

Міністерство освіти і науки України
Харківський національний університет радіоелектроніки

Факультет Автоматики і комп'ютеризованих технологій
(повна назва)

Кафедра Комп'ютерно-інтегрованих технологій, автоматизації та робототехніки
(повна назва)

КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА
Пояснювальна записка
другий (магістерський)

(рівень вищої освіти)

Розроблення системи автоматичного керування самобалансуючим роботом
(тема)

Виконав:

здобувач 2 року, групи КІТПВМ-23-2

Горяїнов І. О.

(прізвище, ініціали)

Спеціальності 174 Автоматизація, комп'ютерно-інтегровані технології та робототехніка

(код і повна назва спеціальності)

Тип програми Освітньо-професійна

(освітньо-професійна або освітньо-наукова)

Освітня програма Комп'ютерно-інтегровані технологічні процеси і виробництва

(повна назва освітньої програми)

Керівник доц. Аллахверанов Р. Ю.

(посада, прізвище, ініціали)

Допускається до захисту
Зав. кафедри КІТАР

(підпис)

Невлюдов І. Ш.

(прізвище, ініціали)

2025р.

ХАРКІВСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ РАДІОЕЛЕКТРОНІКИ

Факультет	Автоматики і комп'ютеризованих технологій
Кафедра	Комп'ютерно-інтегрованих технологій, автоматизації та робототехніки
Рівень вищої освіти	другий (магістерський)
Спеціальність	174 Автоматизація, комп'ютерно-інтегровані технології та робототехніка
Тип програми	освітньо-професійна
Освітня програма	Комп'ютерно-інтегровані технологічні процеси і виробництва

(код і повна назва)

ЗАТВЕРДЖУЮ:

Зав. кафедри КІТАР _____

(підпис)

« ____ » _____ 2024 р.

ЗАВДАННЯ НА КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ

Здобувачеві _____ *Горяїнову Іллі Олексійовичу*
(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема роботи *Розроблення системи автоматичного керування самобалансуючим роботом*

затверджена наказом по університету від "22" листопада 2024 р. № 1231 Ст.

2. Термін подання студентом роботи "27" січня 2025 р.

3. Вихідні дані до роботи 3.1 *Двоколісний самобалансуючий робот;*

3.2 *Керуючий модуль – Arduino Mega;*

3.3 *Датчик кута нахилу – MPU6050;*

3.4 *Пакет прикладних програм – MATLAB;*

3.5 *Оформлення текстової документації – ДСТУ 3008-2015.*

4. Перелік питань, що потрібно опрацювати в роботі 4.1 *Вступ;*

4.2 *Аналіз предметної області і вибір комплектуючих для розроблення самобалансуючого робота;*

4.3 *Математичне моделювання двоколісного самобалансуючого робота;*

4.4 *Комп'ютерне моделювання динамічних характеристик самобалансуючого робота;*

4.5 *Охорона праці;*

4.6 *Висновки.*

5. Перелік графічного матеріалу із зазначенням креслеників, схем, плакатів, комп'ютерних ілюстрацій Демонстраційний матеріал представлений у форматі презентації PowerPoint (*.ppt) – 20 с. формату А4

6. Консультанти розділів роботи

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

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№	Назва етапів роботи	Термін виконання етапів роботи	Примітка
1	<i>Аналіз предметної області і вибір комплектуючих для розроблення самобалансуючого робота</i>	25.11 – 30.11.24	<i>виконано</i>
2	<i>Математичне моделювання двоколісного самобалансуючого робота</i>	01.12 – 12.12.24	<i>виконано</i>
3	<i>Комп'ютерне моделювання динамічних характеристик самобалансуючого робота</i>	13.12 – 31.12.24	<i>виконано</i>
4	<i>Охорона праці</i>	01.01 – 06.01.25	<i>виконано</i>
5	<i>Оформлення пояснювальної записки</i>	07.01 – 10.01.25	<i>виконано</i>
6	<i>Подання роботи на перевірку Інтернет-системою StrikePlagiarism</i>	11.01 – 15.01.25	<i>виконано</i>
7	<i>Подання роботи на рецензію</i>	16.01 – 19.01.25	<i>виконано</i>
8	<i>Подання роботи на підпис зав. кафедри</i>	20.01 – 24.01.25	<i>виконано</i>
9	<i>Подання кваліфікаційної роботи в ЕК</i>	28.01.25	<i>виконано</i>

Дата видачі завдання 25.10.2024 р.

Здобувач _____ Горяїнов І. О.
(підпис)

Керівник роботи _____ доц. Аллахверанов Р. Ю.
(підпис) (посада, прізвище, ініціали)

Я, як студент ХНУРЕ, розумію і підтримую політику закладу із академічної доброчесності. Я не надавав і не одержував допомогу під час підготовки кваліфікаційної роботи. Використання ідей, результатів і текстів інших авторів мають посилання на відповідне джерело.

«25» жовтня 2024р.



Горяїнов І. О.

РЕФЕРАТ

Пояснювальна записка: 71 с., 1 табл., 42 рис., 1 дод., 20 джерел.

СИСТЕМА КЕРУВАННЯ, САМОБАЛАНСУЮЧИЙ РОБОТ, ДИНАМІЧНІ ХАРАКТЕРИСТИКИ, ПІД-РЕГУЛЯТОР, ШИРОТНО-ІМПУЛЬСНА МОДУЛЯЦІЯ, МІКРОЕЛЕКТРОМЕХАНІЧНІ СИСТЕМИ.

Мета роботи – підвищення функціонування самобалансуючого робота, за рахунок розробки математичної моделі та алгоритмів керування.

Об'єкт дослідження – процес керування функціонуванням двоколісного самобалансуючого робота.

Предмет дослідження – математична модель, алгоритми керування.

Для розв'язання поставлених завдань послуговувались методами математичного моделювання, теорією автоматичного керування, теорією фільтрації та системного аналізу. Достовірність наукових положень підтверджується проведеними випробуваннями фізичної моделі. За результатами аналізу систем запропоновано модель керування самобалансуючим роботом з метою збереження ним рівноваги під час переміщення або утримання позиції. Створено алгоритм керування двигунами для підтримання заданої швидкості на валу двигуна, тобто незалежно від моменту опору на їхньому валу. Використання результатів втілених досліджень дає змогу суттєво полегшити розроблення мобільних самобалансуючих роботів шляхом їхнього моделювання, до моменту реалізації визначаючи та аналізуючи динамічні параметри робота під час різних умов експлуатації. Отримані результати роботи можна віднести до Цілі сталого розвитку 9 «Промисловість, інновації та інфраструктура», зокрема до пункту 9.4 «Розвиток високотехнологічного машинобудування».

ABSTRACT

Explanatory note: 71 pp., 1 tab., 42 figs., 1 appendices, 20 sources.

CONTROL SYSTEM, SELF-BALANCING ROBOT, DYNAMIC CHARACTERISTICS, SUBREGULATOR, PULSE WIDTH MODULATION, MICROELECTROMECHANICAL SYSTEMS.

The aim of the work is to improve the functioning of a self-balancing robot by developing a mathematical model and control algorithms.

The object of research is the process of controlling the functioning of a two-wheeled self-balancing robot.

The subject of research is a mathematical model, control algorithms

To solve the tasks, we used the methods of mathematical modeling, automatic control theory, filtering theory, and system analysis. The validity of the scientific positions is confirmed by the tests of the physical model. Based on the results of the system analysis, a control model for a self-balancing robot is proposed to maintain its balance while moving or holding a position. An algorithm for controlling motors to maintain a given speed on the motor shaft, i.e., regardless of the moment of resistance on their shaft, was created. The use of the results of the implemented research makes it possible to significantly facilitate the development of mobile self-balancing robots by modeling them, determining and analyzing the dynamic parameters of the robot under different operating conditions before implementation. The results of the work can be attributed to Sustainable Development Goal 9 “Industry, Innovation and Infrastructure”, in particular to paragraph 9.4 “Development of High-Tech Engineering”.

ЗМІСТ

Перелік скорочень	9
Вступ	10
1 Аналіз предметної області і вибір комплектування для розроблення самобалансуючого робота	12
1.1 Аналіз конструкцій самобалансуючих роботів	12
1.2 Аналіз систем керування самобалансуючих роботів	19
1.3 Вибір комплектування для створення самобалансуючого робота	22
1.4 Висновки по розділу	24
2 Математичне моделювання двоколісного самобалансуючого робота	25
2.1 Розроблення математичної моделі самобалансуючого робота	25
2.2 Перевірка системи керування	31
2.3 Оцінка кута повороту та швидкості обертання колеса	33
2.4 Розрахунок ПД-регулятора	46
2.5 Висновки по розділу	48
3 Комп'ютерне моделювання динамічних характеристик самобалансуючого робота	49
3.1 Комп'ютерна модель самобалансуючого робота	49
3.2 Налаштування ПД-регуляторів моделі	53
3.3 Випробування динамічних характеристик самобалансуючого робота ..	58
3.4 Висновки по розділу	62
4 Охорона праці	63
4.1 Аналіз умов праці на робочому місці	63
4.2 Промислова безпека на робочому місці	63
4.3 Виробнича санітарія у приміщенні	64
4.4 Пожежна безпека у приміщенні	66
Висновки	68

Перелік джерел посилання	69
Додаток А Демонстраційний матеріал	72

ПЕРЕЛІК СКОРОЧЕНЬ

- АЦП – аналогово-цифровий перетворювач;
ЕРС – електрорушійна сила;
ЕОМ – електронно-обчислювальна машина;
КПО – коефіцієнт природної освітленості;
МЕМС – мікроелектромеханічні системи;
МК – мікроконтролер;
ПД – пропорційно-інтегрально-диференціальний;
ПК – персональний комп'ютер;
ШИМ – широтно-імпульсна модуляція;
DMP – Digital Motion Processor;
GPS – Global Positioning System;
FIFO – First in First Out;
UART – Universal Asynchronous Receiver-Transmitter.

ВСТУП

Наразі дуже активно розвивається галузь робототехніки, котра спрямована на мобільних роботів, на кшталт тих, які балансують. Роботи такої будови зможуть замінити людину в різних галузях, зокрема зможуть виконувати роботу офіціантів, кур'єрів, стати роботами присутності. На противагу чотириколісним роботам, ці роботи спроектовані із більшою висотою та маневреністю, зберігаючи при цьому гарну стійкість. Складність щодо проектування даних роботів полягає у розробленні алгоритмів керування, що наділяють робота такими властивістями, як збереження рівноваги та заданої позиції, що базуються на даних лінійних і кутових датчиків положення.

Незважаючи на існування значної кількості робіт за даною темою, завдання залишається розв'язаним не повністю через те, що більшість авторів працюють з ідеалізованими математичними моделями, не розповсюджуючи свої дослідження на фізичні зразки пристроїв. Однак у фізичних реалізаціях наявні такі аспекти, впровадження яких до математичної моделі роблять її нестійкою та проблемною щодо налаштування. Мова йде про такі моменти: дискретизацію, похибки датчиків, люфти виконавчих механізмів, зони нечутливості двигунів тощо.

З огляду на сказане вище підкреслимо зростання інтересу в цій царині та актуальність проблеми, проте водночас відсутня формалізована методика розв'язання поставленої задачі, що дає змогу визначити межі можливої системи. Отже, тема кваліфікаційної роботи – актуальна.

Мета роботи полягає у підвищенні функціонування самобалансуючого робота, за рахунок розробки математичної моделі та алгоритмів керування.

Об'єктом дослідження є процес керування функціонуванням двоколісного самобалансуючого робота.

Предметом дослідження є математична модель, алгоритми керування.

Для досягнення мети були поставлені такі завдання:

- вивчити види та галузь використання мобільних самобалансуючих роботів;
- визначити комплектування для розроблення самобалансуючого робота;
- створити математичну модель системи керування двоколісним самобалансуючим роботом;
- змоделювати динамічні параметри самобалансуючого робота;
- розробити заходи та технічні засоби щодо забезпечення безпеки праці персоналу, що працює в лабораторії.

Робота виконується згідно з [1-4], як складова наукових досліджень, які проводяться на кафедрі КІТАР Харківського національного університету радіоелектроніки, результати дослідження опубліковані у [5, 6], отримані результати роботи можна віднести до Цілі сталого розвитку 9 «Промисловість, інновації та інфраструктура», зокрема до пункту 9.4 «Розвиток високотехнологічного машинобудування».

1 АНАЛІЗ ПРЕДМЕТНОЇ ОБЛАСТІ І ВИБІР КОМПЛЕКТОВАННЯ ДЛЯ РОЗРОБЛЕННЯ САМОБАЛАНСУЮЧОГО РОБОТА

1.1 Аналіз конструкцій самобалансуючих роботів

На сьогодні набули значної популярності самобалансувальні роботи. Значного зацікавлення вони викликають у розробників систем автоматичного керування, адже є чудовим прикладом нестійкої системи, а можливість її налаштування дає змогу відпрацювати різні регулятори та методи керування, що згодом можуть функціонувати в інших проєктах, зокрема, у ракетах. Однак водночас із академічним інтересом роботи мають і комерційний успіх. Так, Segway та схожі за будовою транспортні засоби стають дедалі доступнішими та популярнішими в усьому світі. Вивчимо більш детально деякі з цих проєктів.

LegWay – це легоробот, який балансує. Його було створено у 2003 році Стівом Хассенпругом, рис. 1.1. Конструкція власне такого балансувального робота побудована з двох незалежних коліс з електроприводами, контролера керування і двох датчиків відстані, що спрямовані на підлогу. Так, робот дізнається про свій кут завдяки даним, які надходять із датчиків і за допомогою контролера перетворює ці дані на сигнал керування двигунами.



Рисунок 1.1 – Самобалансуючий робот LegWay

NXTway – це робот, який створив Філіп Гарбейн із набору Mindstorms NXT. Такий зразок вважається більш сучасним аналогом LegWay. Крім того, він теж побудований на датчику відстані, проте лише одному, рис. 1.2.



Рисунок 1.2 – Самобалансуючий робот NXTway

NXTway-G – це самобалансуючий робот, який було розроблено у 2007 році РьоВатанабі. На відміну від наведених вище зразків, у такому роботі замість датчика відстані застосовують гіро-сенсор. Все інше конструктивно не змінилося (рис. 1.3).



Рисунок 1.3 – Самобалансуючий робот NXTway-G

MIP 0825 WOWWEE – це самобалансуючий робот, який було розроблено у 2014 році компанією WOWWEE. Він є комерційним роботом та створений для розваг. Керування ним реалізується за допомогою мобільних пристроїв на операційній системі Android, iOS, а також – жестами (рис. 1.4).



Рисунок 1.4 – Самобалансуючий робот MIP 0825 WOWWEE

EMIEW – це самобалансуючий робот, який було розроблено компанією Hitachi в 2005 році. Його позиціонують як офісного робота (рис. 1.5).



Рисунок 1.5 – Офісний самобалансуючий робот EMIEW

Він спроможний розвивати швидкість до 6 км/год, важить 70 кг та має висоту 130 см, обладнаний гуманоїдними руками, за допомогою яких може маніпулювати різними об'єктами. Крім того, вміє розрізняти голоси на відстані, а також приймати команди від користувачів. Водночас може сам знаходити шлях і переміщуватись офісними приміщеннями, завдяки чому може виконувати роботу листоноші в офісі, транспортуючи деякі папери та інші не особливо великі предмети.

EMIEW 2 є другою поліпшеною версією EMIEW. За висотою вона зменшилася до 80 см, вага становить 14 кілограмів. До того ж було додано дві гуманоїдні ноги, в яких замість кожної ступні – колесо. Така модель наділена більшою прохідністю, що дозволяє не втрачати швидкість (рис. 1.6).



Рисунок 1.6 – Гуманоїдний самобалансуючий робот EMIEW 2

Нову модель обладнано лазерним радаром з метою побудови карти незнайомих приміщень, а також ухилення від зіткнення з рухомими та стаціонарними об'єктами, що рухаються. Крім того, робот було устатковано функцією розпізнавання незнайомих йому предметів. Коли роботу демонструють незнайомий йому предмет і запитують, що це, то він спершу його фотографує, потім шукає збіги в інтернеті і за результатами

статистичного аналізу робить висновки про предмет. Також робот устатковано функцією пошуку речей. Так, пошук речей робот виконує за допомогою великої кількості камер, які встановлені в офісі, виявивши збіг, він прямує до знайденої речі.

Segway є мобільним балансувальним транспортним засобом (рис. 1.7). Дана система складається з двох незалежних електродвигунів, системи датчиків нахилу і центру мас. Датчики багато разів на секунду вимірюють положення скутера, нахил наїзника, а комп'ютер, який керує, на базі таких даних формує сигнали на двигуни. З моменту появи першої моделі минуло вже багато років і на ринок вийшло багато її поколінь. Segway стали популярними, ними навіть послуговувались поліцейські та військові. Крім того, у більшості країн вони прирівняні до велосипедів або мотоскутерів. Один із останніх представників серії Segway i2 SE може функціонувати без підзарядки 40 км, розганятися до 20 км/год та важити 47 кг. Паралельно із міськими й офісними моделями фірма випустила і позашляхові варіанти, що обладнані більш масивними колесами з великим протектором.



Рисунок 1.7 – Самобалансуючий робот Segway

Скутер ES2 вважається меншим братом Segway. На відміну від більшої версії він володіє скромнішими параметрами: його швидкість досягає

12 км/год, запас ходу 15-20 км залежно від стилю водіння, вага 12 кг. У порівнянні з великою моделлю він позбавлений стійки, у зв'язку з цим керувати ним стає менш комфортно. До того ж колеса мають менший діаметр, що зменшує його прохідність, а в плані керування він копіює Segway, датчики і система керування двигунами у нього теж аналогічні, проте різниця полягає лише в ціні (рис. 1.8).



Рисунок 1.8 – Скутер ES2

Моноколесо Ninebot ONE E+ – наступний варіант Segway, апогей мінімалізму, оскільки від усієї ходової частини залишилося тільки одне колесо. Людина стоїть на спеціальних підставках, і колесо розташовано в неї між ніг. Незважаючи на свої невеликі габарити, моноколесо може розігнати швидкість до 20 км/год і запас ходу 30 км, утім вага його – 14 кг (рис. 1.9). Керування моноколесом реалізується шляхом перенесення центру мас тіла, керування виконується інтуїтивно, тому поїздки на таких пристроях стають не тільки засобом пересування, а ще й засобом розваг.



Рисунок 1.9 – Моноколесо

Самобалансуючий мобільний робот Handle було розроблено компанією Boston Dynamics задля переміщення ящиків на складі (рис. 1.10). Він побудований на маленькій базі, устаткований довгим маніпулятором, відеосистемою з розпізнаванням об'єктів, завдяки якій може розвантажувати вантажні автомобілі, складати палети та переміщати коробки складом. Робот заавишки до 2 м та вантажопідйомністю 15 кг. Він здатний рухатись із швидкістю до 4 м/с і стрибати на висоту 1,2 м. До того ж заряду батареї вистачить на 24 км пробігу.

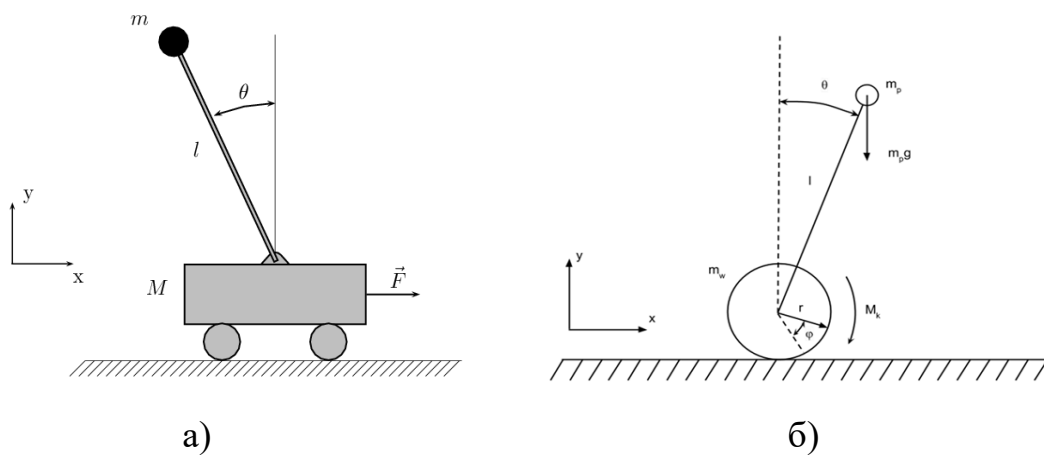


Рисунок 1.10 – Самобалансуючий мобільний робот Handle

Значна кількість пристроїв так і залишається на стадії прототипів, ймовірно це пов'язано із очікуванням на появу більш точних датчиків вимірювання та нових систем оброблення даних, які можна буде застосувати в розробленій конструкції. Так, розповсюдження набули власне ті системи, котрі прямо взаємодіють з людиною як із користувачем. Водночас людиною, як правило, і виконується роль балансування вже під час безпосереднього використання.

1.2 Аналіз систем керування самобалансуючих роботів

Аналіз системи керування самобалансуючих роботів доцільно розпочати з розгляду систему “зворотній маятник”. Завдання стабілізації системи “зворотній маятник” вважається доволі складним, водночас усілякі розробники розв'язують його по-різному. З погляду технічних рішень варіабельність системи залежить від того, яким чином представлена власне система. З точки зору математики система може бути представлена як візок, на якому розміщено маятник, або як стрижень на колесі (рис. 1.11) [7].



а – візок із маятником; б – стрижень на колесі

Рисунок 1.11 – Різновид системи “зворотній маятник”

Зворотні маятники, котрі відповідають типу візок із маятником (рис. 1.1, а), можуть бути спроектовані не тільки як візок, який рухається на колесах нескінченною поверхнею, проте і як візок, який рухається за допомогою ремінної передачі. У даному варіанті візок закріплений на ремені. У розглянутому типі нахил стрижня можна відстежувати за допомогою потенціометра чи іншого датчика повороту, зокрема, дисковим позиційним енкадером. Відстеження лінійного переміщення маятника реалізується або за допомогою енкадерів, які встановлені на виконавчих двигунах, або за допомогою оптичних датчиків відстаней.

Зворотні маятники, котрі відповідають типу стрижень на колесі (рис. 1.1, б), можуть нескінченно рухатися в просторі, відстеження кута нахилу в них реалізується або за допомогою оптичних датчиків, що спрямовані на площину, якою переміщується робот, або за допомогою акселерометрів і гіроскопів. Існує вірогідність застосування й оригінальних систем із відстеженням кількох точок робота за допомогою датчиків положення, котрі ґрунтуються на роботі радіовипромінювачів. Відстеження лінійного положення при цьому реалізується переважно за допомогою енкодерів, які встановлені на вал двигуна.

З погляду теорії керування всі зворотні маятники, як і більшість систем керування, є об'єктами із замкнутими негативними зворотними зв'язками. На рис. 1.2 продемонстровано узагальнену структурну схему всіх самобалансуючих роботів, у котрій зворотний зв'язок замкнутий тільки за кутом повороту виконавчого механізму, а для стабілізації робота під час лінійного руху в точці позиціонування система повинна додатково замикатися зворотним зв'язком за лінійним переміщенням [9].



Рисунок 1.12 – Зворотні маятники

З погляду теорії керування системи відрізняються лише регуляторами. На жаль, неможливо дізнатися, які регулятори функціонують у комерційних проєктах, однак у наукових проєктах використовують всі можливі регулятори, котрі сприяють стабілізації нестійкої системи. Найпростішим щодо налаштування є ПІД-регулятор, пропорційно-інтегрально-

диференціальний, лише відповідно до балансувальних роботів, як правило, його в контурі керування за кутом перетворюють на PD, у зв'язку з тим, що інтегральна складова вносить інерційність, яка в даному разі є критичною. Втім у контурі керування за лінійним переміщенням інтегральну складову залишають, і зменшують диференціальну, за приклад ПД-регулятора можемо розглянути open-source проєкт, який розроблений Себастьяном Нільсоном (рис. 1.3). Крім того, застосовуються LQR-регулятори, котрі є більш складними в проєктуванні у порівнянні з ПД, однак розв'язують задачу оптимального керування [10].

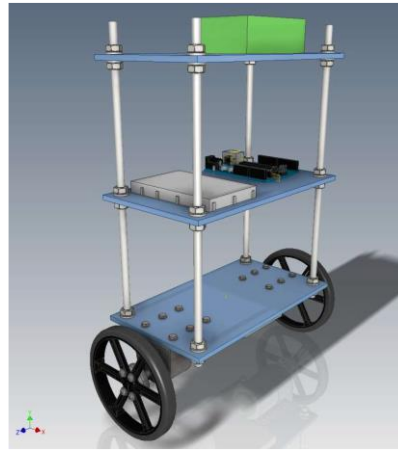


Рисунок 1.13 – Самобалансуючий робот на ПД-регуляторі

Цікавим представником регуляторів можемо назвати нейронні регулятори, котрі базуються на нечіткій логіці і дають змогу розв'язувати завдання. У деяких проєктах такі регулятори навчають за допомогою заздалегідь підготовлених вибірок даних, а в інших – регулятори навчаються самостійно. Так, після запуску вони помиляються і, відповідно, падають. З огляду на попередні дії вони вносять корективи до своїх нейронних зв'язків і під час наступного запуску вже починають краще тримати рівновагу, а також підлаштовують систему, щоб домогтися виконання заданого закону оптимальності. Приклад нейронної мережі, котра втілює керування самобалансуючим роботом, у загальному вигляді продемонстровано на рис. 1.14.

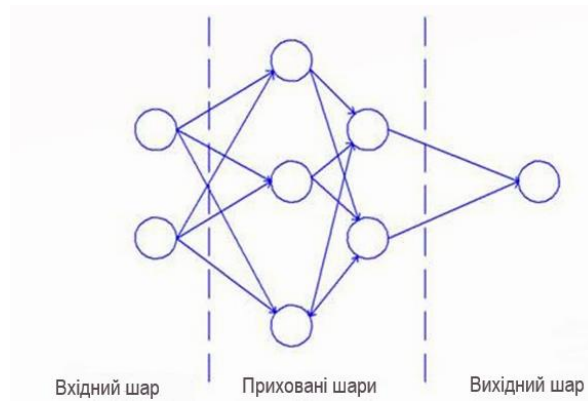


Рисунок 1.14 – Нейронна мережа керування самобалансуючим роботом

У нейронній мережі, котра керує роботом, налічується 2 вхідних нейрона, що відображають кутове та лінійне положення об'єкта. Кількість внутрішніх шарів може бути різною, власне як і кількість нейронів у них. Усе залежить від того, наскільки точно слід налаштувати систему, втім у вихідному шарі наявний лише один нейрон, який відображає сигнал керування, що надходить на двигуни. Крім того, може варіюватися кількість вихідних і вхідних нейронів, зокрема до вхідного шару можуть додаватися нейрони, котрі відображають прискорення, а до вихідного шару може бути доданий нейрон, який відображає швидкість другого колеса для повороту зворотного маятника.

1.3 Вибір комплектування для створення самобалансуючого робота

Розглянувши конструкції та системи керування самобалансуючих роботів, визначимо комплектування для розроблення власного самобалансуючого робота.

Як модуль керування обираємо Arduino Mega, рис. 1.15, він наділений всіма необхідними характеристиками, зокрема, такими:

- мікроконтролером ATmega 328P;
- 54 цифровими портами введення/виведення, 15 з яких можна застосувати як виходи ШІМ;
- 16 аналоговими входами;

- 4 інтерфейсами UART;
- робочою частотою кварцу 16 МГц;
- робочою напругою 5 В;
- 256 КВ FlashMemory;
- 8 кВ SRAM;
- 4 кВ EEPROM;
- 6 зовнішніми перериваннями;
- інтерфейсами SPI та I²C [12].

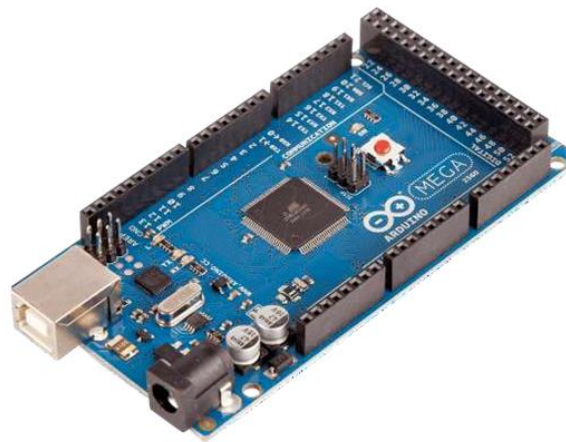


Рисунок 1.15 – Arduino Mega

Ядром системи міститься у мікроконтролері (МК) ATmega 328P, що встановлено на налагоджувальній платі Arduino Mega. Даний МК повністю реалізує керування системою. За кут нахилу обрано вимірювальний модуль MPU6050 (рис. 1.16).



Рисунок 1.16 – Датчик кута нахилу MPU6050

Такий датчик складається з триосьового гіроскопа й акселерометра. До того ж може використовуватися для визначення не тільки кута нахилу, але і його першої похідної (кутової швидкості). Це надає можливість безпосередньо виміряти ще одну змінну стану, отже, значно спрощує процедуру розроблення системи стабілізації.

Виконавчими механізмами системи, в даному прикладі, стали сервомотори NXT Lego Mindstorm. До сервомоторів вбудовані енкодери, котрі дозволяють визначити кут повороту ротора двигуна відносно статора. Таким чином, це сприяє можливості визначити кут повороту колеса. Крім того, до системи включений модуль зв'язку за інтерфейсом UART. До зазначеного модуля може бути під'єднаний перетворювач USB для зв'язку з ПК або модуль Bluetooth (рис. 1.17).

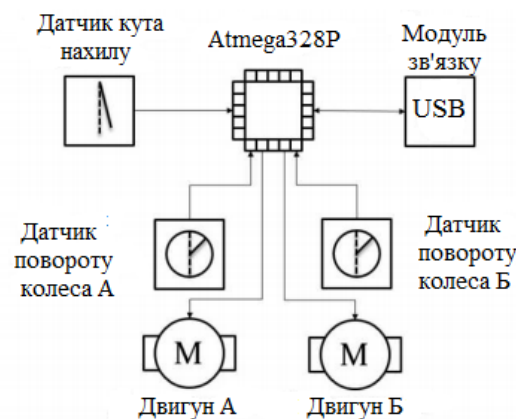


Рисунок 1.17 – Структурна схема самобалансуючого робота

1.4 Висновки до розділу

Проаналізовано предметну галузь, а також сформульовано завдання, котре необхідно розв'язати. За результатами проведеного аналізу наявних моделей самобалансуючих роботів було виявлено, що в таких балансувальних системах використовують виконавчі механізми без люфту обираючих пристроїв. Водночас у них присутня велика зона нечутливості під час запуску двигуна, що ускладнює балансувальну систему загалом.

2 МАТЕМАТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ ДВОКОЛІСНОГО САМОБАЛАНСУЮЧОГО РОБОТА

2.1 Розроблення математичної моделі самобалансуючого робота

Незалежно від своїх габаритів і ваги всі двоколісні самобалансувальні пристрої для опису динамічних характеристик послуговуються класичними математичними рівняннями. Задля спрощення розроблення алгоритмів і регуляторів керування доцільно створити математичну модель об'єкта з можливістю її підлаштування під конкретного самобалансуючого робота.

Конструкція самобалансуючого робота в цілому є простою. Завдяки цьому вона характеризується низкою корисних властивостей. Спрощену конструкцію самобалансуючого робота продемонстровано на рис. 2.1.

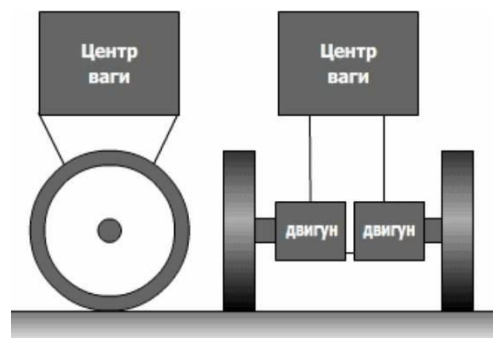


Рисунок 2.1 – Конструкція платформи у вигляді перевернутого маятника

Устаткування двома колесами сприяє зменшенню габаритів і підвищенню надійності, а роздільне керування кожним із них (за допомогою двигунів постійного струму) робить платформу дуже маневреною. Так, платформа під час руху може повертати чи розвертатися на місці. Проте головний недолік полягає в тому, що платформа не є стійкою, отже, під час вимикання двигунів у разі найменшого обурення платформа втратить баланс і впаде. Зробити платформу стійкою – це задача системи автоматичного керування. Створивши замкнутий контур, а також постійно вимірюючи кут,

виникає можливість реалізувати дії керування з великою частотою, щоразу коригуючи положення платформи.

Дослідимо принцип підтримки балансу (рівноваги). Конструкція має єдину точку рівноваги, коли центр мас вантажу знаходиться безпосередньо над віссю обертання. Якщо центр тяжіння конструкції відхиляється убік, то сила тяжіння частково передається через опори до землі, а її інша складова створює момент обертання конструкції, що прагне повалити об'єкт на бік. Щоб компенсувати цю силу, система повинна розпочати рух із прискоренням у бік падіння. Сила F , яку створює прискорення, також розкладається на силу, котра діє у бік опори, та силу, котра створює зворотний момент обертання конструкції (рис. 2.2).

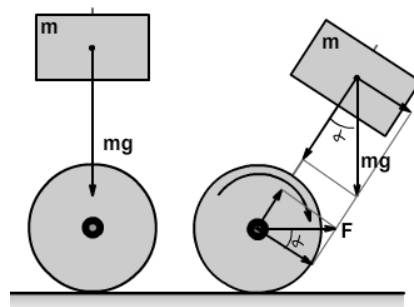


Рисунок 2.2 – Фізична модель об'єкта

Для підтримки балансу потрібно виконати такі умови:

$$F \cdot \cos(\alpha) = mg \cdot \sin(\alpha) . \quad (2.1)$$

Якщо розглядати лише незначні відхилення від стану рівноваги ($\alpha \rightarrow 0$), то завдяки лінеаризації можна отримати простішу умову для рівноваги:

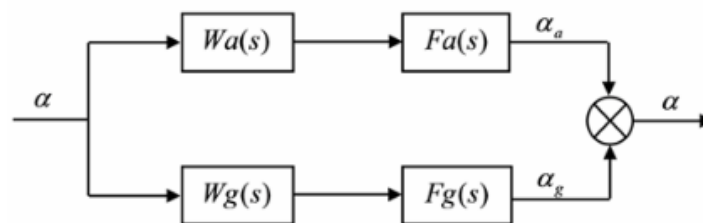
$$F = mg \cdot \alpha . \quad (2.2)$$

Отже, процес підтримання рівноваги такої системи можна поділити на дві основні складові: визначення кута нахилу конструкції від стану рівноваги

та керування обертанням коліс з урахуванням величини відхилення, для формування сили, котра компенсує падіння.

Для визначення кута відхилення конструкції від нормалі до поверхні найактуальнішим буде застосувати МЕМС, яка реалізується шляхом об'єднання акселерометра та гіроскопа [11].

За об'єкт керування обрано конструкцію перевернутого маятника, де роль виконавчого механізму відіграє двигун постійного струму з вбудованим енкодером. Так, у системі присутні два двигуни. Завдання регулювання та обчислень впливів керування покладено на МК, а закон керування функціонує та задається програмно. Обидва двигуни постійного струму підпорядковуються керуванню за допомогою широтно-імпульсної модуляції (ШІМ). Одним із найпоширеніших способів керування напругою двигунів є ШІМ. На вхід двигуна подаються прямокутні імпульси постійної частоти, проте різної шпаруватості. У разі досить високої частоти імпульсів напруга згладжується обмотками двигуна та стає еквівалентною постійній напрузі певної величини. МК визначає шпаруватість ШІМ сигналу разом із напрямком обертання валу, а також посиляє ці сигнали на драйвер двигуна. Кут відхилення маятника від нормалі до поверхні, що вимірюється акселерометром і гіроскопом, є виходом системи. Сигнали з МЕМС пропускаються через систему комплементарних фільтрів, яку продемонстровано на рис. 2.3.



$W_a(s)$ – передатна функція акселерометра; $W_g(s)$ – передатна функція гіроскопа; $F_a(s)$ – передатна функція фільтра акселерометра; $F_g(s)$ – передатна функція фільтра гіроскопа; α – вимірюваний кут

Рисунок 2.3 – Система комплементарних фільтрів

Різниця впливу (0°), що задається, і поточного кута відхилення надходить на вхід регулятора (у нашому випадку мікроконтролера), що розраховує вплив керування для приведення конструкції до рівноваги.

Мета системи компліментарних фільтрів полягає у підтримуванні рівності вхідного та вихідного сигналів. Утім на низьких частотах зміни кута нахилу система надає перевагу показанням акселерометра. Це пояснюється тим, що коли конструкція знаходиться в стані, близькому до стану спокою, найбільше відповідають дійсності саме дані акселерометра, а на високих частотах – більш точні показання гіроскопа, котрий не чутливий до різких рухів конструкції. Кожен датчик домінує на частоті сигналу, де вплив його недоліків є мінімальним. Такий підхід забезпечує доволі високу точність вимірювань за відносною простотою реалізації. Існують також альтернативні методи оброблення показань датчиків, наприклад, з використанням фільтра Кальмана [8, 12].

Для цього необхідно скласти систему диференціальних рівнянь, які описують в ньому фізичні процеси. Для розв'язання цієї задачі застосуємо рівняння Лагранжа другого роду:

$$\frac{d}{dt}\left(\frac{dT}{dq_i}\right) - \frac{dT}{dq_i} = Q_i, \quad (2.3)$$

де T – кінетична енергія системи,

Q_i – узагальнена сила,

q_i – узагальнені координати.

У наведеному випадку узагальненими координатами будуть кут нахилу φ та кут повороту колеса ψ . Кінетична енергія системи набуде такого виду:

$$T = 2T_k + T_p, \quad (2.4)$$

де T_k – кінетична енергія колеса,

T_p – кінетична енергія робота.

Повна кінетична енергія кожної зі складових містить обертальну та поступальну енергії:

$$T_k = T_{k.sp.} + T_{k.noc.} = \frac{J_k \psi^2}{2} + \frac{m_k v_k^2}{2} = \frac{p^2 m_k \psi^2}{2} + \frac{m_k r^2 \psi^2}{2} = \frac{m_k \psi^2 (r^2 + p^2)}{2}; \quad (2.5)$$

$$T_p = T_{p.sp.} + T_{p.noc.} = \frac{J_p \psi^2}{2} + \frac{m_p v_p^2}{2}, \quad (2.6)$$

де J_k та J_p – момент інерції колеса робота відповідно,

p – радіус інерції колеса.

Поступальна швидкість робота окреслюється швидкістю його центру мас:

$$v_p^2 = v_{p-x}^2 + v_{p-y}^2 = \dot{x}_p^2 + \dot{y}_p^2, \quad (2.7)$$

оскільки $y_k=0$, координати центр мас стрижня маятника та центру колеса котрі пов'язані співвідношеннями:

$$x_p = x_k + l \sin \varphi, \quad (2.8)$$

Отже,

$$\dot{x}_p = \dot{x}_k + l \cdot \dot{\varphi} \cos \varphi = r \dot{\psi} + l \cdot \dot{\varphi} \cos \varphi; \quad (2.9)$$

$$\dot{x}_p^2 = r^2 \dot{\psi}^2 + 2r \dot{\psi} \cdot l \cdot \dot{\varphi} \cos \varphi + l^2 \cdot \dot{\varphi}^2 \cos^2 \varphi; \quad (2.10)$$

$$y_p = l \cos \varphi. \quad (2.11)$$

Таким чином,

$$\dot{y}_p = -l \cdot \dot{\varphi} \sin \varphi; \quad (2.12)$$

$$\dot{y}_p^2 = l^2 \cdot \dot{\varphi}^2 \sin^2 \varphi. \quad (2.13)$$

Отже, швидкість центру мас робота:

$$v_p^2 = r^2 \dot{\Psi}^2 + 2rl \dot{\Psi} \dot{\varphi} \cos \varphi + l^2 \dot{\varphi}^2. \quad (2.14)$$

Кінетична енергія робота набуде такого виду:

$$T_v = \frac{\lambda^2 m_v \varphi^2}{2} + \frac{m_v}{2} (r^2 \dot{\Psi}^2 + 2rl \dot{\Psi} \dot{\varphi} \cos \varphi + l^2 \dot{\varphi}^2), \quad (2.15)$$

де λ – радіус інерції робота відносно осі коліс.

З урахуванням (2.5) та (2.15) кінетична енергія системи буде дорівнювати:

$$T = mk \dot{\Psi}^2 (p^2 + r^2) + \frac{m_p}{2} (\lambda^2 \dot{\varphi}^2 + 2rl \dot{\Psi} \dot{\varphi} \cos \varphi + l^2 \dot{\varphi}^2). \quad (2.16)$$

Отримаємо перше диференціальне рівняння системи відповідно до (2.3), диференціюючи (2.16) за φ , $\dot{\varphi}$ та t :

$$\frac{dt}{d\dot{\varphi}} = \frac{m_v}{2} (2\lambda^2 \dot{\varphi} + 2rl \dot{\Psi} \cos \varphi + l^2 \dot{\varphi}); \quad (2.17)$$

$$\frac{d}{dt} \left(\frac{dt}{d\dot{\varphi}} \right) = \frac{m_v}{2} (2\lambda^2 \ddot{\varphi} + 2rl (\ddot{\Psi} \cos \varphi - \dot{\Psi} \sin \varphi \cdot \dot{\varphi}) + l^2 \ddot{\varphi}); \quad (2.18)$$

$$\frac{dt}{d\varphi} = -\frac{m_v}{2} \cdot 2rl\dot{\psi} \sin \varphi \cdot \dot{\varphi} = -m_v rl\dot{\psi} \sin \varphi \cdot \dot{\varphi}; \quad (2.19)$$

$$\frac{d}{dt} \left(\frac{dt}{d\dot{\varphi}} \right) - \frac{dt}{d\varphi} = m_v(\lambda^2 + l^2)\ddot{\varphi} + m_v rl\ddot{\psi} \cos \varphi = m_v gl \sin \varphi - 2M_k. \quad (2.20)$$

де M_k – момент, який діє на платформу з боку двигунів.

2.2 Перевірка системи на керованість

Матриця керованості матиме вид:

$$U = [B \quad AB \quad A^2B \quad A^3B]. \quad (2.21)$$

Оскільки об'єкт керування є одноканальним, то критерієм його керованості буде нерівність визначника цієї матриці нулю: $\det(U) \neq 0$.

У даному випадку визначення матриці керованості дорівнюватиме:

$$\det(U) = \frac{(a_2 a_4 b^2 + 2a_3 a_4 b^2)^2}{(a_1 a_3 - a_3^2)^4}, \quad (2.22)$$

Він завжди позитивний, отже, об'єкт керуєний.

Виконаємо перевірку системи на спостережуваність. Матриця спостережуваності матиме:

$$N = \begin{bmatrix} C \\ CA \\ CA^2 \\ CA^3 \end{bmatrix}.$$

Заважаючи на те, що даний об'єкт одноканальний, відповідно він буде спостережуваний, якщо $\det(U) \neq 0$.

$$\det(N) = \frac{a^2 a_4^2 - 2a_2 a_3 a_4^2 - 4a_2 a_4 a_3^2 + a_3^2 a_4^2 + b a_2 a_4 a_3^2 - 4a_2 a_4 a_3^2}{(a_1 a_3 - a_2^2)^2}. \quad (2.23)$$

Для розрахунку регулятора обрано модальний метод синтезу. Цей метод використовується для розв'язання задачі стабілізації з таких причин. По-перше, базовим режимом роботи системи стабілізації робота вважається режим відпрацювання початкових умов, модальний метод демонструє кращий результат саме у таких системах. По-друге, для розв'язання задачі стабілізації необхідно оцінювати чотири змінні стани систем, два з яких можуть бути виміряні напряму (кут нахилу платформи та кут повороту колеса відповідно). Згідно з модальним методом синтезу закон керування набуде такого виду:

$$U = K_x,$$

$$U = [k_1 \quad k_2 \quad k_3 \quad k_4]. \quad (2.24)$$

де K – матриця коефіцієнтів регуляторів.

Параметри матриці відповідатимуть коефіцієнтам у зворотному порядку зв'язку за таких величин:

- k_1 – похідна кута нахилу платформи $\dot{\varphi}$;
- k_2 – кут нахилу платформи φ ;
- k_3 – похідна кута повороту колеса $\dot{\psi}$;
- k_4 – кут повороту колеса ψ .

Необхідно обчислити характеристичне рівняння системи, виходячи з наступного співвідношення:

$$A(p) = \det(pl - (A + BK)) = p^4 + A_3(K)p^3 + A_2(K)p^2 + A_1(K)p + A_0. \quad (2.25)$$

Після цього можна скласти рівняння системи:

$$C(p) = p^4 + C_3p^3 + C_2p^2 + C_1p + C_0. \quad (2.26)$$

З метою знаходження коефіцієнтів регулятора необхідно прирівняти коефіцієнти за ступенями оператора p характеристичного рівняння до відповідних коефіцієнтів бажаного рівняння [14, 16].

2.3 Оцінка кута повороту та швидкості обертання колеса

Для оцінки кута повороту колеса застосовуються вбудовані у двигун квадратурні інкрементальні енкодери. Кожен енкодер налічує два виводи: канал A і канал B . За один оберт колеса буде згенеровано 180 імпульсів на обох виводах, до того ж час імпульсу T_u дорівнюватиме часу паузи T_n , що дозволить виміряти кут повороту колеса з точністю до одного градуса, шляхом реєстрування як позитивних, так і негативних фронтів. Сигнал на одному каналі зрушений відносно іншого. Це дозволить визначати і напрямок повороту колеса. На рисунку 2.4 зображено діаграму сигналів із каналів енкодера під час повороту колеса за годинниковою стрілкою, а на рисунку 2.5 – під час роботи проти годинникової стрілки.

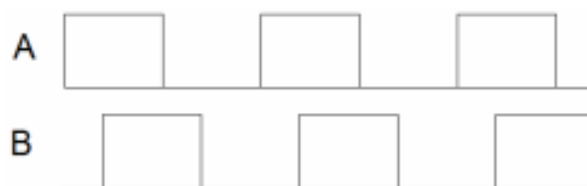


Рисунок 2.4 – Сигнали енкодера під час повороту колеса за годинниковою стрілкою

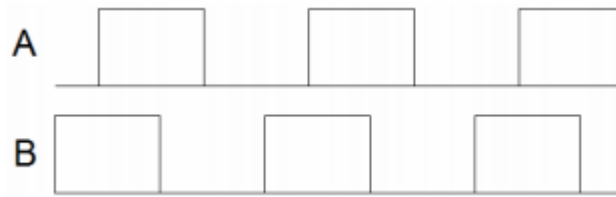


Рисунок 2.5 – Сигнали енкодера під час повороту колеса проти годинникової стрілки

З метою оцінки швидкості обертання колеса слід застосувати спеціальний фільтр, який називається диференціальним фільтром. Диференціальним фільтром називають пристрій, який дозволяє отримати позначення величини, що фільтрується, а також її похідні. Розглянемо його роботу на прикладі диференціального фільтра другого порядку

$$\dot{y}_0 = dy_0 / dt, \ddot{y}_0 = d\dot{y}_0 / dt,$$

де y – фільтрувальний сигнал;

y_0 – його позначення.

Структурна схема фільтра продемонстрована на рис. 2.6.

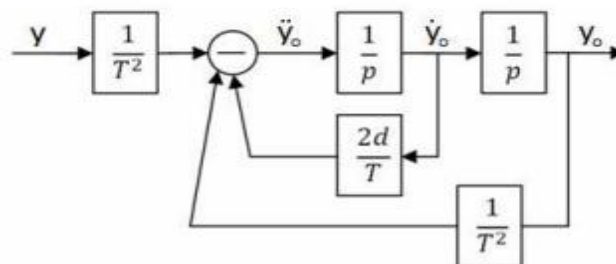


Рисунок 2.6 – Структурна схема диференціального фільтра другого порядку

Зазначеній структурній схемі відповідає диференціальне рівняння:

$$y = T^2 \ddot{y}_0 + 2\xi T \dot{y}_0 + y_0. \quad (2.27)$$

На вхід фільтра подається вихідний сигнал об'єкта, на виході можна отримати характеристику вихідного сигналу об'єкта та його першу похідну. Теоретично, даний фільтр так само дозволяє отримати характеристику другої похідної (для цього необхідно взяти сигнал із входу першого інтегратора), проте внаслідок зашумленості вихідного сигналу об'єкта, якість одержуваної характеристики другої похідної, як правило, незадовільна. Для коректного визначення n -ї похідній потрібний диференціувальний фільтр $n + 1$ порядку.

Під час побудови фільтра необхідно правильно вибрати параметри. Головними параметрами даного фільтра є стала часу фільтра T та коефіцієнт демпфування d . Перший параметр окреслює тривалість перехідних процесів у фільтрі, тобто, його швидкодію. Другий параметр окреслює коливання процесів у фільтрі. Рекомендується вибирати цей параметр у межах $0,5 - 1$. Величина сталої часу фільтра обчислюється постійним часом процесів в об'єкті. Для коректного визначення вихідного сигналу об'єкта необхідно, щоб стала часу фільтра була в $3 - 5$ разів меншою за найменшу сталу часу об'єкта. Проте не забуваємо, що чим меншим буде значення сталої часу фільтра, тим гіршим стане ефект від його застосування. Отже, значення сталої часу має бути достатньо малим, щоб затримка вихідного сигналу фільтра була прийнятною, проте водночас досить великою, щоб перешкоди вихідного сигналу успішно згладжувалися.

На відміну від теоретичної моделі фільтра, у фільтрі, що базується на мікроконтролері, з'являється ще один важливий параметр, який необхідно правильно вибрати. Мова йде про крок інтегрування. Основне правило під час його вибору полягає в тому, що крок інтегрування повинен бути меншим за найменший параметр фільтра, тобто, сталої часу. Для коректної роботи фільтра необхідно, щоб крок інтегрування був меншим за постійний час принаймні у 3 рази. Проте є ще одна особливість під час реалізації фільтра на мікроконтролері. Більшість мікроконтролерів можуть працювати лише з

цілою чисельною арифметикою. Таким чином, щоб уникнути втрат даних під час поділу, необхідно здійснити зсув вліво на кілька розрядів перед операцією поділу (що тотожно множенню на 2 в деякій мірі). Після завершення всіх операцій необхідно виконати зворотний зсув (тотожно поділу). Для функціонування в реальному часі операції, наведені вище, можуть бути реалізовані у вигляді функції, що активується через інтервали часу, рівні обраному кроку інтегрування. Нижче продемонстровано результати роботи диференціувального фільтра, котрий застосовували для визначення швидкості обертання колеса. На рис. 2.7 подано результати вимірювання кута повороту колеса.

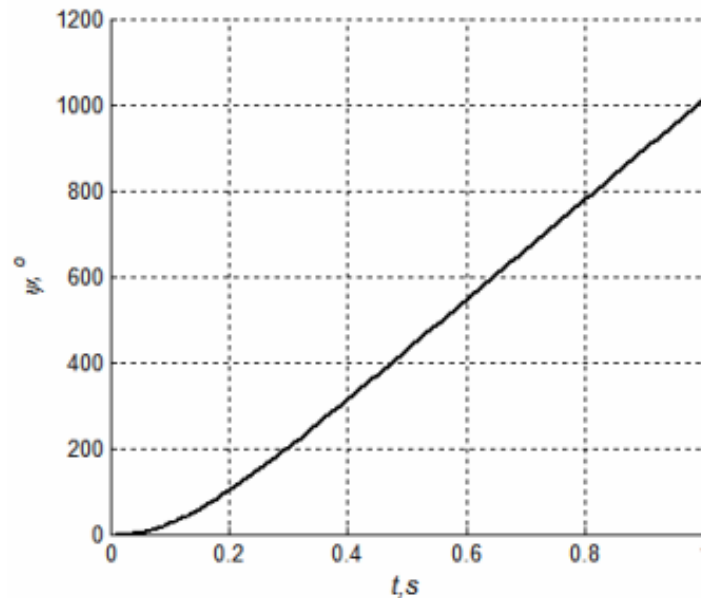


Рисунок 2.7 – Кут повороту колеса

На рис. 2.8 – результат визначення швидкості обертання колеса за даними кута повороту.

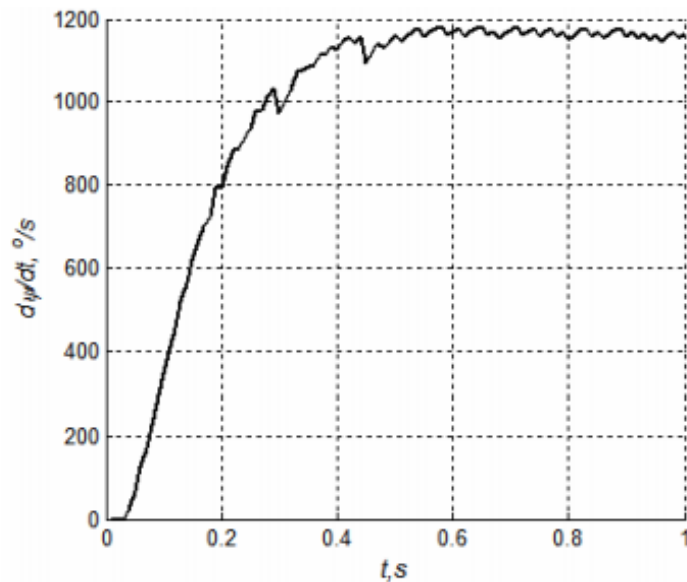
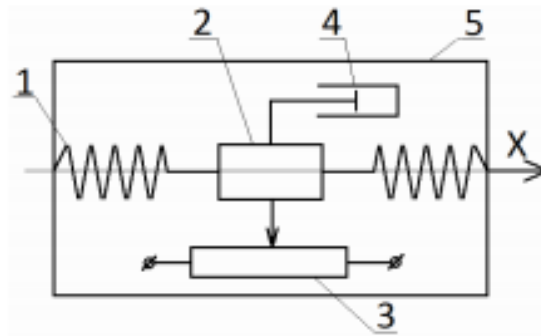


Рисунок 2.8 – Визначення швидкості обертання колеса

Акселерометром називають пристрій, який вимірює проекцію на його осі суми всіх сил, які прикладені до його корпусу, окрім сили тяжіння. Він вимірює проекцію прискорення (різниця між істинним прискоренням об'єкта і гравітаційним прискоренням). Отже застосування акселерометра визначення кута нахилу має сенс, коли сила, що прикладена до корпусу (реакція опори), дорівнює за модулем силі тяжіння і спрямована в протилежний бік, у такому разі датчик повинен бути у спокої або, принаймні рухатися без прискорення, що у реальних системах спостерігається зрідка. Є кілька видів акселерометрів, які відрізняються за чутливими елементами та принципом дії. Акселерометр у промисловій вібродіагностиці застосовується як віброперетворювач, який вимірює віброприскорення в системах неруйнівного контролю та захисту. На рис. 2.9 продемонстровано структурну схему одноосьового акселерометра, котрий перетворює зміну положення чутливого елемента 2 на напругу за допомогою потенціометра 3 [15].

Чутливий елемент – це маса, що закріплена на пружинах, які прикріплені до корпусу. Демпфер застосовується з метою зменшення впливу власних коливань чутливого елемента. На рис. 2.9 жодних сил уздовж осі X не було прикладено до корпусу.



1 – пружина; 2 – чутливий елемент;

3 – потенціометр; 4 – демпфер; 5 – корпус

Рисунок 2.9 – Внутрішній пристрій одновісного акселерометра

Якщо корпус наділити прискоренням, то картина зміниться. У даному випадку до корпусу було докладено силу F_1 (рис. 2.10), чутливий елемент зміщується вліво, тобто у бік, який протилежний F_1 . Це зміщення реєструє потенціометр, а на виході датчика з'являється напруга, котра пропорційна прикладеній силі.

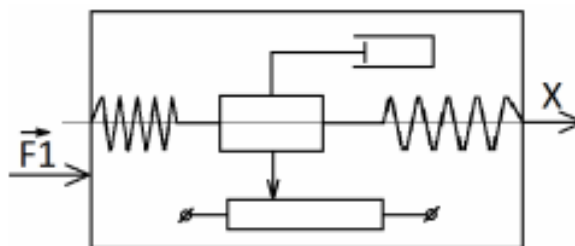


Рисунок 2.10 – Внутрішній пристрій одновісного акселерометра під час дії сили вздовж осі X

Якщо одновісний акселерометр розташувати перпендикулярно до земної поверхні, тобто вздовж вектора сили тяжіння, то датчик виконає вимірювання сили реакції опори (рис. 2.11) [15].

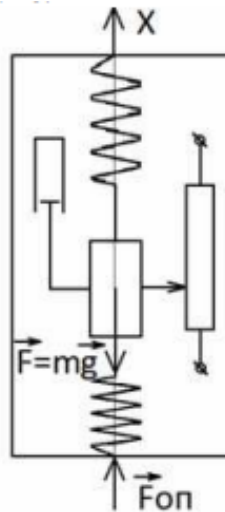


Рисунок 2.11 – Внутрішній пристрій одновісного акселерометра під час вимірювання сили реакції опори

Під час повороту датчика із положення на рис. 2.10 у положення на рис. 2.11, значення проекції сили F на вісь X зменшуватиметься. Якщо до даного одноосового акселерометра додати ідентичний другий, однак розмістити його вісь перпендикулярно до осі першого, отримаємо двоосовий акселерометр (рис. 2.12) [15].

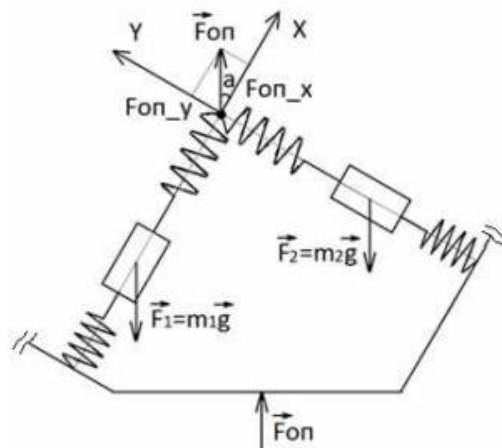
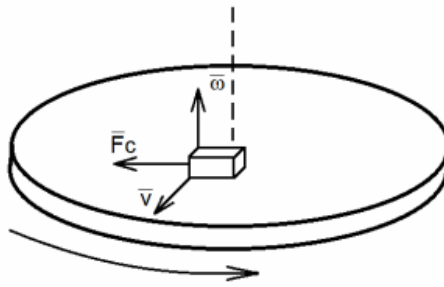


Рисунок 2.12 – Розрахункова схема кута нахилу за проекціями вектора сили реакції опори на осі акселерометра

Доведено, що за проекціями вектора на дві осі (OX , OY) декартової системи координат можна відновити кут даного вектора у цій системі, що і є необхідним.

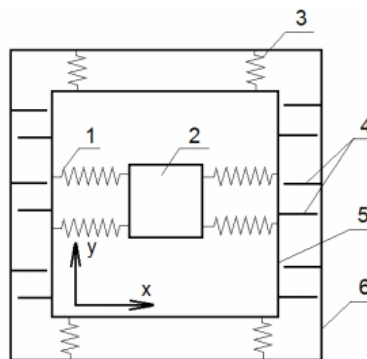
Виготовлено кілька різновидів МЕМС гіроскопів, які відрізняються внутрішнім пристроєм, однак усіх їх об'єднує те, що їхня робота ґрунтується на використанні сили Коріоліса. У кожному з них є робоче тіло, котре виконує зворотно-поступальні рухи. Якщо крутити підкладку, на якій знаходиться це тіло, то на нього почне діяти сила Коріоліса, котра спрямована перпендикулярно осі обертання та напрямку руху тіла. На рис. 2.13 продемонстровано механізм роботи цієї сили [15].



ω – вектор кутової швидкості, \bar{v} – вектор лінійної швидкості,
 \bar{F}_c – сила Коріоліса

Рисунок 2.13 – Механізм роботи сили Коріоліса

Знаючи лінійну швидкість та силу Коріоліса, можна обчислити кутову швидкість. Одну з можливих реалізацій гіроскопа побудовано за такої структури: закріплена на гнучких підвісках рамка, всередині якої виконує поступальні коливальні рухи певна маса. Структуру такого сенсора продемонстровано на рис. 2.14 [15, 18].

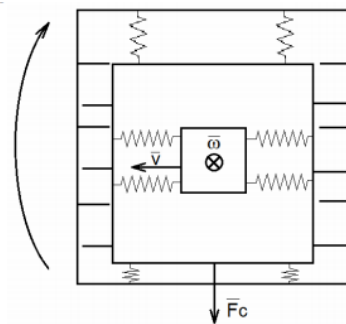


1 – кріплення маси; 2 – робоча маса; 3 – кріплення внутрішньої рамки;
 4 – сенсори переміщення внутрішньої рамки; 5 – внутрішня рамка;
 6 – підкладка

Рисунок 2.14 – Внутрішня структура гіроскопа

Коливання робочої маси реалізується вздовж осі X та генеруються електростатично, а коливання внутрішньої рамки можливі лише вздовж осі Y . Обкладки плоских конденсаторів (сенсори переміщення) розміщені між внутрішньою і підкладною рамкою. Таким чином, можна фіксувати рух рамки відносно підкладки, вимірюючи їхню ємність.

На рис. 2.15 подано структуру гіроскопа під час його обертання у площині X, Y за годинниковою стрілкою.



ω – вектор кутової швидкості; \vec{v} – вектор лінійної швидкості;

\vec{F}_c – сила Коріоліса

Рисунок 2.15 – Структура гіроскопа під час обертання

Коливання внутрішньої рамки можуть активуватися не лише силою Коріоліса, але за допомогою лінійних прискорень, які діють вздовж осі Y . Проблема розв'язується шляхом розміщення на одній підкладці двох рамок, у кожній з яких міститься робоча маса. У зв'язку з тим, що обидві маси коливаються у протифазі, то в конкретний момент часу сила Коріоліса, котра впливає на першу масу, спрямовується протилежно силі, котра впливає на другу.

Сигнали, що генеруються силою Коріоліса, будуть складатися, а синфазна складова, котра породжена лінійним прискоренням, – відніматися. Таким чином, під час вимірювання відхилення внутрішньої рамки за допомогою сенсорів переміщення, можна визначити кутову швидкість датчика.

За приклад датчика кута нахилу робота використаємо вимірювальний модуль MPU6050. Такий модуль містить два МЕМС-датчика (акселерометр та гіроскоп). Модуль устаткований цифровим виходом I₂C. Вбудований АЦП перетворює аналогові сигнали датчиків на цифровий код для подальшого передавання за інтерфейсом I₂C. Нижче перелічені технічні характеристики модуля:

- триосьовий гіроскоп;
- триосьовий акселерометр;
- термодатчик;
- напруга живлення 2,375 – 3,46 В;
- fifo-буфер обсягом 1024 байт;
- програмовані користувачем цифрові фільтри для гіроскопа, акселерометра та термодатчика;
- інтерфейс I₂C для записування та зчитування з регістрів пристрою, що працює на частоті до 400 кГц;
- програмований користувачем діапазон вимірювань: ± 250 , ± 500 , ± 1000 і ± 2000 °/с;
- вбудований 16-розрядний АЦП;
- струм у режимі роботи – 3,6 мА;
- струм у режимі очікування – 5 мкА.

MPU6050 підключається до I₂C модуля МК ATmega 328P для надсилання команд та зчитування з регістрів необхідних даних. Після надсилання модулю команди про початок вимірювань виконується постійне оцифрування показань з усіх осей гіроскопа, акселерометра та термодатчика. Залишається тільки зчитувати інформацію з необхідних регістрів. Частота запису нових даних до цих регістрів АЦП залежить від обраної користувачем чутливості сенсора, іншими словами, діапазона вимірювань. Зв'язок датчика та МК втілюється через інтерфейс I₂C. Даний інтерфейс має провідну архітектуру, в якій один пристрій (провідний) виконує запит на зчитування чи запис ведених пристроїв. У нашому прикладі провідним є MPU6050, а

провідним I₂C буде модуль, який знаходиться на МК. Зв'язок виконується за допомогою двох двонаправлених ліній: тактування та даних. Ведений пристрій має свою адресу, котра на даній лінії повинна бути унікальною (у нашому прикладі 0xD0). Лінії мають бути підтягнуті до рівня логічної одиниці. Здебільшого пристрої підключаються до ліній через виводи з відкритим колектором (стоком). Перевагає полягає у можливості підключення великої кількості відомих пристроїв, а також у порівняно збільшенні дальності передавання даних. Однак у разі збільшення дальності фактична швидкість передавання даних знижується. Це обґрунтовується тим, що фронти згладжуються у зв'язку зі збільшенням ємності дротів.

Вимірювання кута, котрі були отримані акселерометром, містять високочастотну перешкоду навіть у статичному режимі. У динаміці лінійні прискорення призводять до того, що показання кута можуть бути взагалі некоректними. Першу проблему можна розв'язати шляхом згладжування, проте це призведе до зрушення фазою корисного сигналу, що може зробити систему нестійкою. Багато об'єктів керування можуть приборкувати цю високочастотну складову своєю інерційністю, отже, згладжування можна не застосовувати, втім друга проблема, котра пов'язана з неправильним визначенням кута відхилення акселерометра у разі впливу лінійних прискорень на нього, легко може зробити систему нестійкою навіть за умови правильно розрахованого регулятора. Вимірювання кута гіроскопом призводить до появи низькочастотного шуму, що виникає внаслідок інтегрування кутової швидкості (гіроскоп вимірює саме цю величину). Це призводить до дрейфу нуля, отже, значення кута постійно збільшуватиметься або зменшуватиметься, навіть якщо система буде нерухомою. Акселерометр вимірює проекцію з його осі суми всіх сил, які прикладені до нього, крім сили тяжіння. Таким чином, у статиці проводиться вимірювання сили реакції опори на цей пристрій. Зважаючи на те, що ця сила протилежна за напрямом гравітаційній, то, оперуючи величинами її проекцій на осі, можна обчислити кут відхилення від вертикалі за формулою:

$$\varphi_A[i+1] = \operatorname{arctg}\left(\frac{F_{on_y}[i+1]}{F_{on_x}[i+1]}\right), \quad (2.28)$$

де $\varphi_{Акc[i+1]}$ – кут відхилення на даний момент часу, обчислень за допомогою акселерометра;

$F_{on_y}[i+1]$ – проекція сили реакції опори на вісь Y;

$F_{on_x}[i+1]$ – на вісь X.

Гіроскоп вимірює кутову швидкість у певній площині послуговуючись ефектом Коріоліса. У даному разі нас цікавить кутова швидкість у площині X,Y. Проінтегрувавши сигнал гіроскопа, можна отримати величину кута:

$$\varphi_H(t) = \int_0^t \omega(\tau) d\tau. \quad (2.29)$$

Під час реалізації на МК дана операція замінюється чисельним інтегруванням:

$$\varphi_H[i+1] = \varphi_H[i] + \Delta\varphi_H[i+1] = \varphi_H[i] + \omega[i]\Delta t, \quad (2.30)$$

де $\varphi_H[i+1]$, $\varphi_H[i]$ – кут, який було обчислено за допомогою гіроскопа на поточному та попередньому кроці;

$\omega[i]$ – кутова швидкість на попередньому кроці;

$\Delta\varphi_H[i+1]$ – приріст кута за проміжок часу, що дорівнює кроку інтегрування;

Δt – крок інтегрування.

На рис. 2.16 – 2.17 продемонстровані графіки кутів, які отримані завдяки даним акселерометра та гіроскопа, вхідних до вимірювальної системи MPU6050.

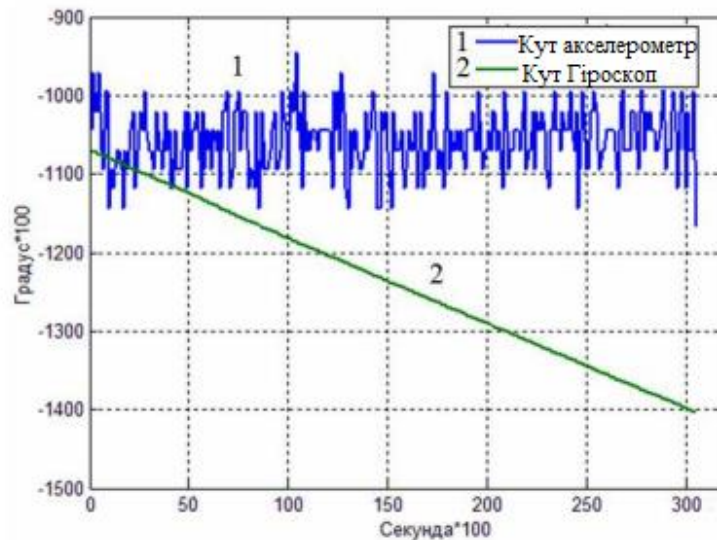


Рисунок 2.16 – Кут, який було обчислено за допомогою даних акселерометра та гіроскопа у статиці

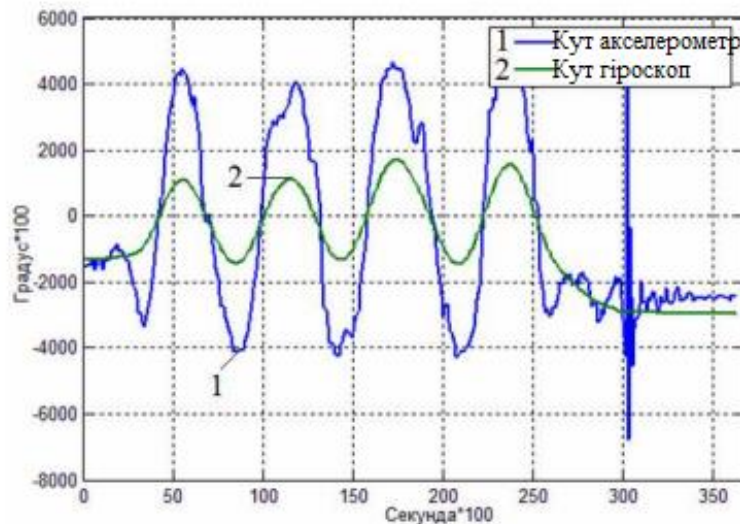


Рисунок 2.17 – Кут, який було обчислено за допомогою даних акселерометра та гіроскопа у динаміці

Для зручності початковий кут гіроскопа було обрано максимально близько до кута акселерометра. На рис. 2.17 продемонстровано, що розкид значень кута, котрий обчислено за даними акселерометра, перевищує один градус, а на рис. 2.18 зображено чотириразову помилку його визначення у динаміці. Дані кута, обчислені з кутової швидкості гіроскопа, більш коректні на другому графіку, проте на першому існує значний дрейф цього кута.

Оскільки обидва ці датчики мають недоліки і не можуть бути використані безпосередньо в системах, де потрібна висока точність оцінки кута нахилу, слід використати спеціальний фільтр, який би задіяв переваги кожного датчика та компенсував недоліки. Один із можливих варіантів такого фільтра є комплементарний фільтр [16].

2.4 Розрахунок ПІД-регулятора

Система керування перевернутим маятником полягає у так званому пропорційно-інтегрально-диференціальному контролері. Для зв'язку моделі керування із моделлю ПК універсальний механізм до моделі системи керування слід додати компоненти In і Out.

У роботі розглядається система керування самобалансуючим роботом. Її структурну схему продемонстровано на рис. 2.18 [17].

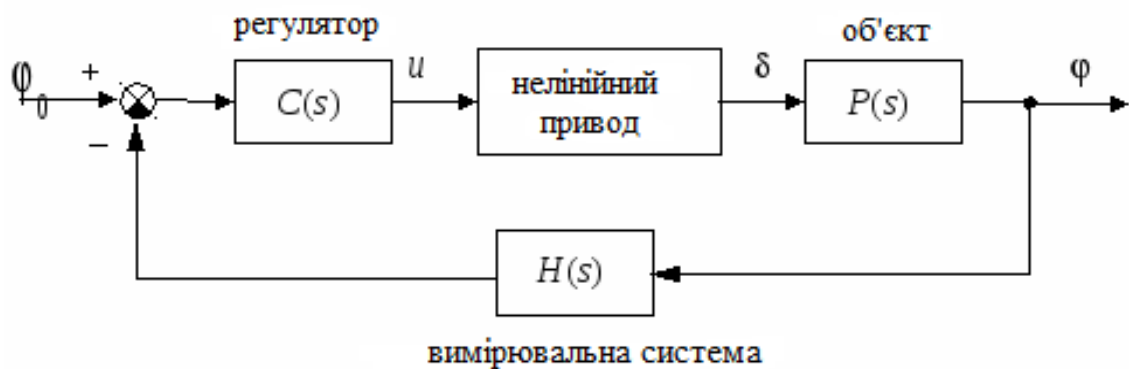


Рисунок 2.18 – Система керування самобалансуючим роботом

Лінійна математична модель, яка описує поведінку самобалансуючого робота, матиме вид:

$$\dot{\varphi} = \omega_y; \quad (2.31)$$

$$\dot{\omega}_y = -\frac{1}{T_s} \omega_y + \frac{K}{T_s} \delta, \quad (2.32)$$

де ϕ – кут відхилення;

ω_y – кутова швидкість обертання навколо вертикальної осі;

δ – кут повороту вертикального керма відповідно до положення рівноваги;

T_s – стала часу;

K – постійний коефіцієнт, який має розмірність, рад/сек.

Передаточну функцію від кута повороту до кута відхилення запишемо так:

$$P(s) = \frac{k}{s(T_s s + 1)}. \quad (2.33)$$

Лінійна модель приводу є інтегруючою ланкою з передавальною функцією охоплена одиничним негативним зворотним зв'язком.

$$R_0(s) = \frac{1}{T_R s}. \quad (2.34)$$

На кут переведення керування та швидкість переведення накладаються нелінійні обмеження:

$$|\dot{\delta}(t)| < 3^\circ / \text{нає} \quad |\delta(t)| < 30^\circ. \quad (2.35)$$

Для вимірювання кута ристання використовується гірокомпас, математичну модель якого запишемо як аперіодичну ланку першого порядку з передатною функцією:

$$H(s) = \frac{1}{T_{oe} s + 1}. \quad (2.36)$$

Як пристрій керування застосуємо ПІД-регулятор з передатною функцією:

$$C(s) = K_c \left(1 + \frac{T_s s + 1}{T_v + 1} \right) + \frac{1}{T_I s}, \quad (2.37)$$

де $T_v = 1$ сек і $T_I = 200$ сек.

2.5 Висновки до розділу

Розроблено математичну модель системи керування двоколісним самобалансуючим роботом. Виконано визначення кута повороту та швидкості обертання колеса. Запропоновано математичну модель серводвигуна. Під час математичного опису об'єкта, що розглядається, для обчислення регулятора було обрано модальний метод синтезу.

3 КОМП'ЮТЕРНЕ МОДЕЛЮВАННЯ ДИНАМІЧНИХ ХАРАКТЕРИСТИК САМОБАЛАНСУЮЧОГО РОБОТА

3.1 Комп'ютерна модель самобалансуючого робота

Використовуючи дані математичних рівнянь, які описують динамічні характеристики самобалансуючого робота, було побудовано модель самобалансуючого робота у середовищі Simulink пакета Matlab (рис. 3.1).

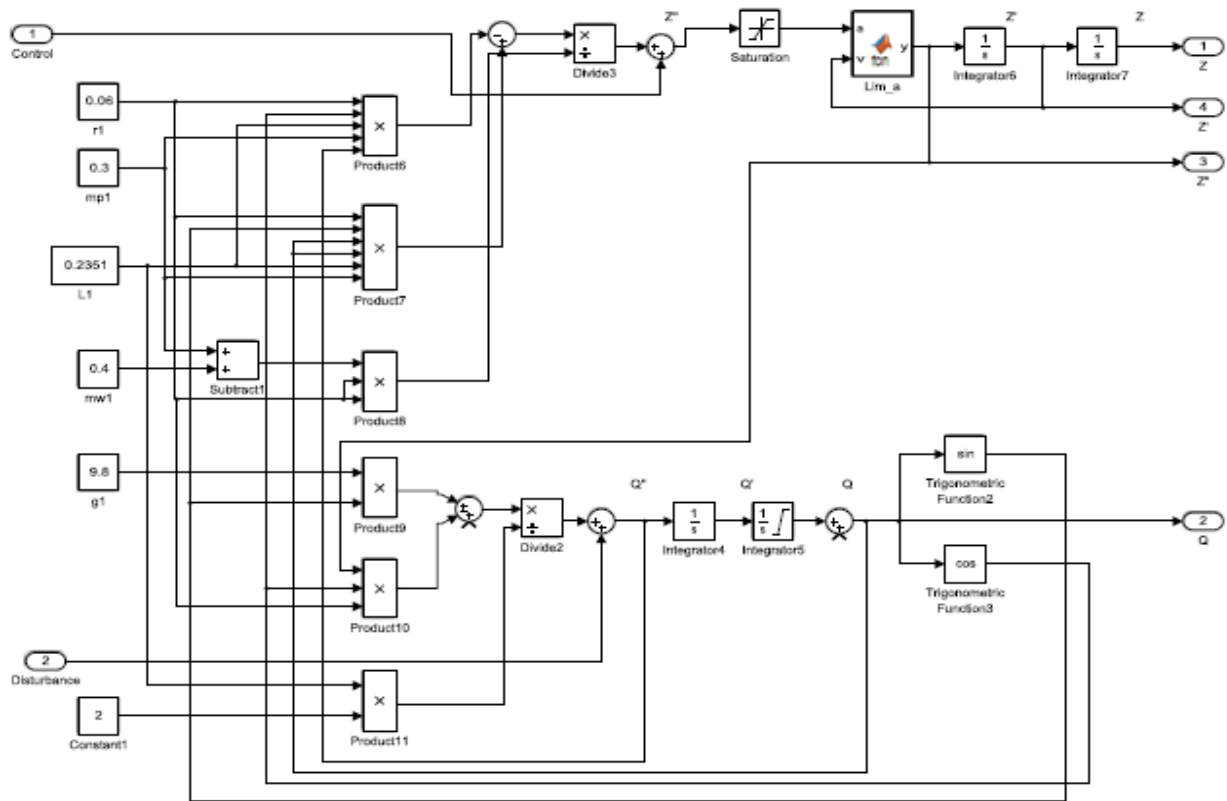


Рисунок 3.1 – Модель самобалансуючого робота

На систему слід накласти обмеження щодо зміни лінійної швидкості, прискорення, а також максимального кута нахилу маятника.

Схему ввімкнення обмежувача за швидкістю та прискоренням подано на рис. 3.2. На рис 3.3. продемонстровано обмежувач за кутом нахилу.

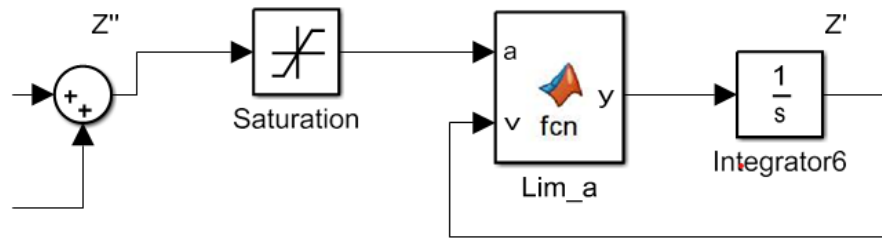


Рисунок 3.2 – Схема ввімкнення обмежувача лінійної швидкості та прискорення

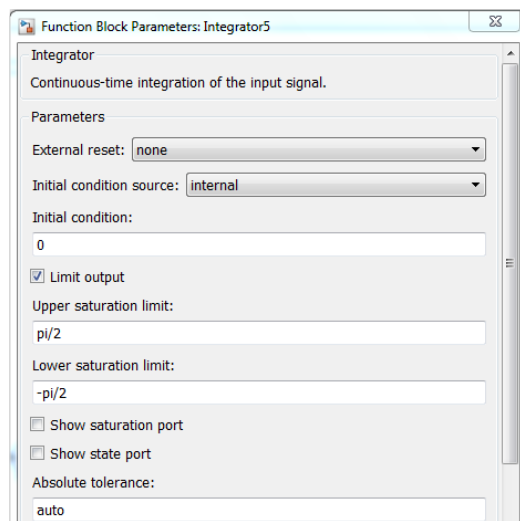


Рисунок 3.3 – Блок інтегратора з обмежувачем кута

Код блоку Lim_a подано на рис. 3.4

```

1  function y = fcn(a,v)
2  %#codegen
3  if a > 0
4      if v > 0
5          if v >= 0.5
6              y = 0;
7          else
8              y = a;
9          end
10     else
11         if v <= 0.5
12             y = a;
13         else
14             y = 0;
15         end
16     end
17 else

```

Рисунок 3.4 – Вміст блоку Lim_a

Зважаючи на обмеження швидкості та прискорення, що вибрали, підбираємо виконавчі механізми з необхідними параметрами.

Для зручності аналізу отриманої системи доцільно представити її у вигляді об'єкта Subsystem. Водночас для утримання маятника в перевернутому стані слід охопити систему двома зворотними зв'язками: за швидкістю та прискоренням. Після внесених змін математична модель набуде такого вигляду (рис. 3.5):

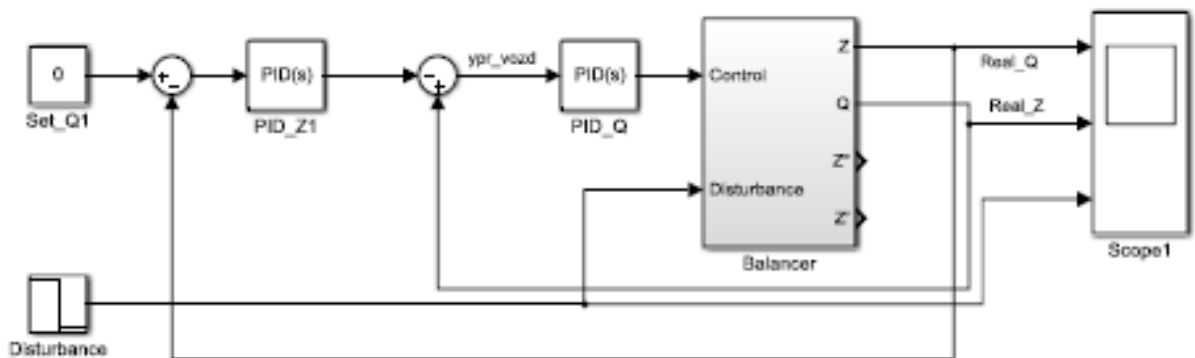


Рисунок 3.5 – Система охоплена зворотними зв'язками

Для більш наочного відображення поведінки самобалансуючого робота за допомогою блоку VRsink було спроектовано 3D-модель, яку наведено на рис. 3.6.



Рисунок 3.5 – 3D-модель самобалансуючого робота

Увімкнення блоку моделі реалізується в лінії кутового і лінійного переміщення. Водночас 3D-модель відображає поведінку самобалансуючого робота в інтуїтивно зрозумілому вигляді. На рис. 3.6. зображено схему увімкнення [19].

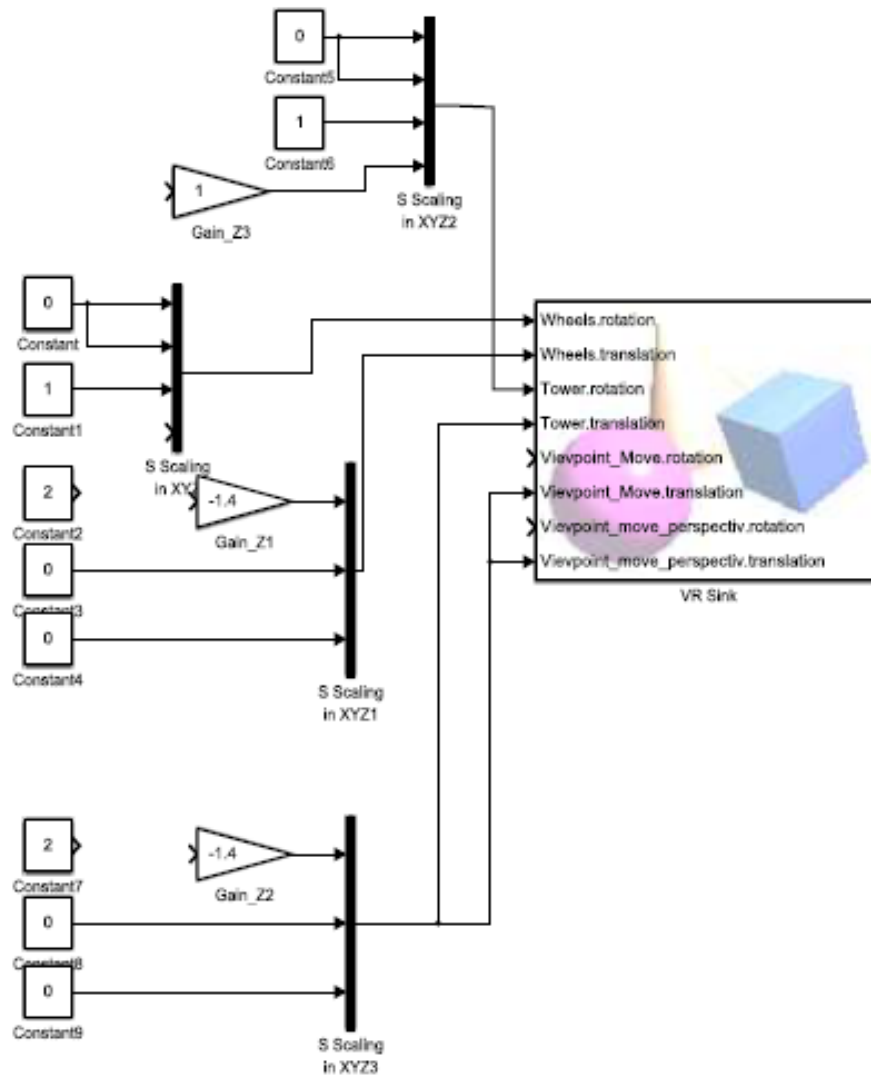


Рисунок 3.6 – Увімкнення блоку 3D

Більш комфортне керування моделлю для користувача можна реалізувати завдяки використанню ігрового джойстика. Це зручний пристрій введення. Крім того, відповідний блок у середовищі Simulink реагує на зміни джойстика і передає їх до математичної моделі.

3.2 Налаштування ПІД-регуляторів моделі

Для утримання перевернутого маятника в перевернутому стані застосовуємо два ПІД-регулятора. Зокрема один із них утримуватиме робота в перевернутому стані, а другий – утримуватиме робота в заданому лінійному положенні.

Під час налаштування систем контури налагоджуються послідовно. Спочатку налаштовується внутрішній контур, а потім контур, який його охоплює. Налаштування в середовищі Simulink мож виконати як в автоматичному, так і в ручному режимі. Проте послуговуватись автоматичним режимом не бажано, у зв'язкуз тим, що він виставляє значення, котрі неможливо використовувати в реальних системах. Отже, надаємо перевагу ручному режиму.

Під час увімкнення внутрішнього зворотного зв'язку за кутом, як це продемонстровано на рис. 3.7, виконується налаштування цього контуру [19].

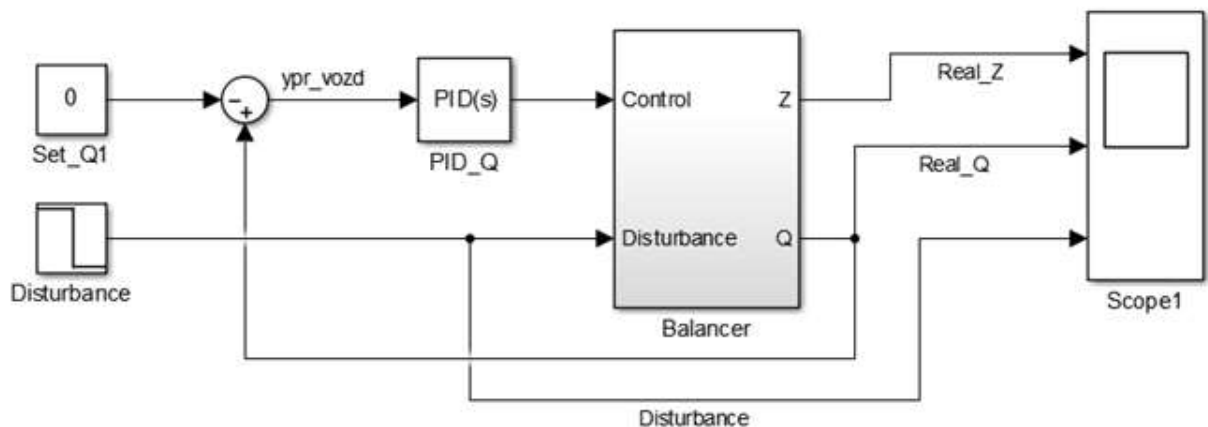


Рисунок 3.7 – Контур зворотного зв'язку за кутом

Спершу необхідно підібрати значення пропорційного коефіцієнта, таким чином, щоб система увійшла в коливальний режим (рис. 3.8). На наступному етапі необхідно збільшувати диференціальну складову, таким чином, щоб система стала нестійкою, а потім повернеться назад до крайнього

стійкого стану. Поведінку системи після завершення налаштувань продемонстровано на рис. 3.9. Отримані значення і будуть значеннями для ПД-регулятора внутрішнього контуру. Під час проведеного експерименту для нашої системи були отримані такі значення: пропорційне – 200, інтегральне – 0, диференціальне – 30.

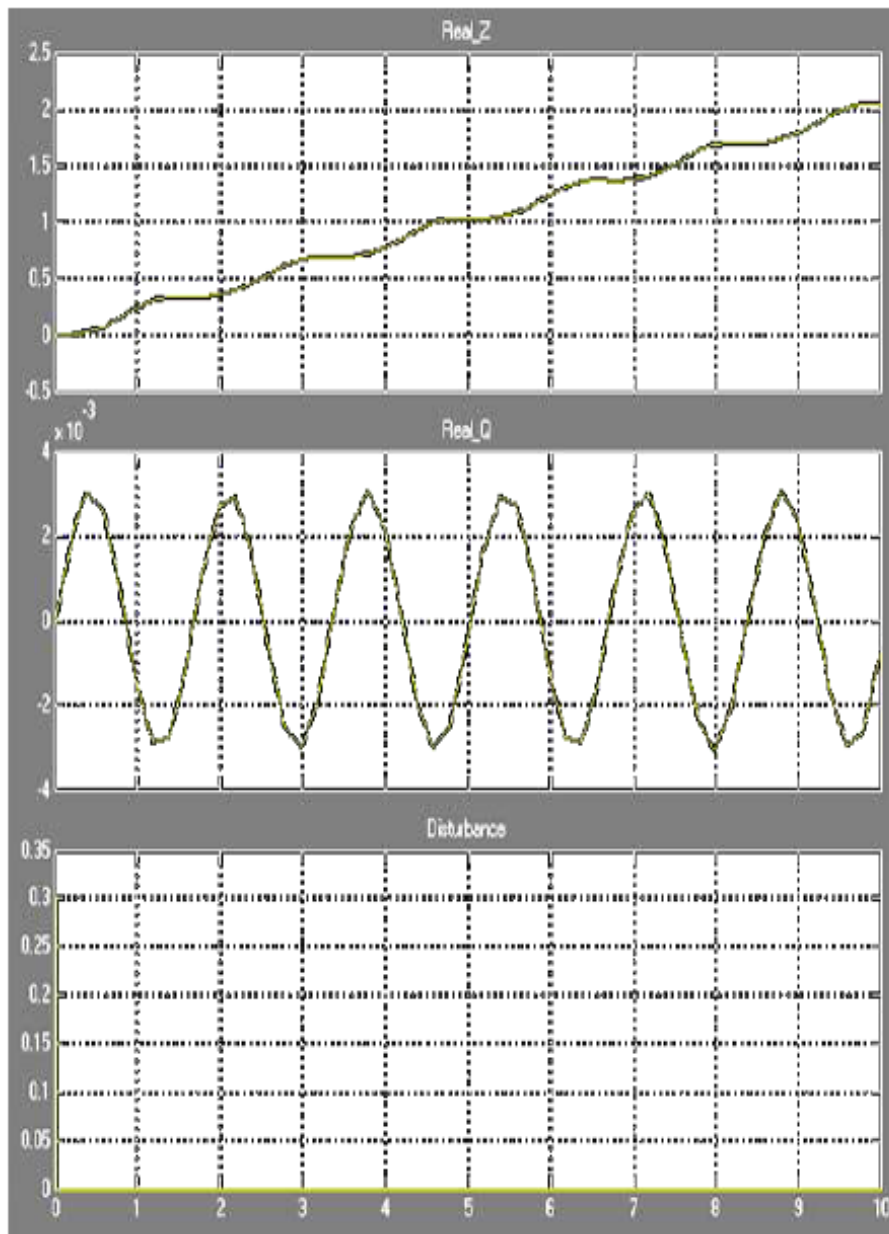


Рисунок 3.8 – Аперіодичні коливання в системі

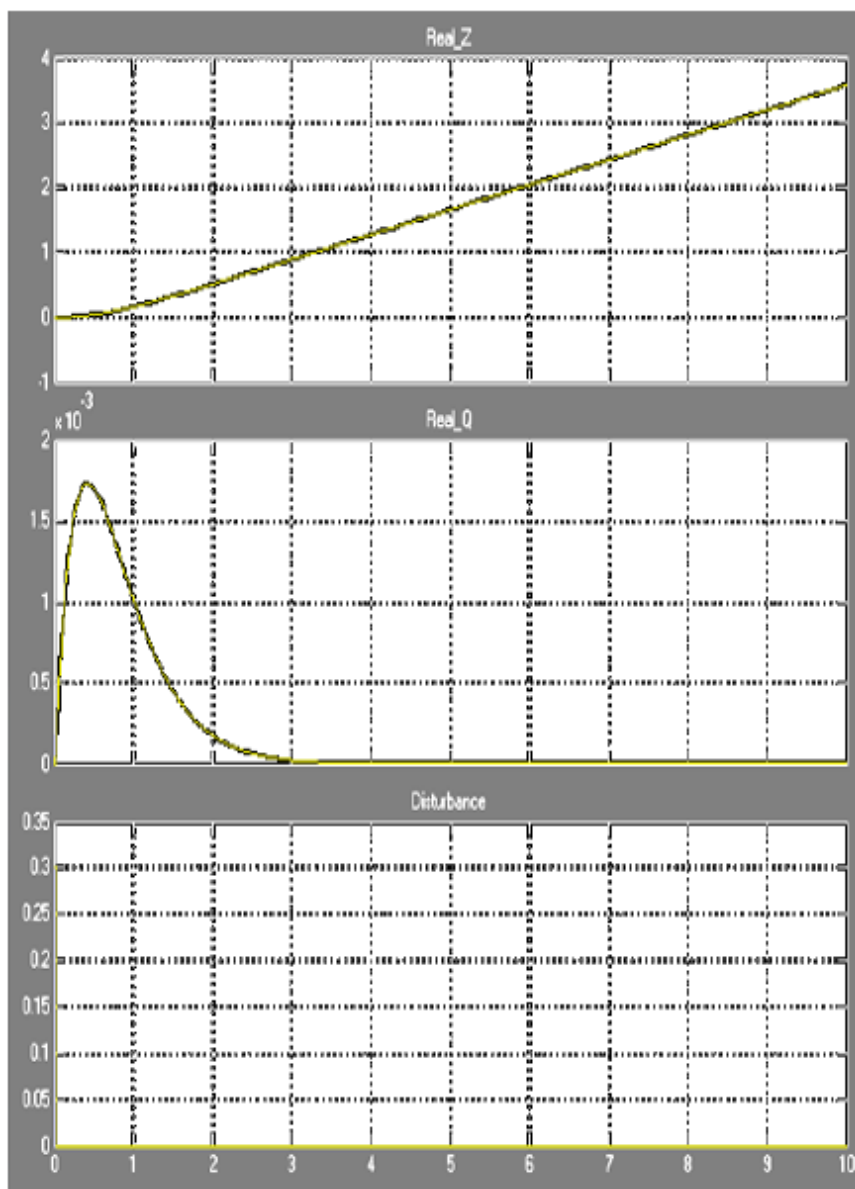


Рисунок 3.9 – Крайне стійке значення диференціальної складової

Після налаштування внутрішнього контуру виконують налаштування зовнішнього контуру. Одночасно зовнішній контур замикають за лінійним переміщенням робота. На рис. 3.10 подано схему з'єднання [19].

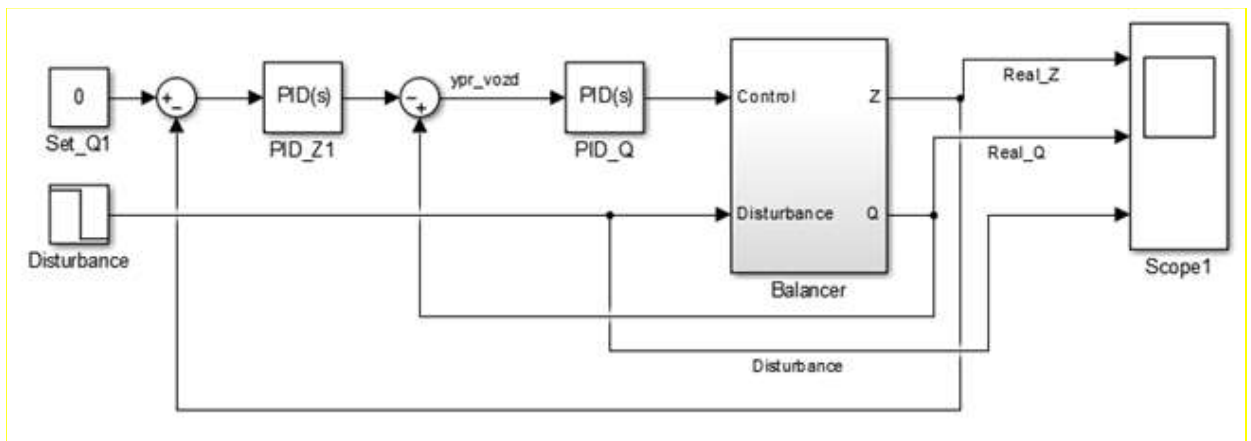


Рисунок 3.10 – Система з двома замкненими контурами зворотного зв'язку

Для налаштування значень ПІД-регулятора зовнішнього контуру потрібно збільшувати значення пропорційного коефіцієнта доти, доки система не стане нестійкою, а вже потім зменшити його до останнього стійкого стану системи.

Дії, котрі були зазначені вище, необхідно послідовно повторити для інтегрального та диференціального коефіцієнтів. За результатами налаштування було отримано такі значення ПІД-регулятора: пропорційне – 0,00002, інтегральне – 0,0000001, диференціальне – 0,001. Поведінку системи з двома налаштованими контурами зворотного зв'язку продемонстровано на рис. 3.11.

Відповідно до рис. 3.11 можемо стверджувати, що система є стійкою, втім перехідний процес за лінійним переміщенням займає неприпустимо тривалий час. Щоб пришвидшити перехідний процес, необхідно збільшувати значення ПІД-регулятора, за лінійним переміщенням. Однак у разі збільшення цих значень система стає не стійкою. Причина полягає у малому запасі стійкості за кутом, оскільки під час налаштування застосовувались мінімально можливі значення коефіцієнтів для ПІД-регулятора, щоб вони стали більш реалістичними для існуючих систем, Matlab витримає все, а ось реальна система – ні. Щоб пришвидшити загальний перехідний процес, доцільно збільшити значення регулятора за кутом удвічі, тоді вони становитимуть: пропорційне – 400, інтегральне – 0, диференціальне – 60.

Тепер доцільно збільшити і коефіцієнти регулятора за лінійним переміщенням, котрі становитимуть: пропорційне – 0,02, інтегральне – 0, диференціальне – 0,01.

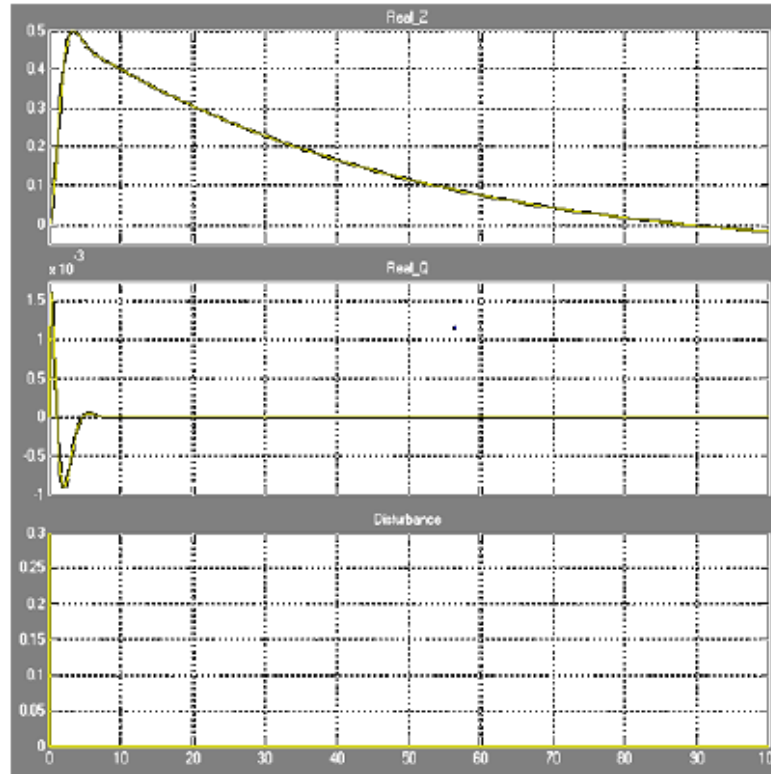


Рисунок 3.11 – Поведінка системи з двома замкнутими контурами зворотного зв'язку

Після внесених змін перехідний процес у системі набуде такого вигляду, котрий продемонстровано на рис. 3.12.

З огляду на викладене вище можна зробити висновок, що система налаштована, отже, час перехідного процесу є прийнятним. Так, перехідний процес можна прискорити, піднявши коефіцієнти ще, проте за таких обставин система стане дедалі важчою для реалізації. Таким чином, доцільно зупинитися на досягнутому. У разі виникнення бажання щодо збільшення швидкості перехідного процесу, краще вибрати новий двигун, який надасть можливість розширити обмеження швидкості та прискорення, котрі ним накладаються на систему.

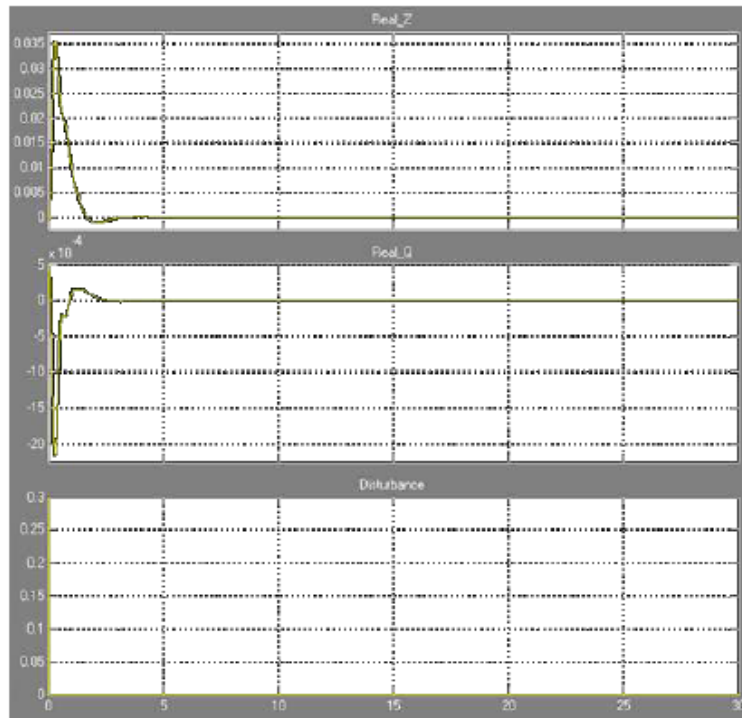


Рисунок 3.12 – Перехідний процес у системі під час збільшення коефіцієнтів ПД

3.3 Випробування динамічних характеристик самобалансуючого робота

З метою аналізу поведінки системи через різні вхідні впливи необхідно на її вхід подати різні впливи, і спостерігати за поведінкою системи. Для виведення системи зі стану рівноваги потрібно спрямувати на її вхід одиничний ступінчастий вплив з тривалістю 0,03 та інтенсивністю 0,3. За такого впливу. Поведінку системи, на котру скеровано такий вплив, можна спостерігати на рис. 3.13.

Як видно з вихідних значень системи, що подані на рис. 2.16, коливання є затухаючими і наближаються до нуля через 5 с.

У разі підвищення інтенсивності впливу, наприклад, обрати тривалість 0,03, а інтенсивність 10, система стає нестійкою. Дію такого впливу продемонстровано на рис. 3.14.



Рисунок 3.13 – Поведінка системи за одиничного впливу

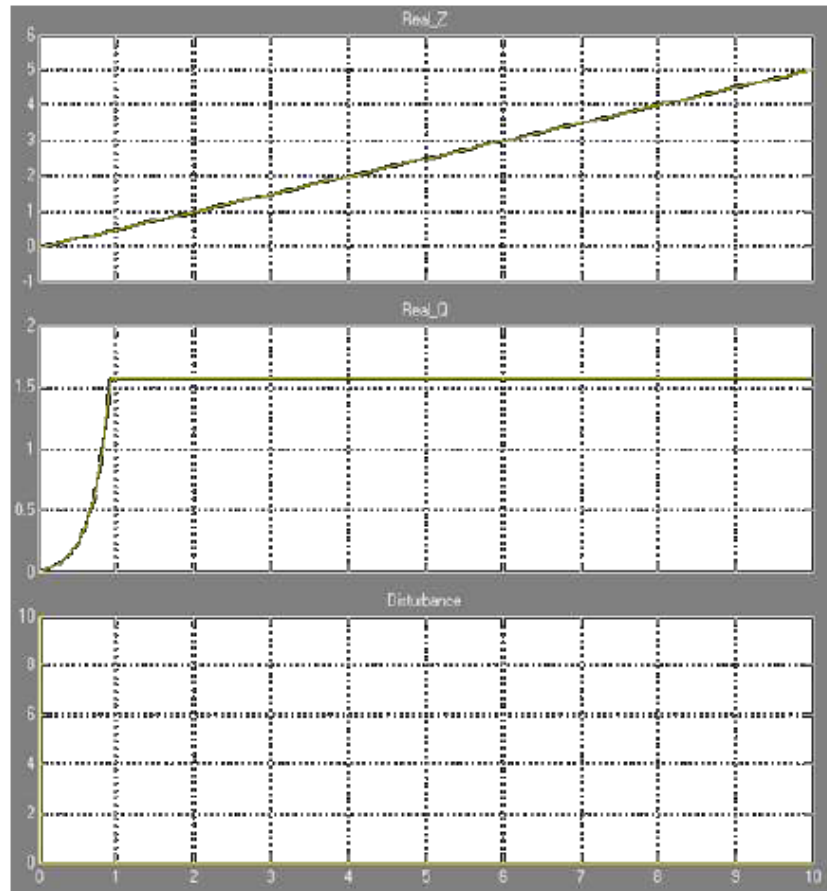


Рисунок 3.14 – Поведінка системи за надмірного вхідного впливу

Для аналізу системи за зовнішнім впливом, який постійно змінюється, на її вхід подають синусоїдальний вплив з амплітудою в 0,5 та періодом коливань 0,5. Поведінку системи через такий збурювальний вплив продемонстровано на рис. 3.15.

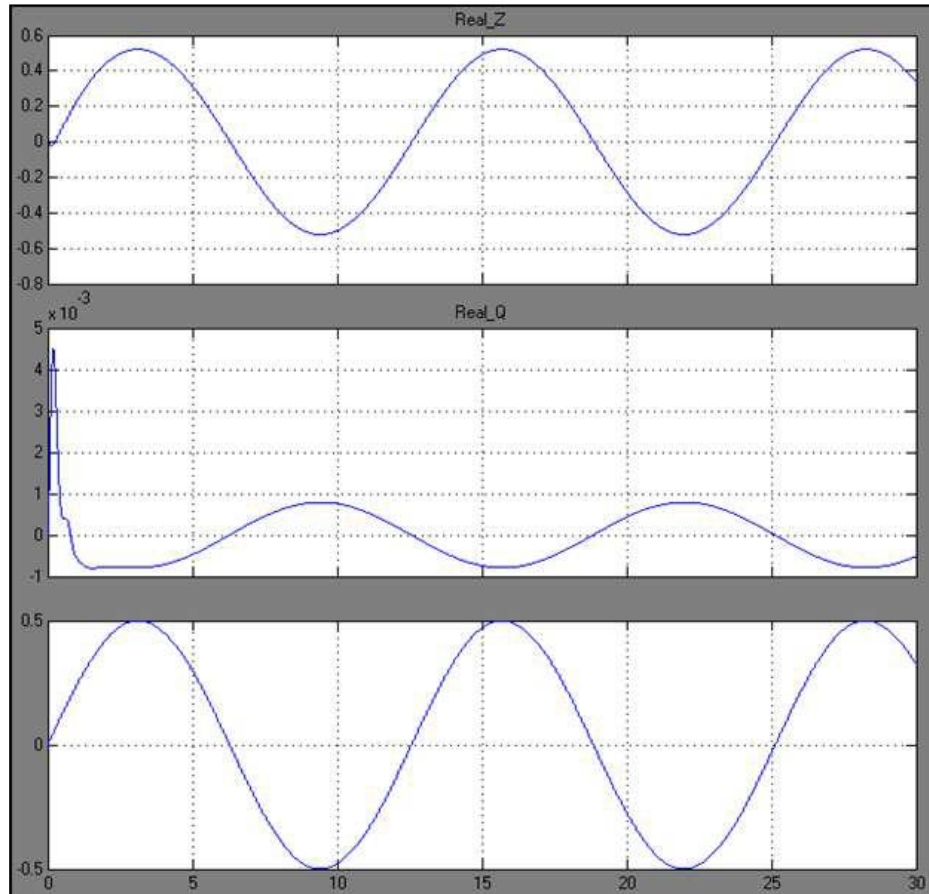


Рисунок 3.15 – Поведінка системи під час синусоїдального зовнішнього впливу

Вище було розглянуто ідеалізовану систему, а також її поведінку. Проте у реальних системах завжди присутні перешкоди та похибки вимірювань.

З огляду на експериментальні дослідження, додамо до системи перешкоди, що відповідають реальним спотворенням значень з датчика кута нахилу й енкодера. Після внесення цих елементів загальна схема набуде вигляду, продемонстрованого на рис. 3.16 [19].

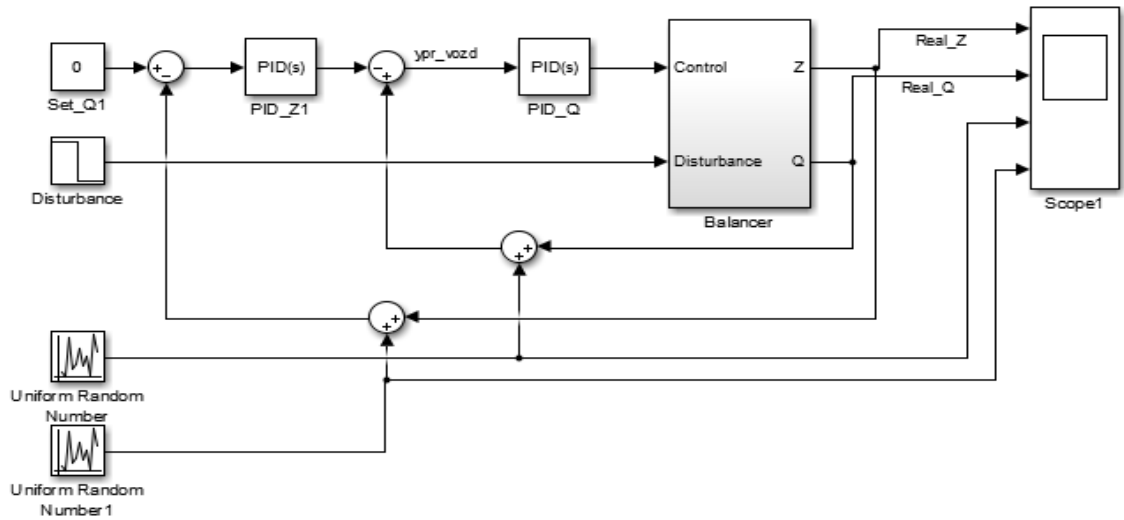


Рисунок 3.16 – Модель з доданими генераторами перешкод

Таким чином, можна бачити, що навіть за відсутності зовнішнього впливу система не перебуває у стані повної рівноваги, як це спостерігалось раніше. Це обґрунтовується тим, що значення з датчиків постійно мають помилку. Поведінку зазначеної системи подано на рис. 3.17.

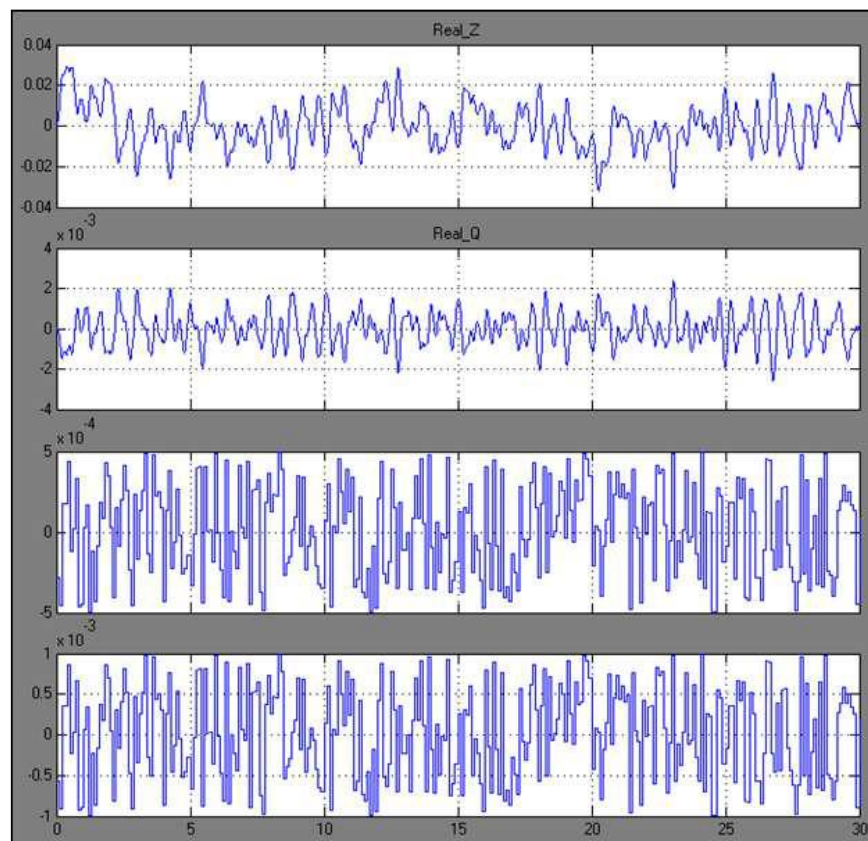


Рисунок 3.17 – Поведінка системи за наявності перешкод

3.4 Висновки до розділу

На базі даних математичних рівнянь, які описують динамічні характеристики самобалансуючого робота, у середовищі Simulink пакета Matlab було побудовано модель самобалансуючого робота. Для більш наочного відображення поведінки зазначеного робота за допомогою блоку VRsink було складено 3D-модель. Для утримання перевернутого маятника в перевернутому стані використано два ПД-регулятора, один з яких спрямований на утримання робота в перевернутому стані, а другий – на утримання робота в заданому лінійному положенні. З метою аналізу поведінки системи за різних вхідних впливах проведено випробування динамічних характеристик самобалансуючого робота. Це дозволить побудувати мобільний двоколісний самобалансуючий робот, який спроможний утримувати рівновагу на місці з одночасним переміщенням окремих частин за наявності різних перешкод.

4 ОХОРОНА ПРАЦІ

4.1 Аналіз умов праці на робочому місці

На робочому місці оператора ПК можуть виникати небезпечні та шкідливі чинники: підвищений рівень шуму, несприятливі мікрокліматичні умови, недостатній рівень освітленості, шкідливі речовини, а також підвищений рівень електромагнітних випромінювань радіочастот, висока напруга електричної мережі, статична електрика тощо. Робота з ПК супроводжується також підвищеним ступенем напруженості трудового процесу. У разі систематичного впливу виробничих чинників, які не відповідають нормативним показникам, зростає рівень професійно зумовленої захворюваності працівників. Крім того, можуть виникнути професійні захворювання органів зору, руху, нервової системи. Таким чином, вивчення умов праці на робочому місці програміста – це необхідна умова запобігання негативних наслідків впливу небезпечних та шкідливих чинників.

Організація робочого місця. Приміщення, в якому обладнане робоче місце програміста, загальною площею 48 м², і висотою стелі 3,5 м. У приміщенні розташовано 6 робочих місць з ПК. Кожне робоче місце обладнане робочим столом, стільцем та персональним комп'ютером, який складається з монітора, системного блоку, клавіатури та миші.

4.2 Промислова безпека на робочому місці

Живлення ПК здійснюється від трифазної чотирьох електричної мережі змінного струму з глухо-заземленою нейтраллю і напругою 220 В, частотою 50 Гц. Згідно з НПАОП 40.1-1.21-98 приміщення можна віднести до категорії без підвищеної небезпеки, оскільки в приміщенні відсутні

чинники, що викликають підвищену чи особливу небезпеку.

Для створення безпечних умов праці необхідно втілити низку організаційних і технічних заходів. Згідно з НПАОП 40.1-1.32-01 для запобігання ураження людини електричним струмом у приміщенні застосовується система занулення.

4.3 Виробнича санітарія у приміщенні

Робота оператора ПК за енерговитратами належать до категорії легких робіт. У таблиці 4.1 наведені оптимальні параметри мікроклімату в приміщеннях, де проводять роботи операторського типу [20].

Таблиця 4.1 – Параметри мікроклімату для приміщень з ПК

Період року	Параметр мікроклімату	Величина
Холодний	Температура повітря в приміщенні; відносна вологість; швидкість руху повітря	22 – 24 °С; 40 – 60 %; до 0.1 м/с
Теплий	Температура повітря в приміщенні; відносна вологість; швидкість руху повітря	23 – 25 °С; 40 – 60 %; 0.1 – 0.2 м/с

Виміряні за допомогою приладів температура та вологість у лабораторії відповідають вказаним у таблиці для теплого періоду року. Слід зазначити, що для нормалізації параметрів мікроклімату слід використовувати у приміщеннях кондиціонування повітря, або забезпечити подачу свіжого повітря системами вентиляції.

Лабораторія, де виконується робота, має наступні характеристики:

- площа приміщення – 48 м² (8 м × 6 м);
- висота – 3,5 м;
- кількість робочих місць – 6 шт.;

– обладнання – стіл з ПК і периферією – 6 шт.

Приміщення, відповідно до ДНАОП 0.00-1.31-99, має забезпечувати 6 м² площі та 20 м³ об'єму на одне окреме робоче місце з ПК [20]. Площа приміщення 48 м² та об'єм 168 м³, на кожне робоче місце приходиться 8 м² площі і об'єм 28 м³, тобто вимога виконана.

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

Рівень загального штучного освітлення приміщення можна перевірити за допомогою методу питомої потужності, викладеної в [20].

Розрахункова формула методу:

$$W = \frac{W_{\Sigma}}{S}, \quad (4.1)$$

де W – питома потужність, Вт/м²;

S – площа приміщення, м²;

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

$$W_{\Sigma} = W_{ce} \cdot n_{ce}, \quad (4.2)$$

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

n_{ce} – кількість світильників в приміщенні.

$$W_{\Sigma} = 100 \cdot 4 = 400 \text{ Вт}, \quad (4.3)$$

$$W = \frac{400}{48} = 8,33 \text{ Вт/м}^2. \quad (4.4)$$

Питомої потужності $8,33 \text{ Вт/м}^2$ по таблиці Б.3 із [20] відповідає освітленість в 250 лк при мінімальній допустимій освітленості 300 лк.

Отже, для створення сприятливих зорових умов у лабораторії необхідно збільшити кількість світильників або замінити в них лампи на більш потужні.

4.4 Пожежна безпека приміщення

Пожежна безпека – стан об'єкта, в якому виключається можливість пожежі, а у випадку її виникнення запобігає впливу на людей небезпечних чинників пожежі й забезпечується захист матеріальних цінностей.

Пожежна безпека забезпечується системою запобігання пожежі й системою пожежного захисту. У всіх службових приміщеннях обов'язково повинен бути План евакуації людей під час пожежі, що регламентує дії персоналу у разі виникнення вогнища загоряння, що й указує місця розташування пожежної техніки.

Горючими компонентами у виробничому приміщенні є: перегородки, двері, підлоги, ізоляція кабелів тощо.

Протипожежний захист – це комплекс організаційних і технічних заходів, які спрямовані на забезпечення безпеки людей, на запобігання пожежі, обмеження її поширення, а також на створення умов для успішного гасіння пожежі.

Джерелами запалювання у виробничому приміщенні можуть бути електронні схеми від ПК, прилади, застосовувані для технічного обслуговування, пристрої електроживлення, кондиціонування повітря, де в результаті різних порушень утворюються перегріті елементи, електричні іскри й дуги, що здатні викликати загоряння горючих матеріалів.

У сучасних ПК дуже висока щільність розміщення елементів електронних схем. У безпосередній близькості один від одного розташовуються сполучні проведення, кабелі. Під час протікання по них електричного струму виділяється значна кількість теплоти. При цьому можливо оплавлення ізоляції. Для відводу надлишкової теплоти від ПК служать системи вентиляції й кондиціонування повітря. У разі постійної дії ці системи стають додатковою пожежною небезпекою.

Енергопостачання виробничого приміщення реалізується за допомогою трансформаторної станції, а також завдяки двигун-генераторних агрегатів. На трансформаторних підстанціях особливу небезпеку можуть спричинити трансформатори з масляним охолодженням. Зважаючи на це, перевагу слід надавати сухим трансформаторам.

ВИСНОВКИ

Для реалізації поставленої мети було проаналізовано предметну галузь, а також сформульовано завдання, котре необхідно розв'язати. За результатами проведеного аналізу наявних моделей самобалансуючих роботів було виявлено, що в таких балансувальних системах використовують виконавчі механізми без люфту обираючих пристроїв. Водночас у них присутня велика зона нечутливості під час запуску двигуна, що ускладнює балансувальну систему загалом.

Було розроблено математичну модель, яка сприяє полегшенню в розробленні самобалансуючого робота шляхом налаштування його регуляторів, не вдаючись до фізичного макетування. Аналіз методів фільтрації продемонстрував, що найкращі результати надає комплементарний фільтр з інтелектуальним пошуком помилок.

Побудовано систему підтримання швидкості обертання коліс під час різних моментів опору на валу двигуна. Така система надасть можливість збільшити швидкість перехідних процесів у виконавчих елементах самобалансуючого робота. У даній роботі сершу розглядаються мобільні нестійкі роботи, в яких утримання рівноваги і пересування реалізується за рахунок центру тяжіння, що зміщується. Ця особливість дозволяє створити мобільного двоколісного самобалансуючого робота, котрий здатен утримувати рівновагу на місці з одночасним переміщенням окремих частин.

Під час виконання розділу «Охорона праці» були визначені небезпечні та шкідливі виробничі чинники. Зважаючи на це були розроблені заходи і технічні засоби щодо забезпечення безпеки праці персоналу. Дотримання цих заходів дасть змогу максимально знизити ймовірність отримання травм під час роботи, а також поліпшити умови роботи персоналу лабораторії, де проводилась робота над дослідженнями.

ПЕРЕЛІК ДЖЕРЕЛ ПОСИЛАННЯ

1. Методичні вказівки з підготовки та захисту кваліфікаційної роботи здобувачами другого (магістерського) рівня вищої освіти спеціальності 174 Автоматизація, комп'ютерно-інтегровані технології та робототехніка, освітньо-професійних програм: «Комп'ютерно-інтегровані технологічні процеси і виробництва», «Комп'ютеризовані та робототехнічні системи» / Упоряд. І. Ш. Невлюдов, Р. В. Артюх, В. В. Безкоровайний, Н. П. Демська, В.В.Євсєєв, О. І. Филипенко, О. М. Цимбал. Харків: ХНУРЕ, 2023. – 49 с.

2. Дипломне проектування для студентів усіх форм навчання спеціальності 151 «Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології»: навч. посіб. / за ред. І.Ш. Невлюдов, А.О. Андрусевич, О.В. Токарева, Г.В. Пономарьова. Київ, 2016. – 320 с.

3. ДСТУ 3008:2015 Інформація та документація «Звіти у сфері науки і техніки». Структура та правила оформлювання. / В. Земцева; Ю. Поліщук, канд. фіз.-мат. наук; Р. Санченко, канд. техн. наук; Л. Шрамко; А. Ямчук (науковий керівник) ДП «УкрНДНЦ» від 22 червня 2015р. № 61 з 2017-07-01.

4. Положення про кваліфікаційну роботу здобувача вищої освіти на другому (магістерському) рівні [Електронний ресурс]: Наказ ХНУРЕ від 06 травня 2021 р. No 143. – Режим доступу: https://nure.ua/wpcontent/uploads/Main_Docs_NURE/143-vid-06.05.2021-pro-vvedennja-v-dijurishennja-vchenoi-radi-universitetu.pdf

5. Аллахверанов Р. Ю., Невлюдова В. В., Горяїнов І. О. Моделювання акселерометра з реостатним чутливим елементом як мехатронного пристрою // Міжнародний науковий журнал "Інтернаука", № 8, 2024. с. 51-57.

6. Goryayinov I., Allakhveranov R. Design of rheostat converters // I International scientific and practical conference “Scientific research: modern challenges and future prospects” – MDPC Publishing, Munich,

Germany. 2024. pp. 99-104.

7. Arakelian V. Robot Design, Dynamics and Control / V. Arakelian, P. Wenger // CISM International Centre for Mechanical Sciences Book Series; Springer: Berlin/Heidelberg, Germany. – 2019. – Vol. 62 – P. 584-598.

8. A. H. Mohamed. “LQR and PID controllers” performance on a half car active suspension system / Mohamed A. H., Abidou D., Maged S. A. // International mobile, intelligent and ubiquitous, computing conference, IEEE. – 2021.– P. 48-53.

9. Zeghloul S. Advances in Service and Industrial Robotics / S. Zeghloul, M. A. Laribi, J. S. Sandoval Arevalo // Mechanisms and Machine Science Book Series; Springer: Berlin/Heidelberg, Germany. – 2020. – Vol. 84 – P. 134-146.

10. Cheng Peng. Model Reference Adaptive Control Based on Adjustable Reference Model During Mode Transition for Hybrid Electric Vehicles / Peng Cheng, Chen Li // Mechatronics. – 2022. – Vol. 87 – P. 128-136.

11. L.V. Gopala Rao. Optimal response of half car vehicle model with sky-hook damper based on LQR control / Gopala Rao L.V., Narayanan S. // Int. J. Dynam. Control. – 2020. – Vol. 8 №2 – P. 488-496.

12. Banerjee S. Mathematical Modeling: Models, Analysis and Applications (2nd ed.) // Chapman and Hall/CRC. – 2021, 9 – 120 p.

13. Matrood Mustafa. Improving the Dynamic Response of Half-Car Model Using Modified PID Controller / Mustafa Matrood, Ameen Nassar // Iraqi Journal for Electrical and Electronic Engineering. – 2023. – Vol. 19 – P. 52-58.

14. Kuo C.-H. Robotics and Mechatronics / C.-H. Kuo, P.-C. Lin, T. Essomba, G.-C Chen // In Proceedings of the 6th IFT&MM International Symposium on Robotics and Mechatronics (ISRM 2019). – 2019. – Vol. 78 – P. 122-139.

15. Koukos-Papagiannis C. Classification of All Non-Isomorphic Regular and Cuspidal Arm Anatomies in an Orthogonal Metamorphic Manipulator /

C. Koukos-Papagiannis, V. Moulianitis, N. Aspragathos // *Robotics*. – 2020, 9 – 20 p.

16. Zhiguo Zhao. Optimal control of mode transition for four-wheel-drive hybrid electric vehicle with dry dual-clutch transmission / Zhao Zhiguo, Lei Dan, Chen Jiayi, Li Hangyu // *Mechanical Systems and Signal Processing* – 2018. – Vol. 105 – P. 68-89.

17. Xiangyang Xu. Optimized control of engine start assisted by the disconnect clutch in a P2 hybrid automatic transmission / Xu Xiangyang, Liang Yinghua, Jordan Mick, Tenberge Peter, Dong Peng // *Mechanical Systems and Signal Processing*. – 2019. – Vol. 124 – P. 313-329,

18. Feng Wang. Torsional oscillation-considered mode transition coordinated control for a power-split PHEV based on action dependent heuristic dynamic programming / Wang Feng, Zhang Jian, Xu Xing, Cai Yingfeng, Ni Shaoyong, Que Hongbo // *ISA Transactions*. – 2022. – Vol. 126 – P. 597-616.

19. Matheson E. Human-Robot Collaboration in Manufacturing Applications: A Review / E. Matheson, R. Minto, E. G. Zampieri, M. Faccio, G. Rosati // *Robotics*. – 2019,8. – 100 p.

20. Комплекс навчально-методичного забезпечення навчальної дисципліни «Організація керування умовами праці» підготовки освітнього рівня бакалавр усіх спеціальностей та усіх напрямів університету [Електронний ресурс] / ХНУРЕ; розроб.: Т.Є. Стищенко, Г. В. Пронюк, Н. М. Сердюк. – Харків, 2017. – 108 с.