

КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА

магістр

Освітній рівень

Модель керування робота-балансира

Назва теми

КвРАКІТР.2023184.01.18 ПЗ

Галузь знань 17 «Електроніка, автоматизація та електронні комунікації»

Шифр, назва

Спеціальність 174 «Автоматизація, комп'ютерно-інтегровані технології та  
робототехніка»

Шифр, назва

Освітня програма «Автоматизація, комп'ютерно-інтегровані технології та  
робототехніка»

Назва

Виконав:

студент ІІ курсу, група АКІТРм-23-1

Підпис

Дмитро НИЧИПОРЧУК

Ім'я, ПРІЗВИЩЕ

Керівник

Підпис, дата

Юрій ФОРКУН

Ім'я, ПРІЗВИЩЕ

Нормоконтролер

Підпис, дата

Людмила КОРЕЦЬКА

Ім'я, ПРІЗВИЩЕ

До захисту допускаю:  
зав. кафедри АКІТтаР

Підпис, дата

Валерій МАРТИНЮК

Ім'я, ПРІЗВИЩЕ

«20» грудня 2024 р.

# ХМЕЛЬНИЦЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ

Факультет інформаційних технологій

Кафедра автоматизації, комп'ютерно-інтегрованих технологій та робототехніки

Рівень вищої освіти другий (магістерський)

Галузь знань 17 – Електроніка, автоматизація та електронні комунікації

Спеціальність 174 – Автоматизація, комп'ютерно-інтегровані технології та робототехніка

Освітня програма Автоматизація, комп'ютерно-інтегровані технології та робототехніка

ЗАТВЕРДЖУЮ

Завідувач кафедри АКІТтаР

Валерій МАРТИНЮК

01 вересня 2024р.

## ЗАВДАННЯ НА КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ Ничипорчуку Дмитру Миколайовичу

Прізвище, ім'я, по батькові студента

1 Тема роботи Модель керування робота-балансира

Керівник роботи Форкун Юрій Вікторович, к.т.н., доцент

Прізвище, ім'я, по батькові, науковий ступінь, учене звання

Затверджено наказом ректора університету від 26.08.2024 р. №60

2 Строк подання студентом роботи на кафедру 02.12.2024р.

3 Вихідні дані до роботи Аналіз відомих конструкцій роботів-балансирів





4 Зміст пояснювальної записки (перелік питань, які потрібно розробити)

Вступ. Аналіз процесів балансування робота-балансира. Засади процесу балансування. Математична модель робота-балансира. Синтез системи регулювання. Висновки.

5 Перелік графічного матеріалу (із зазначенням обов'язкових креслень)

презентаційні матеріали (слайди)

6 Консультанти розділів кваліфікаційної роботи

Розділ	Прізвище, ініціали та посада консультанта	Підпис, дата	
		завдання видав	завдання прийняв
Антиплагіат	Федула М.В., доцент кафедри АКІТтаР		
Нормоконтроль	Корецька Л.О., доцент кафедри АКІТтаР		

7 Дата видачі завдання 01 вересня 2024р.

## КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

Назва розділу кваліфікаційної роботи	Строк виконання	Примітка
1 Вступ	10.09.2024р.	Виконано
2 Огляд літературних джерел та патентних даних	25.09.2024р.	Виконано
3 Огляд існуючих моделей	15.10.2024р.	Виконано
4 Розробка математичної моделі	30.10.2024р.	Виконано
5 Розробка програмного забезпечення	10.11.2024р.	Виконано
6 Висновки	15.11.2024р.	Виконано
7 Оформлення пояснювальної записки до кваліфікаційної роботи	20.11.2024р.	Виконано
8 Оформлення презентаційних матеріалів	1.12.2024р.	Виконано

Студент



Підпис

Дмитро НИЧИПОРЧУК

Ім'я, прізвище

Керівник роботи



Підпис

Юрій ФОРКУН

Ім'я, прізвище

## АНОТАЦІЯ

Тема кваліфікаційної роботи: «Математична модель керування робота-балансира».

Автор роботи: Ничипорчук Дмитро Миколайович.

Керівник роботи: Форкун Юрій Вікторович, к.т.н., доцент

Пояснювальна записка: 86 с., 49 рис., 6 табл., 1 дод., 70джерел.

Графічна частина: 13 презентаційних слайдів.

РОБОТ-БАЛАНСИР, ОБ'ЄКТ КЕРУВАННЯ, ПЕРЕХІДНІ ПРОЦЕСИ, РЕГУЛЯТОР, ПІД-РЕГУЛЯТОР, АДАПТИВНИЙ РЕГУЛЯТОР, MATLAB, SIMULINK.

**Мета роботи:** розробити математичну модель керування роботом-балансиром. У розділах пояснювальної записки вивчаються методи управління існуючими колісними роботами; функція проектування автоматизованої системи; створення електричного кола комутації; аналіз і розробка математичної моделі; проектування системи керування з ППД та адаптивним регулятором.



Підпис студента

07.12.2024

Дата

## ЗМІСТ

ВСТУП.....	4
1 АНАЛІЗ ПРОЦЕСІВ БАЛАНСУВАННЯ РОБОТА-БАЛАНСИРА.....	6
1.1 Одноколісні роботи.....	7
1.2 Двоколісні роботи.....	8
1.3 Триколісний робот.....	11
1.4 Чотириколісні роботи.....	18
1.5 Принцип керування роботами-балансирами.....	22
1.6 Призначення та застосування двоколісних роботів.....	25
1.7 Висновки до першого розділу.....	26
2 ЗАСАДИ ПРОЦЕСУ БАЛАНСУВАННЯ.....	27
2.1 Схем автоматичного балансування.....	27
2.2 Комутаційна схема управління самобалансуючого робота.....	28
2.3 Вибір технічних засобів для реалізації системи керування.....	30
2.4 Корпус схеми керування.....	38
2.5 Висновки до другого розділу.....	43
3 МАТЕМАТИЧНА МОДЕЛЬ РОБОТА-БАЛАНСИРА.....	44
3.1 Аналіз об'єкта математичного моделювання.....	44
3.2 Теоретичні засади керування перевернутим маятником.....	45
3.3 Виведення математичної моделі самобалансуючого робота.....	47
3.4 Динамічні характеристики.....	51
3.5. Висновки до третього розділу.....	55
4 СИНТЕЗ СИСТЕМИ РЕГУЛЮВАННЯ.....	56
4.1 Синтез системи регулювання на основі ПІД-регулятора.....	56
4.2 Синтез системи керування з адаптивним ПІД-регулятором.....	67
4.3 Розробка підсистеми корекції помилок положення об'єкту.....	71
4.3.1 Вибір та опис гіроскопічного інтегратора.....	71
4.3.2 Аналіз помилок датчикової системи.....	73

4.4 Висновки до четвертого розділу.....	77
ВИСНОВКИ .....	79
ПЕРЕЛІК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ .....	81
ДОДАТОК А Стаття у фаховому журналі.....	89

## ВСТУП

Колісні мобільні роботи є невід'ємною частиною сучасної робототехніки та автоматизації. Подібно до того, як розробка колісних мобільних роботів почалася давно, за останні роки в цій сфері спостерігається значний прогрес. Роботи на колесах демонструють такі унікальні характеристики, як маневреність і здатність орієнтуватися на різних поверхнях, на яких вони працюють. Ці роботи знаходять застосування в промисловості, медичних установах, транспорті, фермах тощо. Сучасні технології стимулювали подальші вдосконалення колісних мобільних роботів з акцентом на вдосконаленні систем управління за допомогою штучного інтелекту в напрямку автономності, розширення функціональності за рахунок додавання більшої кількості датчиків, а також підвищення продуктивності, надійності та безпеки. Роль колісних мобільних роботів стала життєво важливою і пов'язана з вирішенням численних соціальних проблем, починаючи від автоматизації виробництва і закінчуючи порятунком людей, що вижили в постраждалих від стихійних лих районах і підтримкою інфраструктури і дослідженням невідомих або ворожих територій. Хоча певного успіху було досягнуто, у майбутньому потрібна робота над інтелектуальними системами керування рухом мобільних роботів. Алгоритми потребують постійного вдосконалення; функціональність повинна бути розширена для роботи в нових умовах, а також повинні бути розроблені нові способи координації та співпраці між роботами. Лише завдяки безперервним дослідженням та інноваціям інтелектуальні системи керування рухом мобільних роботів зможуть піднятися на висоту у відповіді на виклики сучасного технологічного світу.

Роботи-балансери відрізняються здатністю зберігати певне фіксоване положення. Навіть якщо робот-пристрій переміститься на нове місце, він все одно запрограмований на повернення у вихідне положення. Такого роду

роботів можна використовувати в сфері доставки, перевезення вантажів, обслуговування.

У міру розвитку цієї технології виникла потреба в розширенні можливостей робота реагувати на відхилення та повертатися у вихідне положення.

Мета роботи: розробити математичну модель керування роботом-балансиром.

Об'єкт дослідження: процеси підтримання робочого положення під час руху робота-балансира.

Предмет дослідження: математична модель керування роботом-балансиром.

Завдання, що необхідно розв'язати у роботі:

- дослідити відомі конструкції роботів-балансирів;
- вивчити методи керування роботами-балансирами;
- розробити математичну модель керування роботом-балансиром;
- провести дослідження математичної моделі керування роботом-балансиром;
- визначити оптимальні параметри ПДД\_регулятора керування роботом-балансиром.

Наукова новизна роботи полягає у розробці математичної моделі керування роботом-балансиром, яка покращила можливості розробки оптимальних схем та регуляторів управління.

## 1 АНАЛІЗ ПРОЦЕСІВ БАЛАНСУВАННЯ РОБОТА-БАЛАНСИРА

Роботи на колесах мають досить значну перевагу над роботами-гуманоїдами. Вони пересуваються набагато швидше, мають велику гнучкість у напрямку та набагато стабільніші у вертикальному положенні, що є величезною перевагою для багатьох застосувань.

Конструкція однокорпусних мобільних роботів дуже складна з багатьма проблемами – який тип колеса використовувати, як і в якому положенні кріпити колеса та розрахунок кінематичних параметрів. Залежно від навколишнього середовища та планування завдань і бажаних інвестицій у роботизовану систему слід встановити цілі проектування. Колісні роботи можуть змінювати свою конфігурацію в літаку за допомогою своїх коліс. Рух колісного мобільного робота легко забезпечити і його вартість невисока; контролювати рух легко. Колісні роботи є одними з широко використовуваних роботів. Крім того, колісні роботи можна розділити на одноколесні, колісні кулькові мобільні роботи, двоколесні роботи, триколесні роботи, чотириколесні роботи та колісні мобільні роботи з кількома колісними колесами.

Популярним серед кінцевих користувачів є колісний робот. Цей бюджетний і легкий. Конструкція може нести будь-яку кількість коліс. Для статичної та динамічної рівноваги потрібні три колеса, тоді як для врівноваження конструкції додається більше коліс. Деякі інші механізми можуть бути включені в нього для підвищення стабільності на поверхні, як-от підвіски, які мають окремі колеса, так що всі колеса знаходяться на нахилених поверхнях. Колісна машина окупається краще, ніж гуманоїдна, через досить простий механізм руху. Крокуючий робот може мати багато різних варіантів системи пересування залежно від кількості коліс.

Існують різні техніки керування двоколесними роботами. Він підходить для 3-колесних і 4-колесних роботів. Крім диференціального методу керування, триколесні роботи можуть застосовувати ті ж методи, що й чотириколесні.

Багатоколісні роботи можуть застосовувати як диференційований рух, так і техніку водіння автомобіля.

Колісні роботи – це прості програми для переміщення речей з одного місця в інше або більш складні програми для розширення радіусу роботи роботизованої руки в промисловості. Колісні роботи, як правило, прості та економічні. Крім того, вони мають значну вагу, що дозволяє перевозити важке обладнання або акумулятори, що ще більше збільшує термін служби робота.

У той час як традиційні колісні роботи набагато кращі в керуванні, самобалансуючі роботи – ні, але це має одну велику перевагу, яка полягає в тому, що концепція отримала багато цікавих концепцій і технічних рішень. [1-6]

### 1.1 Одноколісні роботи.

Одноколісний робот також може генерувати поворотний момент, спричинений боковим ковзанням колеса, аналогічно динамічній стабільності, яку пропонують традиційні транспортні засоби. Цей випадок демонструє моноцикл, зображений на рисунку 1.1. Одна з можливих конструкцій одноколісного транспортного засобу включає в себе сферичне колесо. Такий робот є стабільним у всіх напрямках, що є лише однією з багатьох елементарних властивостей, які його визначають; серед іншого, є дуже підвищена маневреність і мінімальне тертя між поверхнями кочення, як показано на прикладі автомобіля зі сферичними колесами на рисунку 1.2. Загальне використання одинарних коліс у практичному роботизованому автомобілі зіткнулося б із великими труднощами, оскільки для його статичної та динамічної стійкості були б потрібні додаткові допоміжні елементи, а проблеми щодо перевірки керованості розрахунковими методами залишалися б невирішеними. [1-6]



Рисунок 1.1 – Робот із простим колесом

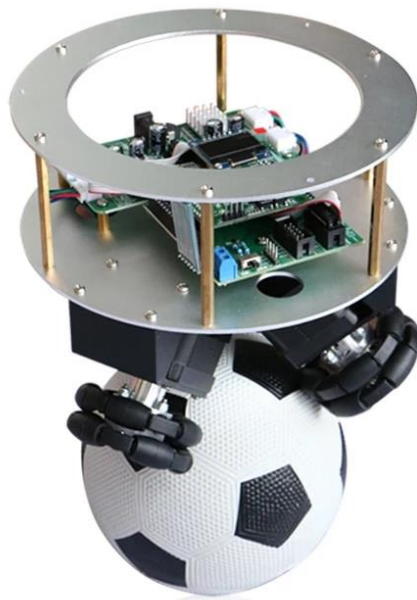


Рисунок 1.2 – Робот із колесом-кулею

## 1.2 Двоколісні роботи

Розрізняють два різновиди двоколісних роботів — із послідовними колесами, одне з яких обертове, як показано на рисунку 1.3, і з паралельними колесами, як показано на рисунку 1.4. Оскільки динамічна стабільність роботів із послідовним колесом (або подібних до велосипедів) зростає зі збільшенням швидкості, механізм для балансування коліс не завжди потрібен. Перевага цього методу полягає в тому, що ширина робота значно зменшується порівняно з іншими методами. Однак цей тип велосипеда є рідкісним, оскільки він не може підтримувати постійне положення в нерухомому стані.

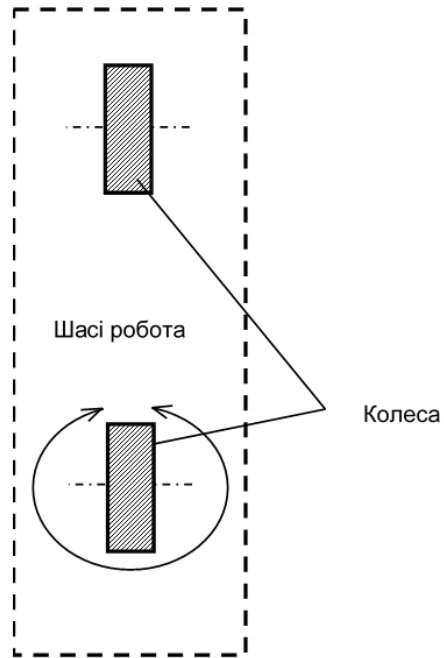


Рисунок 1.3 – Робот з двома послідовними колесами

Один із цих двоколісних роботів став популярним комерційним заходом Segway Inc. На рисунку 1.5 зображено двоколісний автомат, який використовується як особистий транспортний засіб. [1-6]

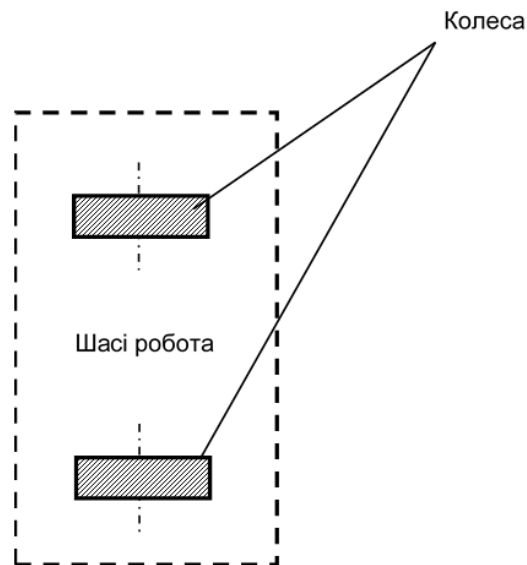


Рисунок 1.4 – Робот з двома паралельними колесами



Рисунок 1.5 – Самобалансуючий двоколісний робот

Двоколісні мобільні роботи мають здатність подорожувати швидше та охоплювати більші території, ніж інші базові роботи, наприклад роботи-гуманоїди. Ось чому двоколісний мобільний робот часто використовується як платформа для мобільних роботів. Однак, щоб зберегти рівновагу, двоколісний транспортний засіб повинен використовувати рух своїх коліс. Коли спонтанно виникла проблема впливає на машину, машина підтримує свою стабільність, регулюючи колеса та нахиляючи корпус. Якщо перешкоди перевищують здатність робота реагувати, він стане нестабільним. Крім того, безпека роботизованої системи може бути порушена через мимовільні рухи рівноваги. Щоб вирішити ці проблеми, можна розробити контролер, який регулює обертання тора, щоб підтримувати рівновагу при мінімізації руху. Коли робототехнічній системі завдано пошкодження, спостерігач, який виявляє пошкодження, оцінює пошкодження, а контролер, який регулює напрямок руху, компенсує пошкодження. Модуль гіроскопа використовується для підтримки стабільності лише з невеликими змінами коліс. Крім того, досягається статична рівновага, оскільки центр ваги розташований точно вздовж осі коліс. Щоб підвищити його стійкість, батареї, які живлять його,

розташовані під його корпусом. Однак більшість випадків передбачає динамічне керування балансуванням, яке подібне до типового завдання регулювання орієнтації маятника. Величина розміру цього робота менша, ніж інші роботи з більшою кількістю коліс.

### 1.3 Триколісний робот

Триколісний роботизований транспортний засіб за своєю суттю стійкий і має просту конструкцію, що робить його одним із найпопулярніших рішень для буксированих роботів. На основі різних типів коліс та їх розміщення можливе багато різних конструкцій. [3-8]

Двоколісний диференціальний привід - одна з найпопулярніших конструкцій триколісних роботів. Він складається з двох активних незалежних коліс плюс одного пасивного колеса, яке обертається. Цей стиль будівлі видно на рисунку 1.6. Стационарне пасивне колесо також можна побудувати у вигляді сфери.

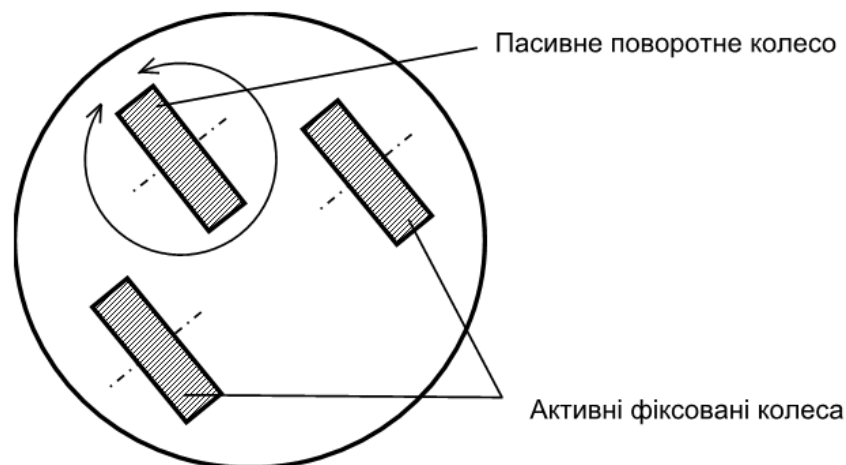


Рисунок 1.6 – Триколісний робот із диференціальним приводом на два колеса

Приклад роботизованого пристрою, побудованого за проектом на рисунку 1.7, демонструється на рисунку 1.7.

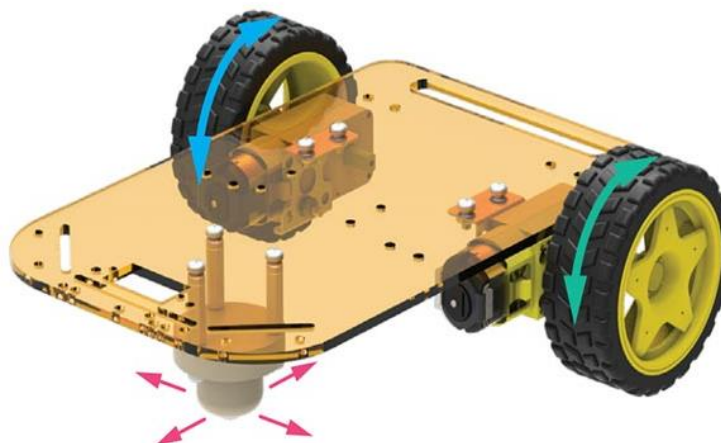


Рисунок 1.7 – Триколісний робот із диференціальним приводом на два колеса і поворотним колесом-сферою

Втілення легко модифікується до чотирьох коліс, просто додавши колесо. Ця конструкція може похвалитися кількома основними перевагами, першою з яких є:

- спрощена механічна конструкція, що включає просту кінематичну модель, статичну стабільність, легкість конструкції та нижчу вартість виробництва порівняно з іншими видами транспорту;

- коло руху не обмежене. Наприклад, для 3-колісного круглого робота можна швидко визначити частину, яка може комфортно подорожувати без перешкод, розширивши межі перешкоди в три рази більші за розмір робота;

- легка ідентифікація системних помилок;

- кінематику можна оцінити простим теоретичним розрахунком, майже наближеним до практичного.

Між тим, цей клас колісних роботів має ряд недоліків:

Оскільки ноги рухаються по нерівній ділянці, якщо одне з динамічних коліс робота-автомобіля на нерівній поверхні втрачає контакт із землею, напрямок і стабільність сильно зміняться. - Лише одновимірний рух.

Пристрій з еквівалентним рухом може бути створений з відцентрованими або нецентрованими колесами, і рух кожного колеса настільки взаємопов'язаний ременями або ланцюгами з рухом решти коліс, так що рухи виконуються синхронно, регулярно орієнтуючи колеса. Кінематичний опис синхронного приводу робота подібний до одного колеса. Таким чином, ми можемо досягти всенаправленого руху, тобто руху в будь-якому напрямку типу напрямку, встановлюючи колеса в одному напрямку. Однак напрямок шасі роботів змінити не можна. Більша перевага робота з синхронним приводом полягає в тому, що він може рухатися в усіх напрямках руху, використовуючи лише два приводи. Оскільки механічна система гарантує однакову частоту керування, потрібно менше зусиль, щоб змінити напрямок його руху. Деякі інші переваги включають досить точний одометр. інформація та рівномірний розподіл рушійних сил на всі колеса. Компонування такого типу машини показано на рисунку 1.8.

До недоліків цього підходу можна віднести:

Механічно продумана конструкція.

Зміни в швидкості колеса, якщо контур керування провисає або трансмісія погана.

Для того, щоб отримати всенаправлений рух, колеса повинні бути вирівняні в потрібному напрямку до початку руху.

Однією з головних переваг шведського колеса є те, що зробити такого мобільного робота не складно. Повністю орієнтований робот-транспортний засіб потребує принаймні трьох різних коліс. Оскільки цих роботів можна створювати без активного контролю над колісними елементами, механічні секції приводу можуть бути досить простими. Але це досить складне з точки зору механічної конструкції колесо. Вертикальний рух, створюваний контактом між колесами та землею, коли вони котяться, є одним із недоліків шведського колеса: однак різні механічні конструкції намагалися знайти спосіб вирішити цю проблему. На рисунку 1.9 показано хід одного з таких проектів.

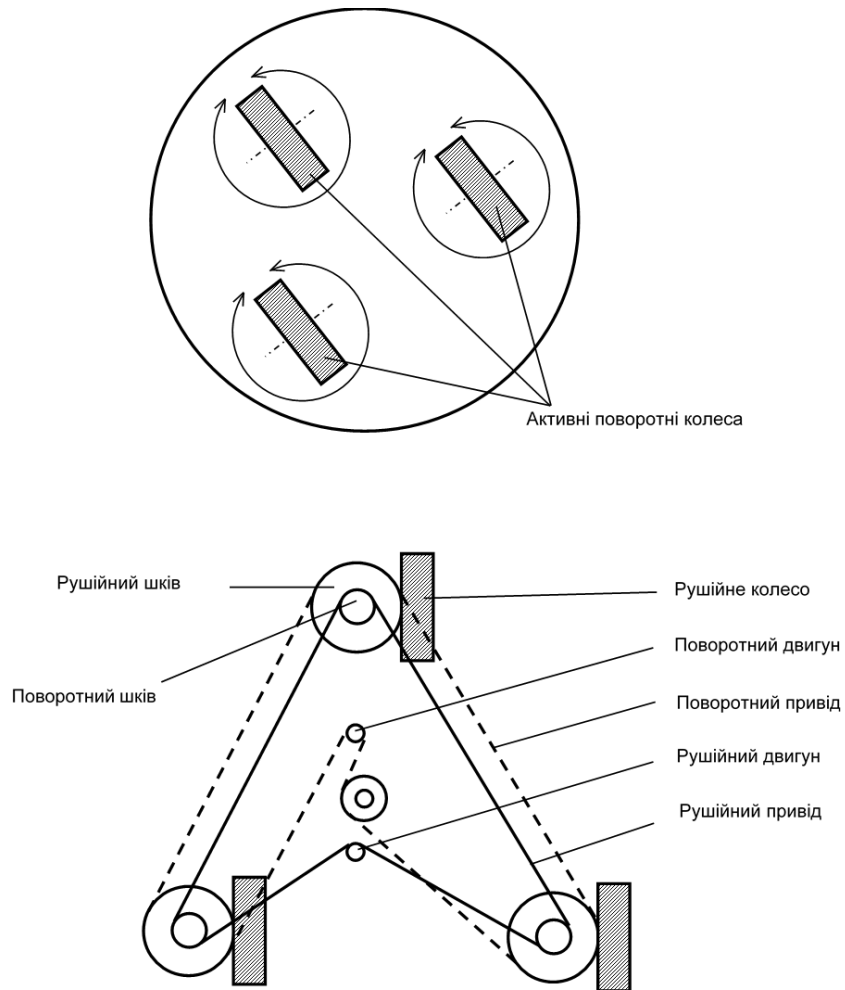


Рисунок 1.8 – Триколісний робот який має синхронний привід

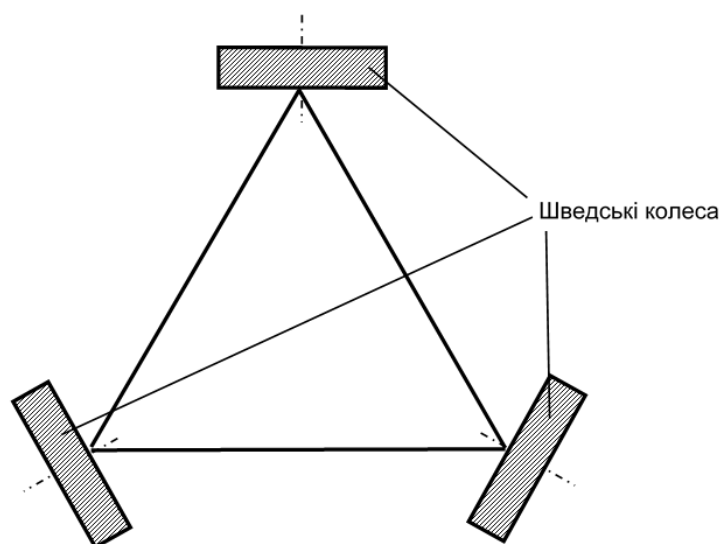


Рисунок 1.9 – Шведські фіксовані колеса

На рисунку 1.10 показаний робот, реалізований на основі вищезгаданої конструкції. [3-8]

Одне з незалежних коліс у 2-колісному всенаправленому роботі має принаймні обертатися. Вся лінійна або кутова швидкість може бути змінена цим роботизованим механізмом незалежно від цих напрямків коліс. Таким чином можна було б усунути недоліки, які супроводжують шведські колеса з точки зору вертикального руху та стійкості, які часто спостерігаються в автомобілях.



Рисунок 1.10 – Робота із шведським фіксованим колесам

Недоліки цієї спроби: theurrets

- будь-яка тенденція до нестабільності не може бути виключена, якщо між колесами встановлено кілька відстаней щодо корпусу робота

- бічний реверс руху робота може різко змінити орієнтацію коліс, що призведе до миттєвого небажаного обертання.

Якщо стаціонарний привід безпосередньо приєднаний до колеса, від двигуна до колеса буде провід, через який впливатиме на керування. Цього можна уникнути, включивши коробку передач, яка може перетворювати вхідний обертальний рух, що надходить від приводного двигуна, а потім

передавати його на шасі робота. Тому механічна композиція є дещо складнішою.

Якщо роботизована система має три активні колеса та три колеса корпусу, а також містить чотири інші приводи, тоді загальна кількість компонентів стає семи. Оскільки мінімальна кількість приводів становить три, ця система не є перенапруженою. Отже, виконавчі дії мають бути добре скоординовані в синергетичному режимі.

На рисунку 1.11 зображено конфігурацію колісного робота з трьома окремими приводними колесами.

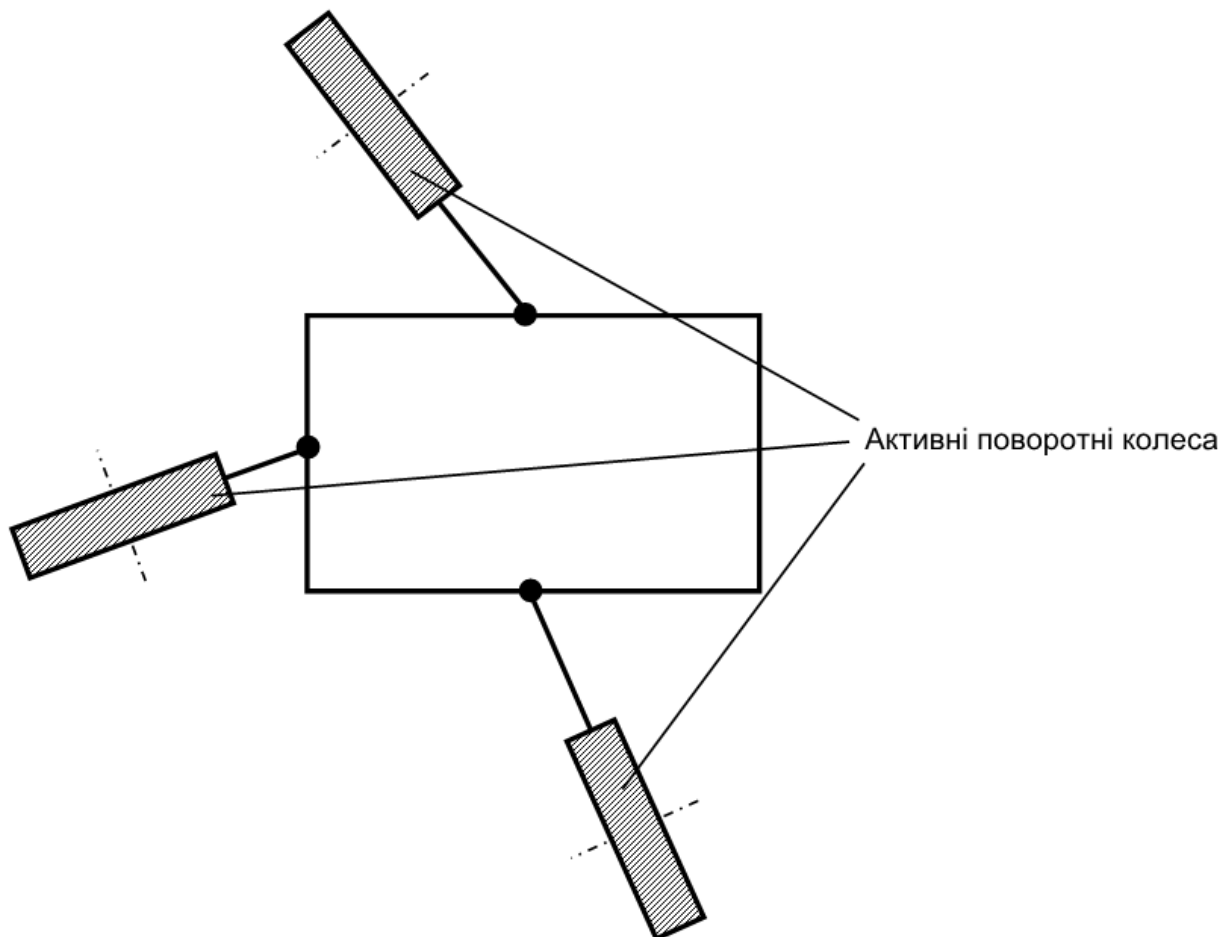


Рисунок 1.11 – Схема робота із трьома поворотними колесами що є незалежними

На рисунку 1.12 наведена схема триколісного робота з двома активними та одним пасивним колесом

Візьмемо решту коліс платформи для створення всепрямованого автомата за допомогою двох модулів. Відмінність активного поворотного колеса від центрального полягає в тому, що в останньому орієнтація завжди буде під прямим кутом до напрямку руху. [3-8]

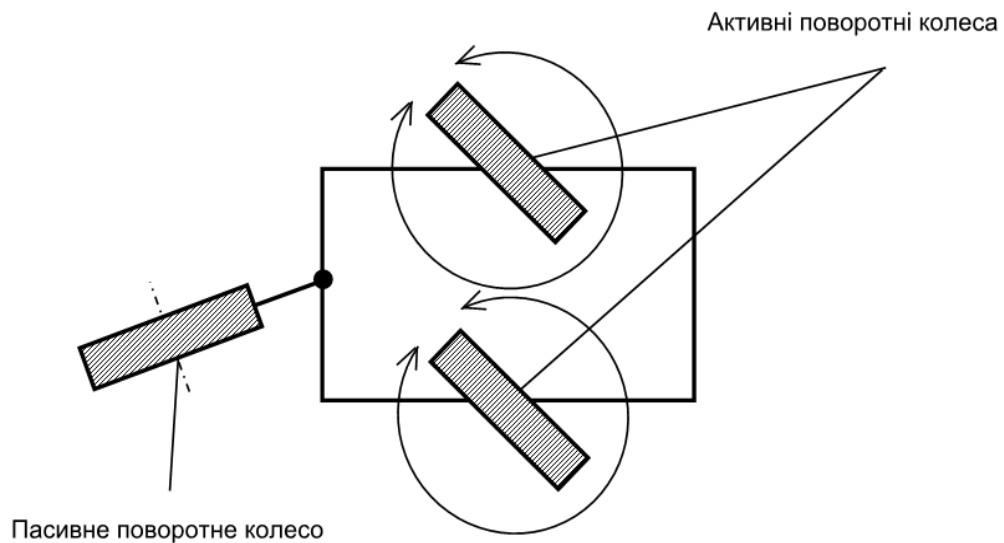


Рисунок 1.12 – Схема роботи із двома активними поворотними та одним пасивним поворотним колесом

Більшість механічних недоліків такі ж, як і підхід із силовим колесом – кілька приводів і складна механічна конструкція. Рухове керування не є вільним, оскільки приводний двигун безпосередньо приєднаний до ведучої осі; це зазвичай призводить до обмеження допустимих кутів повороту керма щодо потужності. На додаток до п'яти, наведених вище, було написано багато, багато проектів триколісних роботів. Це також стосується чотиріколісних роботів, які були б більш стабільними. Можна буде просто додати більше пасивних коліс, які не додадуть додаткових обмежень для кінематичної осі. Крім того, ми можемо мати активні колеса, а потім уникнути цієї проблеми, просто розв'язавши зворотну кінематичну задачу, яка означає неголономних роботів. Для підтримки 4-колісного робота, щоб він не перекинувся, потрібна система підвіски, оскільки він котиться на чотирьох колесах.

#### 1.4 Чотириколісні роботи

Триколісний робот був розроблений неголономним з кінематичною моделлю диференціального диференціального рульового управління одноколесного велосипеда. Однак він мав два вільних додаткових колеса, зберігаючи при цьому пасивні характеристики двох коліс. Конструкція більш сприятлива для триколісного робота, оскільки центр ваги лежить у прямокутнику, обмеженому чотирма колесами, а не в трикутнику, як вважалося. Крім того, він має більше місця, яке можна заповнити іншими механізмами та важливими складовими. Сила тяжіння повинна розташовуватися в центральній частині прямокутника; це зрозуміло, коли круті повороти повинні бути божевільними або коли їдиш по пересіченій місцевості. Схематична конструкція цього робота наведена на рисунку 1.13.

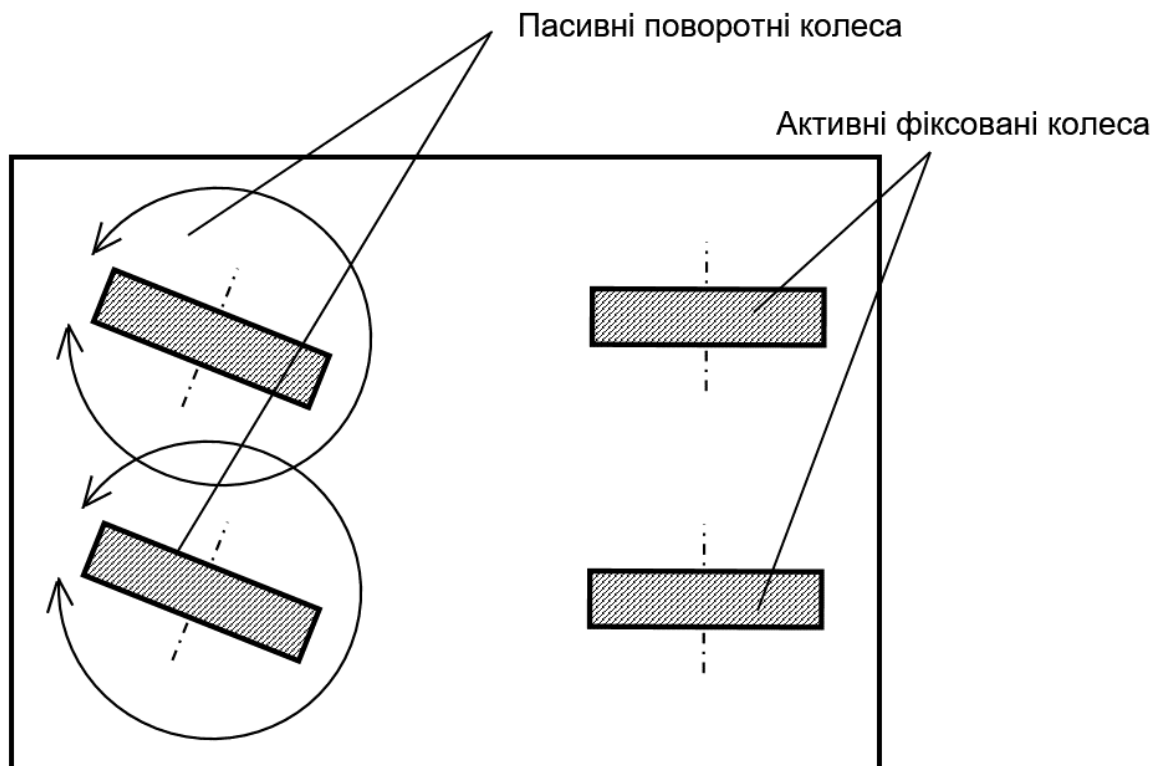


Рисунок 1.13 – Чотириколісний робот з двома активними незалежними рушійними і 2 пасивними поворотними колесами

Цей новий чотириколісний робот із фіксованим колесом розроблено з двома парами ведених коліс, кожна пара протилежних сторін рухається в одному напрямку. Це одна зі складних форм у всьому цьому виді руху, коли всі колеса матимуть однакову швидкість. Якщо в колісній парі немає рівномірності швидкостей осей, то перевагу матиме та вісь, яка більше сповільнюється, а якщо пари коліс не поділяють швидкість і напрямок, то такий транспортний засіб-робот матиме проблеми прямолінійного руху. Конструкція повинна містити частину, що стосується маневрування автомобіля. [6-12]

На рисунку 1.14 показана схема цього робота.

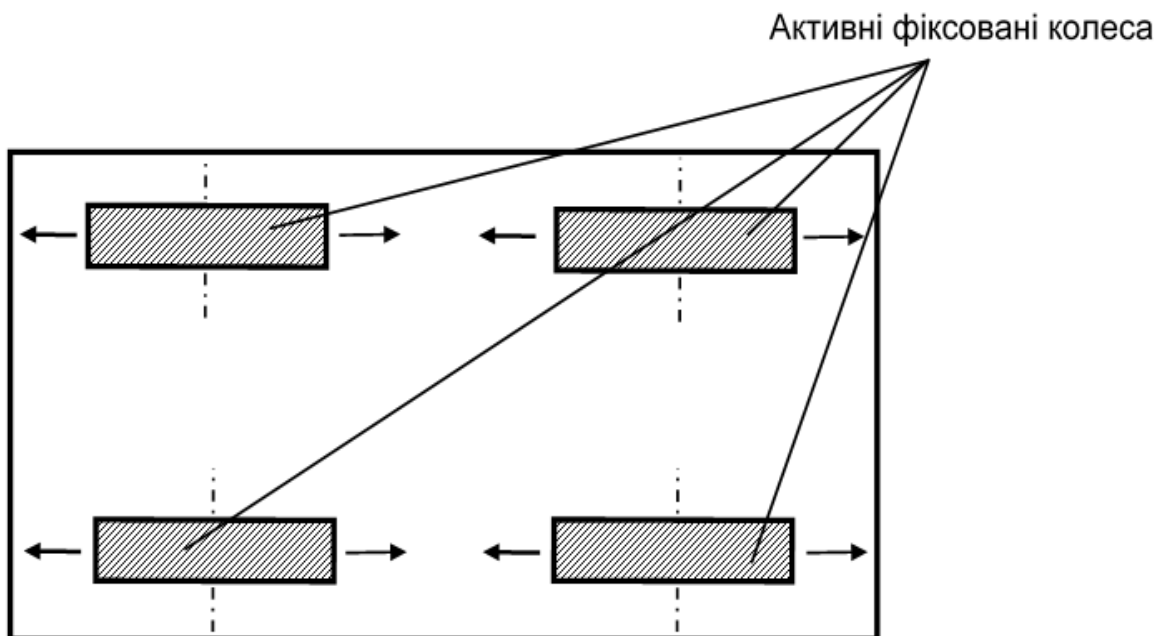


Рисунок 1.14 – Схематична конструкція робота з чотирма активними фіксованими колесами.

Приклад роботизованого пристрою, створеного за даним проектом показано на рисунку 1.15.

Крім того, подібного робота можна створити за допомогою шведського колеса, це продемонстровано на рисунку 1.16.

Приклад роботизованого пристрою, створеного за проектом описаним вище показано на рисунку 1.17.



Рисунок 1.15 – Виконання чотириколісного робота із чотирма фіксованими активними колесами

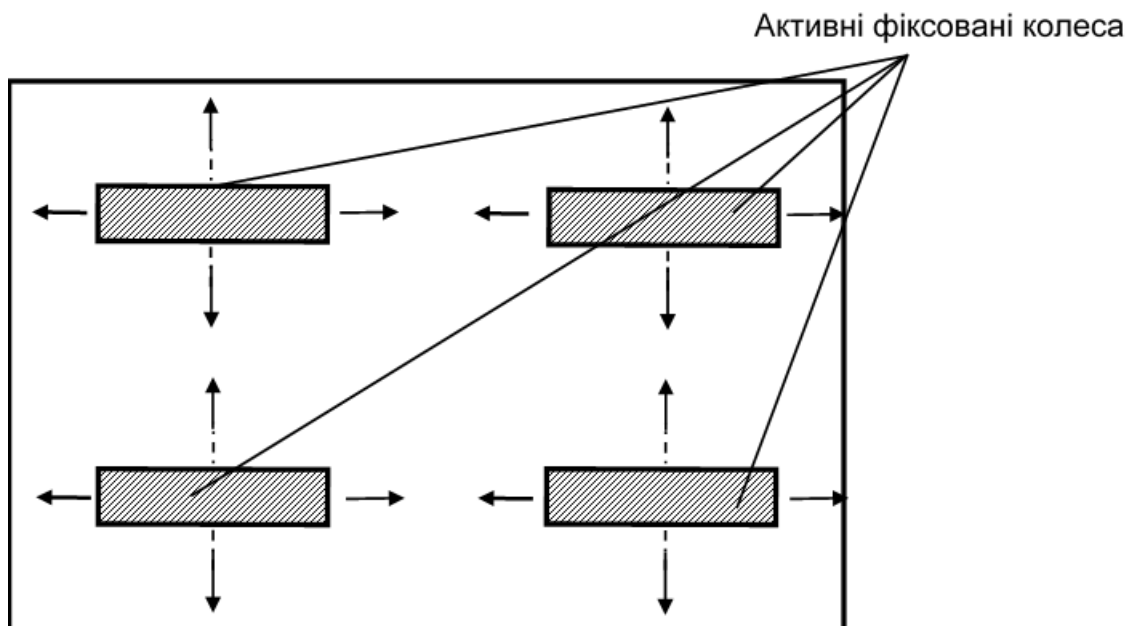


Рисунок 1.16 – Схема робота з чотирма фіксованими активними шведськими колесами

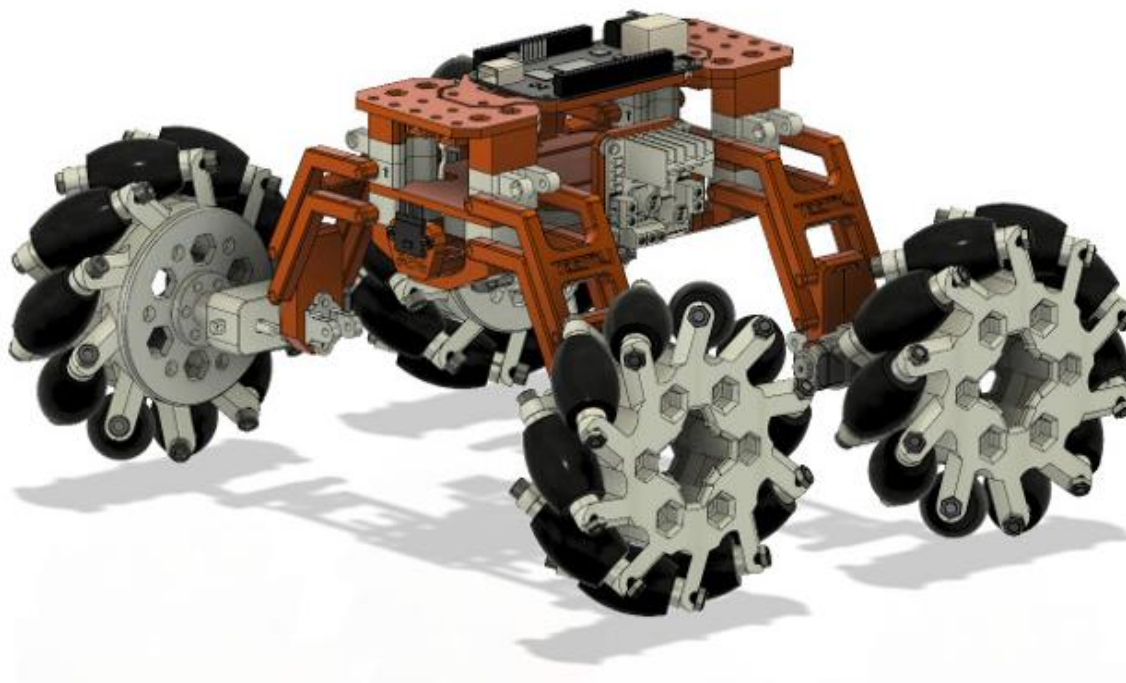


Рисунок 1.17 – Чотириколісного робота з чотирма фіксованими активними шведськими колесами.

Інший варіант конструкції також може повернутися до двох нормально працюючих ведучих коліс і двох нормально працюючих поворотних коліс, повертаючись однаково до звичайних транспортних засобів. Це більш складний спосіб переміщення, а отже, збільшує складність розрахунку. Це має перевагу перед попередніми методами, які були моторизованими: для керування цим двигуном потрібен один двигун і один привод. Попередні методи вимагали або двох двигунів, або складної коробки передач, а остання вимагала двох окремих виходів із незалежною швидкістю та напрямком обертання. [6-12]

Схематична конструкція робота показана на рисунку 1.18.

Приклад робота, створеного за описаною вище конструкцією показано на рисунку 1.19.

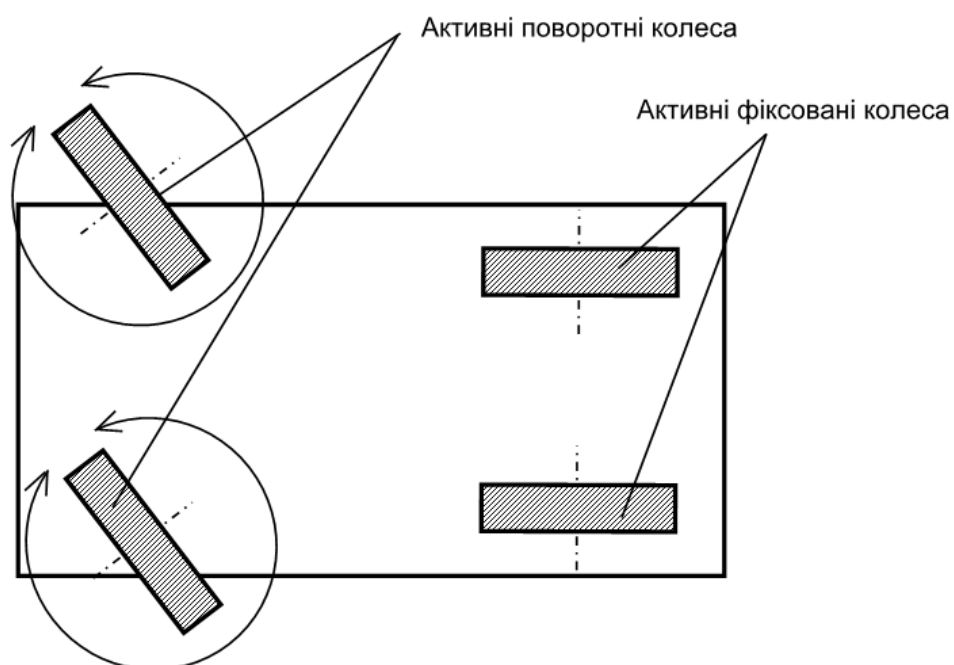


Рисунок 1.18 – Схема роботи з активними двома приводними і активними двома поворотними колесами



Рисунок 1.19 – Робот з активними двома приводними і активними двома поворотними колесами

### 1.5 Принцип керування роботами-балансирами

Двоколісний самобалансуючий робот характеризується як нестійка, нелінійна, електромеханічна система, яка пов'язана з двома колесами, які

контактують із зовнішньою поверхнею; такі колеса називаються самоцентрованими на осі коліс.

Основний принцип роботи самобалансуючої платформи робота часто порівнюють із принципом дії перевернутого маятника. Коли його збурюють, він не буде продовжувати коливатися, як звичайний маятник, і не стабілізуватиметься у вихідному вертикальному положенні, а просто приземлиться на поверхню під дією сили тяжіння.

Розуміння того, як керувати самопідтримуючим роботом, схоже на балансування так само, як ви балансуєте олівцем на пальці. Якщо олівець повертається на певний кут, ми повертаємо палець на відповідний кут, а олівець залишається нерухомим. Балансування пристрою відбувається таким чином: ви повинні крутити колеса в напрямку падіння пристрою, щоб центр ваги залишався над опорою.

Самобалансуючими двоколісними роботами керують за допомогою датчиків, за допомогою яких вони можуть спостерігати за тим, що їх оточує. Акселерометри, інклінометри та гіроскопи утворюють сімейство датчиків руху, які формують деякі входи та виходи для систем керування. Це: поточна позиція або мета інформації. Ці вхідні дані можна об'єднати в процес, який називається злиттям датчиків.

Окрім стандартизованих коліс, можна знайти різні інші типи коліс роботів зі своїми перевагами та недоліками.

Кастер і кулькові колеса виглядають як кульки, які використовуються на балансувальних або опорних колесах. Тим не менш, тип колеса найкраще підходить для умов усередині будівель проти рівних підлог з невеликими обмеженнями. Кульові колеса (або сферичні ролики для перенесення кульок) складаються зі сферичної кулі, виготовленої з міцних матеріалів, таких як метал або нейлон, по якій проходить шина.



Рисунок 1.20 – Касторове колесо

Колеса Omni або колеса Mecanum під кутом  $90^\circ$  з рамою набувають 4-DOF. Вони можуть рухатися в усіх напрямках. Всеспрямоване колесо зображено на рисунку 1.21. [13-15]

Серед багатоярусних коліс є шведське колесо. Вони, як і звичайні колеса, можуть служити приводними або напрямними. Однак шина шведського колеса являє собою комбінацію гумових шин, правильно розташованих по діагоналі вздовж ободів коліс. Типова шведська шина зображена на рисунку 1.21.



Рисунок 1.21 – Шведське колесо

У роботі буде обрано типове колесо, оскільки воно не вимагає обертання в різних напрямках.

## 1.6 Призначення та застосування двоколісних роботів

Практично неможливо точно визначити можливі варіанти використання двоколісних роботів, оскільки вони є універсальними інструментами. Напевно, можна подумати про те, щоб налаштувати їх на доступ до такого небезпечного або обмеженого простору, куди неможливо дістатися навіть на гусеничному чи багатокілісному транспорті. Таке завдання, однак, легко виконує мобільна компактна двоколісна роботизована система, оскільки система може обертатися навколо своєї осі, повертаючись на правому колесі вперед і на лівому колесі назад.

Робота не вимагає великого досвіду та зарплати. Вартість обслуговування роботизованого процесу виявляється меншою, ніж наймання людини. З цими концепціями можна використовувати будь-яку двоколісну машину, незалежно від її призначення.

Ними можна керувати дистанційно або автоматично, залежно від рельєфу місцевості та розміру перешкод на шляху. У міських районах і у великих громадах це зазвичай рекреаційні, соціальні та професійні зони, тому розгляд також може бути пов'язаний з потужністю робота, а також водою та складним рельєфом. Нинішній рівень розвитку вплине на це.

Прибиральник може бути роботизованим, оскільки для цієї роботи не потрібен пристрій, щоб відпочити, окрім як заряджати його автономні елементи живлення. Він може допомогти сім'ям, у яких є хворі або старі члени, будучи доступним весь час і переміщаючись по дому через Інтернет або будь-яке інше бездротове з'єднання.

Наприклад, робот-автомобіль, який виконує роль пожежника, може оглянути задимлену зону ще до того, як будь-яка людина буде піддана небезпеці. Відеокамери можна використовувати для визначення місця лісових пожеж, тоді як датчики температури можуть вимірювати температуру гарячих точок на стінах, стелі та підлозі. Інфрачервоні камери можуть визначити місцезнаходження людей або тварин, які застрягли в кімнаті, і надати

зображення того, що насправді перешкоджає кімнаті. Показання, вимірювання та вся зібрана інформація безпосередньо передаються пожежникам, що забезпечує швидке та ефективно розповсюдження інформації про можливі збитки та жертви.

### 1.7 Висновки до першого розділу

Розділ було присвячено огляду переваг і недоліків колісних роботів. Також були проаналізовані різні конструкції колісних роботів, різна кількість коліс і різні типи коліс, що застосовуються в робототехніці. Концептуальний проект двоколісного робота, переваги та режими роботи двоколісних транспортних засобів добре описані в літературі.

## 2 ЗАСАДИ ПРОЦЕСУ БАЛАНСУВАННЯ

### 2.1 Схем автоматичного балансування

Необхідно створити схему автоматизації, щоб показати об'єкт управління, розміщення засобів автоматизації та вигляд технологічного процесу. Робот-балансир є повністю автоматизованою платформою. Вивчивши теоретичні основи балансування перевернутого маятника, ми визначили основу принципу роботи робота-балансира. Ці принципи автоматизації включають програмний контролер. Основне завдання управління - тримати робота піднятим, не даючи йому ковзати по підлозі. Можна розробити додаткові засоби керування, щоб дозволити рух і обертання роботизованої платформи над поверхнею. [16-25]

На рисунку 2.1 наведена самобалансуюча роботизована платформа для автоматизації процесу балансування.

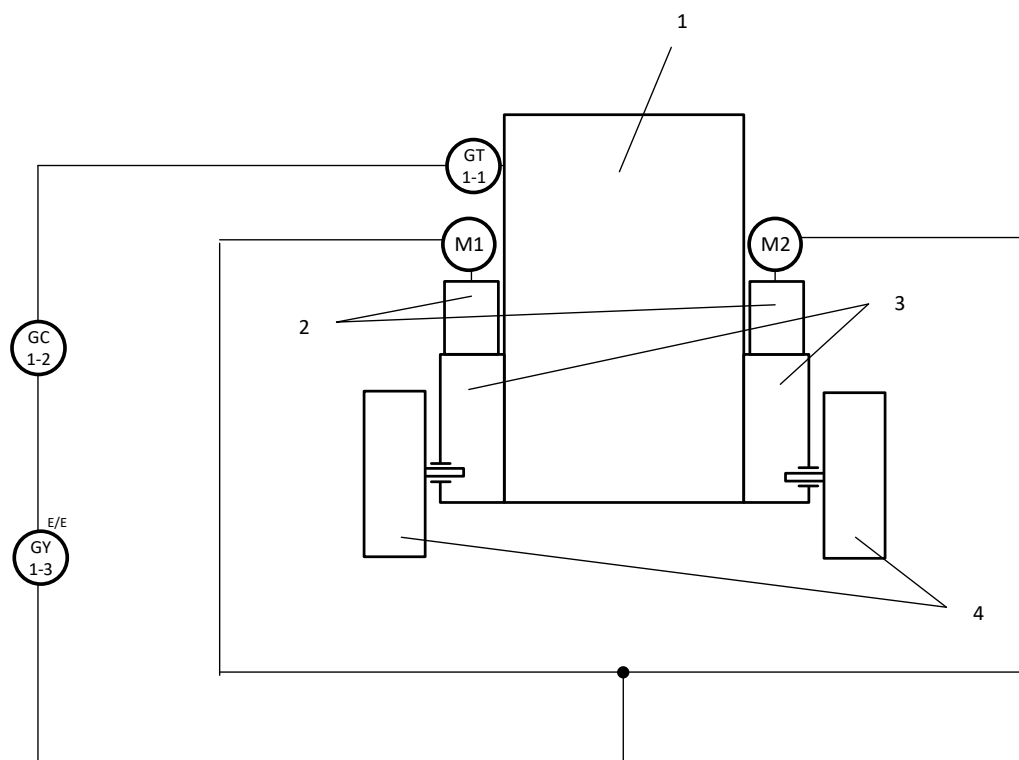


Рисунок 2.1 – Схема автоматизації процесу балансування на базі самобалансуючого робота: 1 – корпус; 2 – двигуни; 3 – редуктори; 4 – колеса

Контур 1 контролює положення робота і містить мікроконтролер, акселерометр і гіроскоп: (1-1) – тривісний акселерометр-гіроскоп; (1-2) – мікроконтролер; (1-3) – електричне перетворення для забезпечення керування двигуном; M1, M2 - електродвигуни, які використовуються як виконавчий механізм. Наступним кроком є вибір технологічних інструментів для реалізації цієї стратегії автоматизації, а також створення схеми переходу.

## 2.2 Комутаційна схема управління самобалансуючого робота

Комутаційну схему показано на рисунку 2.2.

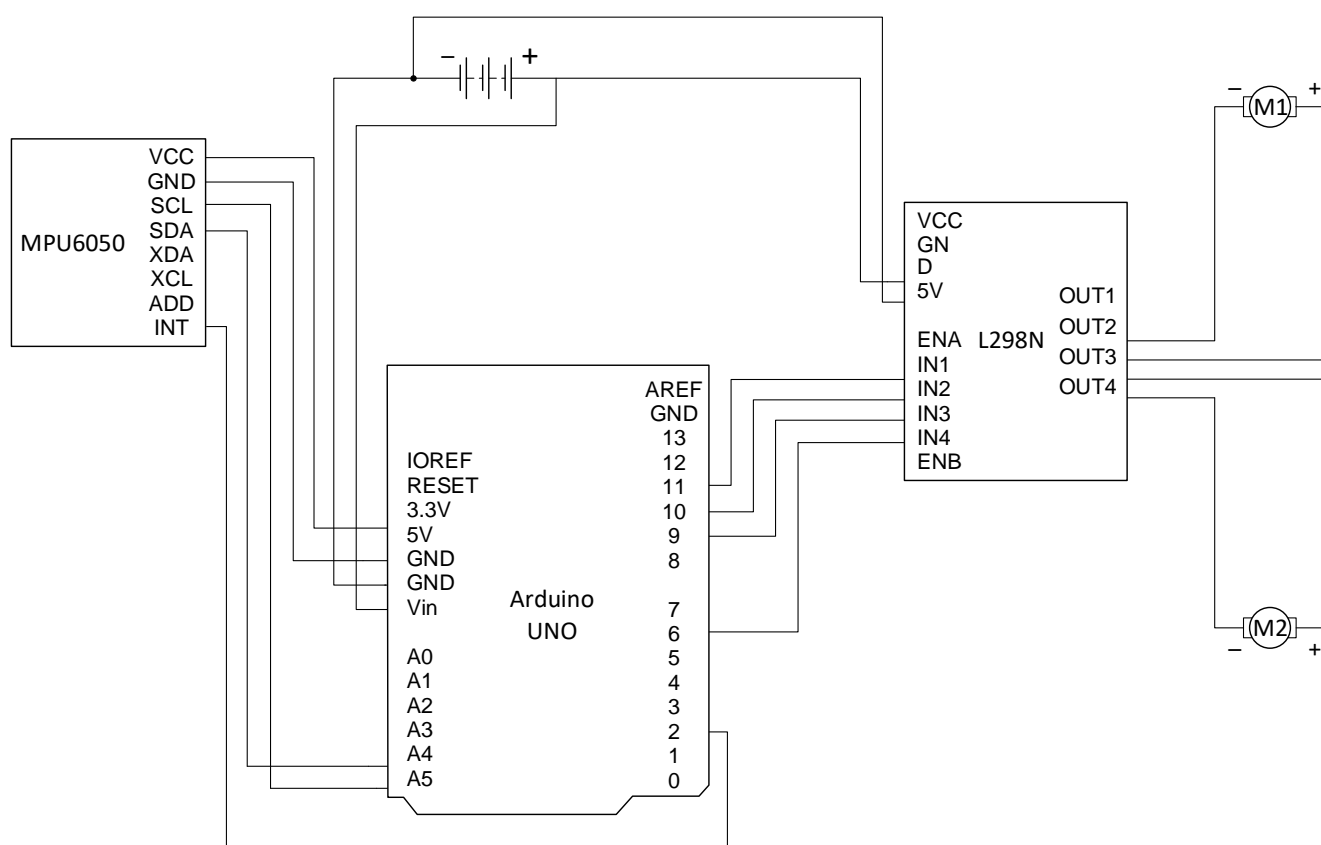


Рисунок 2.2 – Схема комутації самобалансуючого робота

Призначення контактів гіроскопу MPU 6050 та їх підключення наведено в таблиці 2.1.

Таблиця 2.1 – Призначення контактів гіроскопу MPU 6050

<b>Призначення</b>	<b>Контакт на Arduino</b>
Живлення Vcc	+5V
«Земля» Ground	Gnd
«Тактування» SCL	A5
«Дані» SDA	A4
«Дозвіл» INT	D2

Призначення контактів драйверу моторів L298N та їх підключення наведено в таблиці 2.2.

Таблиця 2.2 – Призначення контактів драйверу моторів L298N

<b>Драйвер двигуна L298N</b>	<b>Контакт на Arduino</b>
IN1	D6
IN2	D9
IN3	D10

Arduino обчислює малу і пряму потужність за допомогою діода Vin. Цей пристрій інтегровано з підсилювачем напруги, який змінює вхідну напругу на 5 В, що живить мікропроцесор ATmega 328. Будь-які інші компоненти, зокрема, можуть житися від напруги 5 В на платі.

З'єднання між акселерометром MPU6050 і мікроконтролером використовує протокол I2C Arduino за допомогою двох контактів A4 і A5. Фактично, це контакти SDA і SCL MPU, які підключені до цих контактів плати Arduino. Швидкість I2C коливається від 100 до 400 кГц. Цієї швидкості достатньо для правильної поведінки машини, яка є самобалансуючим пристроєм. Планування переривань вимагатиме підключення контактів INT двох MPU до контактів Arduino. Після цього висновок переривання може бути використаний для ретрансляції команди, яка не має зворотного наказу.

Напруга 5 В Arduino використовується для живлення чіпа MPU6050; контакти заземлення на обох цих платах прикріплені.

З'єднання IN1, IN2, IN3, IN4 драйвера двигуна L298N відповідають контактам 11, 10, 9, 6 плати Arduino. Двигуни керуються шириною імпульсу від контактів 11, 10, 9, 6. Тобто разом контакти IN1 і IN3 контролюють ступінь обертання двигунів M1 і M2; а контакти IN2 і IN4 контролюють напрямок обертання двигунів M1 і M2.

У цій роботі передбачається використовувати електродвигуни, які повинні працювати при напрузі 5-12 В, отже, систему можна живити за допомогою 5 В від плати Arduino. Тим не менш, для їх ефективної роботи необхідно забезпечити джерело 12 В не від напруги акумулятора для успішного виконання контрольних завдань. Для цього знадобиться приєднати позитивний і негативний полюси батареї до плати драйвера двигуна на контактах, позначених як VCC і GND. Драйвер подасть керуючий сигнал до двигунів через порти OUT1, OUT2, OUT3, призначені для двигунів M1, M2. Перший осьовий двигун буде закріплено на порту OUT1, а третій – на порту OUT2. Другий осьовий двигун разом з четвертим потрібно поставити на порт OUT3 і порт OUT4 відповідно. [16-25]

### 2.3 Вибір технічних засобів для реалізації системи керування

#### **Давач положення:**

Після розгляду аспектів найбільш відповідним вибором датчика положення для нашої проектної роботи виявився MPU6050. MPU6050 — це MEMS; він включає в себе 3-осьовий гіроскоп і 3-осьовий акселерометр. Отже, з таким датчиком 6 різних вихідних значень, отриманих від 3 виходів акселерометра та 3 виходів гіроскопа, описують датчик. Вихідні дані акселерометра описують прискорення вільного падіння, тоді як дані гіроскопа описують кутову швидкість у трьох взаємно перпендикулярних напрямках. Це опосередковано вимірює швидкість, напрямок, прискорення, переміщення та

багато інших подібних кінетичних властивостей. На вимірювання акселерометра впливають швидкі горизонтальні рухи, а на вимірювання гіроскопа – повільні. Цей датчик є високоточним і швидким, оскільки він виконує 16-бітне апаратне перетворення аналогового сигналу в цифровий для кожного каналу. Це дозволяє передавати дані через кілька каналів одночасно. Він спілкується з мікроконтролером через I2C.

На рисунку 2.3 зображено акселерометр-гіроскоп MPU6050.



Рисунок 2.3 – Акселерометр MPU6050

Конфігурацію виводів акселерометра-гіроскопа MPU6050 показано в таблиці 2.3.

Особливості MPU6060 включають:

- вбудований 3-осьовий акселерометр і гіроскоп з MEMS (мікроелектромеханічна система);

- робоча напруга від 3,5 В;

Комунікаційна шина I2C.

- 16-розрядний АЦП (аналогово-цифровий перетворювач) внутр.

- вбудований DMP забезпечує повну потужність обробки.

- інші обчислювальні пристрої з підтримкою ІС, наприклад магнітометр.

- налаштування адреси ІС,

- вбудований датчик температури.

- мікроконтролер:

Таблиця 2.3 – Конфігурація виводів акселерометра-гіроскопа MPU6050

Номер виводу	Назва виводу	Опис
1	Vcc	Забезпечує живлення модуля, може бути від +3 В до +5 В. Зазвичай використовується +5 В
2	Ground	Підключено до заземлення системи
3	Serial Clock (SCL)	Використовується для надання тактового імпульсу для зв'язку I2C
4	Serial Data (SDA)	Використовується для передачі даних через зв'язок I2C
5	Auxiliary Serial Data (XDA)	Може використовуватися для інтерфейсу інших модулів I2C з MPU6050. Використання цього піну є необов'язковим
6	Auxiliary Serial Clock (XCL)	Може використовуватися для інтерфейсу інших модулів I2C з MPU6050. Використання цього піну є необов'язковим
7	AD0	Якщо один MCU використовується більше ніж один MPU6050, цей контакт можна використовувати для зміни адреси зв'язку
8	Interrupt (INT)	Використовується для переривань

Одним із найпоширеніших і популярних комп'ютерів є Arduino UNO, який є невеликим і використовує похідну від мікропроцесора ATmega 328. У цій роботі мікроконтролер оцінюється на прикладі Arduino UNO, тому що він дешевий, має підтримку величезної кількості датчиків, інші комп'ютери приймають введення та виведення інформації, і головним чином тому, що є багато навчальних посібників, навчальні матеріали, приклади проектів, а

також відкритий вихідний код у вільному доступі для Arduino UNO; тому цей матеріал дуже цінний і досить гнучкий. Arduino Uno можна живити за допомогою кабелю USB або зовнішнього джерела живлення. Зовнішні джерела живлення в основному являтимуть собою гаджет для перетворення змінного струму на постійний або акумулятори. Для підключення адаптера підключіть його до входу живлення Arduino Uno. Подібним чином підключіть провід акумулятора до гнізд VIN і GND роз'єму POWER. Рекомендований діапазон напруги 7..12 Вольт. [16-25]

На рисунку 2.4 зображено мініатюрний комп'ютер Arduino..



Рисунок 2.4 – Мікроконтролер Arduino Uno

Технічні характеристики Arduino UNO:

- мікропроцесор на базі Atmega 328;
- процесор з тактовою частотою до 16 МГц;
- 32 байта флеш-пам'яті;
- 2 байти статичного MSM
- 1 байт EEPROM

- перезавантаження при включенні (POR)
  - Виявлення низької напруги живлення нижче необхідного рівня.
  - режим порівняння каналів двох 8-бітних таймерів
  - один 16-бітний таймер, який має функцію явного захоплення вхідних даних і порівняння каналів;
  - універсальний асинхронний приймач-передавач (USART) з фіксованою швидкістю передачі даних і початковою точкою кадру;
  - один периферійний послідовний канал (SLL)
  - 2-режимний мікроконтролер гарвардського дизайну з шиною I2C для даних;
  - аналоговий компаратор із збільшеним опорним входом;
  - шість каналів з підтримкою ШІМ;
  - мікропроцесор ATmega 12U2;
- Специфіка розпіновки Arduino UNO наведена в таблиці 2.4.

Таблиця 2.4 – Специфіка розпіновки Arduino UNO

Назва виводу	Опис
NC	Не використовується
IOREF	З'єднано з логічною напругою 5 В
Reset	Скидання
+3V3	Джерело живлення 3,3 В, формується внутрішнім стабілізатором напруги. Максимальний струм споживання 50 мА.
+5V	5 В стабілізоване джерело живлення, яке застосовується для живлення мікроконтролера і компонентів на платі
A0 – A5	Застосовується як аналогові входи у діапазоні 0..5 В

Кінець таблиці 2.4 – Специфіка розпіновки Arduino UNO

D0 – D9	Дискретні виводи, які можуть застосовуватись як вхідні так і вихідні
PWM 3, 5, 6, 9, 11	Виводи ШИМ сигналів
Serial 0(Rx), 1(Tx)	Входи і виходи послідовного порта даних TTL.
10 (SS), 11 (MOSI), 12 (MISO) 13 (SCK)	Це контакти послідовного периферійного інтерфейсу, вони застосовується для підтримки зв'язку SPI за допомогою бібліотеки SPI. Виводи SPI включають:  SS: PIN 10 застосовується як Slave Select. MOSI: Pin 11 застосовується як Master Out Slave In MISO: Pin 12 застосовується як Master In Slave Out SCK: PIN 13 застосовується як Serial Clock
A4 (SDA), A5 (SCA)	Застосовується для зв'язку TWI.
AREF	Це аналоговий опорний контакт плати Arduino. Він застосовується для забезпечення опорної напруги від зовнішнього джерела живлення.

**Драйвер моторів:**

Це було виконано за допомогою драйвера двигуна L298N. Це сумісно з двигунами, які будуть реалізовані в цій роботі, і повністю сумісно з платформомою. Рис. 2.5 Драйвер L298N

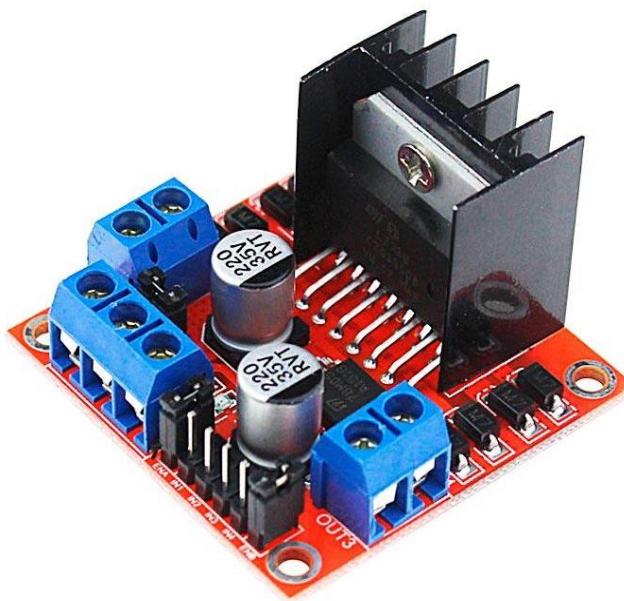


Рисунок 2.5 – Драйвер двигунів L298N

L298N — це драйвер подвійного двигуна, який дозволяє керувати двома різними двигунами постійного струму з блокуванням. Цей модуль можна використовувати для керування двигунами постійного струму з вхідною напругою 5..35 В з максимальним струмом 2 А. Вбудований регулятор напруги для драйвера можна ввімкнути або вимкнути за допомогою перемикача. Якщо напруга двигуна знаходиться в цьому діапазоні, 5-12, тоді ми можемо з'єднати регулятор 5 В і використовувати контакт 5 В для живлення плати Arduino. Але якщо напруга двигуна перевищує 12 В, необхідно обов'язково видалити перемичку, оскільки такі високі напруги не витримують внутрішній регулятор 5 В. Тут висновок 5 В використовується як вхід, оскільки джерело живлення 5 В є обов'язковим для належної роботи чіпа. Контакти ENA та ANB використовуються для подачі живлення на двигуни та для керування швидкістю двигунів. Якщо цей штифт змінюється, двигун повинен працювати на швидкості. Якщо застосувати ШІМ-вхід до цього висновку замість перемички, ми зможемо керувати швидкістю двигуна. Зупиніть двигун, підключивши цей контакт до землі. Ця команда зупинить двигун. [16-25]

Специфікації L298N включають:

- висока робоча напруга, може досягати 46 В;
- висока вихідна потужність. Максимальний миттєвий струм, якого можна досягти, становить 3 А.

Максимальний робочий струм, який підтримується, становить 2 А.

- номінальна потужність 25 Вт;
- 2H-Bridge — це драйвер високої напруги та струму, який використовується для живлення індуктивних пристроїв, таких як двигуни постійного струму.

- регулюються стандартними електронними сигналами;
- 2 кнопки для ввімкнення або вимкнення пристроїв без введення коду;
- може керувати двофазним кроковим, чотирифазним кроковим або двома двигунами постійного струму;
- оснащений конденсатором фільтра великої ємності, діодом вільного ходу, діод вільного ходу призначений для захисту мікросхеми, коли зворотний струм індуктивного навантаження;
- зовнішній стабілізатор 78M05 можна використовувати для отримання 5 В від джерела.

У цій установці використовувалися два диференціальні двигуни постійного струму, один з яких був пофарбований у жовтий колір. Двигун постійного струму з редуктором, пофарбованим у жовтий колір, зображено на рисунку 2.6.



Рисунок 2.6 – Двигун Geared DC Motor Yellow

Характеристики редукторного двигуна постійного струму:

- робоча напруга 3...12 В;
- максимальне зусилля 800 г\*см;
- швидкість без навантаження 90±10 об/хв;
- коефіцієнт редукції: 1:48;
- струм без навантаження максимум 250 мА;
- струм закінчення: ~1В;
- чудовий захист від перешкод на цьому двигуні корисний для мікроконтролерів.

Окрім датчика положення, також використовувався мікроконтролер, драйвер двигуна та двигуни постійного струму, два колеса, три літій-іонні батареї 3,7 В, з'єднувальний дріт і корпус.

## 2.4 Корпус схеми керування

Вся конструкція складається з 3 частин.

Частини, в які встановлюються акселерометр, плата Arduino і драйвер двигуна, будуть називатися основним корпусом. Дві частини корпусу будуть представлені прозорими пластиковими пластинами.

Кришка корпусу акумулятора. Він кріпиться до корпусу батареї за допомогою чотирьох гвинтів. Креслення основного корпусу зображено на рисунку 2.7. На фотографіях показані лише більші розміри. [26-28]

Креслення корпусу акумуляторів на рисунку 2.8.

Креслення кришки корпусу акумуляторів на рисунку 2.9.

3D-модель виготовлена програмою САД. Після того, як ці моделі будуть надруковані на 3D-принтері, деталі будуть зібрані разом, щоб сформувати єдине тіло.

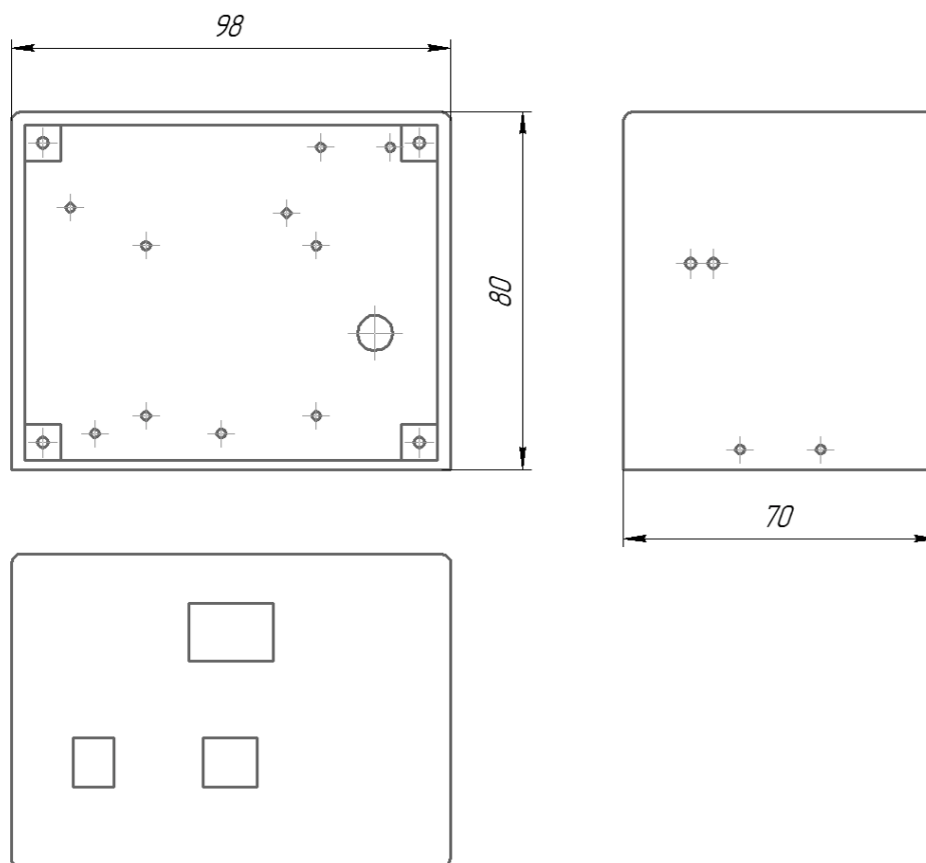


Рисунок 2.7 – Креслення корпусу

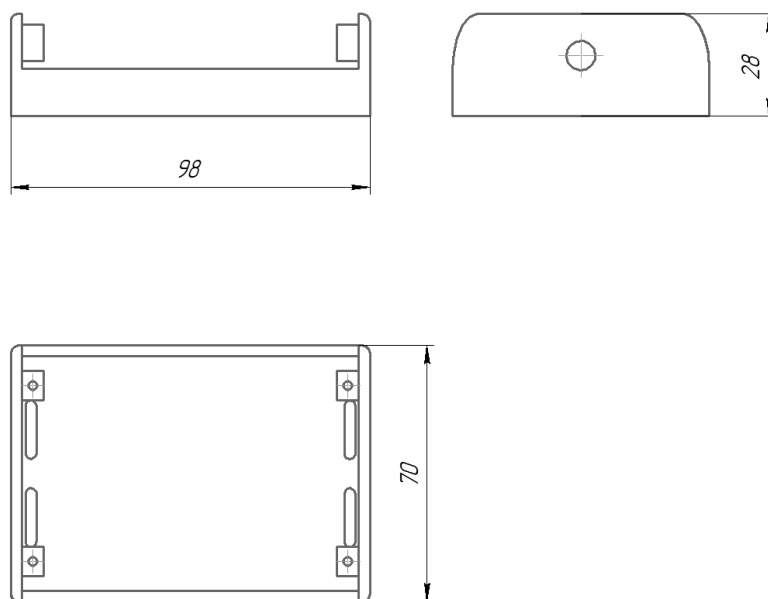


Рис 2.8 – Креслення корпусу акумуляторів

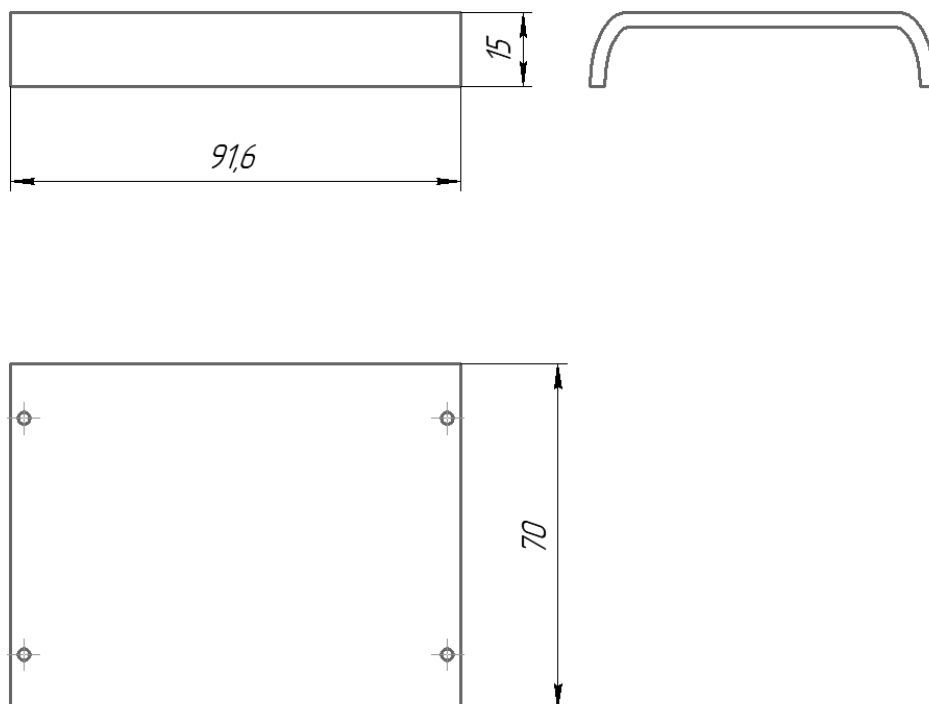


Рис 2.9 – Креслення кришки корпусу акумуляторів

Є головний корпус, до складу якого входять:

- місця, де болтами будуть кріпитися дошки, а згодом до них будуть кріпитися двигуни;
- отвори, виготовлені відповідно до специфікацій протоколу Arduino;
- залежно від з'єднувачів проводів допускається наявність кількох або більше отворів.

У корпусі акумулятора знаходяться:

- отвори для кріплення дроту;
- вуха, щоб закріпити кришку.

У передній частині корпусу акумулятора є отвори, через які можна прикріпити його до корпусу.

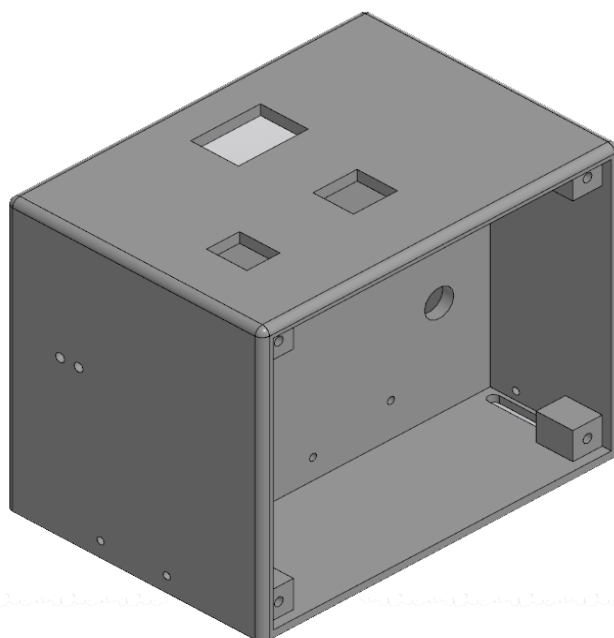


Рисунок 2.10 – 3D-модель корпусу

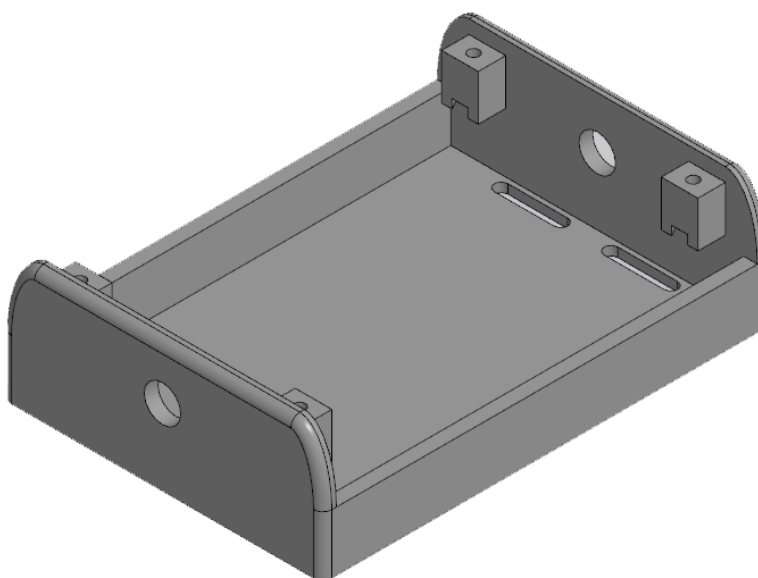


Рисунок 2.11 – 3D-модель корпусу акумуляторів

На рисунку 2.11 показана тривимірна ізометрична модель корпусу батареї.

На рисунку 2.12 показана тривимірна ізометрична 3D-модель кришки корпусу батареї.

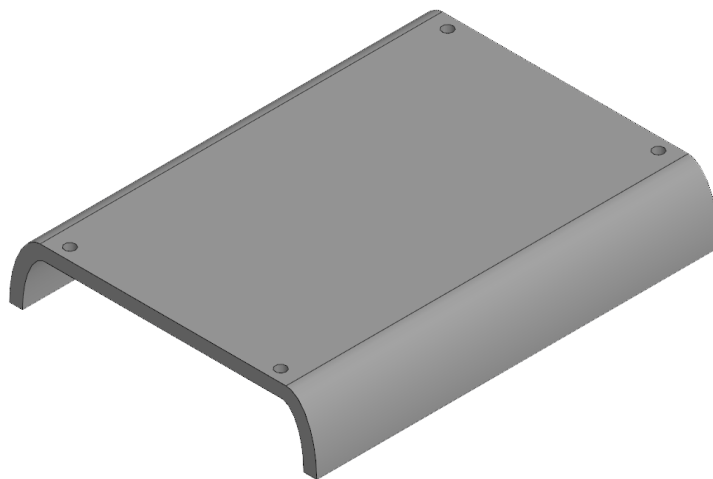


Рисунок 2.12 – 3D-модель кришки корпусу акумуляторів

Також для уточнення було створено креслення всіх трьох частин. Композиційний малюнок зображено на рисунку 2.13.

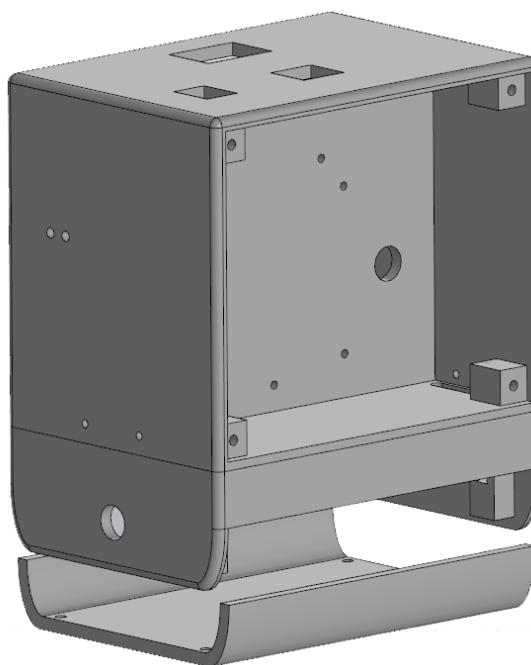


Рисунок 2.13 – Збиральне креслення

Рисунок 2.10. показує тривимірну модель первинного тіла в ізометричному вигляді.

На рисунку 2.11 показана тривимірна ізометрична модель корпусу батареї.

На рисунку 2.12 показана тривимірна ізометрична 3D-модель кришки корпусу батареї.

Щоб захистити електричні компоненти від зовнішньої загрози, корпус буде покритий з обох сторін тонкими пластиковими пластинами, які будуть кріпитися болтами. Пластик був обраний прозорим, що дозволяє користувачеві роботизованої платформи спостерігати за конкретними деталями використовуваних електричних схем і перемиканням компонентів.

## 2.5 Висновки до другого розділу

У цьому розділі було розроблено стратегію автоматизації та те, як двоколісна самобалансуюча машина перемикається між різними напрямками. Розглянуто та обрано основні складові реалізації проекту. Крім того, була створена 3D-модель корпусу, яка пізніше буде надрукована та використана в роботі.

### 3 МАТЕМАТИЧНА МОДЕЛЬ РОБОТА-БАЛАНСИРА

#### 3.1 Аналіз об'єкта математичного моделювання

Перевернутий маятник точно описує механічну природу роботизованої системи, що самобалансується; також описані механічні складові системи. Жорсткий стрижень без тертя, прикріплений до жорсткої каретки, що рухається в одному напрямку. [29-35]

Спрощення полягає в тому, що динаміку колісної бази можна прирівняти до динаміки візка, що рухається по рівній поверхні без тертя. Це задокументовано як опис моделі в підручнику Mathworks Inverted Pendulum. Звужена версія моделі зображена на рисунку 3.1.

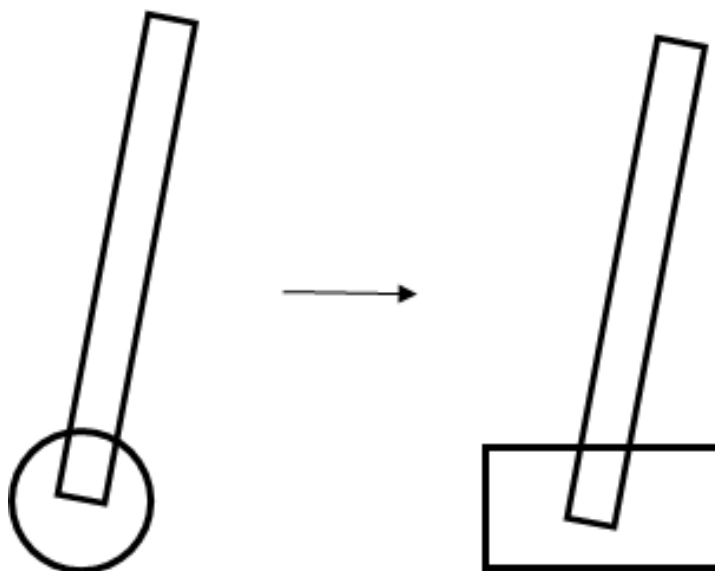


Рисунок 3.1 – Спрощена модель перевернутого маятника

Щоб було краще зрозуміло, ступінь свободи маятника обмежена тільки одним напрямком: кутом  $\theta$ , який рухається в площині  $xy$ . Це представлено на рисунку 3.2.

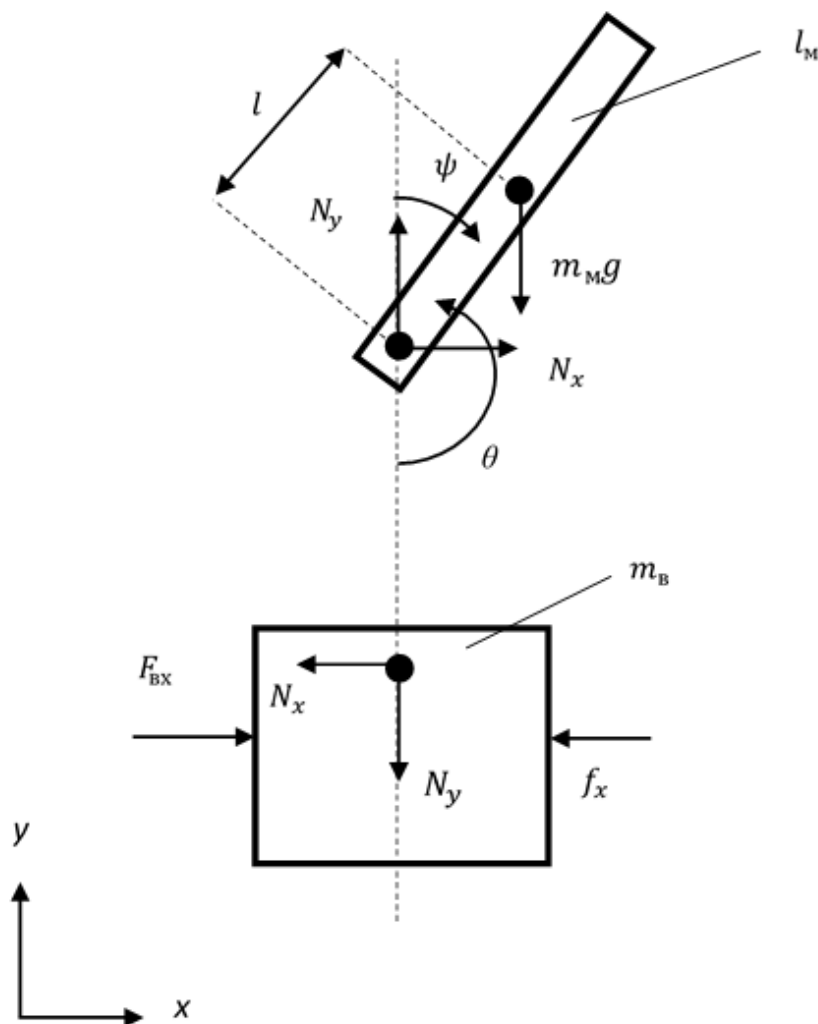


Рисунок 3.2 – Фізичні сили, що діють на модель перевернутого маятника:  $F_{\text{BX}}$  – сила що прикладена,  $m_{\text{B}}$  – маса платформи,  $f_x$  – коефіцієнт тертя основи;  $N_x$  – сила опору поміж платформою та маятником в напрямку  $x$ ;  $N_y$  – сила опору поміж платформою та маятником в напрямку  $y$ ;  $m_{\text{M}}$  — вага маятника;  $l$  – відстань від поточної точки до центру маси маятника;  $\theta$  - кут між вертикальною віссю та маятником;

### 3.2 Теоретичні засади керування перевернутим маятником

Повне рівняння, потрібне для опису візка, це рівняння, яке знаходить суму сил в напрямку руху. Це рівняння показане у вигляді (3.1).

$$F_{\text{BX}} = m_{\text{B}} \cdot x'' + f \cdot x' + N_x \quad (3.1)$$

де,  $F_{\text{ВХ}}$  – сила докладена до платформи,  $m_{\text{в}}$  – маса платформи,  $f_x$  – коефіцієнт тертя з основою, а  $N_x$  – сила опору між платформою та маятником в напрямку  $x$ .

Повна сила, яка діє на маятник у напрямку, описується рівнянням (3.2).

$$N_x = m_{\text{м}} \cdot x'' + m_{\text{м}} \cdot l \cdot \cos(\theta) - m_{\text{м}} \cdot l \cdot (\theta')^2 \cdot \sin(\theta), \quad (3.2)$$

де,  $m_{\text{м}}$  — вага маятника;  $l$  — відстань до центра маси маятника;  $\theta$  - кут між вертикальною віссю та маятником.

Повна сила, перпендикулярна до маятника, описується рівнянням (3.3).

$$\begin{aligned} N_y \cdot \sin(\theta) + N_x \cdot \cos(\theta) - m_{\text{м}} \cdot g \cdot \sin(\theta) = \\ = m_{\text{м}} \cdot l \cdot \theta'' + m_{\text{м}} \cdot x'' \cdot \cos(\theta), \end{aligned} \quad (3.3)$$

де,  $N_y$  — сила опору між платформою та маятником в напрямку  $y$ ;  $g$  — прискорення вільного падіння.

Розповсюдження крутного моменту через центр маси маятника показано у рівнянні (3.4).

$$-N_y \cdot \sin(\theta) - N_x \cdot l \cdot \cos(\theta) = I_{\text{м}} \cdot \theta'' \quad (3.4)$$

Із рівнянь (3.1), (3.2), (3.3), (3.4) і фізичних сил показаних на рисунку 3.2 було отримано узагальнені динамічні рівняння (3.5) і (3.6).

$$\begin{aligned} F_{\text{ВХ}} = (m_{\text{в}} + m_{\text{м}}) \cdot x'' + f \cdot x' + \\ + m_{\text{м}} \cdot l \cdot \theta'' \cdot \cos(\theta) - m_{\text{м}} \cdot l \cdot (\theta')^2 \cdot \sin(\theta) \end{aligned} \quad (3.5)$$

$$(I_{\text{м}} + m_{\text{м}} \cdot l^2) \cdot \theta'' + m_{\text{м}} \cdot g \cdot l \cdot \sin(\theta) = -m_{\text{м}} \cdot l \cdot x'' \cdot \cos(\theta), \quad (3.6)$$

де,  $m_B$  і  $m_M$  – вага візка і маятника відповідно;  $l$  – відстань до центру мас маятника;  $\theta$  – кут між маятником і віссю ординат;  $f$  – коефіцієнт тертя.

### 3.3 Виведення математичної моделі самобалансуючого робота

Рівняння (3.5) і (3.6) є просто простими твердженнями для положення  $x$  і кута відхилення  $\psi$  передатної функції. Наближено лінеаризуйте рівняння для передатної функції. Дуже точна точка рівноваги - коли маятник досягає вертикальності. Цей кут має бути кутом, який зображує відхилення маятника від положення рівноваги. Рівняння (3.7), (3.8) і (3.9) мають невеликі похибки, які будуть пристосовані до нелінійних рівнянь (3.5) і (3.6). [29-35]

$$\cos(\theta) = \cos(\pi + \psi) \approx -1 \quad (3.7)$$

$$\sin(\theta) = \sin(\pi + \psi) \approx -\psi \quad (3.8)$$

$$(\theta')^2 = (\psi')^2 \approx 0 \quad (3.9)$$

Лінеаризація рівнянь (3.7), рівнянь (3.8) і рівнянь (3.9) з рівняннями (3.5) і рівняння (3.6) призводить до приблизно лінійних рівнянь (3.10) і (3.11), які раніше давали більші загальні зусилля на керування .

$$(I_M + m_M \cdot l^2) \cdot \psi'' - m_M \cdot g \cdot l \cdot \psi = m_M \cdot x'' \quad (3.10)$$

$$u_{BX} = (m_B + m_M) \cdot x'' + f \cdot x' - m_M \cdot l \cdot \psi'' \quad (3.11)$$

Передатні функції (3.10) і (3.11) отримані за допомогою перетворення Лапласа. При цьому отримано рівняння (3.12) і (3.13). Те саме записується у вигляді рівнянь (великими буквами) для цих рівнянь.

$$(I_M + m_M \cdot l^2) \cdot \psi(s) \cdot s^2 - m_M \cdot g \cdot l \cdot \psi \cdot (s) = m_M \cdot l \cdot X(s) \cdot s^2 \quad (3.12)$$

$$U_{BX} = (m_B + m_M) \cdot X(s) \cdot s^2 + fX(s) \cdot s - m_M \cdot l \cdot \psi(s) \cdot s^2 \quad (3.13)$$

Він визначається як функція передачі відношення одного входу до одного виходу; таким чином, ми повинні виключити вхідні дані з рівняння (3.12). Дозвольте мені вивести рівняння (3.14) для вас.

$$X(s) = \left[ \frac{I_M + m_M \cdot l^2}{m_M \cdot l^2} - \frac{g}{s^2} \right] \cdot \psi(s) \quad (3.14)$$

В результаті підстановки (3.14) у (3.12) получим рівняння (3.15).

$$U_{\text{ВХ}}(s) = (m_B + m_M) \cdot \left[ \frac{I_M + m_M \cdot l^2}{m_M \cdot l^2} - \frac{g}{s^2} \right] \cdot \psi(s) \cdot s^2 + \\ + f \cdot \left[ \frac{I_M + m_M \cdot l^2}{m_M \cdot l^2} - \frac{g}{s^2} \right] \cdot \psi(s) \cdot s - m_M \cdot l \cdot \psi(s) \cdot s^2 \quad (3.15)$$

Якщо рівняння (3.15) перетворити, ми отримаємо функцію передачі як відношення між  $\Psi(s)$  і  $U_{\text{ВХ}}(s)$ , як представлено в (3.16).

$$\psi(s) = \frac{\frac{m_M \cdot l}{q} \cdot s}{s^3 + \frac{f \cdot (I_M + m_M \cdot l^2)}{q} \cdot s^2 - \frac{(I_M + m_M) \cdot m_M \cdot g \cdot l}{q} \cdot s - \frac{f \cdot m_M \cdot g \cdot l}{q}} \cdot U_{\text{ВХ}}(s), \quad (3.16)$$

де:

$$q = [(m_B + m_M) \cdot (I_M + m_M \cdot l^2) - (m_M \cdot l)^2] \quad (3.17)$$

Передатну функцію, яка вказує на позицію візка  $X(s)$ , показано у рівнянні (3.18).

$$\psi(s) = \frac{\frac{(I_M + m_M \cdot l^2) \cdot s^2 - m_M \cdot g \cdot l}{q}}{s^4 + \frac{f \cdot (I_M + m_M \cdot l^2)}{q} \cdot s^3 - \frac{(m_B + m_M) \cdot m_M \cdot g \cdot l}{q} \cdot s^2 - \frac{f \cdot m_M \cdot g \cdot l}{q} \cdot s} \cdot U_{\text{ВХ}}(s) \quad (3.18)$$

де:  $\psi$  – відхилення кута маятника;  $X$  – координати візка по осі абсцис.  $F_{BX}$  з виразу (3.5) було замінено на більш узагальнене зусилля керування  $U_{BX}$ .

Великі літери позначають перетворення рівнянь Лапласа в часовій області. Зроблено висновок, що для всіх позитивних значень параметрів система є внутрішньо нестабільною, оскільки вона має полюс у відповідній напівплощині, що показано на графіку нульового полюса на рисунку 3.3 нижче.

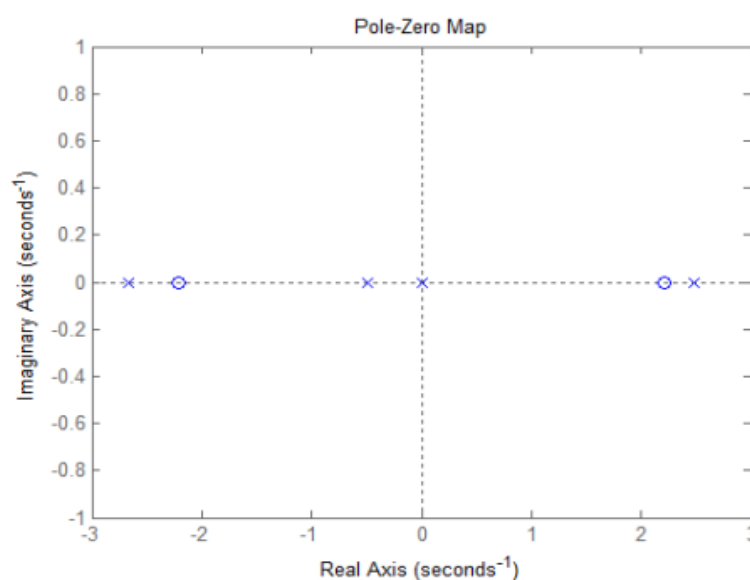


Рисунок 3.3 – Графік нулів і полюсів системи перевернутого маятника

Така конфігурація полюсів і нулів є цілком розумною, оскільки це підказує інтуїтивне уявлення про стабільність маятника.

Рівняння диференціального типу були переведені в лінійну форму. Цю систему також можна візуалізувати як простір станів з параметрами.  $x'$ ,  $x''$ ,  $\psi'$  та  $\psi''$  [2]. Систему у просторі станів представлено у формулі (3.19).

$$\begin{bmatrix} x' \\ x'' \\ \psi' \\ \psi'' \end{bmatrix} = A \cdot \begin{bmatrix} x \\ x' \\ \psi \\ \psi' \end{bmatrix} + B \cdot u_{BX} \quad (3.19)$$

$$y = C \cdot u_{BX} \quad (3.20)$$

Де  $u_{\text{BX}}$  – це сила керування в часовій області. Параметри станів А, В і С показано у формулах (3.21), (3.22) і (3.23).

$$A = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \frac{f \cdot (I_M + m_M \cdot l^2)}{I_M \cdot (m_B + m_M) \cdot m_M \cdot m_B \cdot l^2} & \frac{(m_M)^2 \cdot g \cdot l^2}{I_M \cdot (m_B + m_M) \cdot m_M \cdot m_B \cdot l^2} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & \frac{-m_M \cdot l \cdot f}{I_M \cdot (m_B + m_M) \cdot m_M \cdot m_B \cdot l^2} & \frac{m_M \cdot g \cdot l \cdot (m_B + m_M)}{I_M \cdot (m_B + m_M) \cdot m_M \cdot m_B \cdot l^2} & 0 \end{bmatrix} \quad (3.21)$$

$$B = \begin{bmatrix} 0 \\ \frac{I_M + m_M \cdot l^2}{I_M \cdot (m_B + m_M) \cdot m_M \cdot m_B \cdot l^2} \\ 0 \\ \frac{m_M \cdot l}{I_M \cdot (m_B + m_M) \cdot m_M \cdot m_B \cdot l^2} \end{bmatrix} \quad (3.22)$$

$$C = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \end{bmatrix} \quad (3.23)$$

Якщо детермінант матриці  $S \neq 0$ , ранг матриці відповідає порядку системи, тож система є повністю керованою Матрицю показано у формулі (3.24):

$$S = [B \quad AB \quad A^2B \quad A^3B] \quad (3.24)$$

Подібним чином, система є показаною, якщо матриця О має повний ранг, де О представляється як:

$$O = \begin{pmatrix} C \\ CA \\ CA^2 \\ CA^3 \end{pmatrix} \quad (3.25)$$

Ранги S і O підтверджують, що для всіх додатних значень  $l$ ,  $I_{\text{pend}}$ ,  $m_{\text{cart}}$ ,  $m_{\text{pend}}$  і  $g$  система є контрольованою та спостережуваною, навіть якщо не брати до уваги розташування  $x$ . Ці дві країни можуть використовувати кілька методів для регулювання системи у випадку, якщо  $x$ -місце не розглядається. Серед можливих методів керування – ПІД-регулятор [35]. У результаті обидві

країни мають встановити кут відхилення та x-позицію. Каскадне ПІД-регулювання може бути реалізоване відповідно до Leung і Glad [35].

Інший підхід полягає в тому, щоб якимось чином застосувати управління простором стану. Якщо стани системи відомі, тоді вибір внутрішнього сигналу може ґрунтуватися на стані всередині системи, який безпосередньо пов'язує простір станів. Опис простору містить інформацію про минулу, теперішню та майбутню поведінку системи за Гладом і Люнгом [2].

Статичні значення самобалансуючої машини наведені в таблиці 4.1.

Таблиця 4.1 – Статичні параметри робота-балансир

Параметр	Значення
$m_B$	0,568 кг
$m_M$	1,277 кг
$I_M$	0,065 кг·м <sup>2</sup>
$l$	0.179 м

З статичними параметрами, які було заведено в MATLAB модель, параметри станів виглядатимуть таким чином:

$$\begin{pmatrix} x' \\ x'' \\ \psi' \\ \psi'' \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & -0,007 & 3,363 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & -0,017 & 30,47 & 0 \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} x \\ x' \\ \psi \\ \psi' \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} 0 \\ 0,763 \\ 0 \\ 1,704 \end{pmatrix} \cdot u_{\text{вх.}} \quad (3.26)$$

$$y = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} x \\ x' \\ \psi \\ \psi' \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \end{pmatrix} \cdot u_{\text{вх.}} \quad (3.27)$$

### 3.4 Динамічні характеристики

Особливості реалізації алгоритмів керування бібліотекою PID Control LabVIEW.

Пакет програм LabVIEW (National Instruments (США), популярний серед автоматизаторів) дозволяє використовувати як одно-, так і дворівневі ієрархічні схеми керування. У першому випадку шляхом встановлення плат USO у слоти розширення комп'ютера або підключення модулів збору даних до комунікаційного порту додатки виконуються за допомогою LabVIEW ((автономного) на платформах Windows або Linux). Другий шлях — це реалізація прямих завдань управління на нижньому рівні через PLC-контролери, а на традиційному верхньому рівні ACS — у поєднанні з програмним модулем DSC використовувати LabVIEW лише як SCADA.

У той час як стандартні інженерні мови вже давно розроблені та широко використовуються для програмування ПЛК, професійні програмісти зазвичай потрібні для програмування завдань керування на комп'ютерах однорівневих систем. Що робити автоматизаторам, які не володіють засобами програмування на мовах високого рівня, але знають вимоги та особливості вирішення завдань автоматизації об'єкта керування?

Програмування в графічному середовищі LabVIEW подібне до основних інженерних мов — переважно FBD. Як і в роботі з блоками на функціональній схемі, засоби LabVIEW також забезпечують швидкий і надійний синтез системи управління. Функціональні блоки бібліотеки — це набори функцій, явно розроблені для створення програм регулювання процесу в середовищі LabVIEW. [29-35]

Найбільш поширеним у промисловості є ПІД (пропорційно-інтегрально-диференціальний) алгоритм керування, наприклад, для керування теплотехнічними, гідродинамічними та масообмінними процесами. Регульований параметр розглядається як змінна процесу (температура, тиск, витрата). Завдання вводиться оператором, тобто необхідне значення змінної процесу. Значення керуючого впливу визначається ПІД-регулятором, наприклад, потужністю опалення або положенням регулюючого клапана. Це значення впливає на змінну процесу та змушує її приймати значення уставки.

Стандартний ПІД-регулятор LabVIEW, значення помилки (e) визначається як порівняння між заданим значенням (SP) і значенням змінної процесу (PV)

Часовий характер отриманої моделі очевидний на рисунку 3.4. З появи тимчасового атрибута стає очевидним, що система є непередбачуваною, оскільки система не має постійного значення. Цей тип атрибута ймовірний, оскільки він нагадує фізичну поведінку перевернутого маятника (і, отже, робота-балансира), який не може перебувати в стані рівноваги без контрольного механізму, який урівноважує систему.

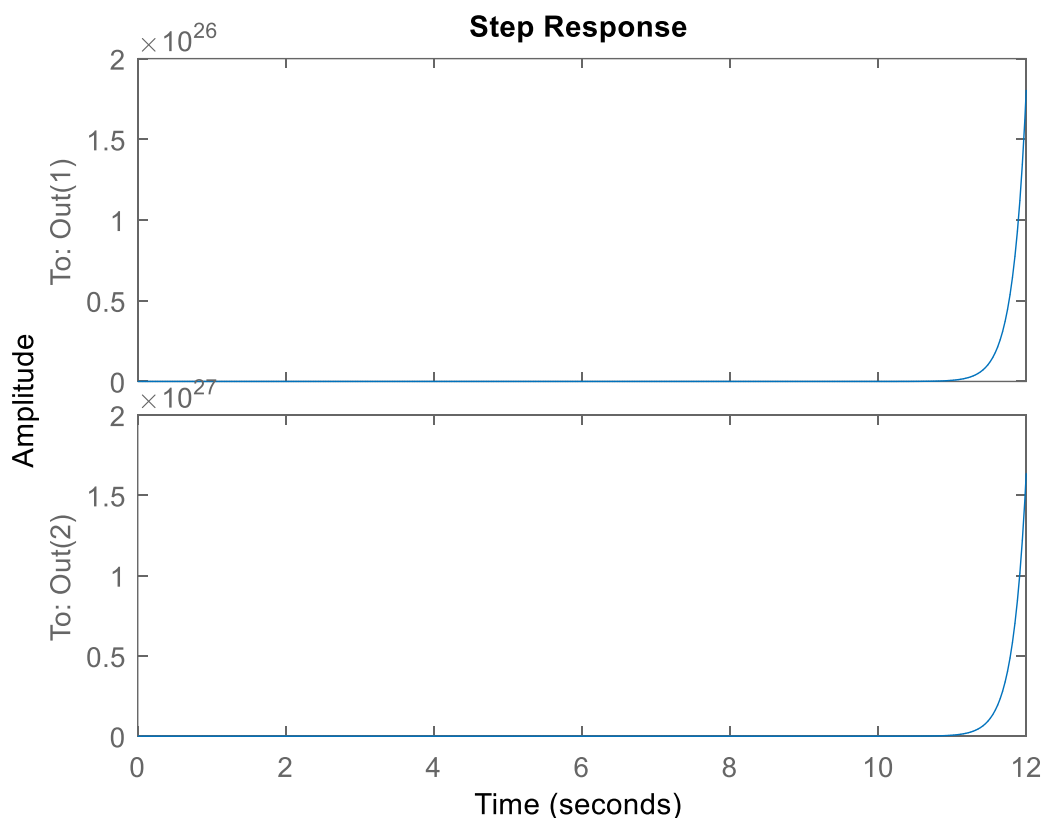


Рисунок 3.4 – Характеристика перехідна робота-балансира

На рисунку 3.5 показано імпульсну характеристику моделі.

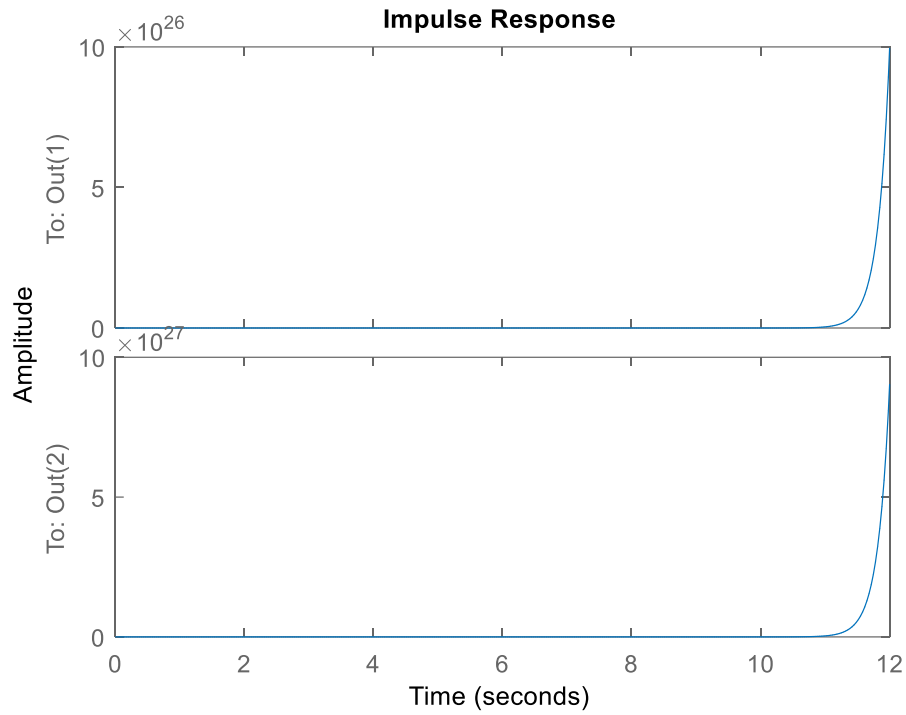


Рисунок 3.5 – Характеристика імпульсна моделі

На рисунку 3.6. показано логарифмічну амплітудно-фазову частотну характеристику.

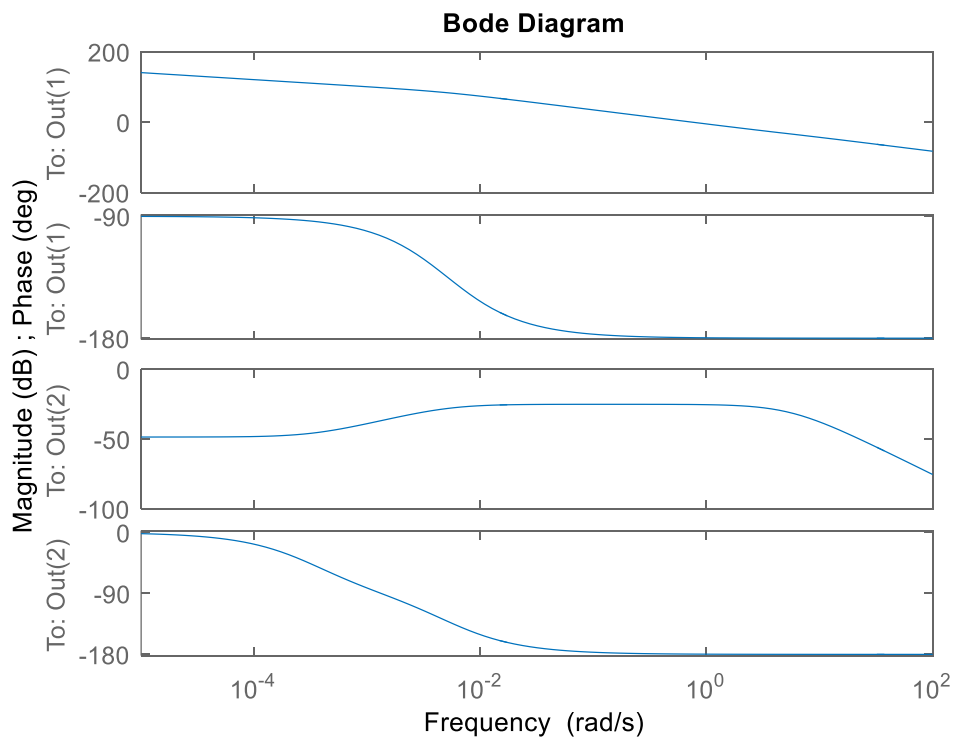


Рисунок 3.6 – ЛАФЧХ моделі

У фактичних системах управління зміни болю, як правило, набагато більші та різкіші, ніж збурення, що виникають у вигляді невеликих відхилень контрольованого значення від заданої точки завдання. Можливим недоліком налаштування ПІД-регулятора на високу чутливість до робочих збоїв є те, що деякі компанії не приймають заявку, тому що регульоване значення може коливатися з можливим виходом за межі стабільності. З іншого боку, висока чутливість до завдання може відносно сповільнити перешкоди. Якщо  $\beta$  менше одиниці, то стрибки чутливості до завдання зменшуються, а чутливість до робочих порушень не змінюється. Цей фактор відноситься до алгоритму «Двох ступенів свободи» щодо PID як індексу чутливості до завдання. Він приймає значення від 0 до 1. Наприклад, якщо експлуатаційні характеристики стабільності більш значні, тоді  $\beta$  дорівнює 0. Отже, якщо змінна процесу має швидко відслідковувати задане значення, тоді також  $\beta = 1$ . [29-35]

### 3.5. Висновки до третього розділу

У цьому розділі досліджувалися фізичні властивості перевернутого маятника, що призвело до формулювання рівняння динаміки. Рівняння динаміки було спрощено. Перетворення Лапласа було застосовано для лінеаризованих рівнянь для отримання функцій, що стосуються двох вхідних даних. Система також була виставлена на державному просторі. Побудовано перехідну, імпульсну та логарифмічну частотну характеристики амплітуди. З вигляду перехідної поведінки та положення полюсів і нулів було зроблено висновок, що система є внутрішньо нестійкою.

## 4 СИНТЕЗ СИСТЕМИ РЕГУЛЮВАННЯ

### 4.1 Синтез системи регулювання на основі ПІД-регулятора

Синтез АСУ – це регламентоване обчислення для знаходження, по можливості, раціональної структури системи та встановлення оптимальних значень параметрів окремих її ланок. В даний час існують різні думки щодо сутності синтезу.

Його можна розглядати як різновид варіаційного прикладу задачі та розробити систему, в якій ця мінімальна теоретична похибка гарантована для даного набору робочих умов (керування та заважаючі впливи, перешкоди, обмеження робочого часу тощо).

Синтез також можна розглядати як інженерну задачу, яка завершується побудовою системи, здатної забезпечити реалізацію тих технічних вимог, які для неї встановлені. Передбачається, що з безлічі можливих рішень інженер вибере ті — оптимальні з точки зору наявності заданих умов і вимог щодо таких речей, як розміри, вага, простота, надійність і т.д.

Іноді поняття інженерного синтезу надається ще більш вузького значення, і розглядається синтез, який прагне визначити вид і параметри виправлень або додаткових елементів, які необхідно додати до деякої фіксованої частини системи (об'єкта) за допомогою пристрою керування, щоб забезпечити певний заданий рівень динамічних характеристик.

При технічному синтезі системи автоматичного керування необхідно, по-перше, забезпечити належну точність і, по-друге, привести перехідні процеси до прийняттого стану.

У більшості випадків першим завданням буде знайти необхідний загальний коефіцієнт передачі відкритої системи та, якщо необхідно, тип засобів керування, які підвищать точність системи (комбіновані засоби керування тощо). Це, як правило, можна зробити шляхом визначення похибок

у звичайних режимах, враховуючи рівень критеріїв точності, наведених у розділі 8. Проте розв'язок цієї задачі зазвичай не містить будь-яких принципово складних або обчислювальних труднощів, оскільки ці критерії точності більш ніж прості для практичного застосування. Якщо проблема складна, можливо, доведеться використовувати процедуру моделювання. Вирішити це стає відносно легко, оскільки потрібно налаштувати лише кілька значень параметрів. У найпростіших випадках потрібно встановити тільки коефіцієнт пропускання відкритої системи.

Друга проблема — гарантія допустимих перехідних процесів — майже завжди складніша через велику різноманітність параметрів і розпливчасте уявлення про те, як вирішити проблему демпфування системи. Тому в більшості випадків існуючі інженерні підходи дозволяють вирішити лише другу задачу, автори вважають, що забезпечити потрібну точність досить легко, ґрунтуючись на застосуванні наявних критеріїв точності, і немає необхідності в їх подальшому підвищенні.

В даний час для синтезу систем автоматичного управління все ширше застосовуються обчислювальні машини, що дозволяють повністю або частково моделювати систему, що проектується. При використанні такого моделювання фактично стає можливим повноцінно досліджувати вплив різноманітних факторів нелінійності, залежність параметрів від часу тощо.

Але комп'ютерне моделювання не може обійтися без методів розрахункового проектування, які багато в чому дозволяють в принципі поставити питання в загальні рамки і виділити з ряду рішень одне оптимальне. Отже, навіть з огляду на розвиток і популяризацію методів машинної компіляції, теорія повинна володіти власними спеціальними методами, які, підтримуючи моделювання, могли б на практиці служити реалізації оптимального рішення шляхом узагальнення шляхів його досягнення. [37-45]

Для створення системи управління використовувався Matlab.

Аспект реалізації ПД-регулятора LabVIEW: Алгоритм корекції інтегральної суми має властивості анти-лагу та недекларування при

перемиканні з автоматичного режиму керування на ручний і навпаки. Зменшення і перевищення — раптові зміни результату при переході з автоматичного режиму в ручний або навпаки, а також при зміні інших налаштувань контролера.

За замовчуванням такі діапазони вказуються у відсотках, хоча можна використовувати фактичні одиниці вимірювання. диференціальний час у хвилинах. значення струму. У режимі ручного керування вихід контролера безпосередньо пов'язаний із значенням, яке ви вводите.

Вставлення віртуального інструменту "PID.vi" в поле редактора діаграм достатньо для синтезу системи керування за допомогою інструментів бібліотеки керування PID LabVIEW, після чого для нього потрібно встановити відповідні змінні введення-виведення. Реалізації системи керування в режимі реального часу досягаються шляхом підключення входів і виходів контролера до панелей приладів, зовнішніх модулів введення/виведення або стандартних портів.

Усі віртуальні інструменти в бібліотеці ПІД-регулювання суворо залежать від часу. Це значення можна встановити за допомогою параметра значення часу циклу або внутрішнього механізму таймера. Якщо значення часу циклу менше або дорівнює нулю, часові параметри підраховуються при кожному виклику контролера. При цьому зараховується різниця в часі з попереднім дзвінком. Якщо він викликається з циклу та використовується один із таймерів LabVIEW, ви можете наблизитися до реального часу. Найменше значення таймера для цього в Windows 95 або NT, Macintosh і Power Macintosh обмежено 1 мс. Те саме 55 мс для Windows 3.1. Оскільки він таким чином обмежений, PID не слід виконувати на частоті вище 5 Гц із значенням часу циклу, нижчим або рівним нулю. Якщо контролер не оновлює графіки, які повинні виконуватися на кожному циклі, то частоту можна розрахувати в кГц. Однак слід пам'ятати, що такі дії, як робота маніпулятора «миша» або зміна параметрів вікна, знижують швидкість, але уточнюють обчислення. [46-55]

Усі вищезазначені вхідні дані доступні в інструменті віртуальної бібліотеки головного ПІД-регулятора. Завдання полягає в цих чотирьох входах. Вхід «Параметри ПІД» — це кластер із трьох значень, які є коефіцієнтом пропорційності (діапазон дроселювання), часом інтегрування та часом диференціювання.

Конфігураційний кластер має ввести додаткові параметри. Цей вхід можна використовувати найчастіше. Один із параметрів у налаштуваннях має логічне значення та визначає вид значення пропорційного параметра: чи це коефіцієнт пропорційності ( $K_c$ ), чи діапазон дроселювання ( $R_B$ ). Відношення цих коефіцієнтів математично визначається як  $K_c = 100/R_B$ . За замовчуванням значення береться для діапазону дроселювання.

Параметр «затримка» може бути встановлений оператором на будь-яке бажане значення, утримуючи всі значення елементів керування на їхньому поточному значенні, або змінює логічне значення параметра «затримка», щоб зупинити керування, а потім повторно налаштувати контролер, щоб встановити вивести вручну. Діапазони також можуть бути встановлені для вихідних даних завдання та контролера (діапазон змінної процесу відповідатиме діапазону значень завдання). Значення за замовчуванням: 0-100% для завдання та #100-100% для контролю впливу. Однак значення можна змінити на одиниці, за допомогою яких вимірюються параметри моделі контуру керування. Параметр  $dt$  фіксує час циклу регулятора. Значення за замовчуванням -1 означає, що системний таймер використовується для обчислення інтегральних і диференціальних компонентів.

Вхід "повторити" - це спосіб фільтрації змінної процесу. Щоб цей процес діяв як процес фільтрації, його слід пов'язати з лічильником повторення циклу. Якщо вхід алгоритму "повторення" залишити непідключеним, тоді неможливо досягти фільтрації змінної процесу.

В якості регулятора було обрано ПІД-регулятор, оскільки він простий у налаштуванні та добре підходить для цієї мети. З результатів, отриманих для

параметрів ПІД-регулятора, у майбутній роботі буде використано більш складний регулятор.

За допомогою розширення Simulink розроблено замкнуту систему ПІД-регулятора. Система управління показана на рисунку 4.1.

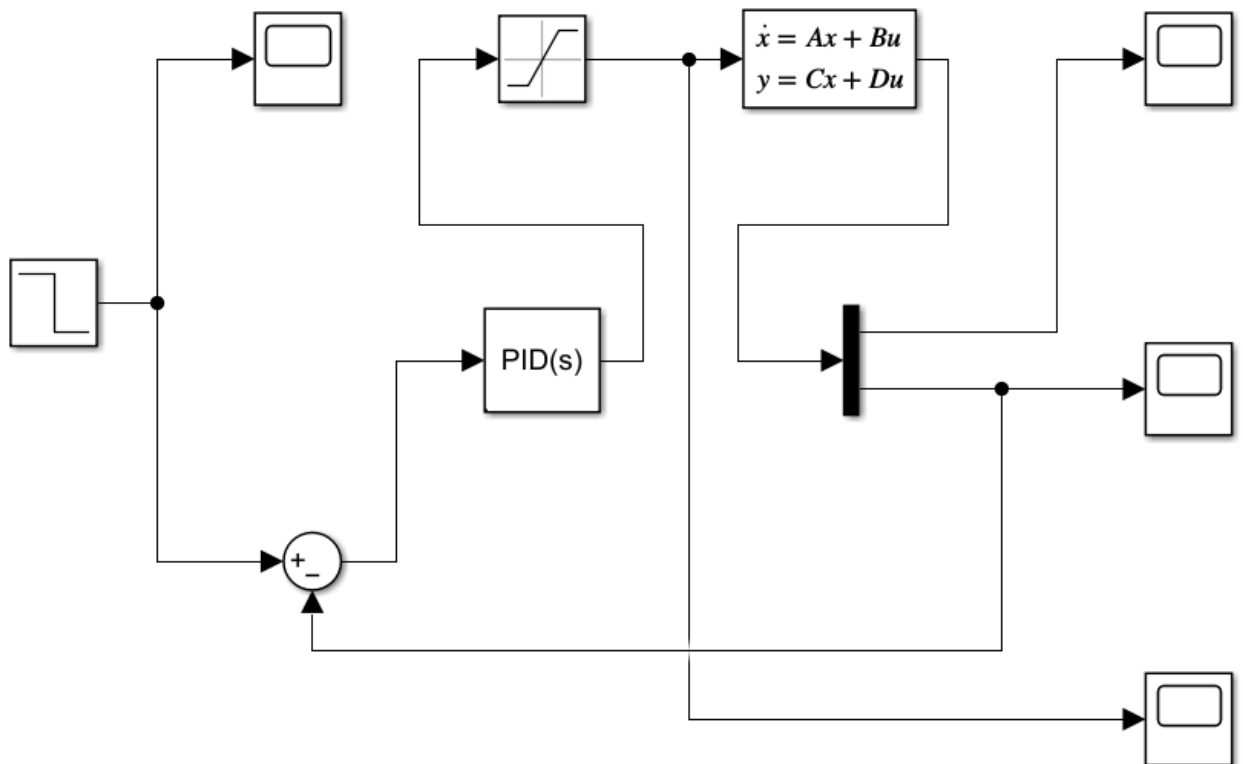


Рисунок 4.1 – Замкнута схема регулювання на базі ПІД-регулятора

Оскільки можливість керування не нескінченна, вона обмежена технічними можливостями (зокрема, потужністю двигунів). Для зниження можливості контролю в систему додали блок під назвою сатурація. Одиницею вимірювання керуючої дії є ньютон. Для електродвигунів на 12 В максимальне зусилля, якого можна досягти, становить приблизно 22 Н. Для визначення порогу точності регулятор автоматично налаштовувався за допомогою розширення PidTune для програмного забезпечення Matlab. На рисунку 4.2 представлено результат процесу. [56-65]

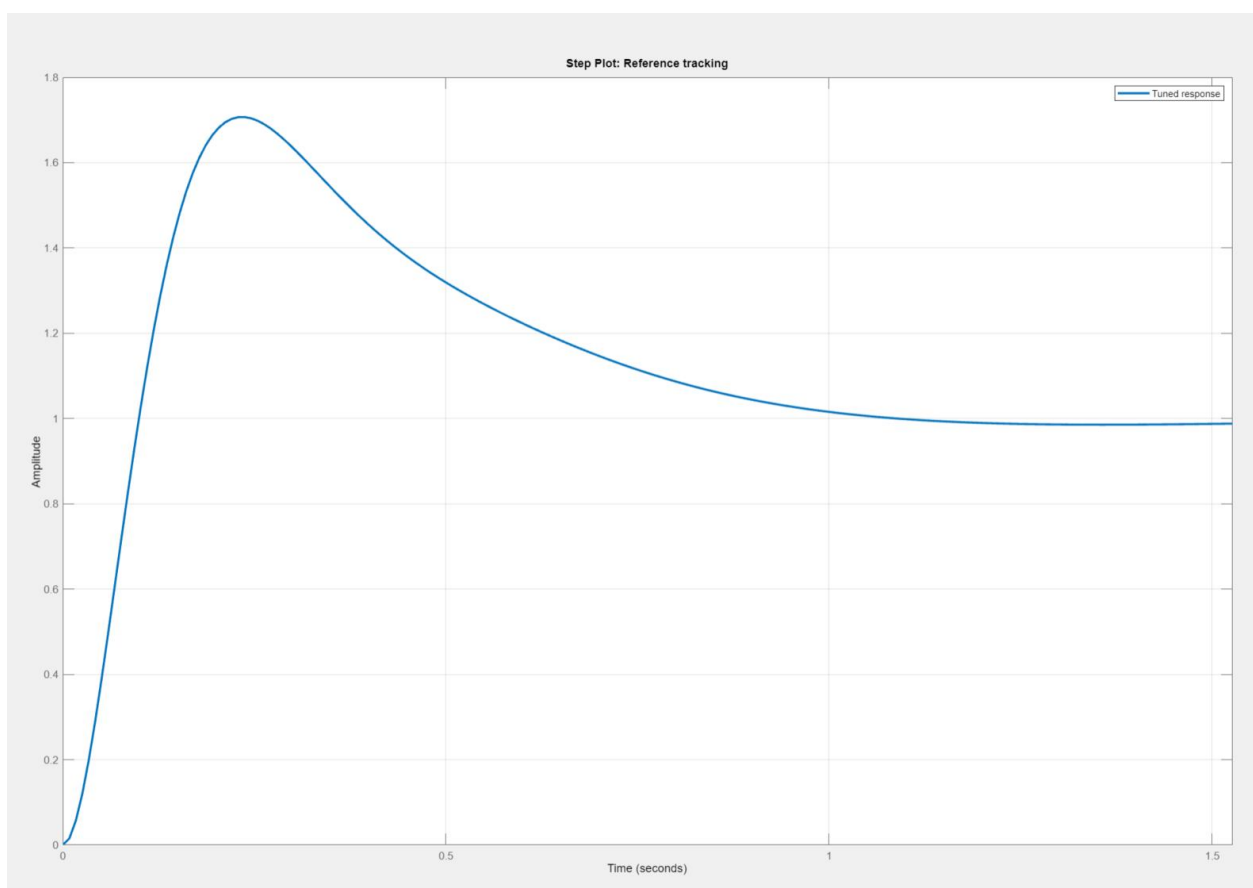


Рисунок 4.2 – Характеристика перехідна системи на бази ПІД-регулятора

У таблиці 4.1 вказані отримані значення налаштувань ПІД-регулятора за допомогою блоку PidTune.

Таблиця 4.1. Значення коефіцієнтів настройки ПІД-регулятора, отримані за допомогою блоку PidTune.

Коефіцієнт	Значення
P	125
I	186
D	14

Значення, що впливають з цього, були призначені компоненту PID. На рисунку 4.3 показана часова діаграма по каналу управління «керована сила на

куті маятника». Рисунок 4.4. представляє характеристики каналу керування «сила, положення візка по осі абсцис  $X$ ».

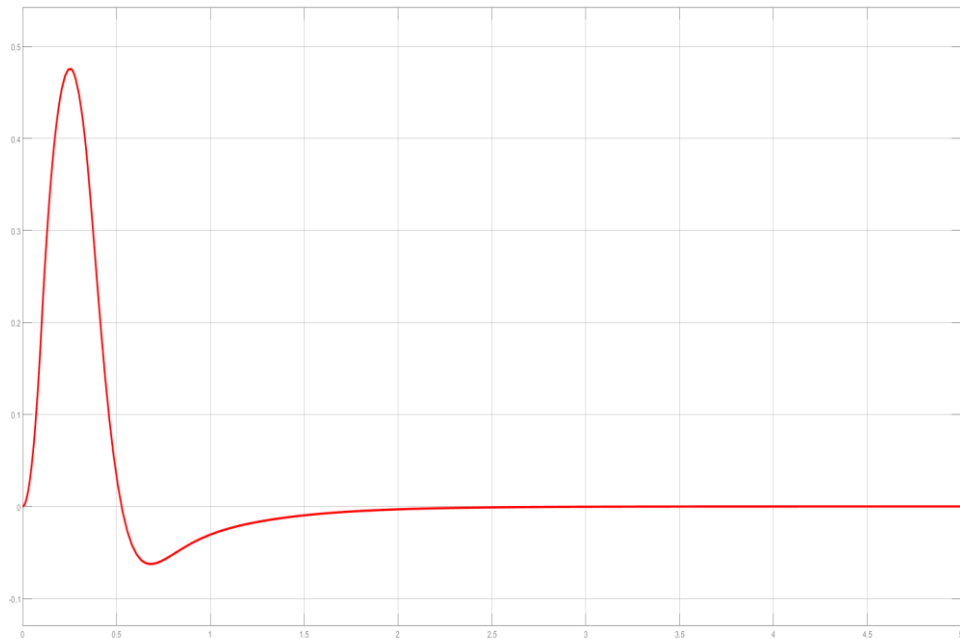


Рисунок 4.3 – Характеристика перехідна каналу керування «сила керування  $U_{вх}$  – зміна кута маятника  $\psi$ »

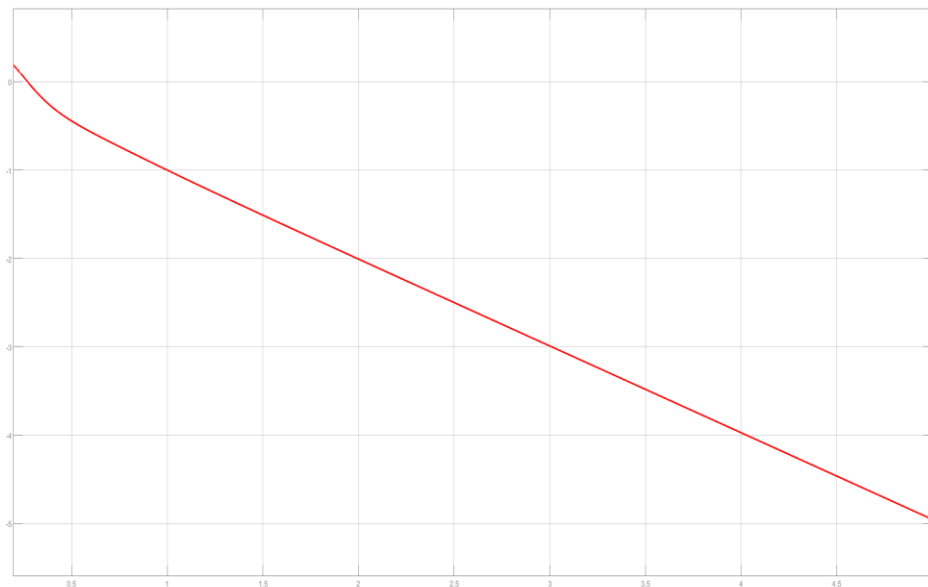


Рисунок 4.4 – Характеристика перехідна за каналом керування «сила керування  $U_{вх}$  – координата візка по горизонтальній вісі  $X$ »

З графіка 4.3 видно, що система керування повертала об'єкт у початкове положення щоразу, коли він віддалявся від цього положення на 1 градус. Для

цього на графіку спостерігаються певні коливання; це тому, що коли робот повертається назад у це початкове положення, він продовжує рухатися в напрямку керуючого ефекту через інерцію.

Як видно на графіку 4.4, за кутом відхилення для відновлення початкового положення робот слідує осі x-ординат. Оскільки зміна відхилення від площини, на якій лежить робот, не є основною проблемою керування, а також надзвичайно складно контролювати два параметри одночасно, цей канал не буде братися до уваги в подальших дослідженнях. [56-65]

Рисунок 4.5: Ефект під зовнішнім кутом 1 градус

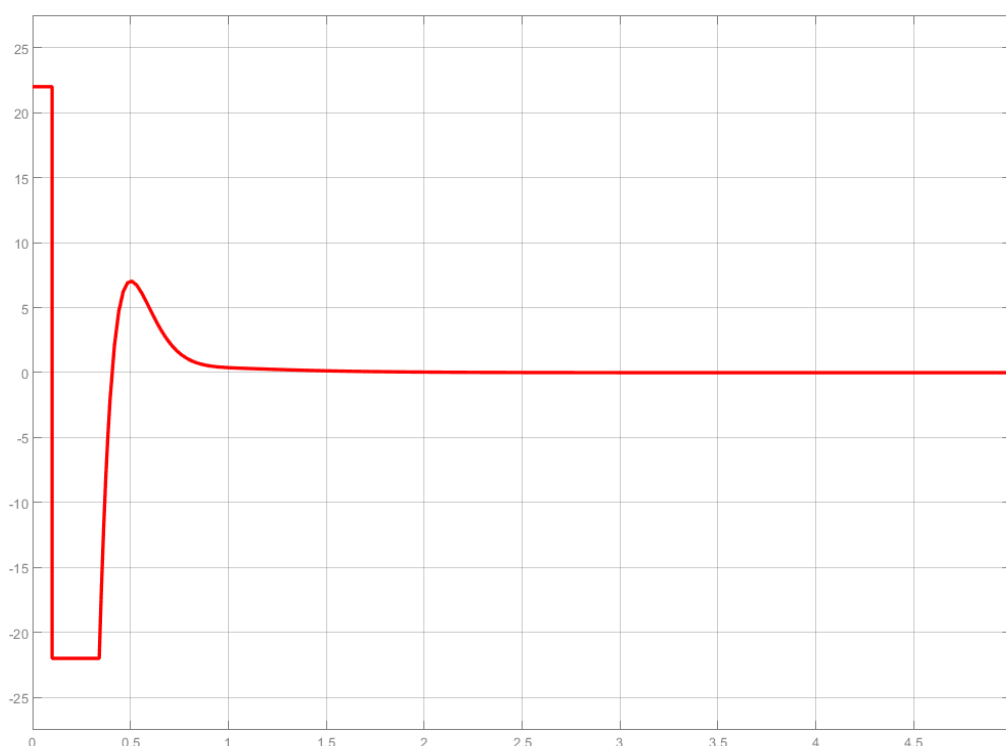


Рисунок 4.5 – Керуюча дія при відхиленні в 1°

Графік вище ілюструє діапазон регулювання 22 Н, а також зміну дії керування при зміні напрямку відхилення.

Щоб порівняти розбіжності, з якими може працювати регулятор, і різні перехідні процеси на різних відстанях, була побудована система порівняння, яка проілюстрована на рисунку 4.6.

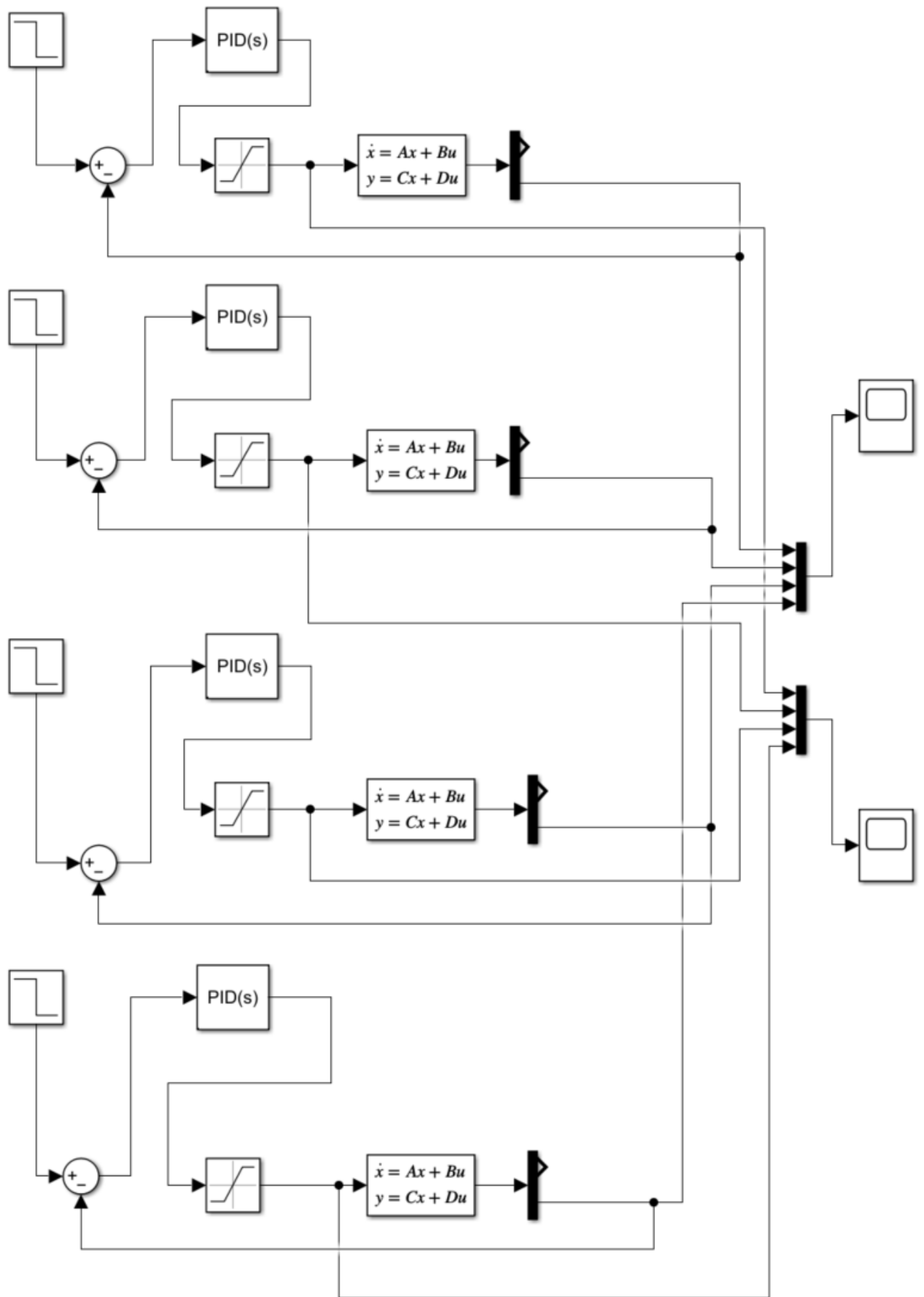


Рисунок 4.6 – Система для різних видів пристроїв

На рисунку 4.7 показані чотири характеристики перехідні для різних чотирьох кутів відхилення.

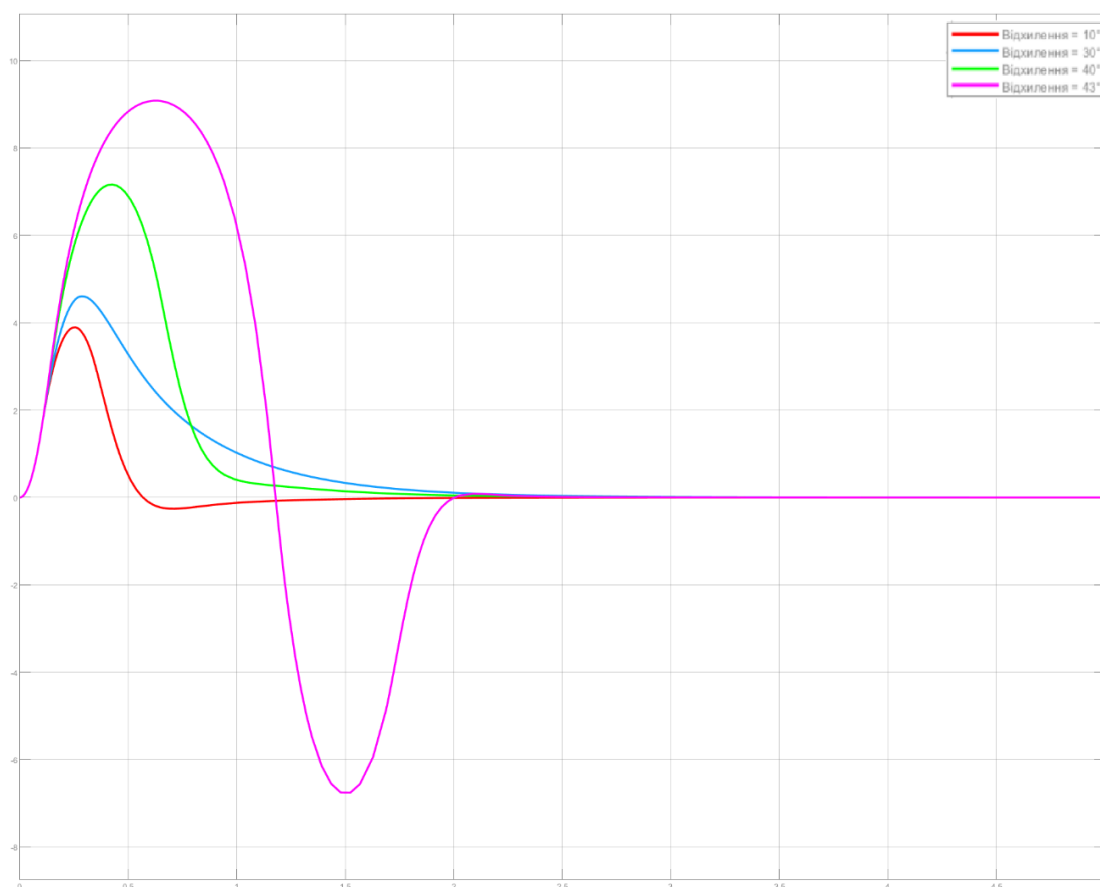


Рисунок 4.7 – Порівняння перехідних характеристик для різних кутів відхилення

На рисунку 4.8 показано характеристики перехідні для різних кутів відхилення при порівнянні керуючих дій регулятора. На рисунку 4.9 представлено порівняння перехідних характеристик, враховуючи значення, з яким система управління не може впоратися. На рисунку вище відхилення осі більше 44 градусів, система не може впоратися з перешкодою, в результаті робот падає.

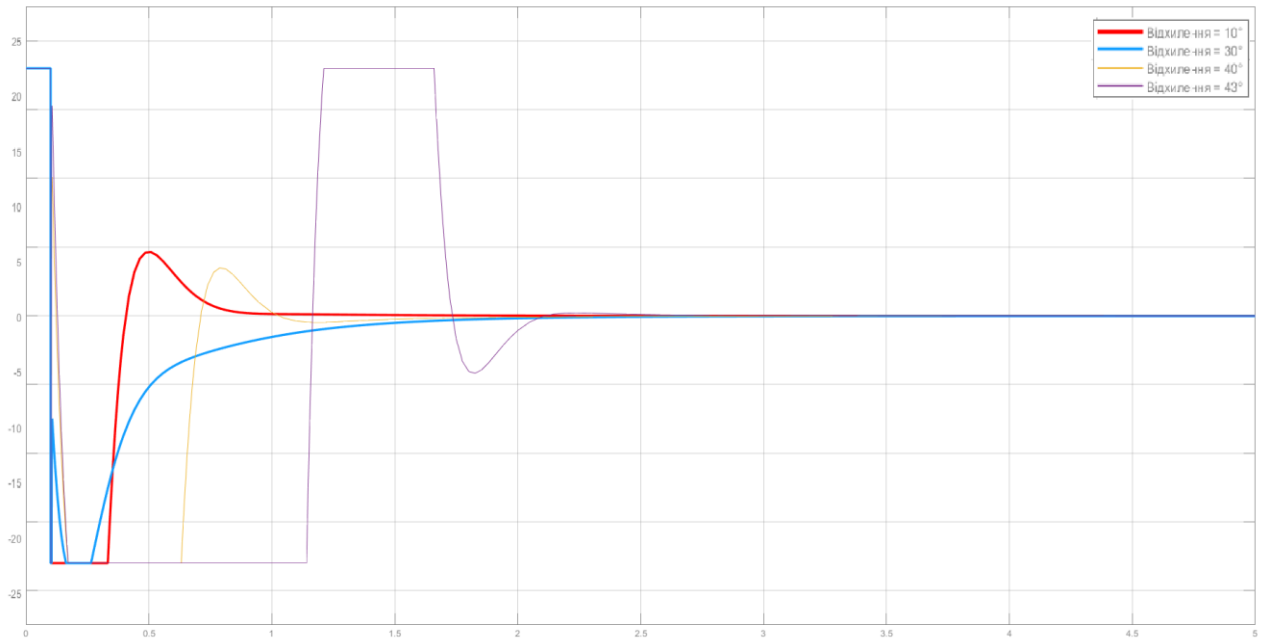


Рисунок 4.8 – Керуючі дії регулятора за різних кутів відхилення

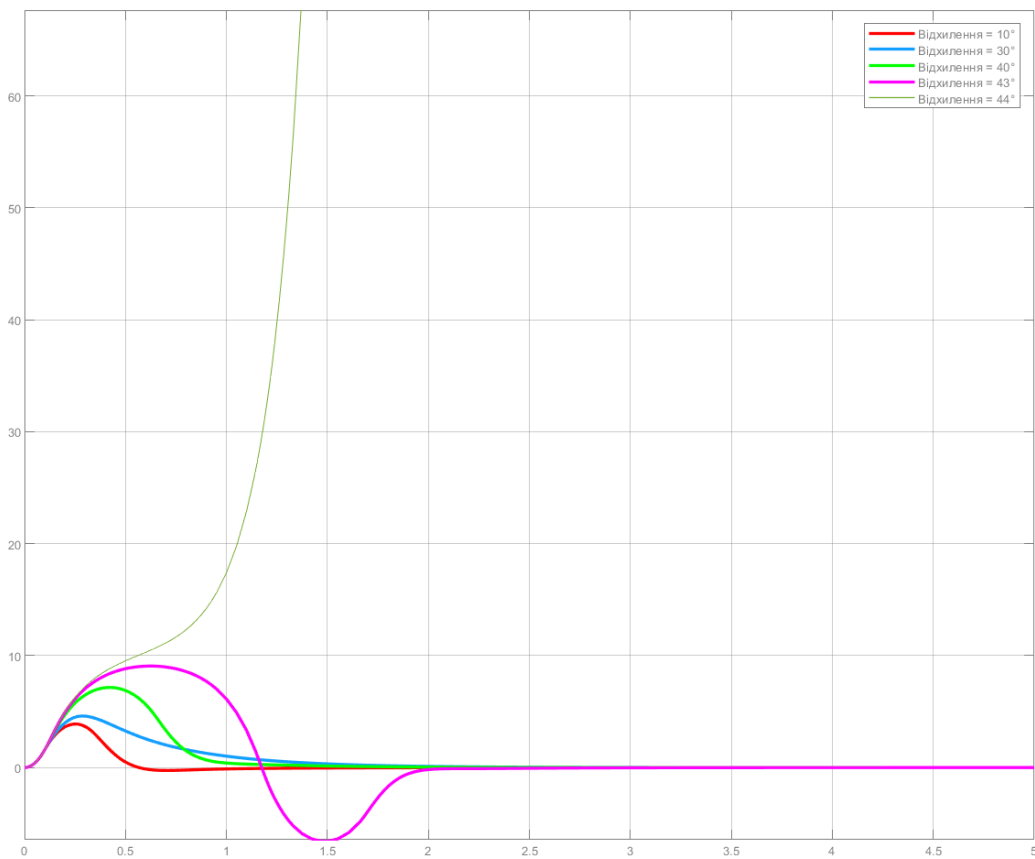


Рисунок 4.9 – Порівняння характеристик перехідних

## 4.2 Синтез системи керування з адаптивним ПІД-регулятором

Спеціальна система керування на основі ПІД була розроблена для покращення продуктивності системи керування. Система побудована з використанням розширення Simulink для програмного забезпечення Matlab, як показано на рисунку 4.10.

Ця система складається з ПІД-регулятора, адаптивного блоку керування та сценарію. У адаптивному блоці управління поточний відсоток впливу ділиться на попередній відсоток. Якщо це значення більше 1, це означає, що швидкість відхилень системи від рівноваги зростає по спіралі, а отже, контрольні параметри повинні приймати більші значення. Якщо результат ділення менше 1, то контрольні параметри повинні бути меншими. Інтегральний компонент був обраний як змінна під основним контролем зміни для ПІД-регулятора. Сценарій задокументує логіку того, як буде змінено пропорційний параметр. Якщо в кінці дня, після застосування цього через адаптивний блок керування, він отримує значення 1, то скрипт збільшує його на 5% або навпаки зменшує на 5%. Якщо це 1, то сценарій не змінює елемент керування. [56-65]

На рисунку 4.11 показано блок порівняння керуючих сигналів.

Графік 4.12 ілюструє контраст між звичайним ПІД та адаптивним регулятором.

Для ПІД-регулятора вибрано максимальну температуру, яку він може витримати ( $43^{\circ}$ ). Для адаптивного контролера розглядалося відхилення на 50 градусів.

Графік показує, що адаптивний контролер змінив відхилення на 50 градусів. З цього можна зробити висновок, що такий керівник має реальний вплив на підвищення можливостей системи. На рисунку 4.13 нижче представлено діаграму ефектів адаптивного регулятора.

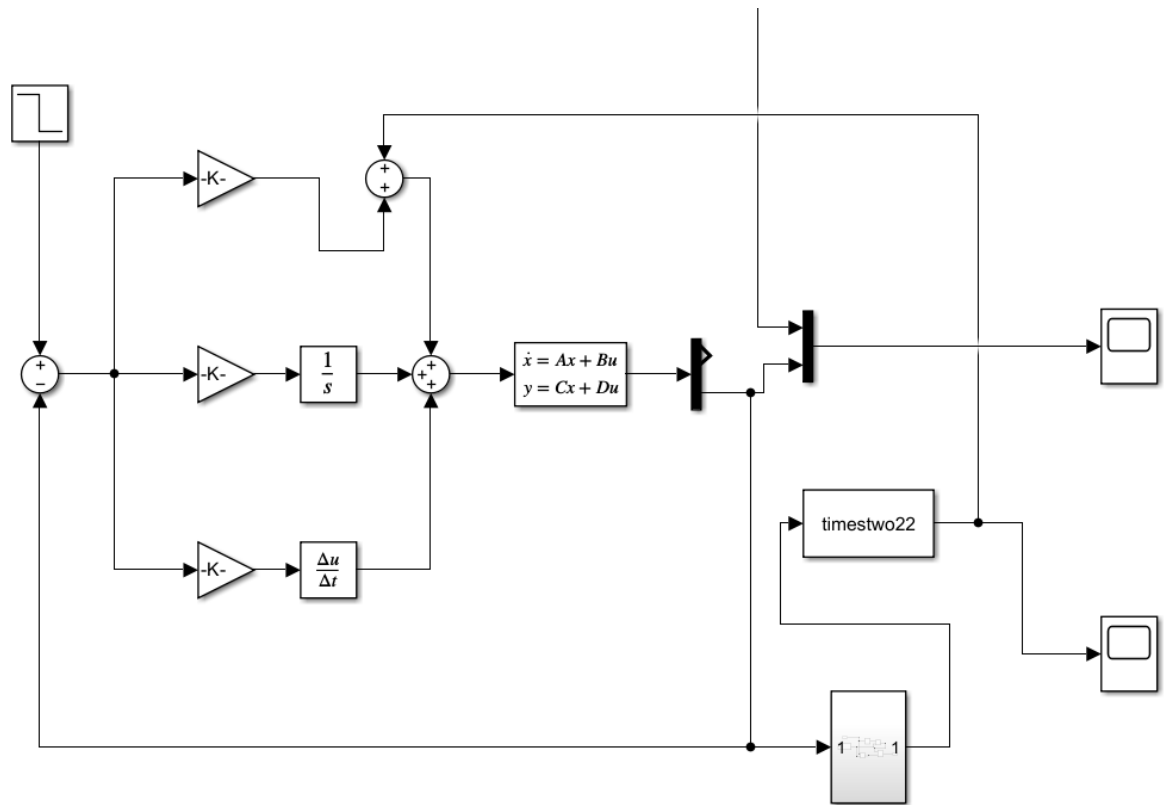


Рисунок 4.10 – Схема керування із адаптивним регулятором із застосуванням ПІД-регулятора

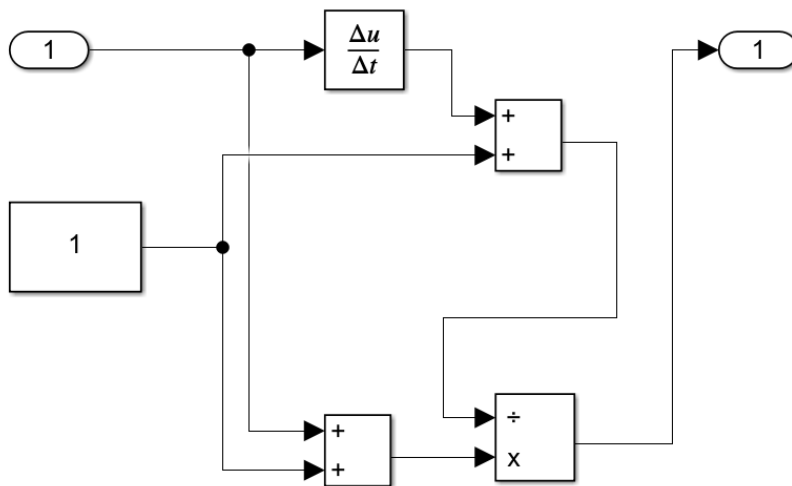


Рисунок 4.11 – Схема порівняння сигналів керування

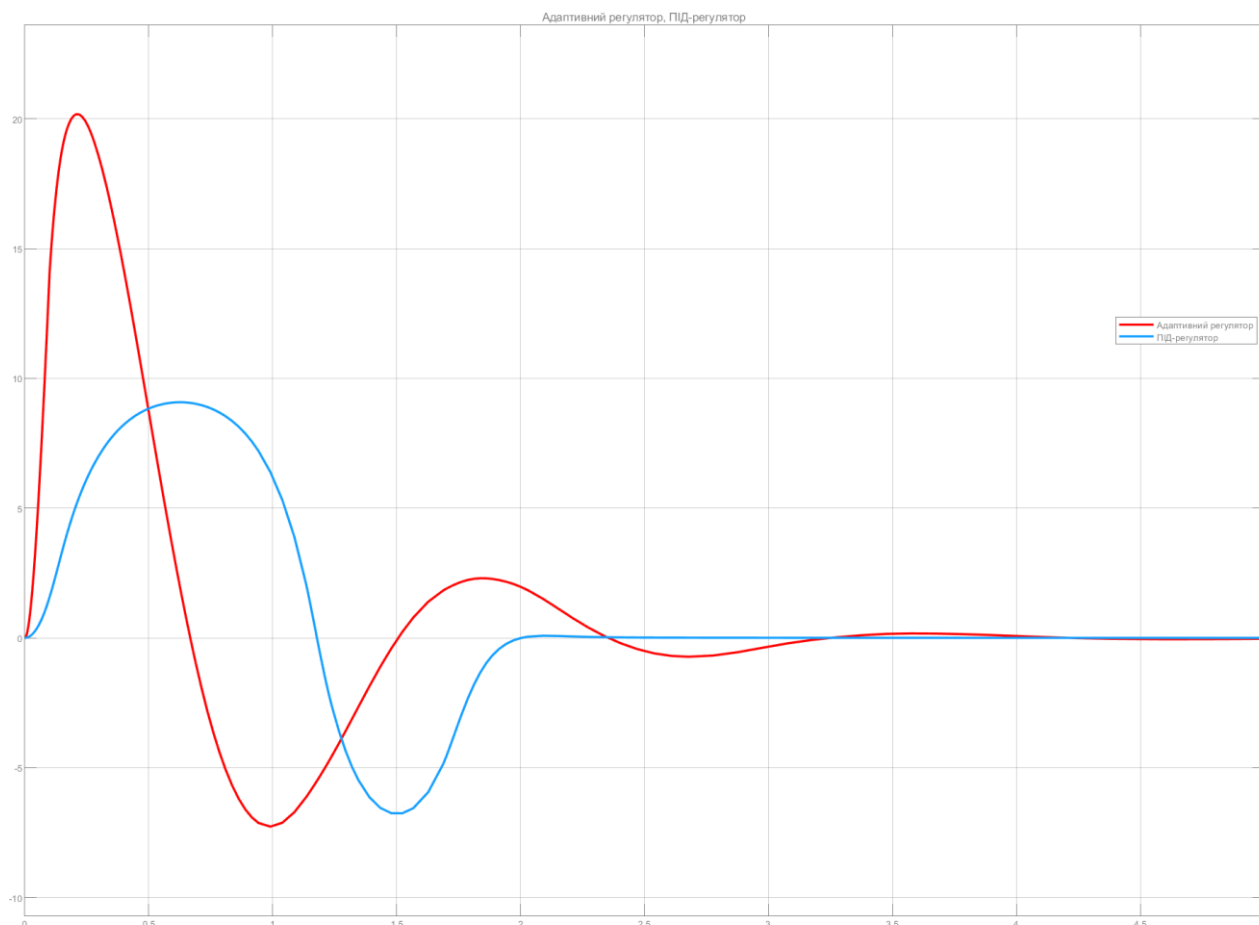


Рисунок 4.12 – Порівняння ПІД-регулятора і адаптивного регулятора

Автоматичні системи управління займають важливе місце в класі різноманітних озброєнь, які зазвичай використовуються в багатьох галузях промисловості та оборонної техніки. На сьогоднішній день якісні системи автоматичного керування проектуються, як правило, з принципом інваріантності (незалежності) до будь-яких зовнішніх впливів.

Комбіноване керування є основним підходом і, по суті, найбільш звичайним підходом, який використовується для забезпечення інваріантності проти збурень контрольованої величини. У комбінованій системі керування вихідний сигнал змушений діяти за допомогою сигналу «и», так що дія, що виконується ним, встановлює компенсуючу дію впливу збурення на об'єкт, щоб відновити, з деякою помилкою, змінну, що розглядається. до початкового значення. Чутливий елемент, що вимірює збурення, і елемент, що створює необхідний компенсуючий сигнал, є частинами компенсуючого елемента.



#### 4.13 – Впливи керування адаптивного регулятора

Збурення – це вплив навколишнього середовища на об’єкт, що викликає відхилення регульованої величини від заданих значень або зміну програм. Якби повна інформація про супутнє збурення об’єкта була доступною, її можна було б враховувати при розрахунку оптимального керування для забезпечення інваріантності об’єкта.

Часом є інформація про причину відхилень. За допомогою цієї інформації можна відслідковувати змінну, що регулюється, до заданого значення, а також надати певний зсув значення змінної, що регулює, для підвищення процесу.

У найпростішому випадку компенсуючий вплив підсумовується з менеджером. Крім того, ми отримаємо таку систему, яка також є реалізатором принципу відкритого управління. Алгоритм обробки поточної інформації про збурення в компенсаторі для розрахунку компенсуючого впливу побудований на інформації про характеристики об’єкта по каналах керування та збурень.

Поточна інформація про збурення, тобто про причину відхилень, дозволяла системі «створити» другий шлях від точки застосування збурення до виходу з об'єкта. Необхідною (але сама по собі недостатньою) умовою абсолютної інваріантності контрольованої змінної до безпосередньо вимірюваного збурення є існування такого шляху.

Компенсатор означає будь-який пристрій або наповнювач, який використовується для компенсації або балансування впливу будь-яких змін зовнішніх факторів на стан і продуктивність конструкцій, систем, машин і пристроїв.

### 4.3 Розробка підсистеми корекції помилок положення об'єкту

#### 4.3.1 Вибір та опис гіроскопічного інтегратора

Основна вимога, що пред'являється до гіроскопічних інтеграторів, точність збереження заданого положення платформи щодо опорного тригранника при дії на неї різних динамічних збурень та прискорень з боку об'єкта, на якому вона встановлена, лінійних та вібраційних перевантажень. Точнісні характеристики - головні фактори, що визначають ефективність виконання завдання, поставленого перед системою навігації.

Розглянемо поплавцевий гіроскопічний інтегратор. Принцип його дії полягає в наступному: лінійне прискорення сприймається безпосередньо чутливим елементом - поплавцем, виконаним у вигляді пластини, зануреної в рідину. Під дією лінійного прискорення пластина відхиляється від положення рівноваги, перетворюючи тим самим величину лінійного прискорення, а пропорційну їй величину кута повороту  $\varphi$ . За допомогою датчика переміщення значення  $\varphi$  перетворюється на електричний сигнал, який після посилення і випрямлення подається на обмотки датчика моменту, що розвиває момент протидії лінійному прискоренню і прагне повернути поплавець в положення рівноваги. Сила струму, що протікає електричним ланцюгом

гіроскопа, прямо пропорційна вимірюваному прискоренню і є вихідним сигналом. Для заспокоєння коливань рухомий системи в приладах зазвичай використовуються демпфери. У гіроскопах даної конструкції роль демпферів виконують датчик моменту та рідина, якою заповнена внутрішня порожнина приладу.

Кінематична схема поплавкового гіроскопічного інтегратора представлена малюнку 4.14.

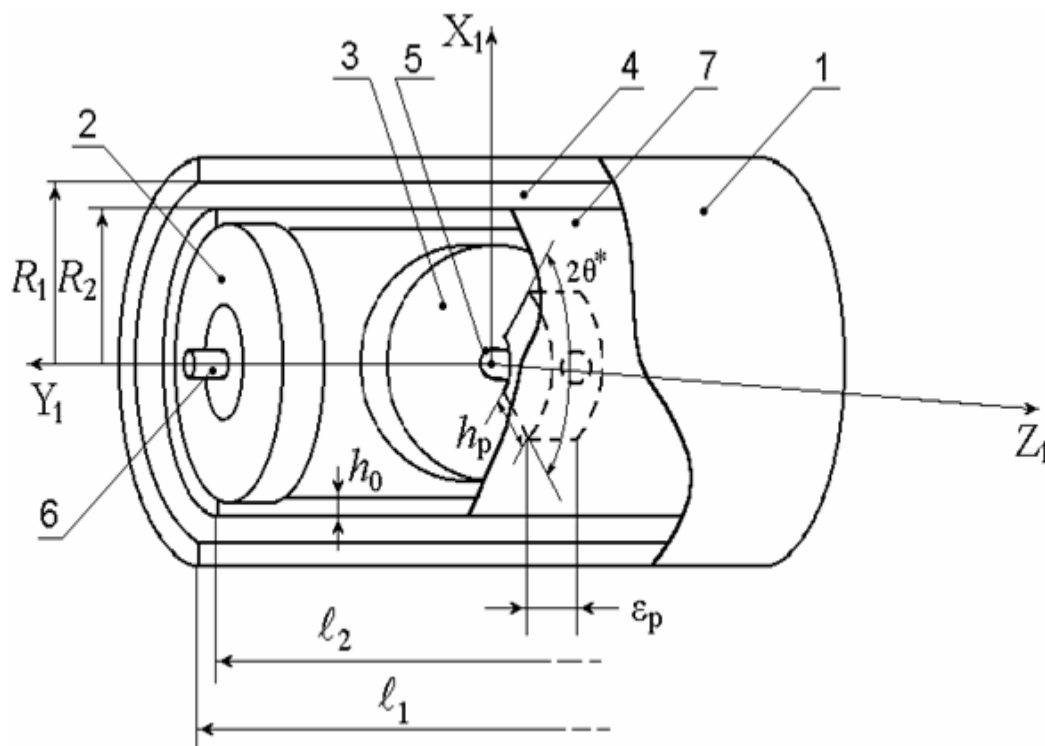


Рисунок 4.11 – Кінематична схема поплавкового гіроскопічного інтегратора: 1. Герметичний корпус; 2. Герметичний поплавець; 3. Ротор; 4. Рідина; 5. Статор; 6. Ротор з віссю поплавця; 7. Другий статор; 8. Ротор датчика моменту

Щільність рідини вибирається такою, щоб опори поплавця були повністю розвантажені від його ваги. Рідина також відіграє роль демпфера. Її високий коефіцієнт в'язкості і малий проміжок між корпусом приладу і поплавцем забезпечують дуже значне демпфування коливань поплавця навколо осі  $Ox$ .

Поплавковий гіроскопічний інтегратор є прецизійним приладом . Основні переваги двоступеневих поплавцевих гіроскопічних інтеграторів полягають у високій точності (власний догляд - десятки і соті частки градуса в 1 год ) ; малої схильності до вібраційних, ударних та ін. обурюючим впливам; можливості використання для розв'язання широкого класу завдань, що покладаються на гіроскопічні пристрої.

#### 4.3.2 Аналіз помилок датчикової системи

Будь-який з головних джерел помилок, що зазвичай зустрічаються, можна віднести до одного з п'яти перерахованих нижче основних класів:

а) Помилки конструкції. Ці помилки пов'язані з реалізацією системи в комплексі, наприклад, помилки виставки та юстування елементів на платформі;

б) Помилки елементів. Сюди належать відхилення реальних елементів від розрахункового режиму;

в) помилки алгоритму системи.

г) Помилки, пов'язані з підготовкою системи. Наприклад, помилки, зумовлені неідеальністю засобів, що використовуються під час виставки системи;

д) Помилки, пов'язані з маневрами. Ці помилки пов'язані зі змінами в прискоренні і для об'єктів, що рухаються в крейсерському режимі, залежать в першу чергу від числа маневрів і тривалості їх під час польоту. Помилки конструкції. Щоб полегшити аналіз помилок цієї категорії, визначимо такі осі:

$x_A y_A z_A$ - Осі чутливості акселерометрів, розташованих по осях  $x$ ,  $y$  і  $z$  відповідно,

$x_G y_G z_G$  - Вхідні осі гіроскопів, що стабілізують осі  $x$ ,  $y$  і  $z$  відповідно.

В ідеальному випадку осі  $x_A$  розташовані  $y_A$  вздовж осі  $x$ , осі  $y_A$  і  $y_G$  вздовж осі  $y$ , а вісь  $z_G$ - уздовж осі  $z$ . Насправді, через наявність настановних похибок, напрями відповідних осей не збігаються.

Координати платформи:

$$x_p = x_A + \delta x_A, y_p = y_A + \delta y_A, z_p = z_A + \delta z_A.$$

Помилки реальних елементів системи. Вимірювачі відстані (двічі інтегруючі акселерометри). В ідеальному випадку вимірювачі відстані працюють як точні подвійні інтегратори, проте на практиці мають місце пов'язані з ними похибки. Так, зазвичай має місце помилка у величині масштабного коефіцієнта  $k$  внаслідок нелінійності, вихідна величина моментного датчика відповідає добутку  $(1 + k')$  на вхідну величину, де  $k' \ll 1$ , і є функцією вхідного впливу. Насправді величина  $k'$  передбачається постійною, отже твір  $k'$  на вхідний вплив є похибка з допомогою нелінійності моментного датчика. Прилад має похибку усунення ( $\Delta$ ) внаслідок нестабільності апаратури балансування.

Гіроскопи та стабілізовані платформи. У типі інерційних систем для управління положенням платформи використовуються поплавкові гіроскопи. Гіроскопи та стабілізована платформа становлять єдине ціле, і похибки їх розглядатимуться спільно.

Є багато причин, які викликають дрейф гіроскопа щодо вхідної осі. Серед них слід згадати розбаланс мас, конвекційні потоки в рідині через градієнт температури, тертя в підшипниках, нерівножорсткість підшипників, нелінійність моментного датчика і кінематичний дрейф, викликаний вібраціями платформи. Внаслідок різної природи джерел результуюча швидкість дрейфу має складові: постійну, пропорційну прискоренню, пропорційну квадрату прискорення та випадкову.

Джерела помилок, що залежать від прискорення, такі як розбаланс мас, конвекційні потоки, нерівножорсткість, зазвичай розглядаються окремо. Окремо розглядаються також нелінійність моментного датчика та кінематичний дрейф.

Розбаланс мас гіроскопа. Внаслідок прискорення, яке випробовує

гіроскоп, створюється момент, який може мати складову, що діє навколо вихідної осі. Тоді результуюча швидкість дрейфу визначиться виразом:

$$\varepsilon = \frac{M}{H} \Delta(\delta r * A) * l_0 \quad (4.1)$$

де  $M$  - маса сферичного поплавцевого гіроскопа;

$H$  - кінетичний момент ротора гіроскопа;

$A$  - прискорення;

$l_0$  - одиничний вектор напрямку вихідної осі;

$\delta r$  - Вектор відстані від центру тяжкості до точки застосування сили, що виштовхує в рідині;

$\Delta(\delta r * A)$  - відхилення величини  $(\delta r * A)$  від її значення в момент, коли гіроскоп був збалансований.

Якщо вихідні осі горизонтальних гіроскопів вертикальні, всі вертикальні прискорення на ці гіроскопи не діють.

Для азимутального гіроскопа, однак, вертикальні прискорення, відмінні від  $g$ , можуть вносити деякі помилки.

Нерівножорсткість . Дрейф внаслідок нерівножорсткості виникає в тому випадку, коли центр тяжкості поплавця зміщується перпендикулярно до лінії дії прикладеного прискорення. Через це створюватиметься момент, що має складову вздовж вихідної осі. Співвідношення, що характеризує цей дрейф, суть:

$$\varepsilon = \frac{M}{H} (\delta * A) * l_0 \quad (4.2)$$

де  $\delta$  - Зміщення центру тяжкості поплавця

Величина  $\delta$  пропорційна величин  $M$  і  $A$ . У процесі виставки, коли  $g$  є повним прискоренням, очевидно, що дрейф внаслідок нерівножорсткості

дорівнює нулю для всіх трьох гіроскопів. (Для горизонтальних гіроскопів вектор  $g$  паралельний одиничному вектору  $1_0$ , для зимових гіроскопів  $\delta$  паралельно  $g$ .)

Для горизонтальних гіроскопів навіть у процесі руху лише горизонтальні складові прискорення створюють моменти щодо вихідної осі.

Можна показати, що ці швидкості дрейфу пропорційні величині

$$A_h^2 \sin 2a_x$$

де  $A_h^2$  горизонтальна складова прискорення і  $a_x$  кут між напрямком вектора  $A_h^2$  горизонтального прискорення і віссю  $x$  платформи.

Швидкість дрейфу внаслідок нерівножорсткості максимальна, коли  $a_x$  непарна величина, кратна  $45^\circ$ .

Швидкість дрейфу азимутального гіроскопа пропорційна величині:

$$A^2 (\sin 2a_z) (\sin 2a_h) \quad (4.3)$$

де  $a_z$  - Кут між вектором  $A$  і горизонтальною площиною;

$a_h$  - Кут між горизонтальною складовою  $A_h^2$  вектора прискорення і вихідною віссю азимутального гіроскопа.

Обчислювач сигналу, який подається на моментний датчик гіроскопа.

Похибки сигналів, що подаються на моментні датчики гіроскопів, залежать від того, як вони формуються. При аналізі помилок ці похибки не відокремлюються від похибки  $\Delta G$  вхідного сигналу моментного датчика гіроскопа. Розмір  $\Delta G$  позначає різницю між фактичним сигналом, поданим на моментний датчик гіроскопа, і сигналом у разі, якщо обчислювач працює ідеально.

Помилки алгоритмів та підготовки системи. Основними помилками

цього класу, що враховуються при аналізі похибок системи, є ті, які пов'язані з визначенням сигналів, що подаються на моментні датчики гіроскопів), та з виміром відстані (обчисленням координат) об'єкта. Так, можна вказати на зміщення нуля акселерометрів і початкову помилку горизонтування (нахил платформи). Якщо зміщення нуля акселерометра точно не збалансоване і водночас акселерометр використовується для горизонтування платформи, то зазначені дві похибки корелюються і повинні складатися алгебраїчно.

Якщо ж для виставки використовуються деякі зовнішні пристрої (наприклад, рівні, теодоліти і т. д.), то похибка зміщення нуля акселерометра та початкова помилка горизонтування платформи є некорельованими і повинні підсумовуватися як середньоквадратичні відхилення (див. нижче про статистичний аналіз похибок). З цього прикладу випливає, що кожен певний режим роботи системи має аналізуватися незалежно з погляду кореляції похибок.

Кругова ймовірна помилка є загальноприйнятим статистичним заходом, що використовується при визначенні точності системи.

Коли компоненти, що відповідають ряду незалежних джерел похибок, підсумовуються, то крива розподілу для сумарної похибки дуже близько наближається до добре відомої кривої нормального розподілу. Навіть лише для трьох джерел похибок із рівномірним розподілом результуюча сумарна помилка відрізняється від кривої нормального закону лише на кілька відсотків. Для інерційної навігаційної системи, що характеризується великою кількістю малих незалежних джерел похибок, сумарна похибка підпорядковується нормальному закону розподілу.

#### 4.4 Висновки до четвертого розділу

У цій роботі розроблено контролер, який реалізує дії, визначені алгоритмом ПІД. Проаналізовано якість роботи регулятора з різними невідповідностями та встановлено гранично допустимі невідповідності. Для

вдосконалення системи керування розроблено синтезований ПІД-регулятор. З результатів дослідження видно, що адаптивний регулятор більш ефективний у боротьбі з відхиленнями і може бути рекомендований для практичного впровадження. [66-70]

## ВИСНОВКИ

У цій роботі розглядаються різні моделі колісних роботів та їхні відповідні переваги та недоліки. Інструментом дослідження був двоколісний балансир. Розглянуто особливості його об'єкта управління. Саме тому система автоматизації, система комутації та основні елементи були визначені з урахуванням простоти та доступності конфігурації роботів. Система управління була розроблена як система ПІД-регулювання. Систему доповнював адаптивний контролер.

Перший розділ було присвячено огляду переваг і недоліків колісних роботів. Також були проаналізовані різні конструкції колісних роботів, різна кількість коліс і різні типи коліс, що застосовуються в робототехніці. Концептуальний проект двоколісного робота, переваги та режими роботи двоколісних транспортних засобів добре описані в літературі.

У другому розділі було розроблено стратегію автоматизації та те, як двоколісна самобалансуюча машина перемикається між різними напрямками. Розглянуто та обрано основні складові реалізації проекту. Крім того, була створена 3D-модель корпусу, яка пізніше буде надрукована та використана в роботі.

У третьому розділі досліджувалися фізичні властивості перевернутого маятника, що призвело до формулювання рівняння динаміки. Рівняння динаміки було спрощено. Перетворення Лапласа було застосовано для лінеаризованих рівнянь для отримання функцій, що стосуються двох вхідних даних. Система також була виставлена на державному просторі. Побудовано перехідну, імпульсну та логарифмічну частотну характеристики амплітуди. З вигляду перехідної поведінки та положення полюсів і нулів було зроблено висновок, що система є внутрішньо нестійкою.

У четвертому розроблено контролер, який реалізує дії, визначені алгоритмом ПІД. Проаналізовано якість роботи регулятора з різними невідповідностями та встановлено гранично допустимі невідповідності. Для

вдосконалення системи керування розроблено синтезований ПД-регулятор. З результатів дослідження видно, що адаптивний регулятор більш ефективний у боротьбі з відхиленнями і може бути рекомендований для практичного впровадження.

## ПЕРЕЛІК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Glad, Torkel. Ljung, Lennart. 2006. Reglerteknik - Grundläggande teori. 4th edn. Studentlitteratur
2. MathWorks. 2012. Control Tutorials for MATLAB and SIMULINK, Inverted Pendulum [Електронний ресурс] – Режим доступу до ресурсу: [http://ctms.engin.umich.edu/CTMS/index.php.exampleInverted\\_Pendulumsection-SystemModeling](http://ctms.engin.umich.edu/CTMS/index.php.exampleInverted_Pendulumsection-SystemModeling). [Accessed 21 April 2015]
3. Лукінюк М. В. Автоматизація типових технологічних процесів: технологічні об'єкти керування та схеми автоматизації [Текст] : навч. посіб. для студ. вищ. навч. закл., які навч. за напрямом «Автоматизація і комп'ютерно-інтегровані технології» / М. В. Лукінюк; Національний технічний ун-т України «Київський політехнічний ін-т». – К.: НТУУ «КПІ», 2008. – 236 с.
4. Проектування систем керування: навч. посібн. для студ. вищ. навч. закл., які навчаються за напрямом «Автоматизація і комп'ютерно-інтегр. технології»/ М. З. Кваско, Я. Ю. Жураковський, А. І. Жученко, В. В. Миленький – К. : НТУУ «КПІ», 2014. – 342 с.
5. Автоматизація технологічних процесів галузі – 2. Розрахунок параметрів регуляторів: Метод. вказівки до викон. лабор. робіт для студ. напр. «Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології» // Уклад.: Д.О. Ковалюк, В.С. Цапар, О.О. Ковалюк – К. : НТУУ ”КПІ“, 2015. – 33 с.
6. Ладієва Л. Р. Оптимальне керування системами.: Навчальний посібник.- К.:НМЦ ВО, 2000. - 187с.
7. Dalal N. Histograms of oriented gradients for human detection. [Текст] / N. Dalal, B. Triggs // 2005 IEEE Computer Society Conference on Computer Vision and Pattern Recognition, Сан Дієго, 20-25 липня 2005 р. – Т. 1. – С. 886-893.
8. Ojala T. Multiresolution gray-scale and rotation invariant texture classification with local binary patterns. [Текст] / T. Ojala, M. Pietikainen, T.

Маєнраа // IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence. – 2002. – Т. 24, №7. – С. 971-987.

9. Babenko V. Visual Tracking with Online Multiple Instance Learning [Електронний ресурс] / В. Babenko, М. Yang, S. Belongie. – 2009. – Режим доступу до ресурсу: <https://faculty.ucmerced.edu/mhyang/papers/cvPr09a.pdf>.

10. Dollar P. Feature mining for image classification. [Текст] / P. Dollar, Z. Tu, Н. Тао, S. Belongie // 2007 IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition, Міннеаполіс, 17-22 липня 2007 р.

11. Wang J. Online selecting discriminative tracking features using particle filter. [Текст] / J. Wang, X. Chen, W. Gao // 2005 IEEE Computer Society Conference on Computer Vision and Pattern Recognition, Сан Дієго, 20-25 липня 2005 р. – Т. 2. – С. 1037-1042.

12. Ross D. Incremental learning for robust visual tracking. [Текст] / D. Ross, J. Lim, R.-S. Lin, М.-Н. Yang // International Journal of Computer Vision. – травень 2008. – Т. 77, №1. – С. 125-141.

13. Dietterich T. Solving the multipleinstance Problem with axis parallel rectangles. [Текст] / T. G. Dietterich, R. H. Lathrop, L. T. Perez // Artificial Intelligence. – 1997. – С. 31-71.

14. Andrews S. Support vector machines for multiple-instance learning. [Текст] / S. Andrews, I. Tsochantaridis, T. Hofmann // Advances in neural information Processing systems. – 2002. – С. 561-568.

15. Viola P. Multiple instance boosting for object detection. [Текст] / P. Viola, J. C. Platt, C. Zhang // Advances in Neural Information Processing Systems 18, Ванкувер, 5-8 грудня 2005 р. – С. 1417-1426.

16. Henriques J. Exploiting the circulant structure of tracking-by-detection with kernels. [Текст] / J. F. Henriques, R. Caseiro, P. Martins, J. Batista // Proceedings of the 12th European Conference on Computer Vision, Флоренція, 7-13 жовтня 2012 р. – С. 702-715.

17. Danelljan M. Adaptive color attributes for real-time visual tracking. [Текст] / М. Danelljan, F.S. Khan, М. Felsberg, J. van de Weijer // 2014 IEEE

Conference on Computer Vision and Pattern Recognition, Колумбус, 23-28 липня 2014 р. – С. 1090-1097.

18. Galoogahi H. Multi-channel correlation filters. [Текст] / H. K. Galoogahi, T. Sim, S. Lucey // 2013 IEEE International Conference on Computer Vision, Сідней, 1-8 грудня 2013 р.

19. Henriques J. Beyond hard negative mining: Efficient detector learning via block-circulant decomposition. [Текст] / J. F. Henriques, J. Carreira, R. Caseiro, J. Batista // 2013 IEEE International Conference on Computer Vision, Сідней, 1-8 грудня 2013 р.

20. Hare S. Struck: Structured output tracking with kernels. [Текст] / S. Hare, A. Saffari, P. Torr // IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence. – 2011. – Т. 38, №10. – С. 2096-2109

21. Lampert C. Beyond sliding windows: Object localization by efficient subwindow search. [Текст] / C. Lampert, M. Blaschko, T. Hofmann // 2008 IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition, Анкоридж, 23-28 червня 2008 р.

22. Vedaldi A. Efficient additive kernels via explicit feature maps. [Текст] / A. Vedaldi, A. Zisserman // IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence. – 2012. – Т. 34, №3. – С. 480-492.

23. Kalal Z. Tracking-learning-detection. [Текст] / Z. Kalal, K. Mikolajczyk, J. Matas // IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence. – 2012. – Т. 34, №7. – С. 1409-1422.

24. Hinterstoisser S. Realtime learning of accurate patch rectification. [Текст] / S. Hinterstoisser, O. Kutter, N. Navab, P. Fua, V. Lepetit // 2009 IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition, Маямі, 20-25 червня 2009 р.

25. Okuma K. A boosted particle filter: Multitarget detection and tracking [Текст] / K. Okuma, A. Taleghani, N. de Freitas, J. J. Little, D. G. Lowe // European Conference on Computer Vision, Прага, 11-14 травня 2004 р.

26. Leibe B. Coupled Detection and Trajectory Estimation for Multi-Object Tracking. [Текст] / B. Leibe, K. Schindler, L. Van Gool // 2007 IEEE 11th International Conference on Computer Vision, Ріо-де-Жанейро, жовтень 2007. – С. 1-8.
27. Breitenstein M. Robust Tracking-by-Detection using a Detector Confidence Particle Filter. [Текст] / M. D. Breitenstein, F. Reichlin, B. Leibe, E. Koller-Meier, L. Van Gool // 2009 IEEE 12th International Conference on Computer Vision, Кіото, 29 вересня – 2 жовтня 2009 р.
28. Chapelle O. Semi-Supervised Learning [Текст] : навч. посібник / O. Chapelle, B. Scholkopf, A. Zien Cambridge. – MA : MIT Press, 2006. – ISBN: 9780262033589.
29. Zhu X. Introduction to semi-supervised learning [Текст] : навч. посібник / X. Zhu, A. B. Goldberg. – Morgan & Claypool Publishers, 2009. – 130 с. – ISBN-13: 978-1598295474.
30. Kalal Z. Forward-backward error: Automatic detection of tracking failures. [Текст] / Z. Kalal, K. Mikolajczyk, J. Matas // 2010 20th International Conference on Pattern Recognition, Істамбул, 23-26 серпня 2010. – С. 2756-2759.
31. Rosten E. Machine learning for high-speed corner detection. [Текст] / E. Rosten, T. Drummond // Computer Vision – ECCV 2006: 9th European Conference on Computer Vision, Граз, 7-13 травня 2006 р.
32. Shi J. Good features to track. [Текст] / J. Shi, C. Tomasi // 1994 Proceedings of IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition, Сіетл, 21-23 червня 1994 р.
33. Wu H. Robust visual tracking using the timereversibility constraint. [Текст] / H. Wu, R. Chellappa, A. Sankaranarayanan, S. Zhou // 2007 IEEE 11th International Conference on Computer Vision, 14-21 жовтня 2007 р.
34. Wu H. In situ evaluation of tracking algorithms using time reversed chains. [Текст] / H. Wu, A. C. Sankaranarayanan, R. Chellappa. // 2007 IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition, Міннеаполіс, 17-22 червня 2007.

35. Yu Q. Online tracking and reacquisition using co-trained generative and discriminative trackers. [Текст] / Q. Yu, T. Dinh, G. Medioni. // Computer Vision – ECCV 2008: 10th European Conference on Computer Vision, Марсель, 12-18 жовтня 2008 р.

36. Bolme D. Visual object tracking using adaptive correlation filters. [Текст] / David S. Bolme, J. Ross Beveridge, Bruce A. Draper, Man Lui Yui // In Conference on Computer Vision and Pattern Recognition, Сан-Франциско, 13-18 червня 2010 р.

37. Sidhu R. Tutorial on Minimum Output Sum of Squared Error Filter. [Електронний ресурс] / R. K. Sidhu. – 2016. – Режим доступу до ресурсу: [https://mountainscholar.org/bitstream/handle/10217/173486/Sidhu\\_colostate\\_0053N\\_13486.pdf](https://mountainscholar.org/bitstream/handle/10217/173486/Sidhu_colostate_0053N_13486.pdf).

38. Zhang X. Graph based discriminative learning for robust and efficient object tracking. [Текст] / X. Zhang, W. Hu, S. Maybank, X. Li. // 2007 IEEE 11th International Conference on Computer Vision, Ріо-де-Жанейро, 14-21 жовтня 2007 р.

39. Ross D. Incremental learning for robust visual tracking. [Текст] / D. Ross, J. Lim, R.-S. Lin, M.-H. Yang // International Journal of Computer Vision. – травень 2008. – Т. 77, №1. – С. 125-141.

40. Bolme D. Average of synthetic exact filters. [Текст] / D. S. Bolme, B. A. Draper, J. R. Beveridge // 2009 IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition, Маямі, 20-25 червня 2009 р.

41. Bolme D. Simple real-time human detection using a single correlation filter. [Текст] / D. S. Bolme, Y. M. Lui, B. A. Draper, J. R. Beveridge // 2009 Twelfth IEEE International Workshop on Performance Evaluation of Tracking and Surveillance, Сновбьорд, 7-9 грудня 2009 р.

42. Lukezic A. Discriminative correlation filter tracker with channel and spatial reliability. [Текст] / A. Lukezic, T. Vojir, L. Cehovin Z., J. Matas, M. Kristan. // International Journal of Computer Vision. – 2018. – Т. 126, №8.

43. Danelljan M. Accurate scale estimation for robust visual tracking. [Текст] / M. Danelljan, G. Hager, F. S. Khan, M. Felsberg // British Machine Vision Conference. – 2014. – С. 1–11.
44. Kiani G. Correlation filters with limited boundaries. [Текст] / G. H. Kiani, T. Sim, S. Lucey // In: Comp. Vis. Patt. Recognition. – 2015. – С. 4630-4638.
45. Lukezic A. Deformable Parts Correlation Filters for Robust Visual Tracking. [Текст] / A. Lukezic, L. C. Zajc, M. Kristan // IEEE Transactions on Cybernetics. – 2017. – Т. 48, №6. – С. 1849-1861.
46. Ma C. Hierarchical convolutional features for visual tracking. [Текст] / C. Ma, J. B. Huang, X. Yang, M. H. Yang // 2015 IEEE International Conference on Computer Vision, Сантьяго, 7-13 грудня 2015 р.
47. Mueller M. A benchmark and simulator for UAV tracking. [Текст] / Mueller M, Smith N, Ghanem B // Computer Vision – ECCV 2016: 14th European Conference, Амстердам, 11-14 жовтня 2016 р. – С. 445-461.
48. Nam H. Learning multi-domain convolutional neural networks for visual tracking. [Текст] / H. Nam, B. Han // 2016 IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition, Лас Вегас, 27-30 червня 2016 р. – С. 4293-4302.
49. Li D. Real-time moving vehicle detection, tracking, and counting system implemented with OpenCV. [Текст] / D. Li, B. Liang, W. Zhang // 2014 4th IEEE International Conference on Information Science and Technology, Шэньчжэнь, 26-28 березня 2014 р. – С. 631–634.
50. Wu Y. Object Tracking Benchmark. [Текст] / Y. Wu, J. Lim, M. H. Yang // IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence. – 2015. – Т. 37, №9. – С. 1834-1848.
51. Wu Y. Online Object Tracking: A Benchmark [Текст] / Y. Wu, J. Lim, M. H. Yang // 2013 IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition, Портленд, 23-28 червня 2013 р. – С. 2411-2418.

52. Wu Y. Visual Tracker Benchmark [Електронний ресурс] / Y. Wu, J. Lim, M. H. Yang. – 2016. – Режим доступу до ресурсу: [http://cvlab.hanyang.ac.kr/tracker\\_benchmark/datasets.html](http://cvlab.hanyang.ac.kr/tracker_benchmark/datasets.html).
53. Kalal Z. Face-НДВ: Tracking-Learning-Detection applied to faces [Текст] / Z. Kalal, K. Mikolajczyk, J. Matas // 2010 IEEE International Conference on Image Processing, Гон-Конг, 26-29 вересня 2010 р. – С. 3789–3792.
54. Culjak I. A brief introduction to OpenCV [Текст] / I. Culjak, D. Abram, T. Pribanic, H. Dzapo, M. Cifrek // 2012 Proceedings of the 35th International Convention МПРО, Опатія, 21-25 травня 2012 р. – С. 1725–1730.
55. ДСТУ 3008-15. Документація. Звіти у сфері науки і техніки. Структура і правила оформлення [Текст]. - Введ. 2015-06-22. - К.: Держстандарт України, 2017. - 29 с.
56. Spiliotopoulos J. A Reconfigurable Gripper for Dexterous Manipulation in Flexible Assembly [Електронний ресурс] / J. Spiliotopoulos, G. Michalos, S. Makris // Laboratory for Manufacturing Systems and Automation, Department of Mechanical Engineering and Aeronautics, University of Patras. – 2018. – Режим доступу до ресурсу: <http://www.mdpi.com/2411-5134/3/1/4>.
57. Автоматика та електропривод техніки реєстрації інформації [Електронний ресурс] : навч. посіб. / Г. Г. Власюк, В. М. Співак, К. О. Трапезон, В. Б. Швайчен-ко. - Київ : Освіта України, 2010. - 159 с. - Режим доступу: <http://ela.kpi.ua/handle/123456789/19129>.
58. Колонтаєвський Ю. П. Електроніка і мікросхемотехніка : підручник / Ю. П. Колонтаєвський. - Київ : Каравела, 2006. - 384 с.
59. Макаренко В. В. Цифрова та імпульсна схемотехніка. Моделювання та аналізі : навч. посіб. для студентів, які навчаються за напрямом підготовки «Акустотех-ніка» [Електронний ресурс] / В. В. Макаренко, В. М. Співак ; НТУУ «КПІ». - Київ : НТУУ «КПІ», 2015. - 314 с. - Режим доступу: <https://ela.kpi.ua/handle/123456789/19099>.
60. Панчевний Б. І. Загальна електротехніка: теорія і практика / Б. І. Панчевний, Ю. Ф. Свєргун. - 2-ге вид. - Київ : Каравела, 2004. - 440 с.

61. Воробйова О. М. Технічні засоби автоматизації: навч. посіб. / О. М. Воробйова, Ю. В. Флейта. - Одеса : ОНАЗ ім. О. С. Попова, 2018. - 208 с.
62. Бойко В. І. Мікрокомп'ютерна техніка / В. І. Бойко, А. Т. Нельга. - 2-ге вид. - Київ : Науково-методичний центр вищої освіти, 2008. - 254 с.
63. Електропривід сільськогосподарських машин, агрегатів та поточкових ліній: Підручник / Є.Л. Жулай, Б.В. Зайцев, Ю.М. Лавріненко, О.С. Марченко, Д.Г. Войтюк; За ред. Є.Л. Жулая. – К.: Вища освіта, 2001. – 288 с.: іл.
64. Автоматизація технологічних процесів і системи автоматичного керування: Навчальний посібник /Барало О.В., Самойленко П.Г.,Гранат С.Є., Ковальов В.О. – К.: Аграрна освіта, 2010. – 557 с.
65. Експлуатація машин і обладнання: Навчальний посібник / Ружицький М.А., Рябець В.І., Кіяшко В.М. та ін. – К.: Аграрна освіта, 2010. – 617 с.
66. Матвійчук А. Я. Електротехніка: навчально-методичний посібник/ Матвійчук А. Я., В. Л. Стінянський; Вінницький державний педагогічний університет ім. М.Коцюбинського.– Вінниця, 2017. -270 с.
67. Загальна електротехніка з основами автоматики: Навчальний посібник / Т.В.Левченко. – К., 2010. – 358 с.
68. Технічний сервіс в агропромисловому комплексі: навчальний посібник / Коновалюк О.В., Кіяшко В.М., Колісник М.В. – К.: Аграрна освіта, 2013. – 404 с.
69. Електричні машини і апарати: навчальний посібник / Ю.М. Куценко,В.Ф. Яковлєв та ін. – К.: Аграрна освіта, 2011. – 449 с.
70. Загірняк М.В. Електричні машини : підручник / М. В. Загірняк, Б. І. Невзлін. – Київ : Знання, 2009. – 399 с.

## Додаток А

### Стаття у фаховому журналі (подана до редакції журналу «Вимірювальна та обчислювальна техніка у технологічних процесах»)

**ФОРКУН Юрій**

Хмельницький національний університет

<https://orcid.org/0000-0002-7906-4191>

forkynjv@khnu.km.ua

**МАКАРИШКІН Денис**

Хмельницький національний університет

<https://orcid.org/0000-0003-3447-811X>

makaryshkinde@khmnu.edu.ua

**КОРЕЦЬКА Людмила**

Хмельницький національний університет

<https://orcid.org/0000-0002-4284-4936>

koretskal@khmnu.edu.ua

**НИЧИПОРЧУК Дмитро**

Хмельницький національний університет

**ЛЮБЧИК Віталій**

ТОВ «Карат»

vitaly1612@gmail.com

#### **ПРИНЦИПИ АВТОМАТИЗОВАНОГО КЕРУВАННЯ БАЛАНСУЮЧОГО РОБОТА**

У роботі були розглянуті властивості, переваги та недоліки колісних роботів. Було проведено дослідження різних конструкцій і особливостей колісних роботів з різною кількістю коліс, а також розглянуто типи коліс, які використовуються в робототехніці. Ідея регулювання двоколісного роботизованого транспортного засобу, переваги та принципи роботи двоколісних транспортних засобів були задокументовані.

Ключові слова: колісний робот, робототехніка, робот-балансир, ПІД-регулятор

**FORKUN Yuriy, MAKARYSHKIN Denys, KORETSKA Liudmyla,**

**NYCHIPORUK Dmytro**

Khmelnytsky National University

**LIUBCHYK Vitalii**

Karat LTD

#### **PRINCIPLES OF AUTOMATED CONTROL OF A BALANCING ROBOT**

The paper considered the properties, advantages and disadvantages of wheeled robots. A study was conducted of various designs and features of wheeled robots with different numbers of wheels, and the types of wheels used in robotics were also considered. The idea of regulating a two-wheeled robotic vehicle, the advantages and principles of operation of two-wheeled vehicles were documented.

Keywords: wheeled robot, robotics, balancer robot, PID controller

**Постановка проблеми у загальному вигляді та її зв'язок**

**із важливими науковими чи практичними завданнями**

Роботи-балансири відрізняються здатністю зберігати певне фіксоване положення. Навіть якщо робот-пристрій переміститься на нове місце, він все одно запрограмований на повернення у вихідне положення. Такого роду роботів можна використовувати в сфері доставки, перевезення вантажів, обслуговування.

## **Виділення невирішених раніше частин загальної проблеми, котрим присвячується стаття.**

У міру розвитку цієї технології виникла потреба в розширенні можливостей робота реагувати на відхилення та повертатися у вихідне положення.

### **Формулювання цілей статті**

Мета керування полягає в утриманні положення робота, утримуючи його у вертикальному стабільному стані. Новизна цієї розробки полягає у використанні адаптивного контролера в управлінні роботами, цей контролер порівнюють з ПД-регулятором.

### **Виклад основного матеріалу**

Колісні роботи мають значну перевагу над роботами-гуманоїдами, оскільки вони швидші, мають більш гнучкий напрямок і більшу вертикальну стабільність, що є перевагою для різноманітних застосувань.

Доступно багато різних конструкцій мобільних роботів з колесами. Проблеми, пов'язані з проектуванням цільного мобільного робота, включають: вибір типу колеса, розміщення коліс і визначення кінематичних параметрів. Цілі проектування мають залежати від передбачуваних середовищ і завдань, а також початкових і експлуатаційних витрат роботизованої системи. Колісні роботи мають можливість змінювати своє положення в літаку за допомогою своїх коліс. Рух колісного роботизованого транспортного засобу легко досягти і його витрати невеликі, управління рухом простіше. Колісні роботи є частиною найпоширеніших типів роботів. Прикладами колісних роботів є одноколісні роботи, мобільні роботи-кулі, двоколісні роботи, триколісні роботи, чотириколісні роботи та багатоколісні роботи.

Колісний автомат є найбільш популярним у споживчому секторі. Вони бюджетні та прості. Їх конструкція здатна мати будь-яку кількість коліс. Три колеса необхідні для статичної і динамічної стійкості. Для балансування конструкції можна додати інші колеса. Для додаткової стабільності на поверхні можна включити деякі механізми, наприклад підвіску, яка включає незалежні колеса, щоб переконатися, що всі колеса розташовані на нерівній поверхні. Створення колісної машини вигідніше гуманоїдної версії через простий механізм пересування. Цей тип робота може використовувати різні методи пересування залежно від кількості коліс.

Двоколісні роботи мають різні методи керування своїм шляхом. Цей підхід підходить для 3-колісних і 4-колісних роботів. Крім диференціального методу керування, триколісні роботи можуть використовувати методи, подібні до чотириколісних. Багатоколісні роботи мають здатність використовувати як диференційований рух, так і методи водіння автомобіля.

Колісні роботи ефективні для простих дій, таких як переміщення об'єктів в інше місце, або для складніших дій, таких як збільшення діапазону роботизованих рук, що використовуються в промисловості. Роботи *Rooves* зазвичай прості та бюджетні. Крім того, вони мають велику вагу, що дозволяє транспортувати важке обладнання або акумулятори, що збільшує тривалість роботи робота.

На відміну від традиційних колісних роботів, самобалансуючі роботи мають деякі проблеми з керуванням, але вони також мають значну перевагу. Завдяки цьому з концепції було виведено багато цікавих ідей і технічних рішень.

Роботизований транспортний засіб лише з одним колесом сприйнятливий до нестабільності без додаткового динамічного контролю, оскільки завжди необхідно підтримувати стійкість його кузова. Типовим прикладом є моноцикл. Одним із можливих варіантів створення одноколісної машини є використання сферичного колеса. Цей тип роботизованої системи стабільний у будь-якому напрямку та має численні переваги, зокрема високу маневреність і низький опір коченню. Одноколісні роботи мало поширені в практичних застосуваннях, оскільки для їх стійкості необхідні додаткові механізми, а оцінити їх керування теоретичними розрахунками практично неможливо.

Розрізняють два різновиди двоколісних роботів — із послідовними колесами, одне з яких обертове, як показано на рисунку 1, і з паралельними колесами. Оскільки динамічна стабільність роботів із послідовним колесом (або подібних до велосипедів) зростає зі збільшенням швидкості, механізм для балансування коліс не завжди потрібен. Перевага цього методу полягає в тому, що ширина робота значно зменшується порівняно з іншими методами. Однак цей тип велосипеда є рідкісним, оскільки він не може підтримувати постійне положення в нерухомому стані.

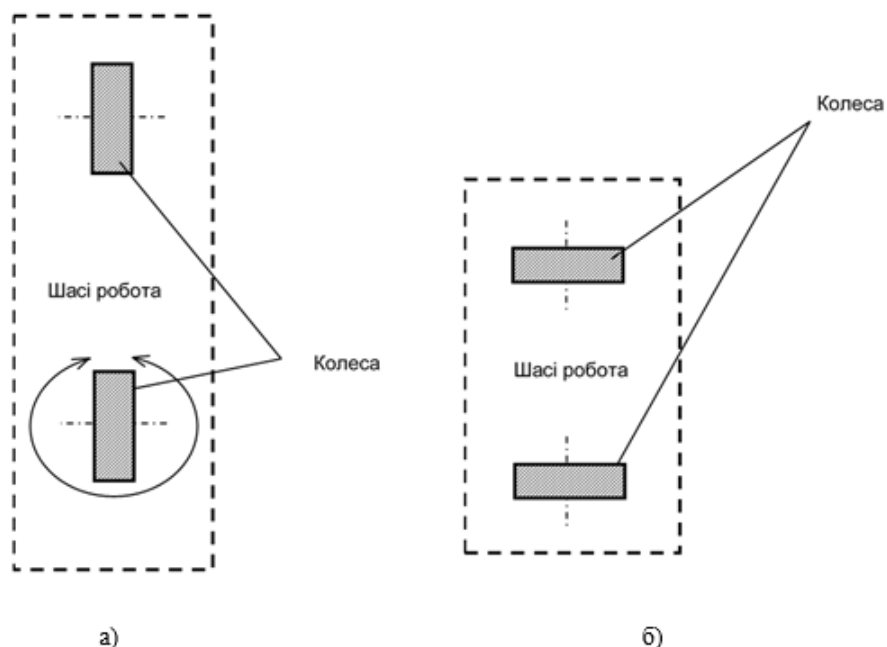


Рис. 1. Двоколісний робот з послідовними колесами (а), з паралельними колесами (б)

Двоколісні мобільні роботи мають здатність подорожувати швидше та охоплювати більші території, ніж інші базові роботи, наприклад роботи-гуманоїди. Ось чому двоколісний мобільний робот часто використовується як платформа для мобільних роботів. Однак, щоб зберегти рівновагу, двоколісний транспортний засіб повинен використовувати рух своїх коліс. Коли спонтанно виникла проблема впливає на машину, машина підтримує свою стабільність, регулюючи колеса та нахиляючи корпус. Якщо перешкоди перевищують здатність робота реагувати, він стане нестабільним. Крім того, безпека роботизованої системи може бути порушена через мимовільні рухи рівноваги. Щоб вирішити ці проблеми, можна розробити контролер, який регулює обертання тора, щоб підтримувати рівновагу при мінімізації руху. Коли робототехнічній системі завдано пошкодження, спостерігач, який виявляє пошкодження, оцінює пошкодження, а контролер, який регулює напрямок руху, компенсує пошкодження. Модуль гіроскопа використовується для підтримки стабільності лише з невеликими змінами коліс. Крім того, досягається статична рівновага, оскільки центр ваги розташований точно вздовж осі коліс. Щоб підвищити його стійкість, батареї, які живлять його, розташовані під його корпусом. Однак більшість випадків передбачає динамічне керування балансуванням, яке подібне до типового завдання регулювання орієнтації маятника. Величина розміру цього робота менша, ніж інші роботи з більшою кількістю коліс.

Триколісний роботизований транспортний засіб за своєю суттю стійкий і має просту конструкцію, що робить його одним із найпопулярніших рішень для буксированих роботів. На основі різних типів коліс та їх розміщення можливе багато різних конструкцій.

Двоколісний диференціальний привід - одна з найпопулярніших конструкцій триколісних роботів. Він складається з двох активних незалежних коліс плюс одного пасивного колеса, яке обертається. Цей стиль будівлі видно на рисунку 2. Стационарне пасивне колесо також можна побудувати у вигляді сфери.

Процедуру цієї конструкції можна змінити на чотириколісну, додавши пасивне колесо. Ця конструкція має багато значних переваг, першою з яких є її перевага:

- проста механічна конструкція, яка має просту кінематичну модель, є статично стабільною, її легко розробити та має низьку вартість виготовлення порівняно з іншими методами транспортування;
- без кола повороту. Наприклад, для 3-колісного циліндричного робота область, яку він може подолати без перешкод, можна легко визначити, розширивши межі перешкод до розміру робота;
- легке розпізнавання систематичних помилок;
- кінематику можна оцінити простими теоретичними розрахунками, відносно близькими до практичних.

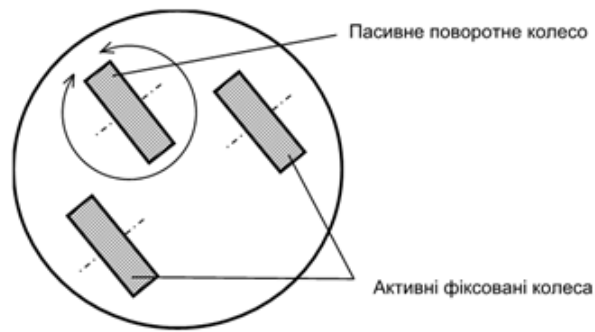


Рис. 2. Триколісний робот із двоколісним диференціальним приводом

І навпаки, цей тип колісних роботів має ряд недоліків:

- важко пересуватися по нерівній поверхні. Коли робот-транспортний засіб рухається по нерівній поверхні, його напрямок і стійкість можуть сильно змінитися, якщо одне з активних коліс втратить контакт із землею;

- рухи тільки в одному вимірі.

Машину з ідентичним рухом можна сконструювати з центрованими або нецентрованими колесами. Рух кожного колеса пов'язаний з рухом інших коліс за допомогою ременів або ланцюгів, і рухи виконуються синхронно, що призводить до узгодженості орієнтації коліс. Кінематичний опис синхронного приводу роботом подібний до одного колеса. В результаті можна досягти всенаправленого руху, тобто руху в будь-якому напрямку, регулюючи напрямок коліс у певному напрямку. Однак напрямок шасі робота не можна змінити. Найвигіднішим аспектом робота з синхронним приводом є те, що всі напрямки руху можна досягти лише за допомогою двох приводів. Оскільки механічна система гарантує однакову частоту керування, потрібно менше зусиль, щоб регулювати рух цього робота, щоб змінити напрямок руху. Інші переваги полягають у тому, що інформація одометра точна до певної міри, а рушійні сили рівномірно розподіляються між усіма колесами. Конфігурацію машини цього типу показано на рисунку 3.

Недоліками цього підходу є:

- продуманий механічний склад;

- якщо ланцюг керування гнучкий або передача слабка, швидкість коліс може відрізнятись.

Щоб досягти всенаправленого руху, напрямок коліс має бути ідентичним бажаному напрямку до того, як відбудеться рух.

Основна перевага шведського колеса полягає в тому, що мобільних роботів такого типу легко сконструювати. Щоб створити повністю спрямований робот-транспортний засіб, потрібні принаймні три різних колеса. Оскільки цих роботів можна сконструювати без активного контролю над компонентами колеса, механічні частини виконавчого органу можуть мати просту конструкцію. Однак механічна конструкція колеса дещо складна. Одним із недоліків шведського колеса є вертикальний рух, спричинений контактом між колесами та землею під час руху. Кілька механічних конфігурацій були спробовані вирішити цю проблему. Рисунок 4 ілюструє процес одного з цих проектів.

Цей тип робота може мати як мінімум два незалежних колеса, які обертаються. Ця роботизована система може регулювати будь-яку лінійну або кутову швидкість, яка не залежить від напрямку коліс. Оскільки в роботизованому транспортному засобі використовуються звичайні колеса, негативні сторони шведських коліс, включаючи вертикальний рух або проблеми з довговічністю, можна подолати. Серед негативних сторін цієї спроби:

- оскільки точка контакту з землею змінюється відносно шасі робота, може виникнути нестабільність, коли відстань між колесами занадто мала;

- якщо рух робота зворотний, напрямок коліс може раптово змінитися. Це може призвести до швидкої, швидкої, неавтоматичної зміни напрямку швидкості.

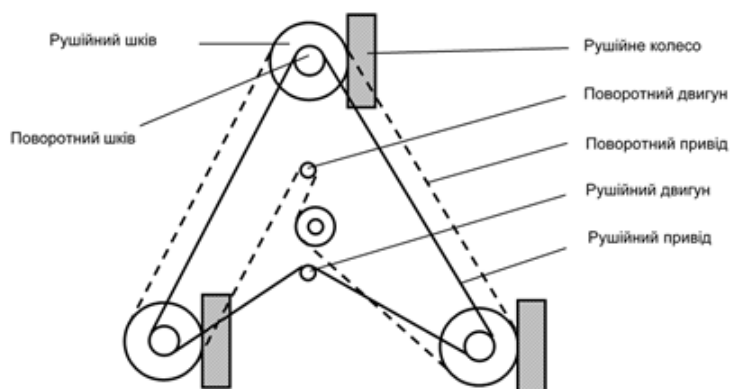
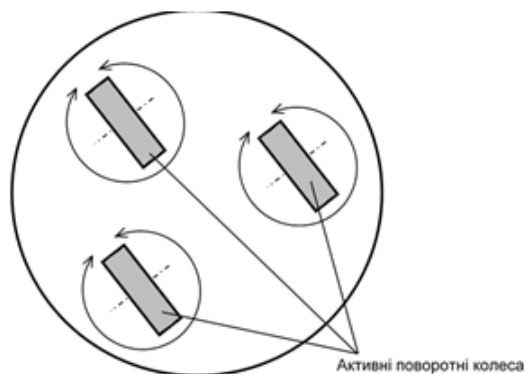


Рис. 3. Триколісний робот із синхронним приводом.

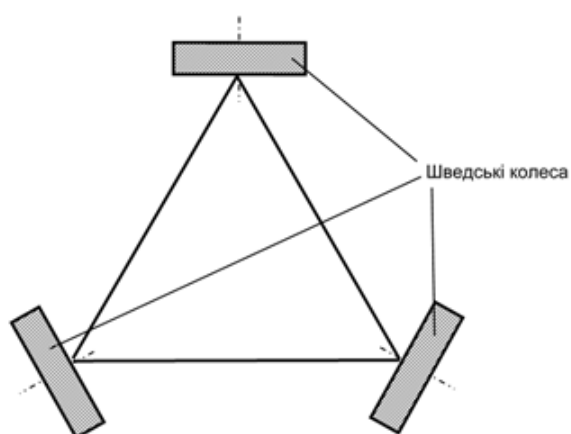


Рис. 4. Триколісний робот з шведським фіксованими колесами

Якщо нерухомий привід підключений безпосередньо до колеса, провід, який з'єднує двигун з колесом, можна простежити через кермо. Щоб уникнути цього, має бути встановлено редуктор, який перетворює вхідний обертовий рух від приводного двигуна, який потім передається на шасі робота. У цьому випадку механічний склад дещо складніший.

Якщо роботизована система має більше двох активних коліс плюс чотири додаткових приводу, загальна кількість використаних компонентів буде більше восьми. Оскільки мінімальна кількість приводів становить 3, ця

система є перенапруженою. У результаті виконавчі механізми повинні точно регулюватися синергетичним чином.

На рисунку 5 зображено конструкцію роботизованого транспортного засобу з трьома незалежними руховими колесами, які обертаються в різних напрямках.

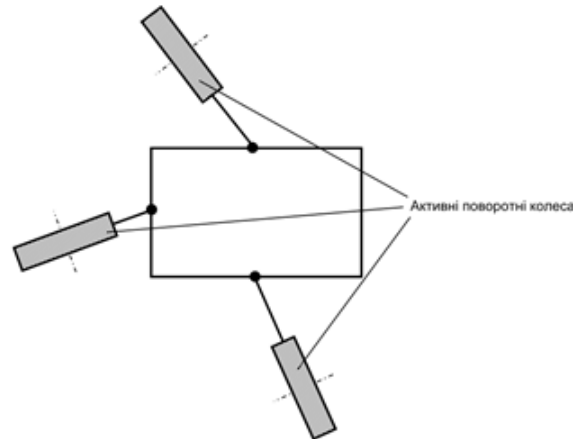


Рис. 5. Конструкція робота з трьома незалежними поворотними колесами.

Рисунок 6 ілюструє створення триколісної машини з двома активними обертами і пасивним обертанням.

Інші колеса центральної сцени використовуються для створення всепрямованих автоматів. Необхідно два модулі. Основна відмінність між проактивним вертлюгом і централізованим колесом полягає в тому, що орієнтація останнього завжди перпендикулярна вектору швидкості.

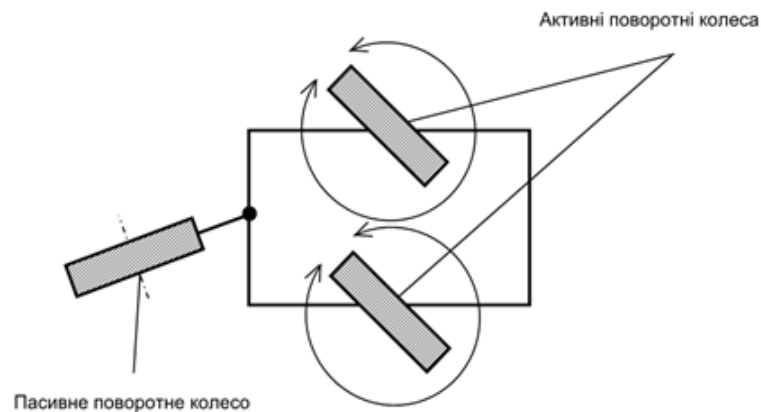


Рис. 6. Конструкція робота з двома активними поворотними та пасивним поворотним коліщатком.

Механічні недоліки подібні до методу силового колеса (тобто численні приводи та складні механічні конструкції). Оскільки провідний двигун безпосередньо підключений до ведучої осі, допустимі кути повороту часто обмежені, щоб запобігти проблемам з потужністю. Було описано багато різних конструкцій триколісних роботів, а також п'ять описаних вище. Ці конструкції також можна застосувати до 4-колісних роботів для підвищення стабільності. Інші колеса можуть бути пасивними без додавання додаткових обмежень на кінематичну вісь. Крім того, активні колеса можуть бути включені та повинні керуватися розв'язуванням кінематичної задачі, яка є зворотною. Щоб уникнути втрати стійкості, 4-колісним роботам потрібна система підвіски, щоб підтримувати контакт із землею.

Подібно до 3-колісних роботів, які мають диференціальне керування, але з двома додатковими вільними колесами, які є пасивними, ці роботи мають більш збалансований вигляд. Ця конструкція є потужнішою, ніж триколісні роботи, оскільки центр ваги розташований у прямокутнику, утвореному чотирма колесами, а не в трикутнику. Крім того, це збільшує доступний простір для додаткових механізмів і необхідних компонентів.

Настійно рекомендується, щоб центр ваги знаходився в середині прямокутника, це особливо важливо під час крутих поворотів або їзди по нерівній поверхні. Схематичний проект цього робота показаний на рисунку 7.

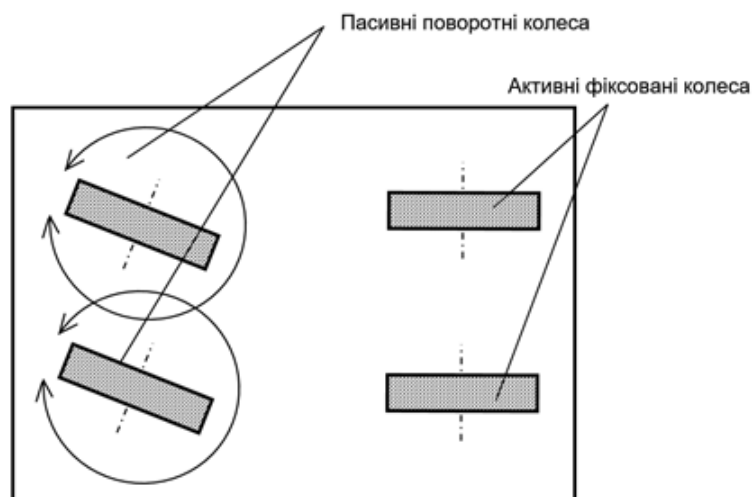


Рис. 7. Чотириколісний робот з двома активними незалежними рушійними і 2 пасивними поворотними колесами

У цій конструкції чотириколісних роботів використовуються дві пари ведених коліс. Кожна пара протилежних сторін рухається в одному напрямку. Складна частина цього типу руху полягає в тому, щоб усі колеса мали однакову швидкість. Якщо осі пари коліс не мають однакої швидкості, вісь, що рухається повільніше, буде зміщена. Якщо пари коліс не мають однакої швидкості та напрямку, робот-транспортний засіб матиме проблеми з рухом прямо. Правильна конструкція повинна включати частину автомобільного маневрування.

Схематичний проект цього робота показаний на рисунку 8.

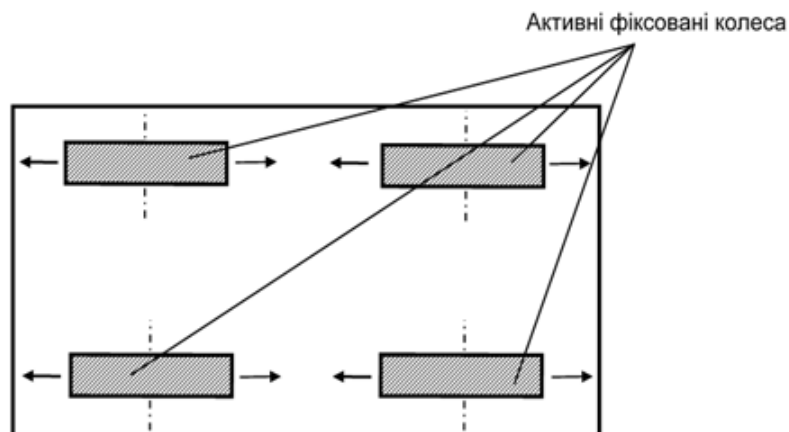


Рис. 8. Схематична конструкція робота з чотирма активними фіксованими колесами

Крім того, подібного робота можна сконструювати за допомогою шведського колеса, це показано на рисунку 9.

Такий варіант конструкції полегшує процес повернення до того ж принципу, що і звичайні автомобілі. Це більш складний спосіб пересування, а також підвищує складність розрахунку. Ця система є перевагою порівняно з попередніми підходами, які вимагали моторизованого двигуна: для її керування потрібен лише один двигун і спеціальний привод. Попередні підходи вимагали або двох двигунів, або складної коробки передач, остання з яких вимагала двох окремих виходів із незалежною швидкістю та напрямком обертання.

Схематичний проект цього робота показаний на рисунку 10.

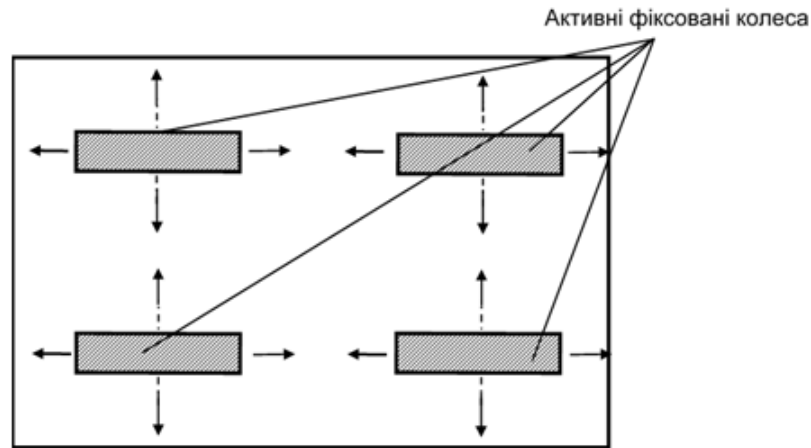


Рис. 9. Схематична конструкція робота з чотирма активними фіксованими шведськими колесами

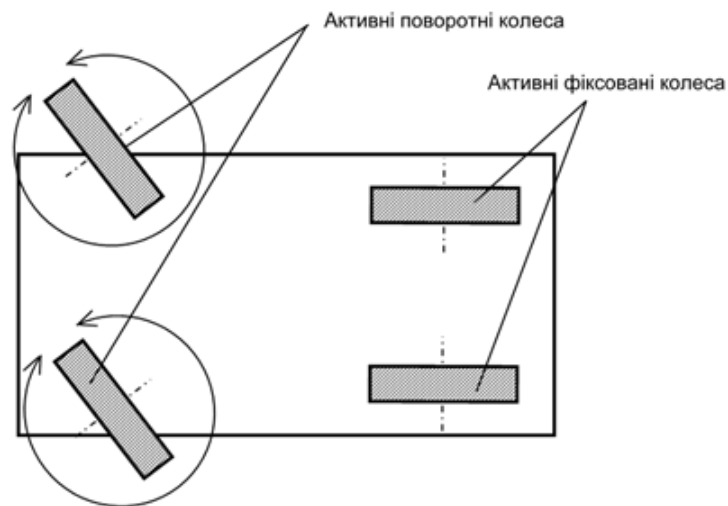


Рис. 10. Схематична конструкція робота з двома активними приводними і двома активними поворотними колесами

Двоколійний автономний балансір — це нестабільна, нелінійна, електромеханічна система, яка має два колеса, які безпосередньо контактують з поверхнею. Колеса мають властивість підтримувати центр ваги, який знаходиться над віссю колеса.

Основний принцип роботи самобалансуючої роботизованої платформи схожий на маятник, спрямований вниз. На відміну від типового маятника, який продовжує коливатися після збурення і в кінцевому підсумку повертається до початкового стану однорідності, маятник, який під дією сили тяжіння, приземлиться на поверхню.

Щоб зрозуміти концепцію керування самодостатнім роботом, розглянемо акт балансування олівця на пальці. Коли олівець нахилиється в певному напрямку, ми рухаємо пальцем у тому ж напрямку, і олівець стає нерухомим. Управління балансірною машиною подібне до цього: ви повинні обертати колеса в напрямку падіння машини, щоб підтримувати центр ваги вище точки обертання.

Двоколійні роботи, які самостійно балансують, мають датчики, які дозволяють їм бачити та відчувати оточення. Акселерометри, інклінометри та гіроскопи є частиною сімейства датчиків руху, які можна використовувати для введення або надання зворотного зв'язку системам керування. До них відносяться: поточна позиція або мета інформації. Ці вхідні дані можна об'єднати в процедуру, яка називається об'єднанням датчиків.

### **Висновки з даного дослідження і перспективи подальших розвідок у даному напрямі**

У роботі були розглянуті властивості, переваги та недоліки колісних роботів. Було проведено дослідження різних конструкцій і особливостей колісних роботів з різною кількістю коліс, а також розглянуто типи коліс, які використовуються в робототехніці. Ідея регулювання двоколісного роботизованого транспортного засобу, переваги та принципи роботи двоколісних транспортних засобів були задокументовані.

### **Література**

1. Glad, Torkel. Ljung, Lennart. 2006. Reglerteknik - Grundläggande teori. 4th edn. Studentlitteratur
2. MathWorks. 2012. Control Tutorials for MATLAB and SIMULINK, Inverted Pendulum [Електронний ресурс] – Режим доступу до ресурсу: <http://ctms.engin.umich.edu/CTMS/index.php.exampleInvertedPendulumsection-SystemModeling>. [Accessed 21 April 2015]
3. Лукінюк М. В. Автоматизація типових технологічних процесів: технологічні об'єкти керування та схеми автоматизації [Текст] : навч. посіб. для студ. вищ. навч. закл., які навч. за напрямом «Автоматизація і комп'ютерно-інтегровані технології» / М. В. Лукінюк; Національний технічний ун-т України «Київський політехнічний ін-т». – К.: НТУУ «КПІ», 2008. – 236 с.
4. «Промислові роботи: тренди й типи». [Електронний ресурс] – Режим доступу до ресурсу: URL: <https://www.controlengrussia.com/innovatsii/promy-eroboty-trendy-i-tipy/>

### **References**

1. Glad, Torkel. Ljung, Lennart. 2006. Reglerteknik - Grundläggande teori. 4th edn. Studentlitteratur.
2. MathWorks. 2012. Control Tutorials for MATLAB and SIMULINK, Inverted Pendulum [Elektronnyi resurs] – Rezhym dostupu do resursu: <http://ctms.engin.umich.edu/CTMS/index.php.exampleInvertedPendulumsection-SystemModeling>. [Accessed 21 April 2015].
3. Lukiniuk M. V. Avtomatyzatsiia tipovykh tekhnolohichnykh protsesiv: tekhnolohichni obiekty keruvannia ta skhemy avtomatyzatsii [Tekst] : navch. posib. dlia stud. vshch. navch. zakl., yaki navch. za napriamom «Avtomatyzatsiia i kompiuterno-intehrovani tekhnolohiii» / M. V. Lukiniuk; Natsionalnyi tekhnichnyi un-t Ukrainy «Kyivskiy politekhnichnyi in-t». – K.: NTUU «KPI», 2008. – 236 s.
4. «Promyslovi roboty: trendy y typy». [Elektronnyi resurs] – Rezhym dostupu do resursu: URL: <https://www.controlengrussia.com/innovatsii/promy-eroboty-trendy-i-tipy/>

## РЕЦЕНЗІЯ НА КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ

Дипломник: Ничипорчук Дмитро Миколайович

Тема: Модель керування робота-балансира

Спеціальність: 174 «Автоматизація, комп'ютерно-інтегровані технології та робототехніка»

Обсяг кваліфікаційної роботи:

Кількість сторінок записки 86

1. Короткий зміст роботи та прийнятих рішень: Метою роботи є розробка математичної моделі керування роботом-балансиром.
2. Висновок про відповідність роботи дипломному завданню: Робота повністю відповідає поставленому завданню
3. Характеристика виконання кожного розділу, ступінь використання останніх досягнень науки і техніки і передових методів роботи: Перший розділ було присвячено огляду переваг і недоліків колісних роботів. Також були проаналізовані різні конструкції колісних роботів, різна кількість коліс і різні типи коліс, що застосовуються в робототехніці. Концептуальний проект двоколісного робота, переваги та режими роботи двоколісних транспортних засобів добре описані в літературі. У другому розділі було розроблено стратегію автоматизації та те, як двоколісна самобалансуюча машина перемикається між різними напрямками. Розглянуто та обрано основні складові реалізації проекту. Крім того, була створена 3D-модель корпусу, яка пізніше буде надрукована та використана в роботі. У третьому розділі досліджувалися фізичні властивості перевернутого маятника, що призвело до формулювання рівняння динаміки. Рівняння динаміки було спрощено. Перетворення Лапласа було застосовано для лінеаризованих рівнянь для отримання функцій, що стосуються двох вхідних даних. Система також була виставлена на державному просторі. Побудовано перехідну, імпульсну та логарифмічну частотну характеристики амплітуди. З вигляду перехідної поведінки та положення полюсів і нулів було зроблено висновок, що система є внутрішньо нестійкою. У четвертому розділі розроблено контролер, який реалізує дії, визначені алгоритмом ППД. Проаналізовано якість роботи регулятора з різними невідповідностями та встановлено гранично допустимі невідповідності. Для вдосконалення системи керування розроблено синтезований ППД-регулятор. З результатів дослідження видно, що адаптивний регулятор більш ефективний у боротьбі з відхиленнями і може бути рекомендований для практичного впровадження.
4. Позитивні сторони роботи: розроблено математичну модель керування роботом-балансиром

5. Негативні сторони роботи: недостатній огляд існуючих технічних рішень, наявні стилістичні та граматичні поимлки

6. Оцінка графічного оформлення та пояснювальної записки роботи: Пояснювальна записка оформлена коректно, згідно діючих стандартів оформлення документації

7. Відгук про роботу в цілому: Робота виконана на належному науково-технічному рівні.

8. Інші зауваження: відсутні

9. Оцінка дипломної роботи: задовільно (3,50/D)

Рецензент (прізвище, ім'я, по батькові, посада, місце роботи)

Мішан Віктор Валодимирович) доцент  
кар. ТМіТ

"20" 12 2024 р.

  
(підпис)

Завідувачу кафедри АКІТтаР  
д-ру техн.наук, проф. Мартинюку В.В.

Ничипорчук Дмитро Миколайович

ПІБ здобувача вищої освіти

ФІТ, 2 курс, групи АКІТРм-23-1

### ЗАЯВА

З правилами чинного Положення «Про систему забезпечення академічної доброчесності у Хмельницькому національному університеті» від 01.07.2022, згідно з яким виявлення плагіату є підставою для відмови в допуску кваліфікаційної роботи до захисту та застосування заходів дисциплінарної та академічної відповідальності, ознайомлений(а). Про використання програмно-технічних засобів для перевірки кваліфікаційних робіт здобувачів вищої освіти на наявність плагіату ознайомлений(а) та надаю свою згоду на обробку та збереження університетом моєї роботи в інституційному репозитарії університету.

Також надаю університету право на передачу моєї роботи для обробки та збереження в базах даних програмно-технічних засобів (StrikePlagiarism та Anti-Plagiarism) та використання роботи для виявлення плагіату в інших роботах, які перевіряються програмно-технічними засобами та користувачами, що мають доступ до цих програмно-технічних засобів, виключно в обмежених цілях для виявлення плагіату в текстах робіт.

Робота для перевірки університетом надається в друкованому та електронному варіанті. Електронна версія моєї роботи збігається (ідентична) з друкованою.

02.12.2024

дата



підпис

## Протокол аналізу звіту подібності науковим керівником

Заявляю, що я ознайомився (-лась) з Повним звітом подібності, який був згенерований Системою виявлення і запобігання плагіату щодо роботи:

**Автор:** Дмитро НИЧИПОРУК

**Співавтор:**

**Назва:** МКР Ничипорук

**Науковий керівник:** Юрій ФОРКУН

**Підрозділ:** Кафедра автоматизації, комп'ютерно-інтегрованих технологій та робототехніки

**Коефіцієнт подібності 1:** 10%

**Коефіцієнт подібності 2:** 2.7%

**Мікропробіли:** 4

**Заміна букв:** 3

**Інтервали:** 0

**Білі знаки:** 0

**Дата створення звіту:** 2024-12-20 00:52:37.0

**Після аналізу Звіту подібності констатую наступне:**

Запозичення, виявлені в роботі є законними і не є плагіатом. Рівень подібності не перевищує допустимої межі. Таким чином робота незалежна і приймається.

Запозичення не є плагіатом, але перевищено граничне значення рівня подібностей. Таким чином робота повертається на доопрацювання.

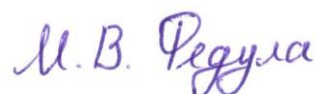
Виявлено запозичення і плагіат або навмисні текстові спотворення (маніпуляції), як передбачувані спроби укриття плагіату, які роблять роботу невідповідною вимогам законодавства (Ст. 32. ЗУ Про вищу освіту, пункт 3.1, Ст. 42. ЗУ Про освіту) та вимог НАЗЯВО (Критерій 5), а також кодексу етики і процедурам. Таким чином робота не приймається.

Обґрунтування:

2024-12-20

Дата

  
експерт



# Anti-Plagiarism v-15.257

**Максимальне співпадіння з одним документом 12.0%**

Словники перевірки: en\_US, ru\_RU, ua\_UA. **Помилки в документах: 10%**

ID: 161608 Назва: МКР Математична модель керування робота-балансира Додано в БД: 2024-12-20 Автора: Дмитро НИЧИПОРУК Керівники: Юрій ФОРКУН Консультанти: Опоненти:	Документ		Сумарний збіг по Базі Даних	
	Символи	Лексеми	Символи	Лексеми
	71895	695	8832 (12%)	110 (16%)

РІШЕННЯ ЕКСПЕРНОЇ КОМІСІЇ  
КАФЕДРИ АВТОМАТИЗАЦІЇ, КОМП'ЮТЕРНО-ІНТЕГРОВАНИХ ТЕХНОЛОГІЙ ТА  
РОБОТОТЕХНІКИ  
ПРО ДОПУСК КВАЛІФІКАЦІЙНОЇ РОБОТИ ДО ЗАХИСТУ

Підтверджуємо ознайомлення з результатом звіту подібності щодо роботи, генерованого системою виявлення текстових збігів/ідентичності/схожості:

Назва: Математична модель керування робота-балансира

Автор: Ничипорчук Дмитро Миколайович

Спеціальність: 174 – Автоматизація, комп'ютерно-інтегровані технології та робототехніка

Освітня програма: Освітньо-професійна програма «Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології»

Науковий керівник: Форкун Юрій Вікторович, кандидат технічних наук, доцент

Після аналізу звіту подібності зроблено такий висновок:

№	Висновок	Позначка про відповідність
1	Запозичення, виявлені в роботі, є законними і не є плагіатом. Робота приймається до захисту.	<b>відповідає</b>
2	Виявлені запозичення не є плагіатом, розміщені в розділах, які не описують безпосередньо авторське дослідження, але кількість цитат перевищує обсяг, виправданий поставленою метою роботи. Робота приймається до захисту, але має бути відкоригована. Відкоригований варіант має бути поданий на кафедру за 2 дні до захисту, разом із заявою щодо самостійності виконання письмової роботи та ідентичності друкованої й електронної версії роботи	
3	Виявлені запозичення не є плагіатом, але частково розміщені в розділах, які описують безпосередньо авторське дослідження, а кількість цитат перевищує обсяг, виправданий поставленою метою роботи. В зв'язку з цим мета роботи та поставлені завдання не були досягнені. Робота може бути допущена до захисту (наступного року) після того, як буде відкоригована та допрацьована і успішно пройде повторну перевірку на академічний плагіат.	
4	Робота містить навмисні текстові спотворення, передбачувані спроби укриття запозичень або інші прояви академічного плагіату. Робота містить фабрикацію або фальсифікацію даних. Робота не допускається до захисту.	
5	Інше:	

Підтвердження:

Запозичення, виявлені в роботі, є законними і не є плагіатом, оскільки:

1) у тексті кваліфікаційної роботи системами перевірки на плагіат виявлено схожість з деякими документами в частині загальноживаних обов'язкових словосполучень у стандартних бланках (титулка, відомість документів), у структурі змісту, назвах розділів/підрозділів тощо, у назвах публікацій у переліку джерел посилання;

2) усі запозичення є фрагментарними або мають належним чином оформленні посилання;

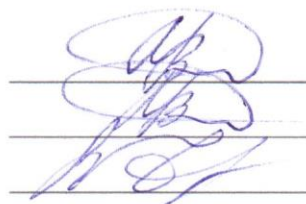
3) виявлені модифікації тексту не впливають на відсоток схожості.

Сумарний обсяг всіх запозичень, визначений системою виявлення збігів ідентичності/схожості, складає 10,01% і адресується до 4 джерел, що, з урахуванням наведених обґрунтувань, відповідає характеру теми і свідчить на користь кваліфікаційної роботи.

Завідувач кафедри

Гарант освітньої програми

Керівник кваліфікаційної роботи



Валерій МАРТИНЮК

Валерій МАРТИНЮК

Юрій ФОРКУН