичні та математичні компоненти системи. Це зручно для моделювання складних систем, таких як перевернутий маятник, завдяки наочності.

Багатий набір бібліотек

- MATLAB/Simulink надає численні готові блоки для моделювання механічних, електричних, математичних та управлінських систем, що дозволяє швидко створити модель двоколісної платформи з перевернутим маятником.

- Бібліотека Simscape Multibody дозволяє моделювати фізичну динаміку об'єктів, таких як маятники, з урахуванням сил та моментів.

Можливість роботи з нелінійними системами - Перевернутий маятник є нелінійною системою. MATLAB/Simulink забезпечує зручні інструменти для моделювання таких систем, включно з налаштуванням інтеграторів та нелінійними блоками.

Інтеграція управління MATLAB має вбудовані функції для аналізу та проектування систем керування (наприклад, PID-регулятори, оптимізація,

розробка адаптивних або предиктивних регуляторів). Simulink дозволяє легко інтегрувати моделі регуляторів до фізичної моделі системи.

Платформа OpenModelica є інструментом для моделювання динамічних систем із математичними рівняннями. Підходить для точного математичного моделювання динаміки перевернутого маятника і підтримує складні фізичні моделі. Недоліком є відсутність вбудованої тривимірної візуалізації.

Аналіз і візуалізація результатів - MATLAB забезпечує потужні інструменти для аналізу результатів моделювання, візуалізації траєкторій, графіків помилок, оцінки стабільності та продуктивності системи.

Можливість реального часу - MATLAB/Simulink підтримує інструменти для генерації коду (наприклад, Simulink Coder), що дозволяє використовувати модель для управління реальними системами в режимі реального часу.

Гнучкість для адаптації до складних задач

- Можна інтегрувати власні математичні моделі, написані в MATLAB, з блоками Simulink.

- Можливість додавання зовнішніх бібліотек або моделювання мультирівневих систем. Підтримка тестування - Інструменти для моделювання зовнішніх збурень, тестування системи в різних сценаріях (наприклад, зміна нахилу поверхні або параметрів маятника).

Можливість інтеграції toolbox Simulink з іншими модулями MATLAB для роботи з машинним навчанням, оптимізацією, обробкою сигналів тощо та можливість взаємодії з іншими середовищами програмування та моделювання.

Описані вище можливості даного середовища моделювання показують, що MATLAB/Simulink надає повний набір інструментів для моделювання, аналізу, налаштування та тестування системи перевернутого маятника на двоколісній платформі, що робить його ідеальним середовищем для таких задач.

3.2 Моделювання системи в середовищі MATLAB/Simulink

Ефективність запропонованих в роботі алгоритмів управління продемонстрована шляхом моделювання системи в середовищі MATLAB/Simulink [43].

Складемо структурну схему управління перевернутим маятником в середовищі MATLAB/Simulink (рис. 3.1). Дана схема складається з PID контролера, генератора імпульсів, двох суматорів, безпосередньо блоку управління перевернутим маятником, на вхід якому подається сила збурення, а на виході ми отримуємо кут нахилу маятника та положення візка. Також до даної схеми входить осцилограф для спостереження за процесами, що відбуваються в системі.

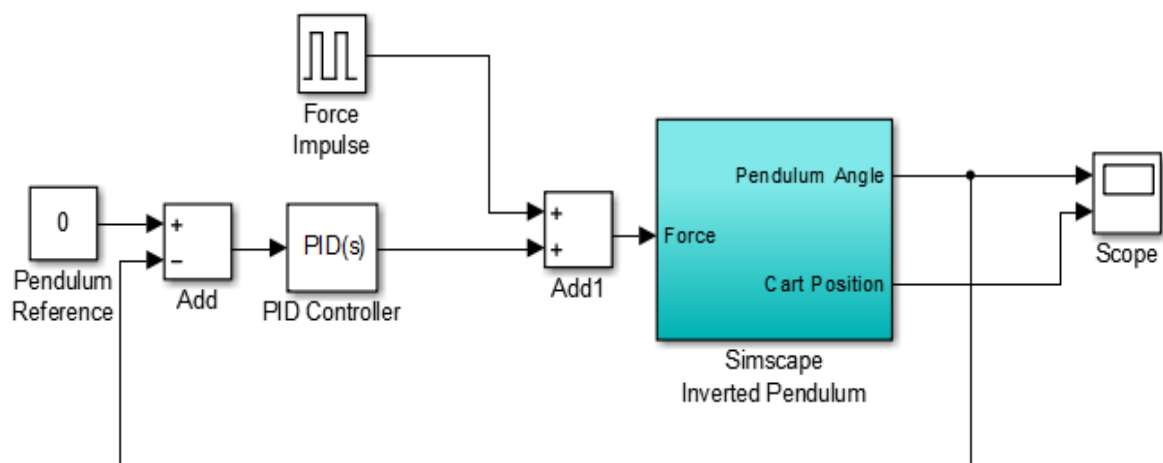


Рисунок 3.1 – Структурна схема управління в середовищі MATLAB/Simulink

Структурна схема блоку управління перевернутим маятником представлена на рисунку 3.2.

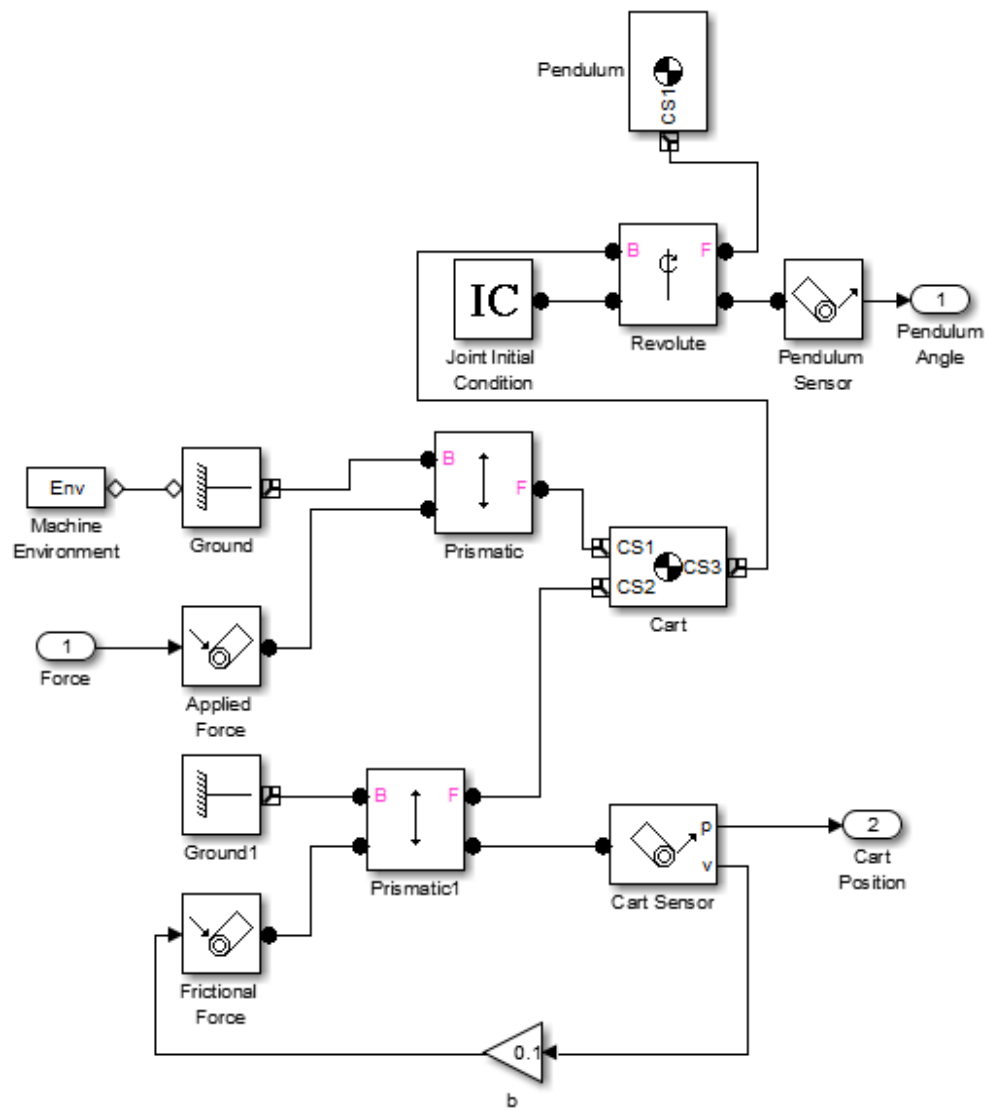


Рисунок 3.2 – Структурна схема блоку управління перевернутим маятником

Задамо вхідні параметри:

clc;

clear;

M=0.5;

m=0.5;

b=0.1;

l=.3;

I=.006;

g=9.8;

d=I*(M+m)+M*m*l^2;

Будуємо модель в просторі станів:

```
A=[0 1 0 0;m*g*l*(M+m)/d 0 0 m*l*b/d;0 0 0 1;-g*m^2*l^2/d 0 0 -
b*(I+m*l^2)/d];
B=[0;-m*l/d;0;(I+m*l^2)/d];
C=[0 0 1 0;1 0 0 0];
D=[0;0];
system=ss(A,B,C,D)
```

Передатна функція системи:

```
inputs = {'u'};
outputs = {'x'; 'tetha'};
G=tf(system)
set(G,'InputName',inputs)
set(G,'OutputName',outputs)
```

Перевірка стабільності системи:

```
inputs = {'u'};
outputs = {'x'; 'theta'};
set(G,'InputName',inputs)
set(G,'OutputName',outputs)
figure(1);clf;subplot(221)
t=0:0.01:1;
impulse(G,t);
grid;
title('Open-Loop Impulse Response of the system')
%Open-Loop step response
subplot(222)
t = 0:0.05:10;
u = ones(size(t));
```

```

[y,t] = lsim(G,u,t);
plot(t,y)
title('Open-Loop Step Response of the system')
axis([0 2 -50 50])
legend('x','theta')
grid;
% Poles of the system and pole-zero mapping
disp('=====')
disp('Poles of the system are:')
disp('=====')
Poles=eig(A)
subplot(2,2,3:4)
pzmap(system);
title('Pole-zero mapping of inverted pendulum')
% Checking controllabilitydisp('=====')
disp('checking controllability:')
disp('=====')
CO=ctrb(system);
Rank_CO=rank(CO)
unco=length(A)-rank(CO)
if(unco==0)
disp('system is controllable!')
else
disp(['number of uncontrollable states are:',unco])
end;
% Checking Observabilitydisp('=====')
disp('Checking observability:')
disp('=====')
OB=obsv(system);
Rank_OB=rank(OB)

```

```

unobsv=length(A)-rank(OB)
if(unobsv==0)
disp('system is observable!')
else
disp(['number of unobservable states are:',unobsv])
end;

```

3.3 Результати тестування моделі

На рисунку 3.3 представлено приклад управління положенням маятника. Зображені графіки перехідних процесів кута нахилу маятника ψ та обертового моменту колеса T . У вихідному стані маятник встановлений вертикально, потім він повинен зайняти і підтримувати положення $-0,1$ рад, на другій секунді дається команда зайняти і утримувати положення $+0,1$ рад, і, нарешті, на четвертій секунді дається команда зайняти і втримувати положення $+0$ рад.

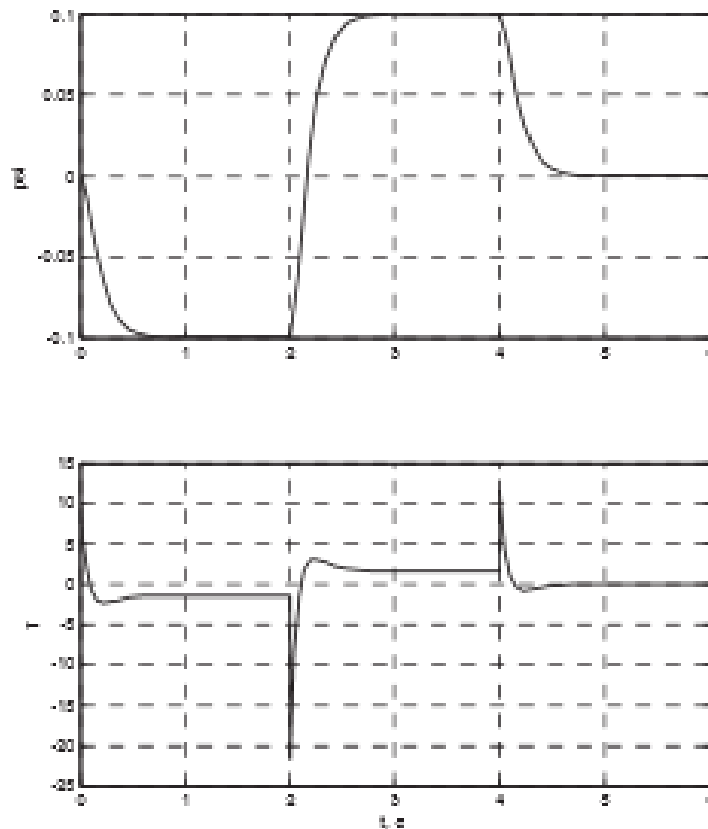


Рисунок 3.3 – Перехідні процеси при управлінні тільки положенням маятника

На рисунку 3.4 представлений приклад одночасного управління положенням маятника і швидкістю руху платформи. Зображені графіки перехідних процесів кута нахилу маятника ψ та кутової швидкості колеса $\dot{\vartheta}$. В вихідному стані маятник розташований практично вертикально, апарат із стану спокою повинен досягнути швидкості обертання колеса в 1 рад/с, зберігаючи вертикальне положення маятника, на тридцятій секунді дається команда збільшити швидкість до 1,2 рад/с, на шістдесятій секунді дається команда знизити швидкість до 0,8 рад/с.

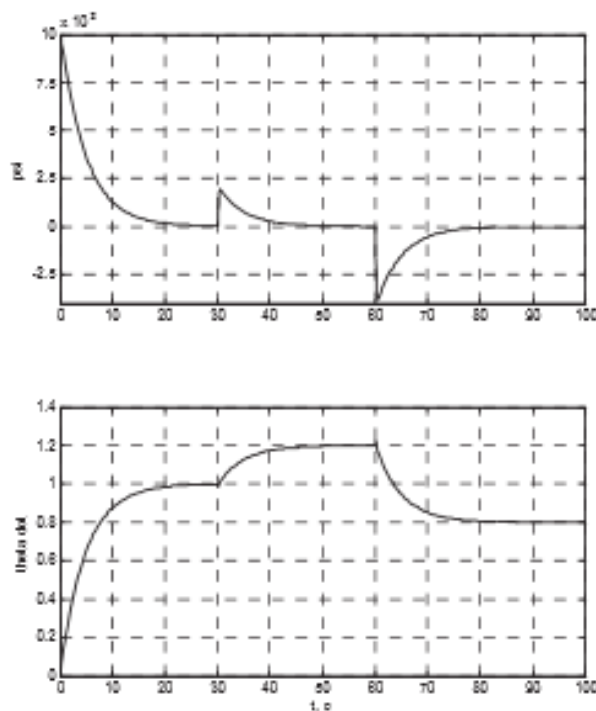


Рисунок 3.4 – Перехідні процеси при одночасному управлінні положенням маятника і швидкістю руху платформи

3.4 Висновки до розділу

Тестування розробленої програмної моделі в середовищі MATLAB/Simulink з використанням двухімпульсної схеми управління показало, що система “візок-маятник” після деякого зрівноваження стає стабільною і перебуває в стані рівноваги, що свідчить про ефективність даної моделі.

4 ЕКОНОМІЧНА ЧАСТИНА

Виконання науково-дослідної роботи завжди передбачає отримання певних результатів і вимагає відповідних витрат. Результати виконаної роботи завжди дають нам нові знання, які в подальшому можуть бути використані для удосконалення та/або розробки (побудови) нових, більш продуктивних зразків техніки, процесів та програмного забезпечення.

Дослідження на тему «Розробка моделі автоматизованого управління самохідним візком» може бути віднесено до фундаментальних і пошукових наукових досліджень і спрямоване на вирішення наукових проблем, пов'язаних з практичним застосуванням. Основою таких досліджень є науковий ефект, який виражається в отриманні наукових результатів, які збільшують обсяг знань про природу, техніку та суспільство, які розвивають теоретичну базу в тому чи іншому науковому напрямку, що дозволяє виявити нові закономірності, які можуть використовуватися на практиці.

4.1 Оцінювання наукового ефекту

Основними ознаками наукового ефекту науково-дослідної роботи є новизна роботи, рівень її теоретичного опрацювання, перспективність, рівень розповсюдження результатів, можливість реалізації. Науковий ефект НДР на тему «Розробка моделі автоматизованого управління самохідним візком» можна охарактеризувати двома показниками: ступенем наукової новизни та рівнем теоретичного опрацювання.

Значення показників ступеня новизни і рівня теоретичного опрацювання науково-дослідної роботи в балах наведені в табл. 4.1 та 4.2.

Таблиця 4.1 – Показники ступеня новизни науково-дослідної роботи
виставлені експертами

Ступінь новизни	Характеристика ступеня новизни	Значення ступеня новизни, бали		
		Експерти (ПІБ, посада)		
		1	2	3
Принципово нова	Робота якісно нова за постановкою задачі і ґрунтується на застосуванні оригінальних методів дослідження. Результати дослідження відкривають новий напрям в даній галузі науки і техніки. Отримані принципово нові факти, закономірності; розроблена нова теорія. Створено принципово новий пристрій, спосіб, метод	0	0	0
Нова	Отримана нова інформація, яка суттєво зменшує невизначеність наявних значень (по-новому або вперше пояснені відомі факти, закономірності, впроваджені нові поняття, розкрита структура змісту). Проведено суттєве вдосконалення, доповнення і уточнення раніше досягнутих результатів	55	58	56
Відносно нова	Робота має елементи новизни в постановці задачі і методах дослідження. Результати дослідження систематизують і узагальнюють наявну інформацію, визначають шляхи подальших досліджень; вперше знайдено зв'язок (або знайдено новий зв'язок) між явищами. В принципі відомі положення розповсюджені на велику кількість об'єктів, в результаті чого знайдено ефективне рішення. Розроблені більш прості способи для досягнення відомих результатів. Проведена часткова раціональна модифікація (з ознаками новизни)	0	0	0

Таблиця 4.1 (продовження)

Традиційна	Робота виконана за традиційною методикою. Результати дослідження мають інформаційний характер. Підтверджені або поставлені під сумнів відомі факти та твердження, які потребують перевірки. Знайдено новий варіант рішення, який не дає суттєвих переваг в порівнянні з існуючим	0	0	0
Не нова	Отримано результат, який раніше зафіксований в інформаційному полі, та не був відомий авторам	0	0	0
Середнє значення балів експертів		56,3		

Згідно отриманого середнього значення балів експертів ступінь новизни характеризується як нова, тобто отримана нова інформація, яка суттєво зменшує невизначеність наявних знань (по-новому або вперше пояснені відомі факти, закономірності, впроваджені нові поняття, розкрита структура змісту) та проведено суттєве вдосконалення, доповнення і уточнення раніше досягнутих результатів.

Таблиця 4.2 – Показники рівня теоретичного опрацювання науково-дослідної роботи виставлені експертами

Характеристика рівня теоретичного опрацювання	Значення показника рівня теоретичного опрацювання, бали		
	Експерт (ПБ, посада)		
	1	2	3
Відкриття закону, розробка теорії	0	0	0
Глибоке опрацювання проблеми: багатоаспектний аналіз зв'язків, взаємозалежності між фактами з наявністю пояснень, наукової систематизації з побудовою евристичної моделі або комплексного прогнозу	60	65	63
Розробка способу (алгоритму, програми), пристрою, отримання нової речовини	0	0	0

Таблиця 4.2 (продовження)

Елементарний аналіз зв'язків між фактами та наявною гіпотезою, класифікація, практичні рекомендації для окремого випадку тощо	0	0	0
Опис окремих елементарних фактів, викладення досвіду, результатів спостережень, вимірювань тощо	0	0	0
Середнє значення балів експертів	62,7		

Згідно отриманого середнього значення балів експертів рівень теоретичного опрацювання науково-дослідної роботи характеризується як глибоке опрацювання проблеми: багатоаспектний аналіз зв'язків, взаємозалежності між фактами з наявністю пояснень, наукової систематизації з побудовою евристичної моделі або комплексного прогнозу.

Показник, який характеризує рівень наукового ефекту, визначаємо за формулою [44]:

$$E_{\text{нау}} = 0,6 \cdot k_{\text{нов}} + 0,4 \cdot k_{\text{теор}}, \quad (4.1)$$

де $k_{\text{нов}}, k_{\text{теор}}$ - показники ступеня новизни та рівня теоретичного опрацювання науково-дослідної роботи, $k_{\text{нов}} = 56,3, k_{\text{теор}} = 62,7$ балів;

0,6 та 0,4 – питома вага (значимість) показників ступеня новизни та рівня теоретичного опрацювання науково-дослідної роботи.

$$E_{\text{нау}} = 0,6 \cdot k_{\text{нов}} + 0,4 \cdot k_{\text{теор}} = 0,6 \cdot 56,3 + 0,4 \cdot 62,67 = 58,87 \text{ балів.}$$

Визначення характеристики показника $E_{\text{нау}}$ проводиться на основі висновків експертів виходячи з граничних значень, які наведені в табл. 4.3.

Таблиця 4.3 – Граничні значення показника наукового ефекту

Досягнутий рівень показника	Кількість балів
Високий	70...100
Середній	50...69
Достатній	15...49
Низький (помилкові дослідження)	1...14

Відповідно до визначеного рівня наукового ефекту проведеної науково-дослідної роботи на тему «Розробка моделі автоматизованого управління самохідним візком», даний рівень становить 58,87 балів і відповідає статусу - середній рівень. Тобто у даному випадку можна вести мову про потенційну фактичну ефективність науково-дослідної роботи.

4.2 Розрахунок витрат на здійснення науково-дослідної роботи

Витрати, пов'язані з проведенням науково-дослідної роботи на тему «Розробка моделі автоматизованого управління самохідним візком», під час планування, обліку і калькулювання собівартості науково-дослідної роботи групуємо за відповідними статтями.

4.2.1 Витрати на оплату праці

До статті «Витрати на оплату праці» належать витрати на виплату основної та додаткової заробітної плати керівникам відділів, лабораторій, секторів і груп, науковим, інженерно-технічним працівникам, конструкторам, технологам, креслярам, копіювальникам, лаборантам, робітникам, студентам, аспірантам та іншим працівникам, безпосередньо зайнятим виконанням конкретної теми, обчисленої за посадовими окладами, відрядними розцінками, тарифними ставками згідно з чинними в організаціях системами оплати праці.

Основна заробітна плата дослідників

Витрати на основну заробітну плату дослідників (Z_o) розраховуємо у відповідності до посадових окладів працівників, за формулою [44]:

$$Z_o = \sum_{i=1}^k \frac{M_{ni} \cdot t_i}{T_p}, \quad (4.2)$$

де k – кількість посад дослідників залучених до процесу досліджень;

M_{ni} – місячний посадовий оклад конкретного дослідника, грн;

t_i – число днів роботи конкретного дослідника, дн.;

T_p – середнє число робочих днів в місяці, $T_p=22$ дні.

$$Z_o = 20200,00 \cdot 12 / 22 = 11018,18 \text{ грн.}$$

Проведені розрахунки зведемо до таблиці.

Таблиця 4.4 – Витрати на заробітну плату дослідників

Найменування посади	Місячний посадовий оклад, грн	Оплата за робочий день, грн	Число днів роботи	Витрати на заробітну плату, грн
Керівник науково-дослідної роботи	20200,00	918,18	12	11018,18
Інженер-дослідник автоматизованих систем управління	16300,00	740,91	10	7409,09
Науковий співробітник	16150,00	734,09	5	3670,45
Лаборант	8000,00	363,64	10	3636,36
Всього				25734,09

Основна заробітна плата робітників

Витрати на основну заробітну плату робітників (Z_p) за відповідними найменуваннями робіт НДР на тему «Розробка моделі автоматизованого управління самохідним візком» розраховуємо за формулою:

$$Z_p = \sum_{i=1}^n C_i \cdot t_i, \quad (4.3)$$

де C_i – погодинна тарифна ставка робітника відповідного розряду, за виконану відповідну роботу, грн/год;

t_i – час роботи робітника при виконанні визначеної роботи, год.

Погодинну тарифну ставку робітника відповідного розряду C_i можна визначити за формулою:

$$C_i = \frac{M_M \cdot K_i \cdot K_c}{T_p \cdot t_{zm}}, \quad (4.4)$$

де M_M – розмір прожиткового мінімуму працездатної особи, або мінімальної місячної заробітної плати (в залежності від діючого законодавства), прийmemo $M_M=8000,00$ грн;

K_i – коефіцієнт міжкваліфікаційного співвідношення для встановлення тарифної ставки робітнику відповідного розряду (табл. Б.2, додаток Б) [44];

K_c – мінімальний коефіцієнт співвідношень місячних тарифних ставок робітників першого розряду з нормальними умовами праці виробничих об'єднань і підприємств до законодавчо встановленого розміру мінімальної заробітної плати.

T_p – середнє число робочих днів в місяці, приблизно $T_p = 22$ дн;

$t_{зм}$ – тривалість зміни, год.

$$C_1 = 8000,00 \cdot 1,10 \cdot 1,25 / (22 \cdot 8) = 62,50 \text{ грн.}$$

$$З_{pl} = 62,50 \cdot 7,20 = 450,00 \text{ грн.}$$

Таблиця 4.5 – Величина витрат на основну заробітну плату робітників

Найменування робіт	Тривалість роботи, год	Розряд роботи	Тарифний коефіцієнт	Погодинна тарифна ставка, грн	Величина оплати на робітника грн
Встановлення обладнання для проведення досліджень	7,20	2	1,10	62,50	450,00
Підготовка робочого місця дослідника моделі	5,80	3	1,35	76,70	444,89
Інсталяція програмного забезпечення моделювання системи	4,35	4	1,50	85,23	370,74
Проведення числового експерименту	6,45	4	1,50	85,23	549,72
Тестування моделі	7,52	2	1,10	62,50	470,00
Всього					2285,34

Додаткова заробітна плата дослідників та робітників

Додаткову заробітну плату розраховуємо як 10 ... 12% від суми основної заробітної плати дослідників та робітників за формулою:

$$Z_{\text{доо}} = (Z_o + Z_p) \cdot \frac{H_{\text{доо}}}{100\%}, \quad (4.5)$$

де $H_{\text{доо}}$ – норма нарахування додаткової заробітної плати. Прийmemo 10%.

$$Z_{\text{доо}} = (25734,09 + 2285,34) \cdot 10 / 100\% = 2801,94 \text{ грн.}$$

4.2.2 Відрахування на соціальні заходи

Нарахування на заробітну плату дослідників та робітників розраховуємо як 22% від суми основної та додаткової заробітної плати дослідників і робітників за формулою:

$$Z_n = (Z_o + Z_p + Z_{\text{доо}}) \cdot \frac{H_{\text{зн}}}{100\%} \quad (4.6)$$

де $H_{\text{зн}}$ – норма нарахування на заробітну плату. Приймаємо 22%.

$$Z_n = (25734,09 + 2285,34 + 2801,94) \cdot 22 / 100\% = 6780,70 \text{ грн.}$$

4.2.3 Сировина та матеріали

До статті «Сировина та матеріали» належать витрати на сировину, основні та допоміжні матеріали, інструменти, пристрої та інші засоби і предмети праці, які придбані у сторонніх підприємств, установ і організацій та витрачені на проведення досліджень за темою «Розробка моделі автоматизованого управління самохідним візком».

Витрати на матеріали на даному етапі проведення досліджень в основному пов'язані з використанням моделей елементів та моделювання роботи і досліджень за допомогою комп'ютерної техніки та створення експериментальних математичних моделей або програмного забезпечення, тому дані витрати формуються на основі витратних матеріалів характерних для офісних робіт.

Витрати на матеріали (M), у вартісному вираженні розраховуються окремо по кожному виду матеріалів за формулою:

$$M = \sum_{j=1}^n H_j \cdot C_j \cdot K_j - \sum_{j=1}^n B_j \cdot C_{ej}, \quad (4.7)$$

де H_j – норма витрат матеріалу j -го найменування, кг;

n – кількість видів матеріалів;

C_j – вартість матеріалу j -го найменування, грн/кг;

K_j – коефіцієнт транспортних витрат, ($K_j = 1,1 \dots 1,15$);

B_j – маса відходів j -го найменування, кг;

C_{ej} – вартість відходів j -го найменування, грн/кг.

$$M_1 = 1 \cdot 202,00 \cdot 1,01 - 0 \cdot 0 = 204,02 \text{ грн.}$$

Проведені розрахунки зведемо до таблиці.

Таблиця 4.6 – Витрати на матеріали

Найменування матеріалу, марка, тип, сорт	Ціна за 1 кг, грн	Норма витрат, кг	Величина відходів, кг	Ціна відходів, грн/кг	Вартість витраченого матеріалу, грн
Офісний папір Canon 500/80 A4	202,00	1	0	0	204,02
Папір для записів Canon Parers A5	92,00	2	0	0	185,84
Органайзер офісний BUROMAX	205,00	2	0	0	414,10
Канцелярське приладдя (набір офісного працівника) BUROMAX	215,00	2	0	0	434,30

Таблиця 4.6 (продовження)

Картридж для принтера Canon i-sensys LBP6500	1129,00	1	0	0	1140,29
Тека для паперів BUROMAX	127,00	1	0	0	128,27
Flesh-пам'ять Kingston Data Traveler 128 GB	295,00	1	0	0	297,95
Всього					2804,77

4.2.4 Розрахунок витрат на комплектуючі

Витрати на комплектуючі (K_6), які використовують при проведенні НДР на тему «Розробка моделі автоматизованого управління самохідним візком», розраховуємо, згідно з їхньою номенклатурою, за формулою:

$$K_6 = \sum_{j=1}^n H_j \cdot C_j \cdot K_j \quad (4.8)$$

де H_j – кількість комплектуючих j -го виду, шт.;

C_j – покупна ціна комплектуючих j -го виду, грн;

K_j – коефіцієнт транспортних витрат, ($K_j = 1,1 \dots 1,15$).

$$K_6 = 1 \cdot 4520,00 \cdot 1,01 = 4565,20 \text{ грн.}$$

Проведені розрахунки зведемо до таблиці.

Таблиця 4.7 – Витрати на комплектуючі

Найменування комплектуючих	Кількість, шт.	Ціна за штуку, грн	Сума, грн
Діюча імітаційна модель самохідного візка (М1:10)	1	4520,00	4565,20

Таблиця 4.7 (продовження)

Всього	4565,20
--------	---------

4.2.5 Спецустаткування для наукових (експериментальних) робіт

До статті «Спецустаткування для наукових (експериментальних) робіт» належать витрати на виготовлення та придбання спецустаткування необхідного для проведення досліджень, також витрати на їх проектування, виготовлення, транспортування, монтаж та встановлення.

Балансову вартість спецустаткування розраховуємо за формулою:

$$B_{\text{спец}} = \sum_{i=1}^k C_i \cdot C_{\text{пр.і}} \cdot K_i, \quad (4.9)$$

де C_i – ціна придбання одиниці спецустаткування даного виду, марки, грн;

$C_{\text{пр.і}}$ – кількість одиниць устаткування відповідного найменування, які придбані для проведення досліджень, шт.;

K_i – коефіцієнт, що враховує доставку, монтаж, налагодження устаткування тощо, ($K_i = 1,10 \dots 1,12$);

k – кількість найменувань устаткування.

$$B_{\text{спец}} = 1850,00 \cdot 1 \cdot 1,01 = 1868,50 \text{ грн.}$$

Отримані результати зведемо до таблиці:

Таблиця 4.8 – Витрати на придбання спецустаткування по кожному виду

Найменування устаткування	Кількість, шт	Ціна за одиницю, грн	Вартість, грн
Програмний інтерфейс	1	1850,00	1868,50
Всього			1868,50

4.2.6 Програмне забезпечення для наукових робіт

До статті «Програмне забезпечення для наукових (експериментальних) робіт» належать витрати на розробку та придбання спеціальних програмних

засобів і програмного забезпечення, (програм, алгоритмів, баз даних) необхідних для проведення досліджень, також витрати на їх проектування, формування та встановлення.

Балансову вартість програмного забезпечення розраховуємо за формулою:

$$B_{npz} = \sum_{i=1}^k C_{inprz} \cdot C_{npz.i} \cdot K_i, \quad (4.10)$$

де C_{inprz} – ціна придбання одиниці програмного засобу даного виду, грн;

$C_{npz.i}$ – кількість одиниць програмного забезпечення відповідного найменування, які придбані для проведення досліджень, шт.;

K_i – коефіцієнт, що враховує інсталяцію, налагодження програмного засобу тощо, ($K_i = 1, 10 \dots 1, 12$);

k – кількість найменувань програмних засобів.

$$B_{npz} = 40,58 \cdot 1 \cdot 1,01 = 40,99 \text{ грн.}$$

Отримані результати зведемо до таблиці:

Таблиця 4.9 – Витрати на придбання програмних засобів по кожному виду

Найменування програмного засобу	Кількість, шт	Ціна за одиницю, грн	Вартість, грн
Програмне забезпечення середовища моделювання процесів	1	40,58	40,99
Абонплата доступу до мережі Internet	1	350,00	353,50
Всього			394,49

4.2.7 Амортизація обладнання, програмних засобів та приміщень

В спрощеному вигляді амортизаційні відрахування по кожному виду обладнання, приміщень та програмному забезпеченню тощо, розраховуємо з використанням прямолінійного методу амортизації за формулою:

$$A_{обл} = \frac{Ц_б}{T_е} \cdot \frac{t_{вик}}{12}, \quad (4.11)$$

де $Ц_б$ – балансова вартість обладнання, програмних засобів, приміщень тощо, які використовувались для проведення досліджень, грн;

$t_{вик}$ – термін використання обладнання, програмних засобів, приміщень під час досліджень, місяців;

$T_е$ – строк корисного використання обладнання, програмних засобів, приміщень тощо, років.

$$A_{обл} = (38999,00 \cdot 1) / (3 \cdot 12) = 1083,31 \text{ грн.}$$

Проведені розрахунки зведемо до таблиці.

Таблиця 4.10 – Амортизаційні відрахування по кожному виду обладнання

Найменування обладнання	Балансова вартість, грн	Строк корисного використання, років	Термін використання обладнання, місяців	Амортизаційні відрахування, грн
Персональний комп'ютер розробника ПЗ (Ноутбук Acer Nitro 5 AN515-58 (NH.QMZEU.006) Obsidian Black)	38999,00	3	1	1083,31
Допоміжне обладнання (блоки живлення тощо)	6799,00	5	1	113,32
Пристрої виводу графічної інформації	7770,00	4	1	161,88

Таблиця 4.10 (продовження)

Оргтехніка	7320,00	5	1	122,00
Приміщення лабораторії дослідження	410000,00	25	1	1366,67
Робоче місце дослідника	7320,00	4	1	152,50
Пристрої передачі цифрової інформації (Маршрутизатор інтернет WiFi6 TP-Link Archer AX12)	6500,00	5	1	108,33
ОС Windows 10	6700,00	3	1	186,11
Прикладний пакет Microsoft Office 2019 Professional Plus	6520,00	3	1	181,11
Всього				3475,22

4.2.8 Паливо та енергія для науково-виробничих цілей

Витрати на силову електроенергію (B_e) розраховуємо за формулою:

$$B_e = \sum_{i=1}^n \frac{W_{yi} \cdot t_i \cdot C_e \cdot K_{eni}}{\eta_i}, \quad (4.12)$$

де W_{yi} – встановлена потужність обладнання на визначеному етапі розробки, кВт;

t_i – тривалість роботи обладнання на етапі дослідження, год;

C_e – вартість 1 кВт-години електроенергії, грн; (вартість електроенергії визначається за даними енергопостачальної компанії), прийmemo $C_e = 10,98$ грн;

K_{eni} – коефіцієнт, що враховує використання потужності, $K_{eni} < 1$;

η_i – коефіцієнт корисної дії обладнання, $\eta_i < 1$.

$$B_e = 0,25 \cdot 90,0 \cdot 10,98 \cdot 0,95 / 0,97 = 247,05 \text{ грн.}$$

Проведені розрахунки зведемо до таблиці.

Таблиця 4.11 – Витрати на електроенергію

Найменування обладнання	Встановлена потужність, кВт	Тривалість роботи, год	Сума, грн
Персональний комп'ютер розробника ПЗ (Ноутбук Acer Nitro 5 AN515-58 (NH.QMZEU.006) Obsidian Black)	0,25	90,0	247,05
Допоміжне обладнання (блоки живлення тощо)	0,01	80,0	8,78
Пристрої виводу графічної інформації	0,10	2,2	2,42
Оргтехніка	0,32	1,5	5,27
Робоче місце дослідника	0,02	90,0	19,76
Пристрої передачі цифрової інформації (Маршрутизатор інтернет WiFi6 TP-Link Archer AX12)	0,02	90,0	19,76
Всього			303,05

4.2.9 Службові відрядження

До статті «Службові відрядження» дослідної роботи на тему «Розробка моделі автоматизованого управління самохідним візком» належать витрати на відрядження штатних працівників, аспірантів, зайнятих розробленням досліджень, відрядження, пов'язані з проведенням випробувань машин та приладів, а також витрати на відрядження на наукові з'їзди, конференції, наради, пов'язані з виконанням конкретних досліджень.

Витрати за статтею «Службові відрядження» відсутні.

4.2.10 Витрати на роботи, які виконують сторонні підприємства, установи і організації

Витрати за статтею «Витрати на роботи, які виконують сторонні підприємства, установи і організації» відсутні.

4.2.11 Інші витрати

До статті «Інші витрати» належать витрати, які не знайшли відображення у зазначених статтях витрат і можуть бути віднесені безпосередньо на собівартість досліджень за прямими ознаками.

Витрати за статтею «Інші витрати» розраховуємо як 50...100% від суми основної заробітної плати дослідників та робітників за формулою:

$$I_e = (Z_o + Z_p) \cdot \frac{H_{ie}}{100\%}, \quad (4.15)$$

де H_{ie} – норма нарахування за статтею «Інші витрати», прийmemo $H_{ie} = 50\%$.

$$I_e = (25734,09 + 2285,34) \cdot 50 / 100\% = 14009,72 \text{ грн.}$$

4.2.12 Накладні (загальновиробничі) витрати

До статті «Накладні (загальновиробничі) витрати» належать: витрати, пов'язані з управлінням організацією; витрати на винахідництво та раціоналізацію; витрати на підготовку (перепідготовку) та навчання кадрів;

витрати, пов'язані з набором робочої сили; витрати на оплату послуг банків; витрати, пов'язані з освоєнням виробництва продукції; витрати на науково-технічну інформацію та рекламу та ін.

Витрати за статтею «Накладні (загальновиробничі) витрати» розраховуємо як 100...150% від суми основної заробітної плати дослідників та робітників за формулою:

$$B_{нзв} = (З_o + З_p) \cdot \frac{H_{нзв}}{100\%}, \quad (4.16)$$

де $H_{нзв}$ – норма нарахування за статтею «Накладні (загальновиробничі) витрати», прийmemo $H_{нзв} = 100\%$.

$$B_{нзв} = (25734,09 + 2285,34) \cdot 100 / 100\% = 28019,43 \text{ грн.}$$

Витрати на проведення науково-дослідної роботи на тему «Розробка моделі автоматизованого управління самохідним візком» розраховуємо як суму всіх попередніх статей витрат за формулою:

$$B_{заг} = З_o + З_p + З_{доп} + З_n + M + K_{в} + B_{спец} + B_{прз} + A_{обл} + B_e + B_{св} + B_{сп} + I_{в} + B_{нзв}. \quad (4.17)$$

$$B_{заг} = 25734,09 + 2285,34 + 2801,94 + 6780,70 + 2804,77 + 4565,20 + 1868,50 + 394,49 + 3475,22 + 303,05 + 0,00 + 0,00 + 14009,72 + 28019,43 = 93042,45 \text{ грн.}$$

Загальні витрати $ЗВ$ на завершення науково-дослідної (науково-технічної) роботи та оформлення її результатів розраховується за формулою:

$$ЗВ = \frac{B_{заг}}{\eta}, \quad (4.18)$$

де η - коефіцієнт, який характеризує етап (стадію) виконання науково-дослідної роботи, прийmemo $\eta = 0,95$.

$$ЗВ = 93042,45 / 0,95 = 97939,42 \text{ грн.}$$

4.3 Оцінювання важливості та наукової значимості науково-дослідної роботи

Оцінювання та доведення ефективності виконання науково-дослідної роботи фундаментального чи пошукового характеру є достатньо складним

процесом і часто базується на експертних оцінках, тому має вірогідний характер.

Для обґрунтування доцільності виконання науково-дослідної роботи на тему «Розробка моделі автоматизованого управління самохідним візком» використовується спеціальний комплексний показник, що враховує важливість, результативність роботи, можливість впровадження її результатів у виробництво, величину витрат на роботу.

Комплексний показник K_p рівня науково-дослідної роботи може бути розрахований за формулою:

$$K_p = \frac{I^n \cdot T_c \cdot R}{B \cdot t}, \quad (4.19)$$

де I – коефіцієнт важливості роботи. Прийmemo $I = 3$;

n – коефіцієнт використання результатів роботи; $n = 0$, коли результати роботи не будуть використовуватись; $n = 1$, коли результати роботи будуть використовуватись частково; $n = 2$, коли результати роботи будуть використовуватись в дослідно-конструкторських розробках; $n = 3$, коли результати можуть використовуватись навіть без проведення дослідно-конструкторських розробок. Прийmemo $n = 3$;

T_c – коефіцієнт складності роботи. Прийmemo $T_c = 1$;

R – коефіцієнт результативності роботи; якщо результати роботи плануються вище відомих, то $R = 4$; якщо результати роботи відповідають відомому рівню, то $R = 3$; якщо нижче відомих результатів, то $R = 1$. Прийmemo $R = 3$;

B – вартість науково-дослідної роботи, тис. грн. Прийmemo $B = 97939,42$ грн;

t – час проведення дослідження. Прийmemo $t = 0,08$ років, (1 міс.).

Визначення показників I , n , T_c , R , B , t здійснюється експертним шляхом або на основі нормативів [44].

$$K_p = \frac{I^n \cdot T_c \cdot R}{B \cdot t} = 3^3 \cdot 1 \cdot 3 / 97,9 \cdot 0,08 = 9,92.$$

Якщо $K_p > 1$, то науково-дослідну роботу на тему «Розробка моделі автоматизованого управління самохідним візком» можна вважати ефективною з високим науковим, технічним і економічним рівнем.

4.4 Висновок до розділу

Витрати на проведення науково-дослідної роботи на тему «Розробка моделі автоматизованого управління самохідним візком» складають 97939,42 грн. Відповідно до проведеного аналізу та розрахунків рівень наукового ефекту проведеної науково-дослідної роботи на тему «Розробка моделі автоматизованого управління самохідним візком» є середній, а дослідження актуальними, рівень доцільності виконання науково-дослідної роботи $K_p > 1$, що свідчить про потенційну ефективність з високим науковим, технічним і економічним рівнем.

ВИСНОВКИ

Магістерська кваліфікаційна робота присвячена дослідженню і розробці моделей автоматизованого управління перевернутим маятником.

В першому розділі було проведено огляд принципів побудови сучасних у вигляді транспортних платформ з перевернутим маятником і методів управління ними, проведено огляд і аналіз робіт, в яких вирішуються задачі моделювання і стабілізації. Визначено суть проблеми автоматизованого енергоефективного управління самохідним двохколісним візком Також було наведено схематичний опис об'єкта управління і сформульовано завдання розробки моделі енергоефективного управління даним об'єктом.

В другому розділі було проведено класифікацію моделей об'єктів і процесів різної природи, обрано тип математичного моделювання, розроблені математичні моделі для енергоефективного управління рухомою платформою. На основі отриманого співвідношення зроблено висновок, що оптимальне з точки зору витрат енергії управління шляхом приведення перевернутого маятника у верхнє положення рівноваги за будь-яких початкових умов можна реалізувати у вигляді двох імпульсів, перший з яких подається на початку руху, а другий – в кінці. Проведено альтернативне моделювання управління візком відомими нечіткими методами

Тестування розробленої програмної моделі в середовищі MATLAB/Simulink з використанням двухімпульсної схеми управління показало, що система “візок-маятник” після деякого зрівноваження стає стабільною і перебуває в стані рівноваги, що свідчить про ефективність даної моделі.

В економічній частині роботи проведено аналіз та розрахунки рівня наукового ефекту проведеної науково-дослідної роботи, які засвідчили її потенційну ефективність з високим науковим, технічним і економічним рівнем.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Lee, J.C. Dynamic Modeling and Control of Segway-like Robots. *Journal of Intelligent Transportation Systems*, 2020, vol. 23, no. 4, pp. 341–350.
2. Ковальчук В.О. Алгоритми управління стабілізацією роботів типу Segway. *Інформаційні системи і технології*, 2021, т. 8, № 2, с. 52–58.
3. Huang, P., et al. Development of two-wheeled mobile manipulators. *IEEE Transactions on Automation Science and Engineering*, 2017, vol. 14, no. 3, pp. 525–533.
4. Савченко О.П. Порівняльний аналіз систем керування стабілізацією двоколісних платформ. *Техніка і прогрес*, 2023, т. 19, № 1, с. 105–112.
5. Kim, Y., Kwon, J. A robust control method of two-wheeled self-balancing robot. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 2018, vol. 65, no. 1, pp. 98–107..
6. Hossain, M.Z., Ahmed, A. Modeling and nonlinear control of two-wheeled self-balancing robots. *IEEE Access*, 2019, vol. 7, pp. 154–162.
7. Altan, C., Hacıoglu, R. Adaptive control of two-wheeled self-balancing robot using fuzzy logic. *International Journal of Advanced Robotic Systems*, 2017, vol. 12, pp. 73–82.
8. Wang, J., et al. A comprehensive optimal fuzzy control for a two-wheeled balancing robot. *IEEE/ASME Transactions on Mechatronics*, 2020, vol. 23, no. 4, pp. 90–99.
9. Іванов І.В., Мельник О.М. Алгоритми стабілізації двоколісних роботизованих платформ. *Технічні науки*, 2018, т. 10, № 3, с. 25–30.
10. Кравець Д.Г. Методи управління нестійкими платформами на основі ПД-регуляторів. *Технології майбутнього*, 2019, т. 12, № 2, с. 45–52.
11. Чумак М.О. Розробка та моделювання двоколісної платформи для стабілізації. *Інженерна механіка*, 2020, т. 9, № 6, с. 60–67.

12. Козак А.В. Інтелектуальні системи стабілізації руху для мобільних платформ. Сучасні технології в робототехніці, 2022, т. 8, № 1, с. 35–42.
13. Jones, D.K. Modeling and Control of Self-Balancing Robots Based on nBot and JOE Platforms. IEEE Robotics and Automation Letters, 2019, vol. 4, no. 3, pp. 2951–2958.
14. nBot Balancing Robot [Електронний ресурс] – Режим доступу: <http://www.geology.smu.edu/~dpa-www/robo/nbot/>
15. Сидоров М.Ю., Шевченко О.В. Принципи побудови систем стабілізації двоколісних платформ. Автоматика і робототехніка, 2016, т. 10, № 4, с. 23–31.
16. Grasser, F., D'Arrigo, A., Colombi, S., Rufer, A. JOE: A Mobile, Inverted Pendulum. Swiss Federal Institute of Technology Lausanne, EPFL.
17. Петренко І.О. Стабілізація двоколісних мобільних платформ типу JOE. Системи автоматизованого керування, 2017, т. 9, № 1, с. 15–21.
18. Zhou, Y. Design of Fuzzy PD Control for Two-Wheeled Self-Balancing Robots. IEEE Transactions on Mechatronics, 2021, vol. 26, no. 2, pp. 473–479.
19. Lee, M. Fuzzy-based sliding mode control of self-balancing robots under external disturbances. IEEE Access, 2020, vol. 8, pp. 9323–9331.
20. Xie, H., et al. LQR and state-feedback controllers for self-balancing robots. IEEE International Conference on Robotics and Automation, 2018, pp. 6213–6218.
21. Smith, H. Advanced Control Techniques for Ballbot Robots. International Journal of Robotics Research, 2018, vol. 12, no. 5, pp. 1021–1035.
22. Gupta, A. Comparative Study of Control Strategies for Ballbot and Two-Wheeled Robots. Journal of Applied Robotics, 2023, vol. 13, no. 3, pp. 77–85.
23. Кравець Д.Г., Методи управління нестійкими платформами на основі ПД-регуляторів. Технології майбутнього, 2019, т. 12, № 2, с. 45–52.

24. Johnson, M.P. Nonlinear Control of Self-Balancing Vehicles like Segway and EN-V. *IEEE Transactions on Control Systems Technology*, 2019, vol. 27, no. 1, pp. 55–63.
25. Segway Advanced Development. The EN-V project, [Електронний ресурс] – Режим доступу: <http://www.segway.com/en-v/index.php/>
26. Лук'яненко М.І. Інтелектуальні платформи для перевезення типу EN-V: принципи та моделі управління. *Технічні системи*, 2022, т. 7, № 4, с. 65–70.
27. Чумак М.О. Розробка та моделювання двоколісної платформи для стабілізації. *Інженерна механіка*, 2020, т. 9, №. 6, с. 60-67.
28. Козак А.В. Інтелектуальні системи стабілізації руху для мобільних платформ. *Сучасні технології в робототехніці*, 2022, т. 8, № 1, с. 35–42.
29. Дорошенко І.П. Гіростабілізація руху двоколісних роботів з використанням MEMS сенсорів. *Технічні вісті*, 2016, т. 11, № 5, с. 23-29.
30. Проценко О.С. Аналіз алгоритмів стабілізації двоколісних роботів. *Системи керування*, 2021, т. 7, №. 2, с. 75-83.
31. Huang, S.K. Modeling of a two-wheeled robot for optimal state feedback control, *IEEE Int. Conf. Autom.*, 2021, pp. 90-96.
32. Barbera, G., Santamaria, A. Design and control of wheel-based mobile robots for autonomous navigation. *Robotica*, 2012, vol. 30, no. 8, pp. 1245–1263, doi: 10.1017/S0263574711000497.
33. IEEE Robotics and Automation Society. Mobile Robot Platform: A Review of Research and Development. *IEEE Robotics and Automation Society*, 2023. [Електронний ресурс]. — Режим доступу: <https://www.ieee-ras.org>.
34. Lee, D.S. Reinforcement learning-based control of two-wheeled robots, *IEEE Access*, 2019, vol. 7, pp. 31254-31266.
35. Martinez, E., et al. Control of self-balancing robot under parametric uncertainties. *IEEE Robotics and Automation Magazine*, 2021, vol. 26, no. 1, pp. 77–84.

36. Дубовой В.М., Кветний Р.Н., Михальов О.І., Усов А.В. Моделювання та оптимізація систем: підручник. Вінниця: ПП ТД «Едельвейс», 2017. — 804 с.
37. Пугачов С.О. Математичне моделювання систем. Харків: ХНУРЕ, 2018. — 540 с.
38. Потапов І.М. Теорія моделювання: Основи та застосування. Київ: Наукова думка, 2017.
39. Tan, T., Lee, K.H. Dynamic balance control of two-wheeled robots using neural networks. IEEE Transactions on Neural Networks and Learning Systems, 2020, vol. 31, no. 12, pp. 2341–2349.
40. Liu, Y., Chen, X. Adaptive backstepping control of two-wheeled robots. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2020, vol. 67, no. 5, pp. 1234–1241.
41. Law, A.M., Kelton, W.D. Simulation Modeling and Analysis, 4th ed. New York: McGraw-Hill, 2007.
42. Штовба С.Д. Проектування нечітких систем засобами Matlab. Київ: Телеком, 2007. — 196 с.
43. Кожухівський А.Д., Кожухівська О.А. Імітаційне моделювання систем та процесів в середовищі MATLAB. Черкаський державний технологічний університет, 2017. [Електронний ресурс]. – Доступно в електронно-бібліотечній системі ЧДТУ.
44. Козловський В.О., Лесько О.Й., Кавецький В.В. Методичні вказівки до виконання економічної частини магістерських кваліфікаційних робіт. Вінниця : ВНТУ, 2021. – 42 с.

ДОДАТКИ

Експерт _____
(за потреби) (підпис) (прізвище, ініціали, посада)

Додаток Б
(обов'язковий)

ВНТУ

ЗАТВЕРДЖЕНО

Зав. кафедри КСУ ВНТУ,

д.т.н., проф.

 Вячеслав КОВТУН

“ 14 ” 10 2024 р.

ТЕХНІЧНЕ ЗАВДАННЯ

на магістерську кваліфікаційну роботу

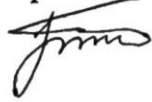
РОЗРОБКА МОДЕЛІ АВТОМАТИЗОВАНОГО УПРАВЛІННЯ
САМОХІДНИМ ВІЗКОМ

08-33.МКР.005.00.000 ТЗ

Студент групи 2 АКІТР-23 м

Підпис  Ярослав ЛУЖИНЕЦЬКИЙ
Ім'я ПРІЗВИЩЕ

Керівник к.т.н., доцент

Підпис  Микола БИКОВ
Ім'я ПРІЗВИЩЕ

Вінниця 2024

1. Назва та галузь застосування

1.1. Назва – Розробка моделі автоматизованого управління самохідним візком.

1.2. Галузь застосування – Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології управління.

2. Підстава для проведення розробки.

Тема магістерської кваліфікаційної роботи затверджена наказом по ВНТУ від №310 від “17” вересня 2024 року.

3. Мета та призначення розробки.

Метою роботи є підвищення ефективності руху транспортних засобів за рахунок розробки удосконаленої моделі автоматизованого управління перевернутим маятником, що враховує можливість використання потенціальної енергії маятника для зменшення загальних енергозатрат на рух транспортного засобу.

4. Джерела розробки.

Магістерська кваліфікаційна робота виконується вперше. В ході проведення розробки повинні використовуватись такі документи:

1. Моделирование та оптимізація систем: підручник / [Дубовой В. М. , Кветний Р. Н. , Михальов О. І. , Усов А. В.] – Вінниця: ПП ТД «Едельвейс», 2017 – 804 с.

2. Мережа Internet: Дистанційний електронний курс: Simulation and modeling of natural processes. Режим доступу https://www.coursera.org/lecture/modeling_simulation-natural-processes/modeling-and-simulation-F7vas.

3. Marholt, J.: Modelling, identification and simulation of the inverted pendulum PS600 (in Czech). Diploma thesis. Zlín: Tomas Bata Univ. in Zlín, 2018, 75 pp.

4. nBot Balancing Robot [Електронний ресурс] – Режим доступу: <http://www.geology.smu.edu/~dpa-www/robo/nbot/>

5. Вимоги до розробки.

5.1. Перелік головних функцій:

- Моделювання процесу управління самохідним візком;
- Імітаційне моделювання в середовищі Матлаб з метою дослідження поведінки системи для отримання оптимальних параметрів управління;
- Верифікація результатів експерименту.

5.2. Основні технічні вимоги до розробки.

5.2.1. Вимоги до програмної платформи:

- WINDOWS 7/10;
- MATLAB 7.0;
- Visual Studio 2019.

5.2.2. Умови експлуатації системи:

- робота на стандартних ПК в приміщеннях зі стандартними умовами;
- можливість цілодобового функціонування системи;
- текст програмного забезпечення системи є цілком закритим.

6. Стадії та етапи розробки.

6.1 Пояснювальна записка:

- аналіз предметної області і обґрунтування обраного методу моделювання - 12.09.2024 р.
- розробка моделі руху самохідного візка з перевернутим маятником - 22.09.2024 р.
- розробка моделі нечіткого регулятора - 03.10.2024 р.
- розробка програмної моделі руху візка - 12.10.2024 р.
- тестування розроблених моделей - 22.10.2024 р.
- підготовка економічної частини - 01.11.2024 р.
- апробація результатів дослідження - 06.11.2024 р.
- публікації результатів дослідження - 12.11.2024 р.
- оформлення текстової частини пояснювальної записки - 18.11.2024 р.

6.2 Графічні матеріали:

- структурна схема моделі системи - 22.11.2024 р.
- схема алгоритму управління системою - 24.11.2024 р.
- результати машинного експерименту - 26.11.2024 р.
- плакати демонстраційні - 28.11.2024 р.

7. Порядок контролю і приймання.

- 7.1. Хід виконання роботи контролюється керівником роботи. Рубіжний контроль провести до «28» листопада 2024 р.
- 7.2. Атестація проекту здійснюється на попередньому захисті. Попередній захист магістерської кваліфікаційної роботи провести до «01» грудня 2024 р.
- 7.3. Підсумкове рішення щодо оцінки якості виконання роботи приймається на засіданні ДЕК. Захист бакалаврської дипломної роботи провести до «10» грудня 2024 р.

Додаток В
(довідковий)
Лістинг програми

```

clc;
clear;
M=0.5;
m=0.5;
b=0.1;
l=.3;
I=.006;
g=9.8;
d=I*(M+m)+M*m*l^2;

A=[0 1 0 0;m*g*l*(M+m)/d 0 0 m*l*b/d;0 0 0 1;-g*m^2*l^2/d 0 0 -
b*(I+m*l^2)/d];
B=[0;-m*l/d;0;(I+m*l^2)/d];
C=[0 0 1 0;1 0 0 0];
D=[0;0];
system=ss(A,B,C,D)

inputs = {'u'};
outputs = {'x'; 'tetha'};
G=tf(system)
set(G,'InputName',inputs)
set(G,'OutputName',outputs)

inputs = {'u'};
outputs = {'x'; 'theta'};
set(G,'InputName',inputs)
set(G,'OutputName',outputs)

```

```

figure(1);clf;subplot(221)
t=0:0.01:1;
impulse(G,t);
grid;
title('Open-Loop Impulse Response of the system')
%Open-Loop step response
subplot(222)
t = 0:0.05:10;
u = ones(size(t));
[y,t] = lsim(G,u,t);
plot(t,y)
title('Open-Loop Step Response of the system')
axis([0 2 -50 50])
legend('x','theta')
grid;
% Poles of the system and pole-zero mapping
disp('=====')
disp('Poles of the system are:')
disp('=====')
Poles=eig(A)
subplot(2,2,3:4)
pzmap(system);
title('Pole-zero mapping of inverted pendulum')
% Checking controllabilitydisp('=====')
disp('checking controllability:')
disp('=====')
CO=ctrb(system);
Rank_CO=rank(CO)
unco=length(A)-rank(CO)
if(unco==0)

```

```

disp('system is controllable!')
else
    disp(['number of uncontrollable states are:',unco])
end;
% Checking Observabilitydisp('=====')
disp('Checking observability:')
disp('=====')
OB=obsv(system);
Rank_OB=rank(OB)
unobsv=length(A)-rank(OB)
if(unobsv==0)
    disp('system is observable!')
else
    disp(['number of unobservable states are:',unobsv])
end;

```

Додаток Г

(обов'язковий)

ІЛЮСТРАТИВНА ЧАСТИНА**РОЗРОБКА МОДЕЛІ АВТОМАТИЗОВАНОГО УПРАВЛІННЯ
САМОХІДНИМ ВІЗКОМ**Студент групи 2АКІТ-23м

Підпис

Ярослав ЛУЖИНЕЦЬКИЙ

Ім'я ПРІЗВИЩЕ

Керівник к.т.н., доцент, проф. кафедри КСУ

Підпис

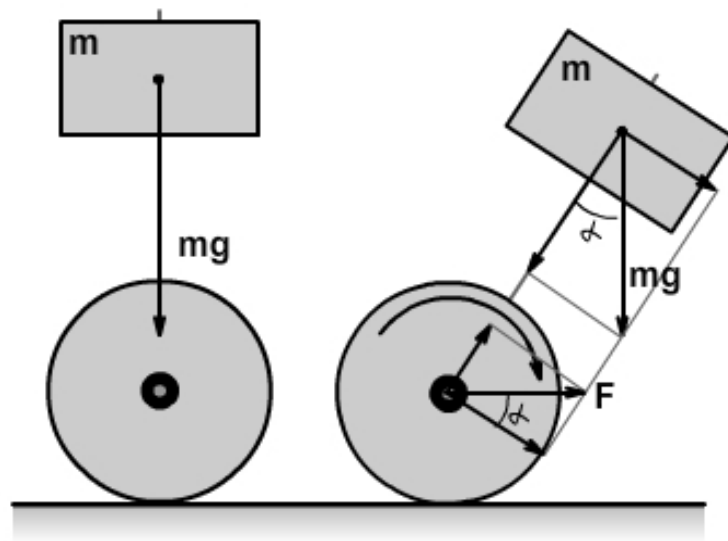
Микола БИКОВ

Ім'я ПРІЗВИЩЕ

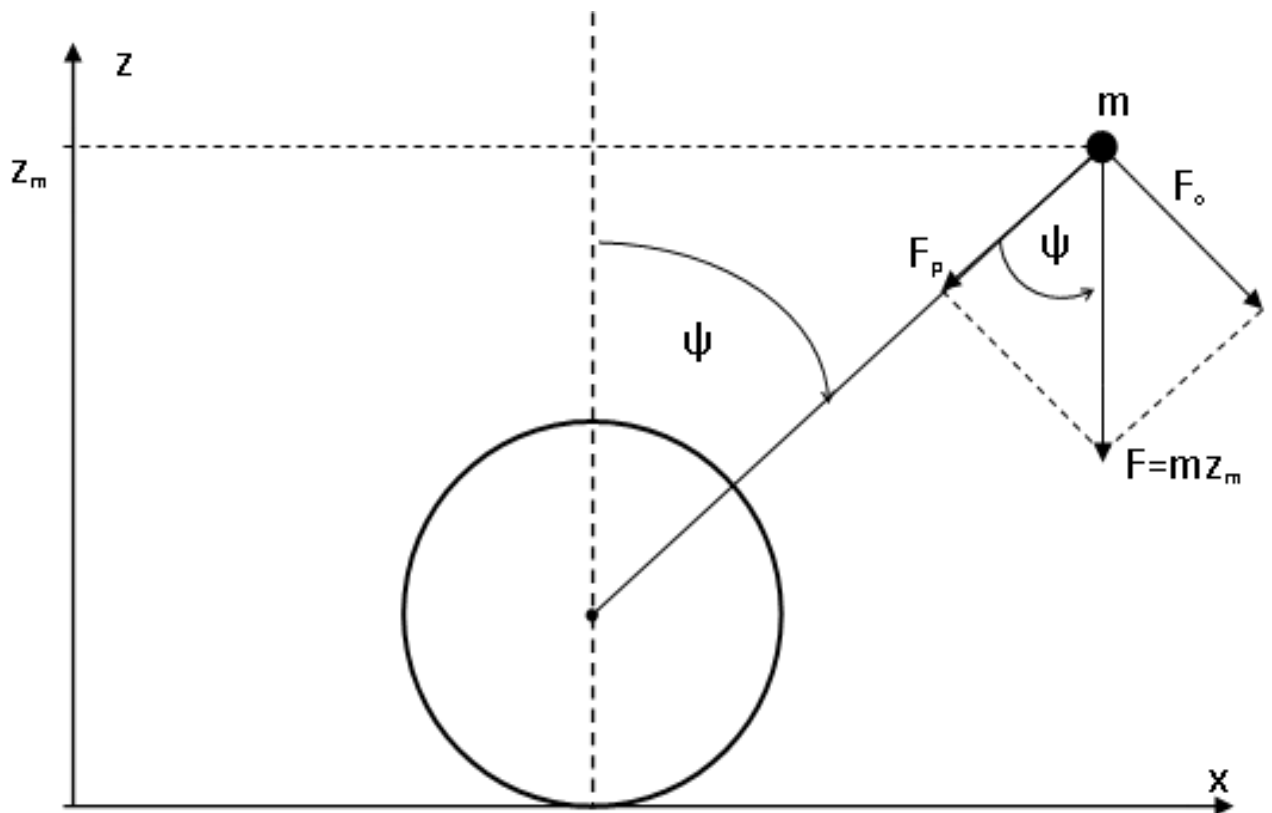
**ПРИКЛАД САМОХІДНОГО ВІЗКА З ПЕРЕВЕРНУТИМ
МАЯТНИКОМ НА ЙОГО ПЛАТФОРМІ**



Segway

ФІЗИЧНА МОДЕЛЬ ВІЗКА З ПЕРЕВЕРНУТИ МАЯТНИКОМ

СТАТИЧНА МОДЕЛЬ ПЕРЕВЕРНУТОГО МАЯТНИКА



m – маса маятника;

z_m - висота маятника над поверхнею Землі;

$F = mz_m$ - сила земного тяжіння;

F_p - сила штовхання;

F_o – сила обертання;

ψ_d - кут відхилення маятника;

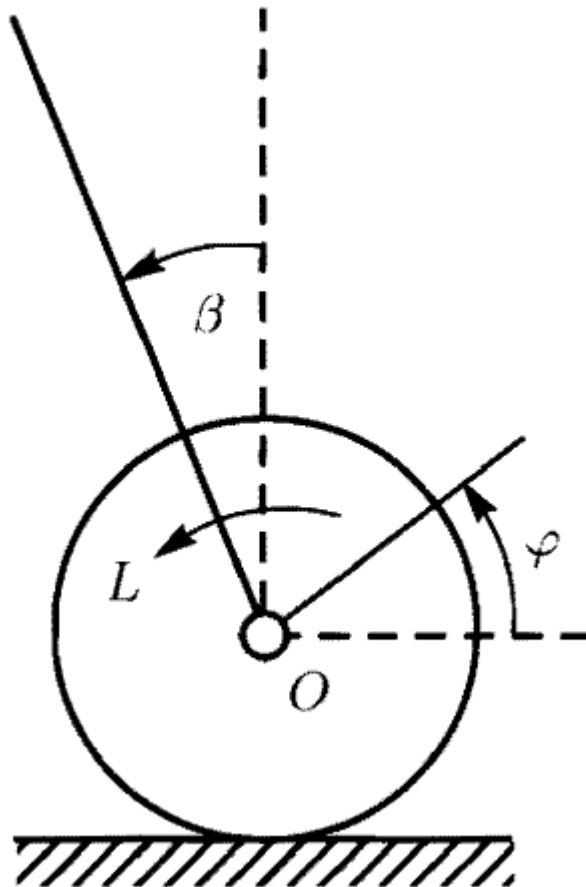
ψ_d - допустима межа кута відхилення від вертикалі.

$W = mgz_m$ – потенціальна енергія маятника, використовується для зменшення енергозатрат на рух самохідного візка.

За умови $F_o / F_p = 0,5 \rightarrow \operatorname{tg} \psi_d = 0.5$

Звідки $\psi_d = \operatorname{arctg}(0.5) = 26^\circ$

**МОДЕЛЬ САМОХІДНОГО ВІЗКА З ПЕРЕВЕРНУТИМ МАЯТНИКОМ
В ДИНАМІЦІ**



МАТЕМАТИЧНА МОДЕЛЬ РУХУ САМОХІДНОГО ВІЗКА З ПЕРЕВЕРНУТИМ МАЯТНИКОМ

Координати колеса і маятника

$$\begin{cases} x_w = R \cdot \vartheta; \\ x_m = x_w + L \cdot \sin \psi = R \cdot \vartheta + L \cdot \sin \psi; \\ z_m = R + L \cdot \cos \psi. \end{cases}$$

Рух системи в узагальнених координатах:

$$\begin{cases} \frac{d}{dt} \cdot \frac{\partial T}{\partial \dot{\vartheta}} - \frac{\partial T}{\partial \vartheta} = \frac{\delta A_{\vartheta}}{\delta \vartheta}; \\ \frac{d}{dt} \cdot \frac{\partial T}{\partial \dot{\psi}} - \frac{\partial T}{\partial \psi} = \frac{\delta A_{\psi}}{\delta \psi}. \end{cases}$$

Елементарні роботи зовнішніх сил:

$$\begin{cases} \delta A_{\vartheta} = M_w \cdot \delta \vartheta; \\ \delta A_{\psi} = -mg \cdot \delta z_m = mgL \cdot \delta \psi \cdot \sin \psi. \end{cases}$$

Рівняння руху системи

$$\begin{cases} \ddot{\psi} = \frac{(J_w + (m_w + m) \cdot R^2) \cdot g \cdot \sin \psi - (M_w + mLR \cdot \dot{\psi}^2 \cdot \sin \psi) \cdot R \cdot \cos \psi}{L \cdot (J_w + m_w \cdot R^2 + mR^2 \cdot \sin^2 \psi)}; \\ \ddot{\vartheta} = \frac{M_w + mLR \cdot \dot{\psi}^2 \cdot \sin \psi - mRg \cdot \sin \psi \cdot \cos \psi}{J_w + m_w \cdot R^2 + mR^2 \cdot \sin^2 \psi}. \end{cases}$$

Компактна форма рівнянь руху досліджуваної системи

$$\begin{cases} \ddot{\psi} = f_1(\psi, \dot{\psi}) + f_2(\psi) \cdot M_w; \\ \ddot{\vartheta} = f_3(\psi, \dot{\psi}) + f_4(\psi) \cdot M_w. \end{cases}$$

ДИНАМІЧНА МОДЕЛЬ РУХУ САМОХІДНОГО ВІЗКА З ПЕРЕВЕРНУТИМ МАЯТНИКОМ (ПРОДОВЖЕННЯ)

Бажана траєкторія в відповідності до закону:

$$\dot{\psi} + K \cdot (\psi - \psi_{ref}) = 0.$$

Близькість системи до траєкторії

$$S(t) = \psi(t) + K \cdot (\psi(t) - \psi_{ref})$$

Необхідний закон зміни моменту $M_w = M_w(\psi, \dot{\psi})$

$$M_w(\psi, \dot{\psi}) = - \frac{\alpha \cdot S(\psi, \dot{\psi}) + K \cdot \dot{\psi} + f_1(\psi, \dot{\psi})}{f_2(\psi)}.$$

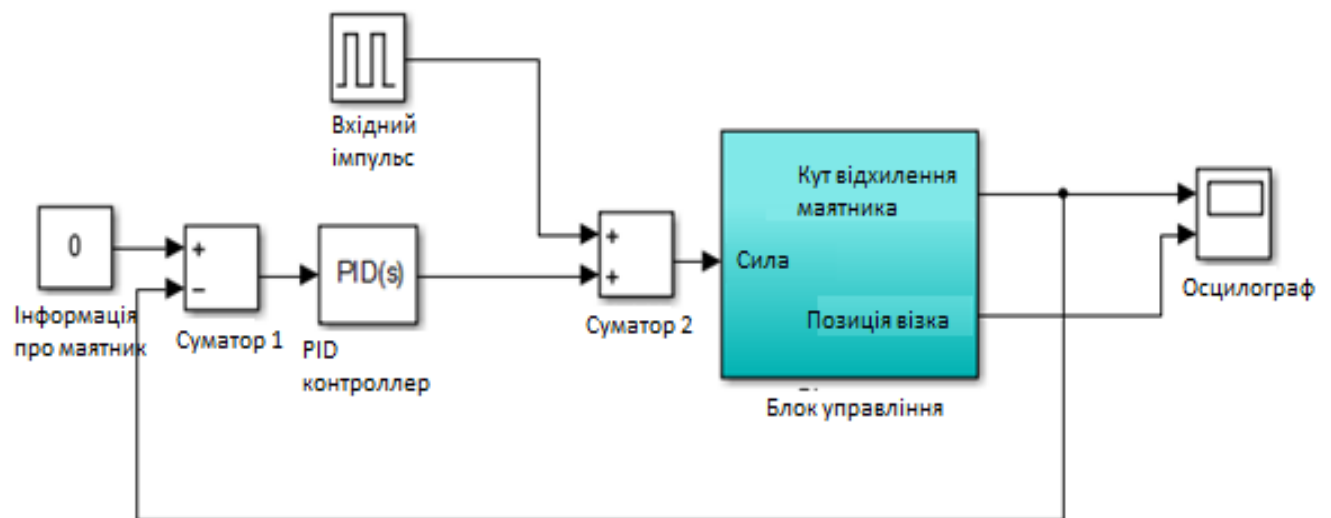
Лінійне диференціальне рівняння другого порядку:

$$\ddot{\psi} + (\alpha + K) \cdot \dot{\psi} + \alpha K \cdot \psi = \alpha K \cdot \psi_{ref}$$

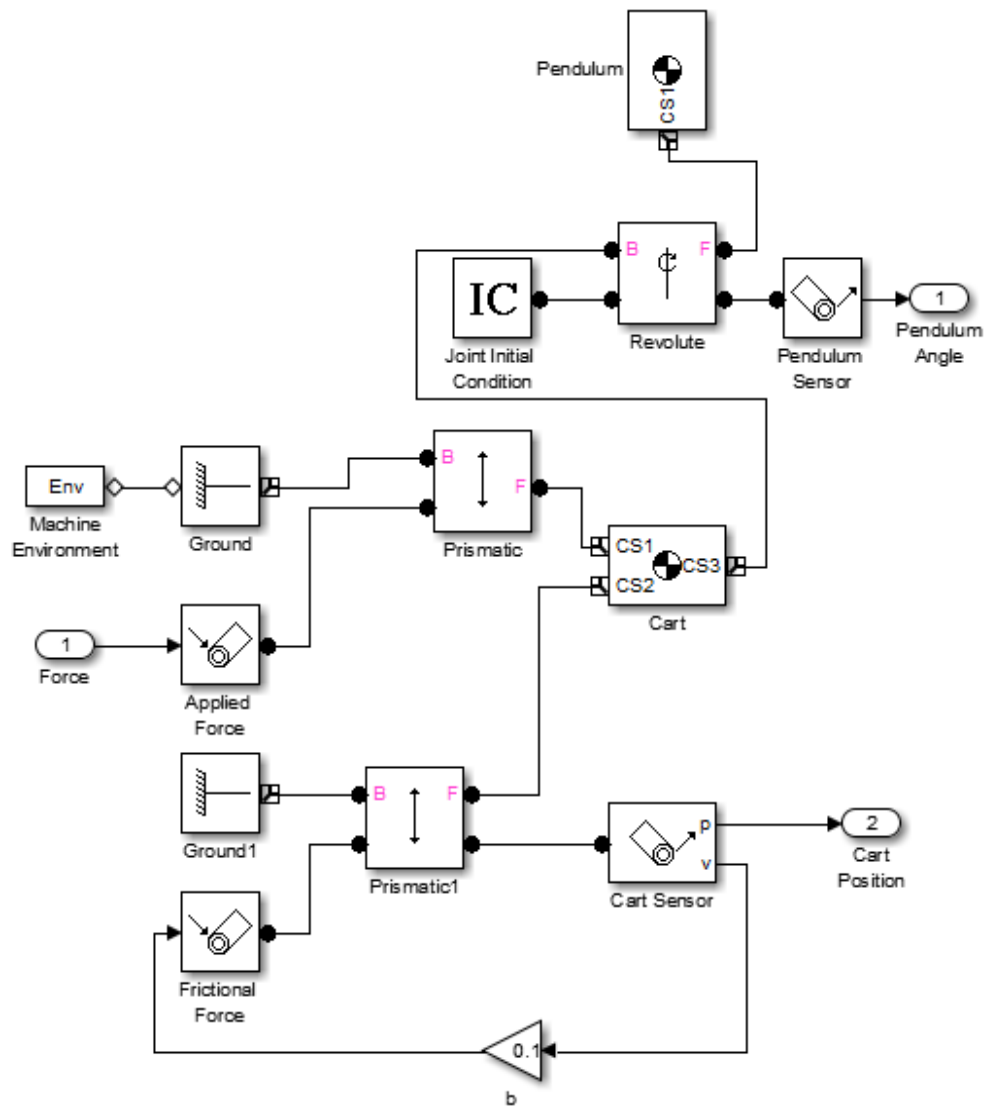
Момент для утримання маятника в положенні рівноваги $\psi = \psi_{ref}$

$$M_w = \frac{f_1(\psi_{ref}, 0)}{f_2(\psi_{ref})} = \frac{g}{R} (J_w + m_w \cdot R^2 + m \cdot R^2) \cdot \tan \psi_{ref}.$$

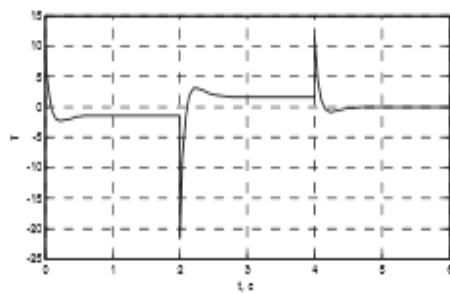
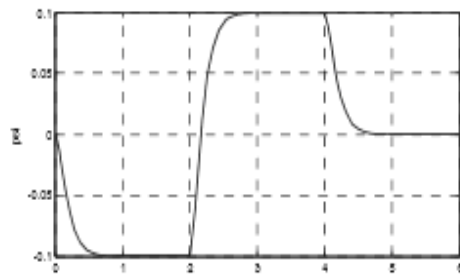
СТРУКТУРНА СХЕМА АВТОМАТИЗОВАНОГО УПРАВЛІННЯ САМОХІДНИМ ВІЗКОМ З ПЕРЕВЕРНУТИМ МАЯТНИКОМ



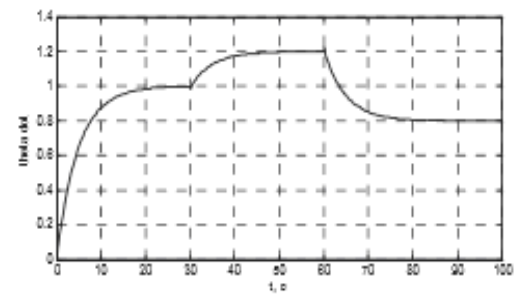
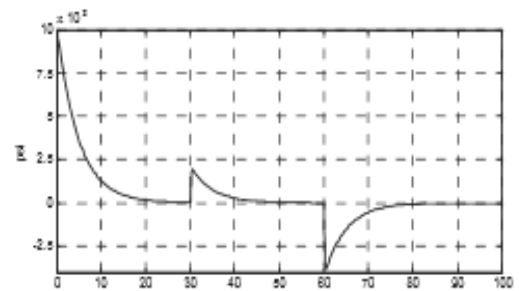
СТРУКТУРНА СХЕМА БЛОКУ УПРАВЛІННЯ ПЕРЕВЕРНУТИМ МАЯТНИКОМ



РЕЗУЛЬТАТИ МОДЕЛЮВАННЯ



Перехідні процеси при управлінні
тільки положенням маятника



Перехідні процеси при
одночасному управлінні
положенням маятника і
швидкістю руху платформи