

**НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ УКРАЇНИ
«КИЇВСЬКИЙ ПОЛІТЕХНІЧНИЙ ІНСТИТУТ
імені ІГОРЯ СІКОРСЬКОГО»**

**Приладобудівний факультет
Комп'ютерно-інтегрованих оптичних та
навігаційних систем**

До захисту допущено:

Завідувач кафедри

_____ Надія БУРАУ

«__» _____ 2025 р.

**Дипломний проект
на здобуття ступеня бакалавра
за освітньо-професійною програмою «Комп'ютерно-інтегровані системи
та технології в приладобудуванні»
спеціальності 151 «Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані
технології»
на тему «Двоколісна балансуєча платформа»**

Виконав:

студент IV курсу, групи ПГ-11

Громович Данило Євгенійович _____

Керівник:

Доцент, к.т.н. Павловський Олексій Михайлович _____

Рецензент:

Засвідчую, що у цієї дипломної роботі
немає запозичень з праць інших авторів
без відповідних посилань.

Студент _____

Київ – 2025 року

Національний технічний університет України
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

Інститут/факультет _____ Приладобудівний
(повна назва)

Кафедра _____ Комп'ютерно-інтегрованих оптичних та навігаційних систем
(повна назва)

Рівень вищої освіти – перший (бакалаврський)

Спеціальність 151 – «Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології»
(код і назва)

Освітня програма Комп'ютерно-інтегровані системи та технології в приладобудуванні

ЗАТВЕРДЖУЮ

Завідувач кафедри КІОНС

_____ Надія БУРАУ
(підпис) (ім'я, прізвище)

«___» _____ 2025 р.

ЗАВДАННЯ

на дипломний проект студенту

Громович Данило Євгенійович

(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема проекту «Двоколісна балансуєча платформа»,
керівник проекту Павловський Олексій Михайлович, к.т.н., доцент,
затверджені наказом по університету від «___» _____ 2025 р. № _____

2. Строк подання студентом проекту __.06.2025 р.

3. Вихідні дані до проекту

Блок електроніки, виконавчих елементів та відповідного програмного та алгоритмічного забезпечення, що приводить у рух двоколісного мобільного балансуєчого робота.

4. Перелік завдань, які потрібно розробити:

Вступ. Огляд балансуєчих платформ, пристроїв та транспортних засобів. Створення прототипу двоколісної балансуєчої платформи: розробка структурної схеми, вибір електричних компонентів, створення та налагодження коду. Складання прототипу. Випробування макетного зразка.

5. Перелік графічного (ілюстративного) матеріалу (із зазначенням обов'язкових креслеників, плакатів, презентацій тощо)

Складальне креслення (А1), Робоче креслення деталей (А3-А4), Схема структурна (А2), Схема електрична принципова (А2), Схема алгоритму (А2), ілюстрації, що додатково розкривають суть проекту.

6. Дата видачі завдання 24.02.2025р.

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№ з/п	Назва етапів виконання Дипломного проекту	Термін виконання етапів проекту	Примітка
1	Аналіз завдання до дипломного проекту	10.05.2025 – 20.05.2025	
2	Огляд існуючих рішень	21.05.2025 – 23.05.2025	
3	Вибір та обґрунтування елементів	24.05.2025 – 28.05.2025	
4	Проектування приладу	29.05.2025 – 02.06.2025	
5	Програмування приладу	03.06.2025 – 04.06.2025	
6	Аналіз працездатності	04.06.2025 – 05.06.2025	
7	Оформлення пояснювальної записки та графічних документів	06.06.2025 – 07.06.2025	

Студент

(підпис)

Данило ГРОМОВИЧ
(ім'я, прізвище)

Керівник проекту

(підпис)

Олексій ПАВЛОВСЬКИЙ
(ім'я, прізвище)

Анотація

Цей проект присвячено розробці двоколісної самобалансуючої платформи з використанням сучасних мікроконтролерних технологій, принципів автоматичного керування та систем стабілізації. Проект спрямований на реалізацію моделі нестійкої системи з активним регулюванням, аналогічної принципу роботи персонального транспорту типу сігвей.

У роботі виконано повний цикл розробки прототипу: проведено аналіз фізичних основ динамічної стабілізації, обґрунтовано вибір електронних компонентів та виконавчих механізмів, реалізовано структурну й електричну схеми пристрою, а також створено 3D-модель корпусу в середовищі SolidWorks. Основним керуючим елементом системи виступає мікроконтролер, що забезпечує обробку даних з інерціального сенсора та керування двигунами на основі PID-регулювання.

Особливістю конструкції є модульність корпусу, надрукованого з пластику, що дозволяє легко проводити технічне обслуговування та модернізацію пристрою. Платформа здатна стабілізувати вертикальне положення навіть при зміні розподілу ваги, наприклад, при розміщенні додаткового об'єкта на верхній кришці.

Запропонований прототип демонструє практичне застосування принципу оберненого маятника та технологій зворотного зв'язку у системах активної стабілізації. Результати проекту можуть бути використані як навчальна модель у галузі робототехніки, керування та вивчення нестійких систем.

ABSTRACT

This project is devoted to the development of a two-wheeled self-balancing platform using modern microcontroller technologies, automatic control principles and stabilization systems. The project is aimed at implementing a model of an unstable system with active regulation, similar to the principle of operation of personal transport such as a segway.

The work included a full prototype development cycle: an analysis of the physical foundations of dynamic stabilization, a justified choice of electronic components and actuators, the implementation of the structural and electrical schemes of the device, and a 3D model of the body in SolidWorks. The main controlling element of the system is a microcontroller that provides data processing from an inertial sensor and motor control based on PID control.

The design feature is the modularity of the plastic housing, which allows for easy maintenance and modernization of the device. The platform is able to stabilize its vertical position even when the weight distribution changes, for example, when an additional object is placed on the top cover.

The proposed prototype demonstrates the practical application of the principle of the inverse pendulum and feedback technologies in active stabilization systems. The results of the project can be used as a training model in the field of robotics, control, and the study of unstable systems.

Зміст

Перелік скорочень.....	7
Вступ.....	8
Розділ 1. Оглядова частина	9
1.1 Історія балансуєчих систем та гіроскопів	9
1.2 Контроль пристрою гіроскопом	13
1.3 Призначення та сфери застосування стабілізаційних систем	15
1.3.1 Авіація	15
1.3.2 Наземний транспорт	17
1.4 Принцип роботи інверсного маятника.....	23
1.4.1 Обернений маятник	23
1.4.2 Принцип стабільності та реакції на відхилення	25
1.5 PID-регулятор	26
1.5.1. Призначення та роль PID-регулятора	26
1.5.2 Принцип дії PID-регулятора	28
Висновок до розділу 1	31
Розділ 2. Розробка двоколісної балансуєчої платформи	32
2.1 Призначення проекту.....	32
2.2 Структурна схема.....	33
2.3 Вибір компонентів	34
2.3.1 Вибір плати	34
2.3.2 Вибір двигуна	36
2.3.3. Вибір драйвера двигуна.....	38
2.3.4. Вибір інерціального чутливого елемента.....	39
2.3.5 Вибір джерела живлення.....	40
2.4 Електрична схема.....	43
2.5 Конструювання корпусу.....	44
2.5.1 Розробка корпусу	44
2.5.2 Збірка корпусу	49
2.6 Розробка програмного забезпечення.....	50

2.6.1 Загальна архітектура програмного забезпечення	50
2.6.2 Отримання та обробка даних з датчиків.....	52
2.6.3 Керування виконавчими механізмами.....	54
2.6.4 Математична модель регулятора.....	55
2.7 Перевірка працездатності двоколісної балансуєчої платформи.....	56
Висновок до розділу 2	60
Висновки	61
Список використаної літератури	63
Додаток А.....	68
Код програми.....	68
Додаток Б	73
Кресленики	73

ПЕРЕЛІК СКОРОЧЕНЬ

- MEMS — мікроелектромеханічні системи (*Microelectromechanical Systems*)
- IMU — інерціальна вимірювальна одиниця (*Inertial Measurement Unit*)
- PID — пропорційно-інтегрально-диференційний регулятор (*Proportional--Integral-Derivative*)
- ESP — електронна програма стабілізації (*Electronic Stability Program*)
- ЕКС — електронний контроль стійкості
- MSC — система контролю стійкості мотоцикла (*Motorcycle Stability Control*)
- ACC — адаптивний круїз-контроль (*Adaptive Cruise Control*)
- ARAS — вдосконалена система допомоги водієві (*Advanced Rider Assistance Systems*)
- PLA — полілактид (*Polylactic Acid*) — тип пластику для 3D-друку
- I2C — двопровідний серійний інтерфейс (*Inter-Integrated Circuit*)

ВСТУП

Зараз важко уявити сучасні пристрої без систем стабілізації. Вони зустрічаються майже скрізь — у дронах, транспортних засобах, смартфонах, роботах. Їхнє головне завдання — тримати рівновагу й допомагати техніці працювати надійно, без різких збоїв чи втрати керування. Щоб це стало можливим, у хід ідуть датчики, контролери й алгоритми, які постійно слідкують за станом пристрою і коригують його рухи.

Одним із найцікавіших прикладів такої стабілізації є системи, побудовані за принципом оберненого маятника. Це конструкція, яка постійно намагається впасти, а завдання електроніки — не допустити цього. Схожі принципи лежать в основі роботи сігвеїв, гіроскутерів та різних балансуючих роботів. Такі системи часто використовують у навчанні, щоб показати, як працює автоматичне керування на практиці.

Цей дипломний проект якраз і присвячений створенню такого пристрою — простої стабілізаційної машини на базі Arduino nano, яка поводить себе подібно до гіроскутера. У процесі роботи я розібрався з фізикою балансування, зрозумів, як працюють датчики руху, і використав алгоритм PID-регулювання, щоб машинка могла самостійно тримати рівновагу.

Суть конструкції в тому, що вона має два колеса і корпус, який постійно норовить завалитися. Але завдяки керуванню, система встигає реагувати й вирівнюватися, якщо корпус починає хилитися в один бік.

Цей проект корисний тим, що дає змогу на практиці побачити, як влаштовані справжні стабілізаційні системи. Це гарна основа для створення складніших пристроїв у майбутньому — як у промисловості, так і в побуті.

РОЗДІЛ 1.

ОГЛЯДОВА ЧАСТИНА

1.1 Історія балансуєчих систем та гіроскопів

Історія розвитку балансуєчої системи, приклад якої зображено на рисунку 1.1, [1] почалась ще з часів перших досліджень у сфері автоматизованих систем. Прагнення винайти механізм, здатний зберігати рівновагу самостійно почало з'являтися ще за далеко до появи сучасної електроніки та мікроконтролерів. Експерименти з першим прототипом такої системи вважається дослідження оберненого маятника, яке проводилось у ХІХ столітті. Навіть тоді вчені намагались зрозуміти, як незбалансований об'єкт можна стабілізувати застосуванням активного управління [1].

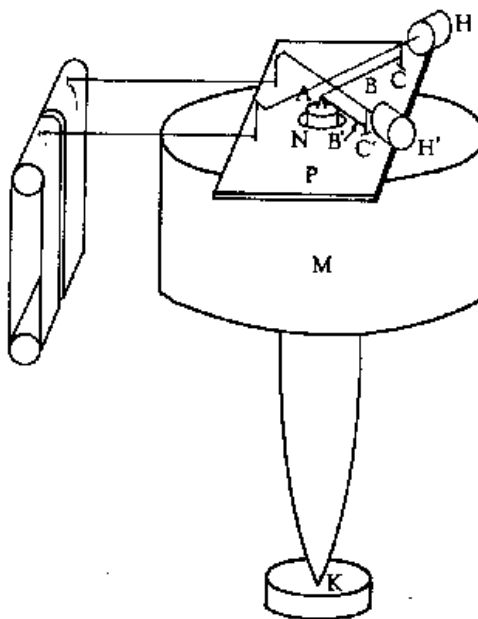


Рисунок 1.1 – Сейсмограф Віхерта з використанням оберненого маятника

Великий вклад у розвиток стабілізаційних систем відбувся у ХХ столітті з розвитком аерокосмічних технологій. Зі створенням літальних апаратів більш схожих до сучасних виникла потреба в точних і надійних стабілізаційних механізмах для літаків, супутників та ракет. Це також мало вплив на вивчення систем зворотного зв'язку та динаміки руху. З тих часів

ключовим елементом для визначення потрібних даних і у забезпеченні курсової стабільності та навігаційних систем було прийнято використати ключовим елементом для цього гіроскоп [2].

У 1898 році військових австрійського флоту створив гіроскопічний напрямний механізм для торпеди Уайтхеда, що продемонстровано на рисунку 1.2, [3]. Він слугував для того, щоб випущена торпеда не змінювала курс руху і влучно попадала в задану ціль. У військовій справі цей винахід був і є безцінним, його не змінюючи використовували до 50-х років XX століття майже по всьому світу. Також це було першим вдалим використанням гіроскопу на практиці [3].

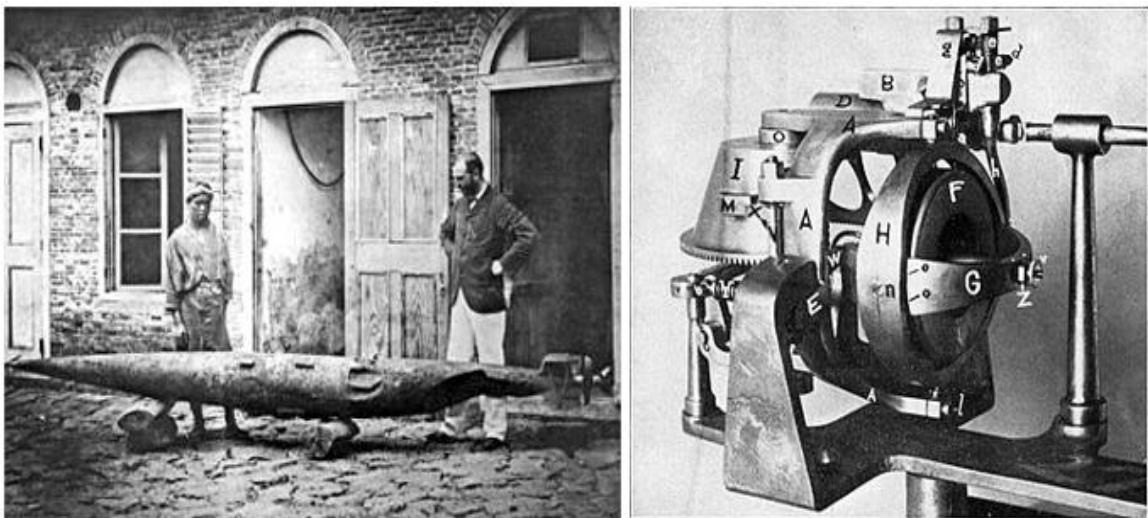


Рисунок 1.2 – Торпеди Уайтхеда і використаного гіроскопа

На початку XX століття було зроблено багато досліджень використання гіроскопа для кутової стабілізації транспортних засобів. Для цього створювали однорейкові залізничні дороги і встановлення на них статично нестійким вагоном, який балансував за допомогою гіроскопа. Були спроби використання гіроскопа з рисунку 1.3, [4] для заспокоювання бортової хитами судна [5].

Надалі людство зрозуміло, що гіроскоп є дуже важливим винаходом і почала його вдосконалювати, оскільки всунути здоровенний механізм який зображено на рисунку вище можна взагалі не всюди. Подальший розвиток виробництва гіроскопів у другій половині XX століття привів до створення

лазерних гіроскопів (рис.1.4, [6]), які замість механічного обертання почали використовувати інтерференцію двох лазерних променів, що рухаються у протилежні сторони у замкнутому корпусі. Це дозволило не лише зменшити об'єм системи, але ще й надзвичайно точно визначати кутове прискорення, також такий пристрій не мав рухомих частин, що подовжувало його термін використання [7].

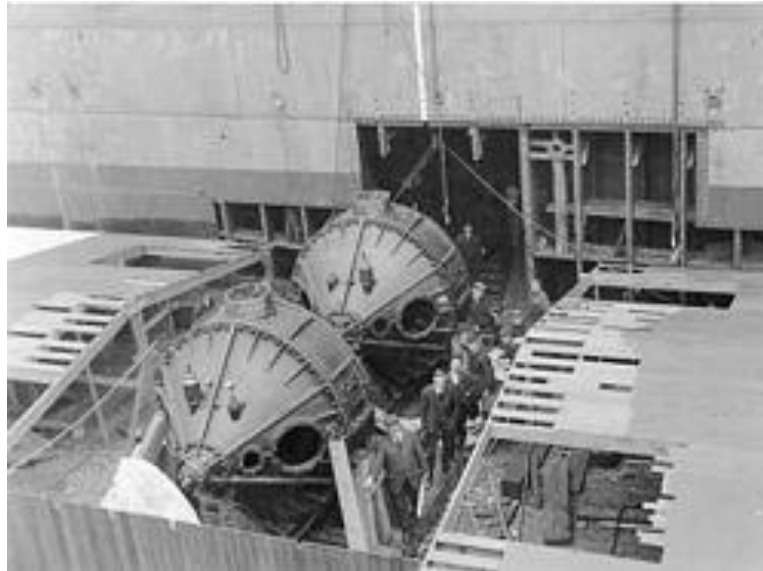


Рисунок 1.3 – Стабілізаційний гіроскоп Сперрі для кораблів

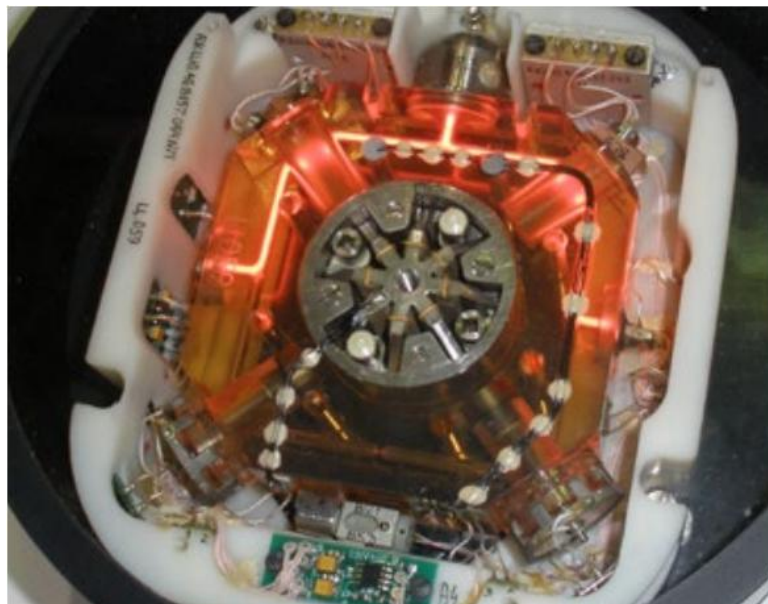


Рисунок 1.4 – Лазерний гіроскоп

Наступний крок розвитку стався на початку 1970-х років. Винайдення гіроскопа на тому ж принципі роботи що й лазерний, але з використанням

замість лазерів оптичне волокно, показано на рисунку 1.5, [8]. Віктор Валі та Річард Шорхтілл вперше продемонстрували на конференції працездатність оптоволоконного гіроскопа. Вже у 1976 році було опубліковано результати досліджень цього винаходу. Він мав вагомі переваги над лазерними гіроскопами: більшу точність, широкий динамічний діапазон, вищу надійність, нижчу вартість був компактнішим, це можна побачити на рисунку 1.6, [9] та легшим у виробництві. Але також мали мінуси, такі як: довгострокова стабільність і шум. Тому в авіації все одно використовували лазерні [10].

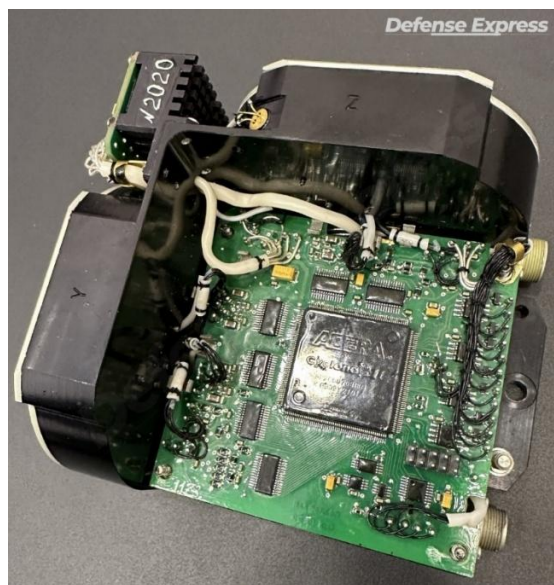


Рисунок 1.5 – Волоконно-оптичний гіроскоп

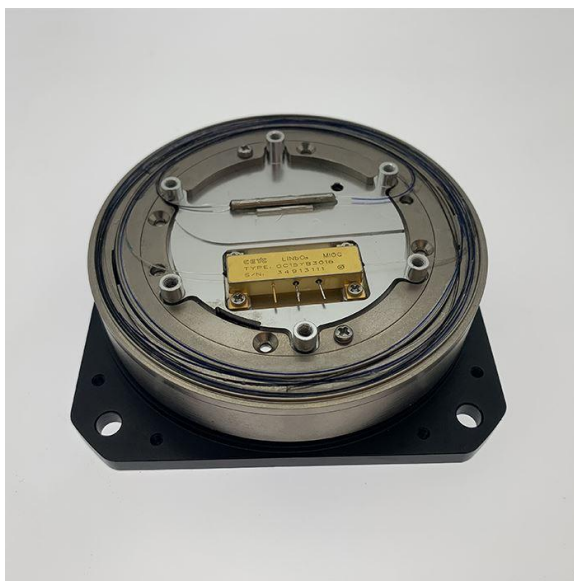


Рисунок 1.6 – Корпус волоконно-оптичного гіроскопа

Розвиток електроніки та поява цифрових контролерів, датчиків руху, обробка сигналів зворотнього зв'язку на початку ХХІ століття відкрила новий етап в історії стабілізації – мініатюризація та доступність балансуєчих систем для електронних винаходів. Так у 2001 році було винайдено перший сігвей (рис. 1.7 [11]) Діном Кайменом – це стало першим широким прикладом торгівельної реалізації балансуєчої, двоколісної системи складеної на принципі динамічної стабілізації [11].



Рисунок 1.7 – Перший винайдений сігвей

1.2 Контроль пристрою гіроскопом

Гіроскоп є невід'ємною частиною багатьох автоматизованих систем керування, особливо тих, де важливе значення має контроль положення, орієнтації та руху об'єкта у просторі. Його основна функція — вимірювання кутової швидкості обертання навколо однієї або кількох осей, що дає змогу

технічним системам реагувати на зміну орієнтації та зберігати стійкість або курс[12].

Основна властивість гіроскопа полягає у його здатності зберігати в просторі незмінний напрям осі обертання при відсутності моментів зовнішніх сил і ефективно чинити опір дії зовнішніх моментів сил. Саме завдяки цій властивості гіроскопи здавна використовуються в авіаційних і морських навігаційних системах, а сьогодні — в мікроелектроніці, робототехніці та побутовій техніці.

У сучасних пристроях, зокрема в портативній електроніці, автономних роботах, транспорті, авіації чи побутових приладах, використовуються мікроелектромеханічні системи (MEMS) — компактні гіроскопи, вмонтовані у чипи [12]. Вони вимірюють ефект Коріоліса, що виникає при русі мікроскопічних мас всередині сенсора. На основі цих даних пристрій отримує точну інформацію про те, наскільки і в якому напрямку він обертається.

Контроль за допомогою гіроскопа реалізується наступним чином:

- Гіроскоп зчитує поточну кутову швидкість об'єкта.
- Ці дані передаються до керуючого модуля, де відбувається аналіз.
- На основі обчисленого відхилення система ухвалює рішення: наприклад, змінити положення керуючих елементів, скоригувати швидкість або виконати компенсаційний рух.
- Виконавчі механізми, отримавши команду, змінюють стан системи відповідно до потрібного положення.

Цей процес повторюється з високою частотою, що дозволяє пристрою в реальному часі підтримувати стабільне положення, відстежувати рух, забезпечувати плавність або швидко реагувати на зовнішні впливи.

У поєднанні з акселерометром гіроскоп утворює інерціальну систему навігації (IMU), яка дозволяє не тільки фіксувати поворот, а й розраховувати нахил, прискорення, а інколи й траєкторію руху. Саме тому гіроскопи відіграють вирішальну роль у стабілізаторах камер, квадрокоптерах,

гіроскутерах, смартфонах, навігаційних системах автомобілів, літаків і навіть у медичних пристроях [12].

1.3 Призначення та сфери застосування стабілізаційних систем

Призначення стабілізаційної системи полягає в забезпеченні динамічної стійкості та керуванні об'єкта в просторі. Вона надзвичайно підвищує безпеку знижуючи ризик втрати контролю над технічним пристроєм, дозволяє мати високу точність у керуванні рухом не лише у динамічних а й в статичних умовах. Покращує ефективність роботи пристрою мінімізуючи вплив людини на неї. Система використовує сенсори для постійного контролю положення об'єкта, якщо є необхідність, передає сигнал на виконавчі механізми для повернення рівноваги. Такими сенсорами є гіроскопи, акселерометри, тощо, що дозволяють отримувати інформацію про нахил, прискорення та кутові швидкості для реалізування системи зі зворотнім зв'язком. Гравітаційне поле Землі відіграє дуже важливу роль у цих сенсорах.

Її застосовують у багатьох сферах:

- авіація;
- наземному транспорті;
- дронах;
- електроніці;
- робототехніці;
- тощо;

1.3.1 Авіація

Під час польоту літак має зберігати керованість та передбачувану поведінку, що забезпечує його стійкість(рис 1.8, [14]). Надійна система стабілізації допомагає підтримувати безпечний і контрольований політ навіть у складних умовах знижуючи навантаження на пілота та підвищуючи загальну ефективність управління повітряним судном.

Термін «стабільність» стосовно літального апарату означає тенденцію цього апарату продовжувати політ у заданому режимі польоту після впливу збурення, тобто літальний апарат вважається стабільним, коли він залишається в тому режимі польоту, в якому його планує пілот. Літак – це лише один із типів літальних апаратів, але його аналіз є важливою основою для розуміння динаміки та характеристик керування всіма літальними апаратами. Проблема полягає в його стійкості та характеристиках керування відносно всіх трьох осей польоту [15].

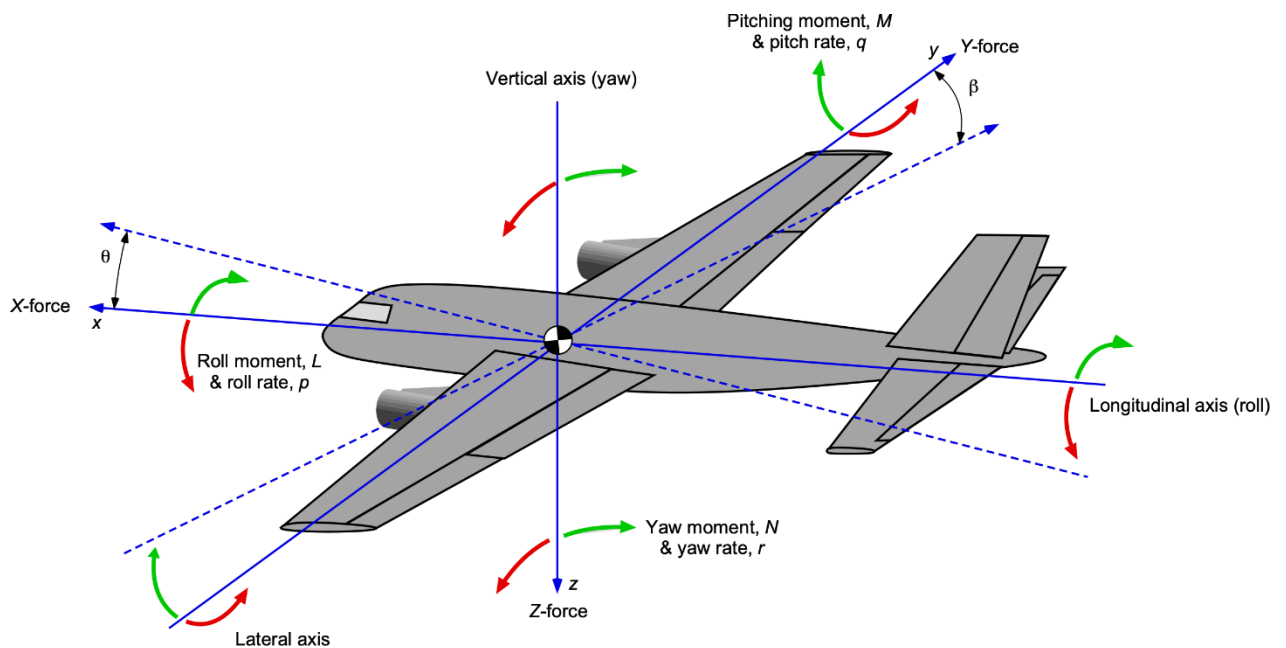


Рисунок 1.8 – Зображення літака з трьома напрямками осей та кутами стійкості

Основну роль в системі стабілізації відіграє гіроскоп. Оскільки він має здатність до зберігання напрямку осі обертання в просторі, незважаючи на зовнішні впливи. Завдяки цьому гіроскопи можуть точно фіксувати зміну положення та орієнтації борту літака. Вони показують кути крену, тангажу та ристання.

Гіроскопи в приладах зазвичай мають електричний або вакуумний привод і використовують основні гіроскопічні принципи для відображення положення літака. У сучасніших установках механічні гіроскопи були замінені

лазерними гіроскопами. Основною характеристикою обертового гіроскопічного ротора є жорсткість у просторі, також відома як гіроскопічна інерція. Як зазначено в Першому законі Ньютона, «тіло, що рухається, прагне рухатися з постійною швидкістю та напрямком, якщо на нього не діє зовнішня сила». Обертовий ротор всередині гіроскопічного приладу зберігає постійне положення в просторі, доки жодні зовнішні сили не діють, щоб змінити його рух. Гіроскопічні прилади зазвичай живляться електрично або пневматично, продемонстровано на рисунку 1.9, [16]. У першому випадку ротор використовується як якорь електродвигуна, тоді як в другому вакуумний насос, що приводиться в дію двигуном, знижує тиск у корпусі приладу. Фільтроване повітря з кабіни всмоктується в прилад, прискорюється та спрямовується на роторне колесо, щоб змусити його обертатися [17].



Рисунок 1.9 – Механічний та електронний авіагоризонти

1.3.2 Наземний транспорт

Також як і в авіації, стабілізаційні системи відіграють невід’ємну роль у наземному транспорті для забезпечення збереження рівноваги, зменшення ризику аварії, заносу та більш точного керування. У даній сфері застосовую пасивне та активне стабілізування, використовуючи у кожному виробі потрібний тип. Стабілізаційна система в наземному транспорті виконує не

тільки допоміжну участь, а є дуже важливим елементом, що забезпечує: активну безпеку, точність керування та автономність автомобілей.

Гіроборди. До цього класу наземного транспорту можна також піднести гіроскутери та сігвеї, зображено на рисунку 1.10, [18]. Якщо їх розглядати в загальному, їх різниця буде залежати в розмірі, відмінностях корпусів цих пристроїв та їх ціні. Але керування та стабілізація в них реалізовано однаково, на основі гіроскопу та акселерометра.



Рисунок 1.10 – Гіроборд, гіроскутер, сігвей

Гіроборди є представниками сучасного персонального електричного транспорту, що поєднує компактність, маневреність та автоматичну стабілізацію за допомогою вбудованих сенсорних систем. Вони забезпечують користувачам ідеальне поєднання технологій та практичності. У своїй найпростішій формі, хOVERборди - це самобалансуючі скутери, що складаються з двох моторизованих коліс, з'єднаних центральною платформою, призначеною для самобалансування. Пасажири на цій платформі керують пристроєм, нахилиючись вперед або назад, а також керують ним та контролюють його швидкість за допомогою нахилів вперед або назад.

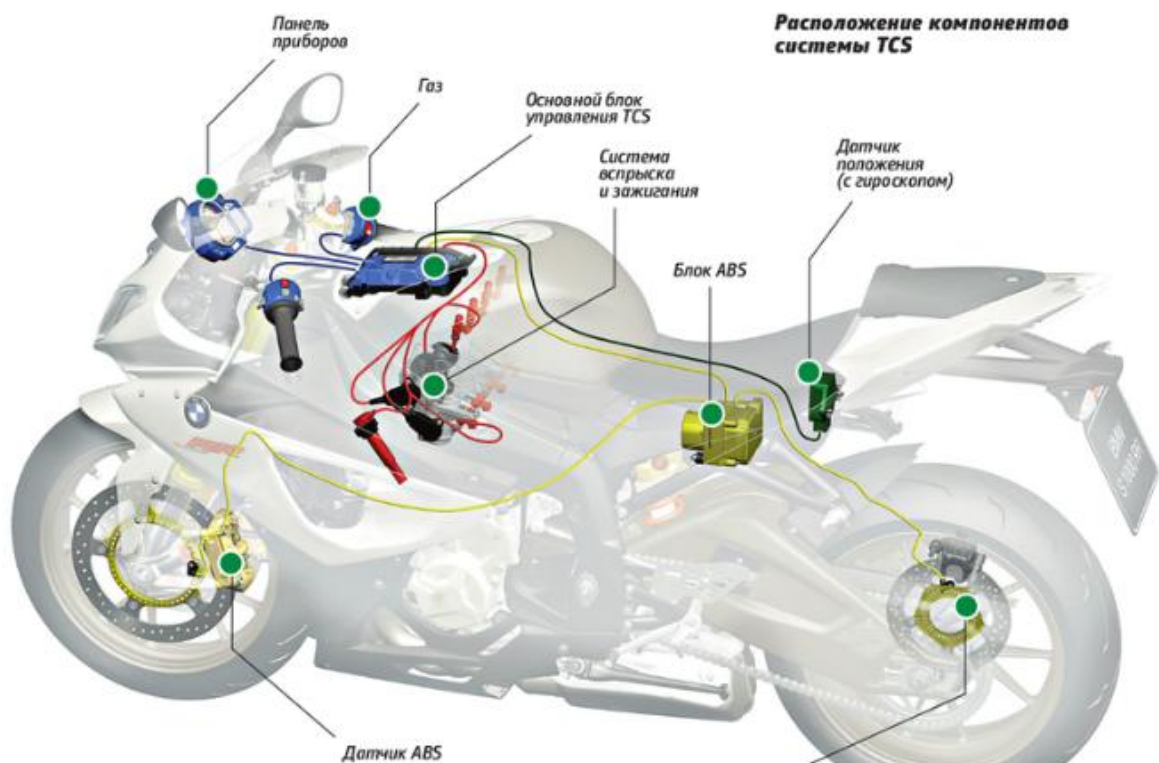
Ховерборди вперше отримали широке визнання як засоби особистої мобільності в середині 2010-х років завдяки досягненням у технологіях датчиків та акумуляторів. Основою здатності будь-якого гіроборда балансувати є його гіроскоп. Він виявляє зміни нахилу та кута на своїй дошці та надсилає дані безпосередньо на логічну плату, після цього на двигуни, які потім регулюють колеса для балансу та напрямку [19].

Мотоцикли. Мотоцикли є одними з найдинамічніших та найманевреніших транспортів, але з цим він є найнебезпечнішим способом пересування через те що мотоцикл має двоколісну конструкцію, яка підвищує ризик порушення балансу. Зміна положення тіла, будь-яка перешкода на дорозі по типу ями, або навіть невеликого камінця, раптовий маневр, погодні умови, досвід водія – це все має суттєвий вплив на стійкість транспортного засобу. У зв'язку з цим, забезпечення стабільного руху й тримання мотоциклу під контролем на дорозі є переважне завдання для розробників систем безпеки. Саме тому виробники застосовують сучасні електронні стабілізаційні системи, які здатні виявляти потенційно небезпечні ситуації (рис 1.11, [20]) ще до втрати контролю та одразу реагувати на них.



Рисунок 1.11 – Виконання професійного маневру на мотоциклі

Система контролю стійкості мотоцикла використовує масив датчиків для реєстрації динаміки руху двоколісного транспортного засобу. Датчики швидкості коліс вимірюють швидкість обертання передніх і задніх коліс, а інерційний вимірювальний блок вимірює прискорення автомобіля та кутову швидкість 100 разів на секунду. Система MSC забезпечує контроль гальм навіть у поворотах, що залежить від кутів нахилу та тангажу автомобіля. Контроль гальм покращує стійкість та ефективність гальмування в динамічних ситуаціях. Аналізуючи дані датчиків, різницю швидкості між передніми та задніми колесами, а також поточний динамічний стан автомобіля, MSC забезпечує кращу безпеку та стійкість у різних ситуаціях руху. Технологія MSC забезпечує не лише широкий спектр функцій з доданою вартістю, таких як контроль тяги на поворотах, але й майбутні можливості для мотоциклів, такі як адаптивний круїз-контроль (ACC) у вдосконалених системах допомоги водієві (ARAS) у поєднанні з радарним датчиком (рис. 1.12, [20]) [20].



Автомобілі. Автомобіль – це основний вид транспорту у світі і його щоденне використання вимагає високого рівня безпеки. Зі зростанням щільності дорожнього руху та навантажень на транспортну інфраструктуру, зросли й вимоги до його стабільності на дорозі. Незважаючи на його перевагу – чотири колеса, автомобілі не застраховані від втрати зчеплення з дорогою, який залежить від різних факторів.



Рисунок 1.13 – Показчик спрацьовування ESP системи

Електронний контроль стійкості, знак якого продемонстрованого на рисунку 1.13, [21] — активна система безпеки автомобіля, що дозволяє запобігти заносу за допомогою управління комп'ютером моментами сили колеса [21]. Експерти називають систему ЕКС найважливішим винаходом у сфері автомобільної безпеки після ременів безпеки. Вона забезпечує водієві кращий контроль за поведінкою автомобіля, стежачи за тим, щоб він переміщався у тому ж напрямку, куди повертають рульове колесо. Шляхом пригальмовування окремих коліс система стабілізує рух. Вона вступає в роботу, коли, наприклад, через велику швидкість при проходженні правого повороту передні колеса зносить із заданої траєкторії в напрямку дії сил інерції, тобто по радіусу більшому, ніж радіус повороту. ESP в цьому випадку пригальмовує заднє колесо, що йде по внутрішньому радіусу повороту, надаючи автомобілю велику обертальність і направляючи його в поворот. Одночасно з пригальмовуванням коліс ESP знижує оберти двигуна.

Якщо при проходженні повороту відбувається занос задньої частини автомобіля, ESP активізує гальмо лівого переднього колеса, що йде по зовнішньому радіусу повороту. Таким чином, з'являється момент протидії розвертанню, що виключає бічний занос (рис. 1.14, [22]) [23].



Рисунок 1.14 – Неконтрольований бічний занос автомобіля

Електроніка. Електронні вироби зараз теж неможливо уявити без стабілізаційної системи, але в них використовують мікромеханічні системи. Вони потрібні для багатьох цілей. Наприклад розглянемо смартфон, така система має дуже багато задач: навігація, покращення зйомки камери, ігор, автоматичне повернення екрану.

Гіроскопи в смартфонах, як правило, є MEMS-гіроскопами, які є дуже малими (рис. 1.15, [24]) та економічними в плані енергоспоживання. Основний принцип роботи гіроскопа полягає в використанні мікрочастинок, які реагують на швидкість обертання. Коли телефон обертається або нахиляється, ці частинки переміщуються, і дані про їх рух передаються на процесор, який обробляє інформацію і перетворює її в зручний для використання формат. Він в телефоні працює в тандемі з іншими сенсорами, такими як акселерометри

та магнітometri. Акселерометри вимірюють прискорення телефону в трьох вимірах, тоді як магнітometri визначають магнітне поле Землі, що дозволяє точно встановити орієнтацію пристрою. Коли дані з гіроскопа, акселерометра та магнітметра зібрані, спеціальний алгоритм обробляє їх та створює єдину картину руху. Це дозволяє телефону розпізнавати, наприклад, коли користувач повертає пристрій для перемикання між горизонтальним і вертикальним режимами перегляду [24].

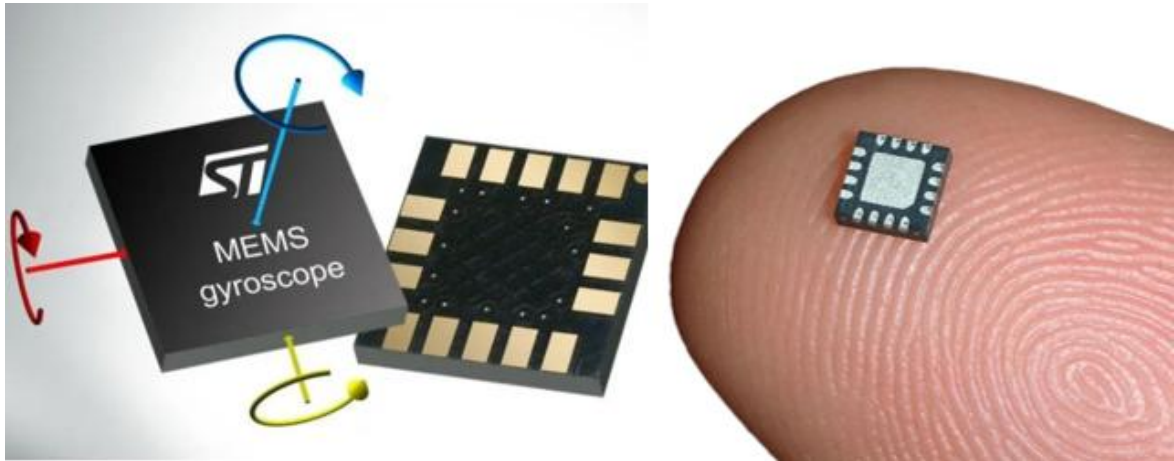


Рисунок 1.15 – MEMS-гіроскоп, що застосовують в смартфонах

Отже наше життя неможливо уявити без стабілізаційної системи та гіроскопу з акселерометром.

1.4 Принцип роботи інверсного маятника

1.4.1 Обернений маятник

Розглянемо явище оберненого маятника, оскільки саме ця фізична модель лежить в основі роботи розробленої балансуєчої системи. Обернений маятник також називають інверсним маятником – це пристрій, в якому центр маси розташований вище точки опори. Обернений маятник є фізичною протилежністю класичного маятника, у якому центр мас розташований нижче точки опори, як це спостерігається, наприклад, у маятникових механізмах годинників, приклад якого є на рисунку 1.16, [25], у нього центр мас було

закріплено нижче за основну частину, яка слугувала опорою і коливався він навколо положення рівноваги. В інверсного маятника все навпаки звідки й пішла його назва. Через це він постійно втрачає рівновагу та прагне впасти.



Рисунок 1.16 – Настінний маятниковий годинник

Принципом роботи оберненого маятника є те, що він не може триматись сам, але може балансувати, якщо його рівновагу постійно регулювати. Цей принцип дії лежить в багатьох сучасних системах, що ми розглядали до цього.

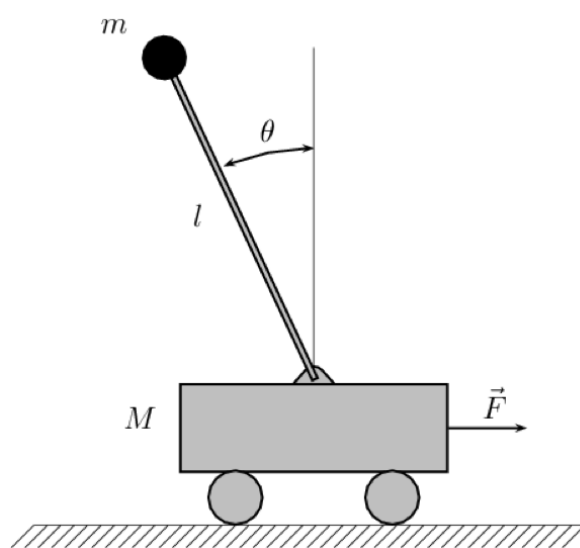


Рисунок 1.17 – Схематичне зображення оберненого маятника на візку

У балансуєчому роботі, що було зроблено для даного проекту, вся конструкція і відіграє роль оберненого маятника (рис. 1.17, [26]). Тобто корпус разом з усіма компонентами – це своєрідний маятник, що постійно прагне впасти відносно двох коліс які є опорою машини, але система має його стабілізувати, навіть якщо на верхню полицку щось покласти. Тому сенс оберненого маятника в даному проекті – змодельовати нестійку ситуацію, яку треба утримати в рівновазі у вертикальному стані за допомогою активного керування.

1.4.2 Принцип стабільності та реакції на відхилення

Ключем до стабілізації оберненого маятника є реакція на зміну положення у реальному часі. Системі треба не тільки розуміти, що центр мас відхилився, а й знати наскільки швидко і в яку сторону для того, аби компенсувати ці сили й повернути його у задане положення. В ідеальному випадку реакція повинна бути миттєвою, для того, щоб не допустити сильного нахилу, інакше момент який тягне його до низу стане занадто великим і система не встигне його збалансувати.

У стабілізаційні машині цей принцип реалізовується за допомогою модуля з гіроскопом та акселерометром, його ціль визначати за допомогою акселерометра кут нахилу падіння і гіроскопом – швидкість кутового падіння, передає ці дані на електронну плату Arduino nano, яка обробляє відхилення і приймає рішення: в яку саме сторону треба обертати колеса та з якою швидкістю, щоб повернути корпус в вертикальне положення. Наприклад якщо корпус починає хилити вперед, двигуни почнуть обертатись в той же напрям так, щоб розташувати опору під центром маси конструкції. Це також можна порівняти з тим як людина автоматично підставляю ногу в той бік, куди хилить тіло.

Цей механізм працює як замкнене коло зображене на рисунку 1.18, таким підходом називають зворотній зв'язок. Він дозволяє системі не просто виконувати задані дії, а й пристосовуватися до змін в той же самий час.

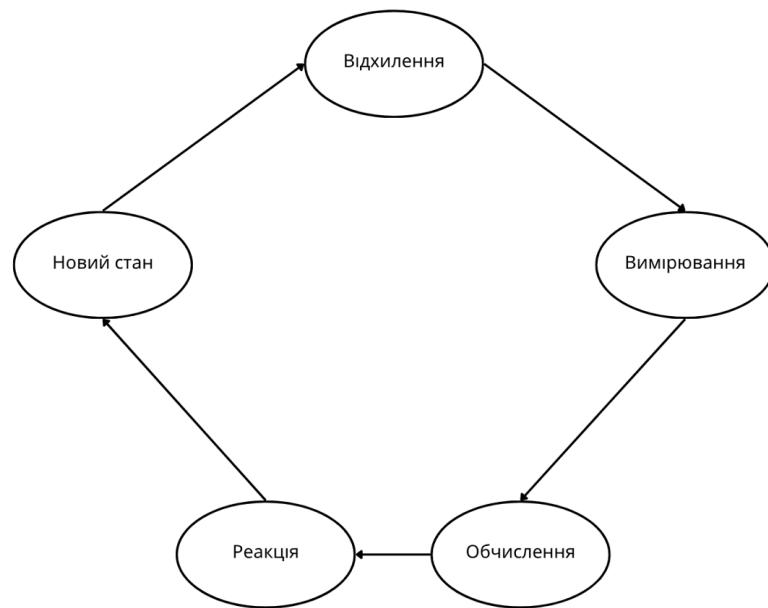


Рисунок 1.18 – Схема зворотнього зв'язку

Чим точніше і швидше система буде реагувати, тим краще й стабільніше буде працювати вся конструкція. Саме тому система повинна мати точні датчики, ефективний код та швидку обробку сигналів. Проте, для досягнення стабільної роботи недостатньо лише зчитувати значення з датчиків — потрібно ще й правильно формувати керуючий вплив. У випадках, коли необхідно не просто реагувати на відхилення, а й робити це точно та прогнозовано, застосовують спеціальні алгоритми регулювання. Найпоширенішим і водночас одним із найефективніших таких алгоритмів є PID-контрлер.

1.5 PID-регулятор

1.5.1. Призначення та роль PID-регулятора

PID-регулятор — це пропорційно-інтегрально-диференціальний інструмент, який використовується в промислових системах керування, що

служує механізмом зворотнього зв'язку у контурі керування для управління температурою, тиском, швидкістю, тощо. Він є найточнішим з усіх існуючих на даний момент регулятором. Його метою є підтримка фактичного вихідного сигналу якомога ближче до заданого значення. Мало хто про нього чув, але використовується він всюди: у побутовій техніці, автомобілях, гаджетах, промисловому обладнанні [27].

Одним із яскравих прикладів практичного використання PID-регулятора є сігвей — самобалансуючий персональний транспортний засіб (рис 2.19, [28]). Основна задача такого пристрою — зберігати вертикальне положення корпусу під час руху або зупинки, балансуючи за допомогою руху коліс.

У роботі сігвея PID-регулятор отримує інформацію від інерціальних датчиків: гіроскопа та акселерометра. Ці сенсори вимірюють кут нахилу корпусу та швидкість зміни цього кута. регулятор порівнює отримані значення з еталонним (тобто вертикальним положенням) і обчислює, яку реакцію слід сформувати для збереження балансу.



Рисунок 1.19 – Стабілізація сігвея під час нахилу

Завдяки пропорційній складовій (P) регулятор швидко реагує на поточне відхилення від вертикалі. Інтегральна складова (I) дозволяє враховувати накопичені помилки з часом і компенсувати повільне «сповзання» платформи. Диференціальна частина (D) допомагає передбачити майбутню поведінку пристрою, реагуючи на швидкість зміни нахилу. Комбіноване використання

цих трьох параметрів дозволяє плавно, але точно компенсувати навіть найменші нахили тіла користувача, змінюючи швидкість і напрям обертання коліс.

У результаті PID-регулятор дозволяє сігвею в реальному часі автоматично балансувати, навіть якщо людина злегка нахиляється вперед або назад, — пристрій реагує миттєво, обертаючи колеса у відповідному напрямку для стабілізації положення.

1.5.2 Принцип дії PID-регулятора

Для розуміння принципу функціонування ПІД-регулятора в системі автоматичного керування, спершу необхідно визначити її ключові складові та їх взаємодію. Будь-яка замкнена система автоматичного керування складається з наступних основних елементів [29]:

Об'єкт керування: пристрій або процес, яким необхідно керувати. У контексті даного дипломного проекту, об'єктом керування є двоколісна балансуєча платформа, яка потребує підтримки вертикального положення .

Регулятор : центральний обчислювальний блок системи. Його завдання полягає у порівнянні бажаного значення параметра з фактичним вимірним значенням та формуванні відповідного керуючого сигналу. У даному проекті роль регулятора виконує мікроконтролер, що реалізує алгоритм PID-регулювання .

Датчик: пристрій, що вимірює поточне значення контрольованого параметра об'єкта керування та надає зворотний зв'язок регулятору. Для двоколісної балансуєчої платформи цим датчиком є інерціальний вимірювальний модуль, який безперервно вимірює кут нахилу платформи.

Виконавчий механізм: пристрій, що перетворює електричний керуючий сигнал від регулятора у фізичний вплив на об'єкт керування. У нашому випадку, це крокові двигуни, які, обертаючи колеса, змінюють положення платформи.

Виконавчий елемент: Проміжний пристрій між регулятором та виконавчим механізмом, який підсилює або перетворює керуючий сигнал регулятора у форму, придатну для керування виконавчим механізмом.

Принцип функціонування замкненої системи керування. Весь процес керування відбувається циклічно через рівні, програмно задані проміжки часу. Послідовність дій:

Вимірювання: датчик постійно зчитує поточний кут нахилу платформи.

Передача даних: отримане значення кута нахилу передається до регулятора.

Обчислення помилки: регулятор порівнює поточне значення кута з бажаним значенням. Різниця між ними утворює помилку керування.

Формування керуючого сигналу: на основі цієї помилки та її динаміки ПД-регулятор обчислює необхідний керуючий сигнал.

Передача сигналу на привід: керуючий сигнал передається на виконавчий елемент – драйвери крокових двигунів.

Вплив на об'єкт: керуючий сигнал перероблений у відповідні електричні імпульси, що змушують двигуни обертати колеса платформи у потрібному напрямку з необхідною інтенсивністю.

Зміна стану об'єкта: рух коліс змінює кут нахилу платформи, що, в свою чергу, фіксується датчиком, замикаючи контур зворотного зв'язку. Цей цикл повторюється, дозволяючи системі безперервно коригувати своє положення та підтримувати рівновагу [27].

ПД-регулятор та його складові. ПД-регулятор є алгоритмом, який генерує керуючий сигнал на основі трьох компонентів, кожен з яких реагує на помилку по-різному [27]:

Р (Пропорційна) складова: ця компонента реагує на поточне значення помилки, різницю між бажаним та фактичним значенням. Чим більше поточне відхилення платформи від вертикалі, тим більший керуючий вплив буде згенерований пропорційною складовою. Це забезпечує швидку та негайну реакцію системи на виникле відхилення, прагнучи зменшити його. Однак,

лише пропорційна складова може призвести до постійної статичної помилки, відхилення від заданого значення, або до коливань системи.

I (Інтегральна) складова: ця компонента реагує на накопичену помилку за певний проміжок часу. Вона інтегрує помилку з плином часу. Основне призначення інтегральної складової – усунення статичної помилки, тобто ситуації, коли система не може повністю вийти на задане значення і зупиняється з невеликим, але постійним відхиленням. Вона запам'ятовує попередні помилки і продовжує впливати на систему, доки помилка повністю не зникне.

D (Диференціальна) складова: ця компонента реагує на швидкість зміни помилки. Вона прогнозує майбутнє значення помилки, аналізуючи, наскільки швидко поточна помилка збільшується або зменшується. Диференціальна складова допомагає зменшити перерегулювання та демпфувати коливання, роблячи вихід на заданий режим більш плавним та швидким. Вона діє як гальмо або прискорювач, запобігаючи різким змінам та підвищуючи стабільність системи.

Таким чином, ПД-регулятор об'єднує переваги цих трьох складових, дозволяючи системі швидко реагувати на відхилення, усувати статичні помилки та забезпечувати стабільне, плавне балансування [29].

ВИСНОВОК ДО РОЗДІЛУ 1

У цьому розділі було досліджено, як виникли стабілізаційні системи, яку роль вони відіграють і за яким принципом працюють. Виявилося, що їхні основи заклали ще понад століття тому — від обернених маятників і гіроскопів до перших інженерних рішень. З часом, із прогресом у авіації, машинобудуванні та мікроелектроніці, такі системи перетворилися на важливий компонент безлічі сучасних пристроїв.

Також розглянуто, де ці системи застосовуються: у літаках, автомобілях, гіроскутерах, навіть у смартфонах. Їхнє головне завдання — допомагати тримати рівновагу, підвищувати безпеку й точність керування. Ключовим прикладом тут є принцип оберненого маятника — система, яка сама по собі нестійка, але завдяки правильному керуванню може тримати баланс. Саме така модель використовується і в моєму проекті.

Окремо було звернуто увагу на PID-регулятор — це той алгоритм, який дозволяє системі реагувати швидко й точно. Завдяки йому багато сучасних пристроїв працюють стабільно. Зокрема, на прикладі електрочайника показано, що навіть у простій техніці можна знайти PID-регулятор, який непомітно для користувача виконує важливу роботу.

РОЗДІЛ 2.

РОЗРОБКА ДВОКОЛІСНОЇ БАЛАНСУЮЧОЇ ПЛАТФОРМИ

2.1 Призначення проекту

У цьому дипломному проекті передбачається розробити макетний зразок та програмне забезпечення для керування двоколісною самобалансуючою платформою. Пристрій має відтворювати принцип роботи персонального транспорту типу сігвея, з автоматичним утриманням рівноваги у вертикальній площині.

Платформа повинна бути здатна самостійно реагувати на відхилення від вертикального положення та миттєво компенсувати їх шляхом регулювання обертання коліс. Важливо, щоб система працювала в режимі реального часу, з мінімальними затримками, забезпечуючи стабільне балансування без стороннього втручання.

Особливістю конструкції є наявність горизонтальної верхньої кришки, на яку можна покласти предмет малої маси. Платформа повинна продовжувати стабілізуватись із врахуванням змін у розподілі ваги, що дозволить демонструвати роботу пристрою як активної стабілізаційної системи. Така функціональність може бути використана у навчальних або демонстраційних цілях.

Система має бути максимально простою в експлуатації, відкритою для подальших модифікацій, із можливістю покращення алгоритмів стабілізації та додавання нових функцій. Головна мета проекту — продемонструвати принцип дії активного балансування та показати практичне застосування сучасних методів керування у нестійких системах.

2.2 Структурна схема

Розроблена структурна схема пристрою представлена на рисунку 2.1. Вона відображає логічну взаємодію між мікроконтролером системи, сенсором, драйверами, виконавчими механізмами та системою живлення.



Рисунок 2.1 – Структурна схема системи стабілізації

На основі даної схеми формується перелік необхідних компонентів, які забезпечують реалізацію закладеного принципу дії системи. Відповідно до неї, обчислювальний блок повинен отримувати дані про положення платформи, опрацьовувати їх у режимі реального часу та генерувати керуючі сигнали до виконавчих елементів.

Для побудови функціональної системи стабілізації був здійснений підбір необхідної елементної бази. Під час цього було аналізовано доступні рішення на локальному ринку електронних компонентів. Особливу увагу приділено відповідності технічних характеристик, енергоефективності та простоті інтеграції в загальну архітектуру системи. У наступному підрозділі наведено

обґрунтований вибір елементів, що забезпечують стабільну й надійну роботу пристрою відповідно до розробленої структурної схеми.

2.3 Вибір компонентів

2.3.1 Вибір плати

Для реалізації даного проекту було обрано мікроконтролер Arduino Nano, яку продемонстровано на рисунку 2.1, [30] як центральний керуючий елемент. Такий вибір обумовлений рядом технічних і функціональних переваг цієї плати, що відповідають вимогам до компактності, зручності інтеграції та програмної гнучкості в системі балансування.



Рисунок 2.2 – Arduino Nano

Arduino це апаратно-програмна платформа, призначена для створення широкого спектру електронних пристроїв: від простих побутових потреб до складних систем керування [31]. Її головна перевага - доступність і простота

використання, що робить її ідеальною як для початківців, так і для досвідчених розробників. Основу платформи становить мікроконтролер, встановлений на друковану плату разом із усіма необхідними допоміжними елементами стабілізатором живлення, роз'ємами введення/виведення та інтерфейсом для програмування. Arduino виконує роль «електронного мозку»: вона отримує сигнали від датчиків, обробляє ці дані й формує відповідні команди для виконавчих пристроїв [32].

У межах сімейства Arduino існує кілька найпоширеніших моделей, наприклад Arduino Uno, Nano, Mega 2560 та Due, які відрізняються розмірами, кількістю пінів введення/виведення та функціональними можливостями. Серед них Arduino Nano є особливо вдалим вибором для проектів з обмеженим простором та високими вимогами до енергоефективності [32].

Основні переваги Arduino Nano, які стали визначальними під час вибору[30]:

- Компактність і легкість монтажу: завдяки невеликим габаритам Nano зручно розміщується в обмеженому корпусі конструкції, наприклад всередині компактної балансуєчої платформи.
- Повна сумісність із Arduino IDE: спрощує процес розробки програмного забезпечення, дозволяє використовувати готові бібліотеки та приклади коду.
- Достатня кількість цифрових та аналогових входів/виходів: дозволяє підключати сенсори та керувати виконавчими елементами без потреби в додаткових логічних модулях.
- Наявність вбудованого USB для прошивки та моніторингу: забезпечує зручне налагодження програмного коду та тестування системи в реальному часі.
- Низьке енергоспоживання: важливо при живленні від акумуляторів.

У сукупності ці фактори роблять Arduino Nano доцільним і ефективним рішенням для створення компактної самобалансуєчої платформи, яка

потребує швидкої реакції на зміну положення та здатності обробляти сигнали від сенсорів у режимі реального часу.

2.3.2 Вибір двигуна

Однією з ключових частин самобалансуючої платформи є виконавчий привід, що забезпечує реакцію системи на зміну положення корпусу. Для забезпечення точної, швидкої та передбачуваної стабілізації необхідно, щоб двигуни відповідали низці технічних вимог, зокрема мали достатній крутний момент, низьку інерційність, можливість точного позиціонування та стабільну динамічну характеристику.

У ході аналізу було розглянуто кілька варіантів приводів, зокрема й класичні двигуни з постійним струмом (рис 2.2, [33]). Проте застосування стандартних DC-моторів у балансуючих системах має ряд обмежень. Найбільшим їх мінусом є недостатня точність керування, вони обертаються вільно і не мають позиціонування, що ускладнюють точність реакції на незначні зміни кута нахилу. Для зворотнього зв'язку використання таких двигунів треба використовувати додатковий елемент – енкодер. Також вони вищу інерцію при швидкісних змінах, також мають не стабільну поведінку.



Рисунок 2.3 – DC-мотор з редуктором

З огляду на ці фактори, було прийнято рішення використати крокові двигуни, які забезпечують точне кутове позиціонування без потреби у зворотному зв'язку. Для даного проекту обрано кроковий двигун NEMA 17 моделі 17HS2408 (рис.2,4 ,[34]), як оптимальний за такими параметрами [35]:

- Висока точність обертання: двигун забезпечує дискретні кроки з фіксованим кутом (1.8° на крок), що дозволяє точно контролювати положення та швидкість обертання коліс.
- Стабільність при низькій швидкості: що особливо важливо при стабілізації та балансуванні.
- Достатній крутний момент: 17HS2408 має силові характеристики, достатні для підтримки платформи у вертикальному положенні при наявності зовнішніх збурень.
- Поширеність і наявність технічної документації: NEMA 17 є одним із найпоширеніших форм-факторів у галузі 3D-друку та робототехніки, що полегшує налаштування та заміну у разі потреби.



Рисунок 2.4 – кроковий двигун Nema 17HS2408

Завдяки поєднанню високої точності, передбачуваної динаміки та надійності, вибір саме крокового двигуна NEMA 17 17HS2408 є технічно

обґрунтованим і повністю відповідає завданням створення стабілізаційної двоколісної системи.

2.3.3. Вибір драйвера двигуна

Для керування кроковими двигунами було використано драйвер A4988 (рис 2.5, [36]), який є спеціалізованим інтегральним контролером для біполярних крокових двигунів. Його функціональні можливості та технічні характеристики повністю відповідають вимогам.



Рисунок 2.5 – драйвер A4988

Драйвер A4988 забезпечує просте та ефективне керування двигунами за допомогою лише двох сигналів: STEP (крок) і DIR (напрямок обертання), що значно полегшує інтеграцію з мікроконтролером Arduino. Завдяки підтримці крокового режиму, A4988 дозволяє досягти більш плавного та точного обертання двигуна, що особливо важливо при реалізації алгоритмів стабілізації, де потрібно швидко реагувати на найменші зміни положення[36].

Однією з ключових переваг A4988 є його здатність працювати в різних режимах крокування: повного, 1/2, 1/4, 1/8, 1/16 кроку. Це дозволяє досягати високої плавності та точності обертання навіть у повільному режимі. Крім

того, драйвер має вбудований підстроювальний резистор для регулювання струму, що дає змогу налаштовувати роботу двигуна відповідно до умов навантаження, зменшуючи нагрівання та споживання енергії. Його компактний форм-фактор дає змогу легко інтегрувати модуль у малі пристрої, а наявність систем захисту, як від перегріву, короткого замикання та перевантаження по струму забезпечує надійність роботи у тривалому режимі [37].

У сукупності ці характеристики роблять A4988 оптимальним вибором для керування кроковими двигунами NEMA 17. Його функціональність забезпечує необхідний рівень точності, швидкості реакції та стабільності при виконанні алгоритмів балансування.

2.3.4. Вибір інерціального чутливого елемента

Для визначення кута нахилу та швидкості платформи було обрано модуль GY-521 (рис. 2.6, [38]), побудований на базі мікросхеми MPU-6050. Цей сенсорний модуль поєднує у собі трьохосьовий акселерометр і трьохосьовий гіроскоп. Така комбінація є необхідною для точного обчислення кута нахилу корпусу та швидкості його зміни — двох основних параметрів, на яких ґрунтується логіка стабілізації [38].

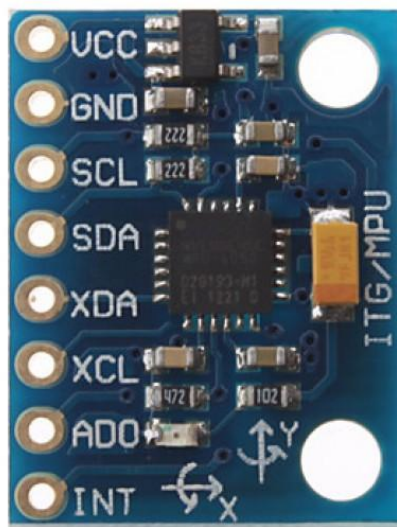


Рисунок 2.6 – MPU 6050

Модуль GY-521 є популярною готовою платою, до складу якої входить сам чіп MPU-6050, стабілізатор напруги, необхідні пасивні компоненти, а також зручні виводи для підключення. Завдяки цьому модуль повністю сумісний із логікою Arduino 5 В і може бути безпосередньо підключений до мікроконтролера через інтерфейс I2C, що спрощує апаратну інтеграцію. Передача даних відбувається через лише два сигнальні дроти SCL і SDA, що особливо зручно в умовах обмеженої кількості доступних пінів [39].

MPU-6050, на якому побудовано GY-521, має вбудований 16-бітний аналого-цифровий перетворювач на кожному каналі, що забезпечує високу точність і чутливість вимірювань. Частота оновлення даних може сягати 1000 Гц, що дає змогу реалізовувати стабілізацію в режимі реального часу. За допомогою відповідного програмного забезпечення та математичних алгоритмів можна отримати надійну та фільтровану оцінку кута нахилу [39].

Таким чином, вибір модуля GY-521 на базі чіпа MPU-6050 є технічно виправданим та повністю відповідає завданням даного проекту, забезпечуючи достовірне та швидке отримання даних про положення корпусу пристрою у просторі.

2.3.5 Вибір джерела живлення

Розрахунок загального струму споживання. Середнє електричне навантаження визначається сумарним споживанням усіх активних компонентів:

$$I_{\text{заг}} = I_{\text{Arduino}} + 2I_{\text{дв}} + I_{\text{мпу}} \quad (2.1)$$

$$I_{\text{заг}} = 0,04 + 2 * 1,2 + 0,01 = 2,45 \text{ А}$$

Розрахунок часу роботи. Час автономної роботи визначається співвідношенням ємності акумулятора до загального струму споживання.

$$t = \frac{I}{C} = \frac{3,2\text{Ah}}{2,45\text{A}} \approx 1,3 \text{ год} \approx 78 \text{ хв} \quad (2.2)$$

Де:

t — час автономної роботи системи;

C — ємність акумуляторної батареї;

I — загальний струм споживання пристрою.

Отже для забезпечення автономної роботи двоколісної балансуєчої платформи використовується акумуляторна батарея, зібрана з двох літій-іонних акумуляторів типу 18650 (рис. 2.7, [40]), з'єднаних послідовно. Така конфігурація дозволяє збільшити вихідну напругу системи при збереженні тієї самої ємності, що особливо важливо для живлення виконавчих компонентів — крокових двигунів та драйверів.



Рисунок 2.7 – Акумулятори 18650

Типова напруга одного акумулятора 18650 становить 3,7 В номінально та до 4,2 В повністю заряджений. Таким чином, при послідовному з'єднанні двох елементів загальна напруга системи становить 7,4 В номінально або 8,4 В максимально. Для такого з'єднання було обрано батарейний відсік (рис 2.8, [41]) під пайку, що дозволяє з'єднати як паралельним так і послідовним з'єднанням. Сумарна ємність акумуляторної збірки дорівнює ємності одного акумулятора — 3200 мА·год, максимальний розрядний струм 6 А. Така напруга є прийнятною для живлення плати Arduino Nano через вхід VIN, а

також забезпечує достатній рівень живлення для драйверів A4988, які рекомендується використовувати при напрузі від 8 до 12 В[40], [36].

Для забезпечення фільтрації пульсацій та згладжування навантажень, особливо при комутації двигунів, у схемі використовуються електролітичні конденсатори (рис 2.9, [42]) ємністю 100 мкФ, 16 В, які встановлюються безпосередньо на вході живлення кожного драйвера A4988. Це дозволяє зменшити просідання напруги в моменти старту двигунів та покращити стабільність їх роботи. Конденсатори відіграють важливу роль у фільтрації пульсацій живлення, що виникають при різкій зміні струму, характерній для запуску або гальмування двигунів. Завдяки своїй здатності накопичувати та швидко віддавати електричний заряд, вони компенсують миттєві перепади напруги, що захищає драйвери від збоїв і підвищує надійність системи в цілому.

Також вони запобігають потенційно небезпечним імпульсним перевантаженням, які можуть викликати нестабільність логічних сигналів та впливати на чутливу електроніку — зокрема мікроконтролер та сенсорні модулі. Саме тому встановлення електролітичних конденсаторів безпосередньо на вході живлення драйверів є рекомендованою практикою при проектуванні систем з імпульсними навантаженнями.



Рисунок 2.8 – Батарейний відсік

2.4 Електрична схема

Електричну схему пристрою було побудовано на основі попереднього аналізу функціональної взаємодії усіх блоків системи стабілізації. Електрична схема керуючого блоку наведена на рисунку 2.10. Вона відображає повний склад елементів, що забезпечують зчитування, обробку та реалізацію керуючих дій у реальному часі.

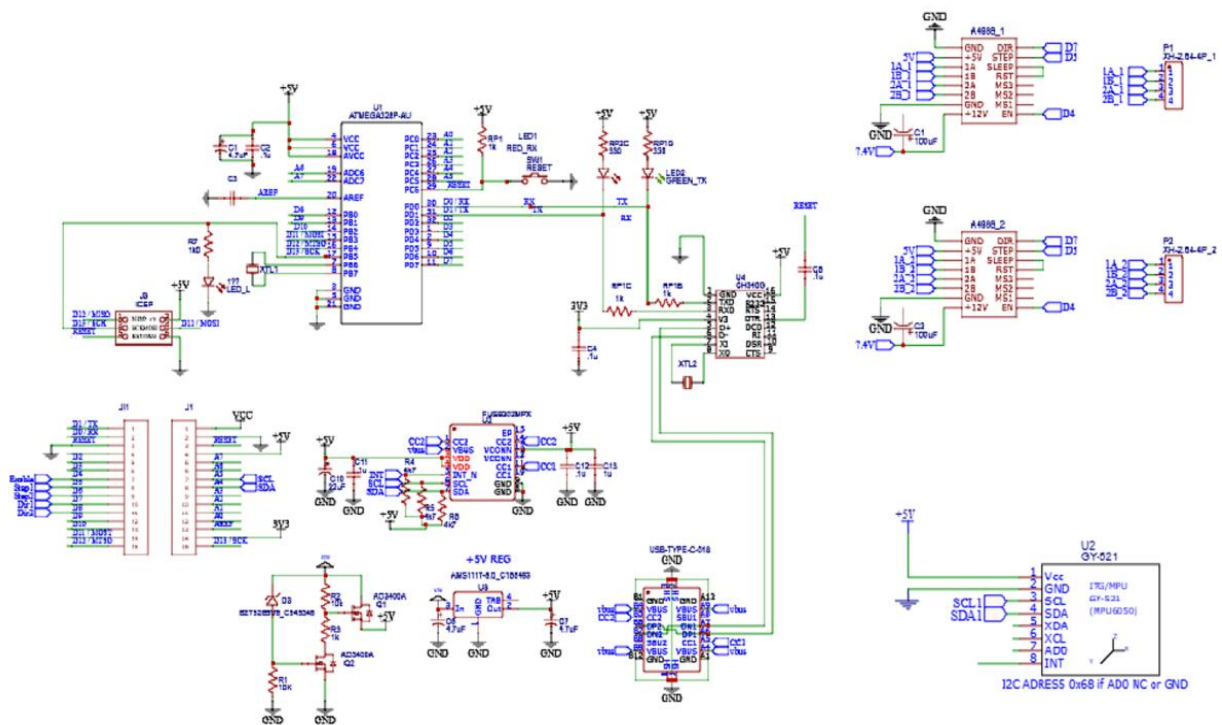


Рисунок 2.10 – Електрична схема

Ключовим елементом схеми є керуючий вузол, який отримує дані від інерціального сенсора через послідовний інтерфейс обміну. На основі отриманої інформації формуються сигнали керування, які надходять на виконавчі модулі через цифрові лінії. Система побудована за принципом циклічного аналізу даних — кожне нове зчитування положення викликає відповідну дію зі сторони двигунів, що й забезпечує стабілізацію платформи.

Живлення пристрою здійснюється від двох послідовно з'єднаних акумуляторів, що забезпечують напругу, достатню для підтримки роботи

силової частини системи. У ланцюгах живлення передбачено буферні конденсатори, які виконують функцію згладжування пульсацій напруги, особливо в моменти перемикавання навантажень. Крім того, у ключових вузлах схеми встановлено захисні резистори, які обмежують пусковий струм і мінімізують вплив шумів та імпульсних збурень на сигнальні лінії.

Для фіксації рівня логіки, уникнення перешкод на входах виконавчих драйверів, а також для забезпечення стабільного старту керуючого модуля, реалізовано відповідні схеми підтягування логічних сигналів. У схемі враховано рекомендації щодо типових з'єднань, полярності елементів і захисту від коротких замикань. Живлення сенсорної частини здійснюється через вбудований стабілізатор напруги, що формує необхідний рівень для точного вимірювання кутових прискорень та нахилу.

Таким чином, електрична схема забезпечує узгоджену роботу всіх елементів системи, дозволяє точно реалізувати алгоритми стабілізації, а також підтримує стабільну подачу живлення в автономному режимі.

2.5 Конструювання корпусу

2.5.1 Розробка корпусу

Корпус (рис 2.11) пристрою було розроблено індивідуально з урахуванням компактності, зручності збірки та можливості встановлення всіх необхідних електронних компонентів. Проектування конструкції здійснювалося у середовищі тривимірного моделювання SolidWorks, що дало змогу точно врахувати геометрію складових частин та забезпечити відповідність габаритів реальним елементам.

Фізична реалізація корпусу виконана методом 3D-друку з використанням PLA-пластику — легкого, достатньо міцного матеріалу, що дозволяє створювати конструкції складної форми. Усі стінки корпусу мають товщину 5 мм, що забезпечує достатню механічну жорсткість для стабільної

роботи пристрою при навантаженнях і вібраціях, які виникають під час активної стабілізації.

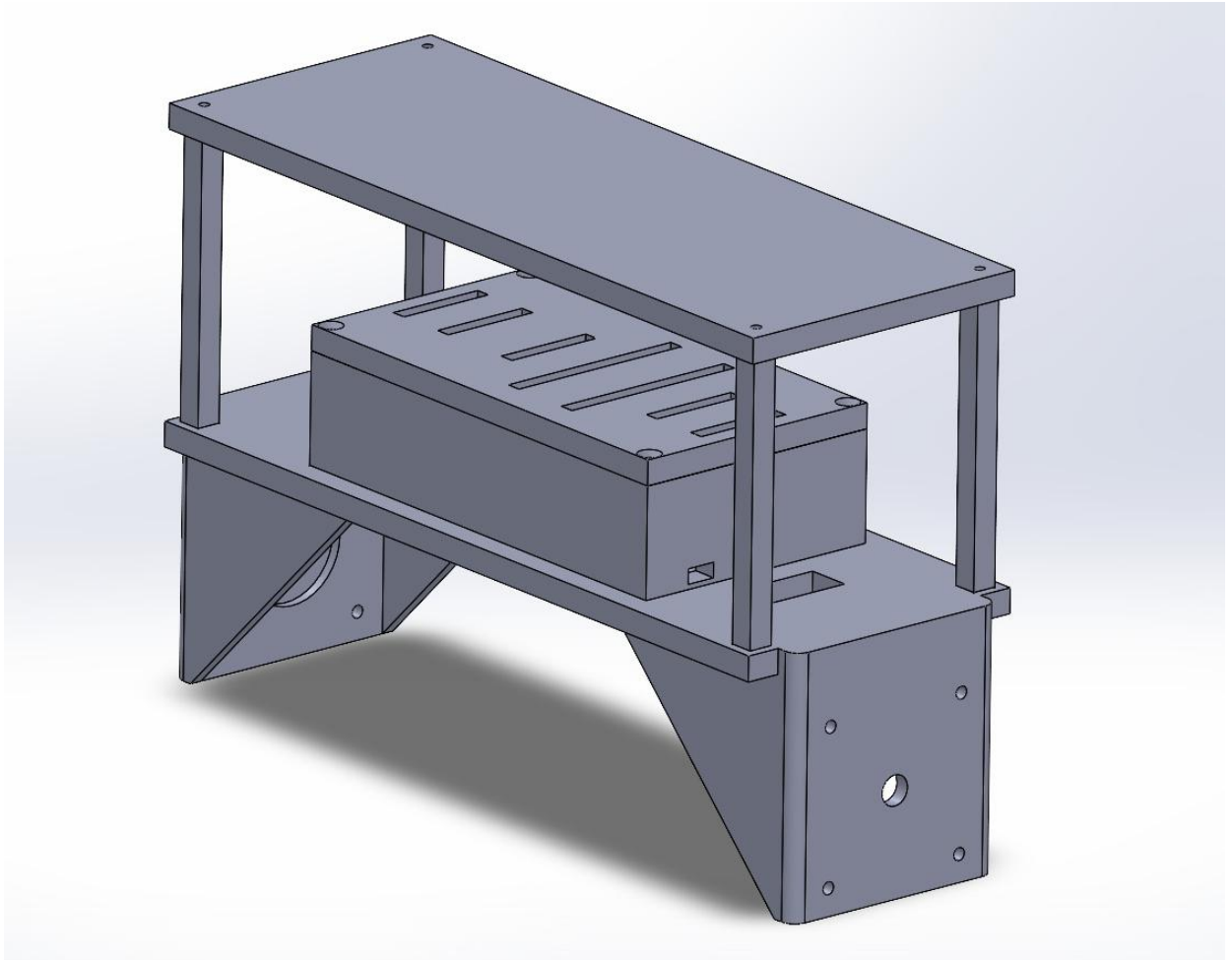


Рисунок 2.11 – Корпус проекту

Всі частини конструкції було виконано у роз'ємному вигляді, що дозволяє швидко отримати доступ до внутрішніх компонентів у разі потреби технічного обслуговування, перепайки або заміни окремих модулів. Для з'єднання окремих частин корпусу між собою у необхідних місцях були передбачені отвори під стандартні шурупи, що забезпечують надійне та зручне складання всієї конструкції без використання клею або додаткових фіксаторів.

Габарити корпусу підібрано з урахуванням точного розміщення всіх складових: електроприводів, акумуляторного відсіку, електронних плат,

проводки та допоміжних елементів. У верхній частині передбачено кришку другого рівня, яка виконує функцію платформи для розміщення додаткового навантаження, наприклад смартфона. Завдяки стабілізаційним алгоритмам система продовжує утримувати рівновагу навіть з додатковою масою на верхній поверхні.

У кришці акумуляторного відсіку створені спеціальні пази для встановлення мікроконтролера, драйверів виконавчих елементів та інерціального сенсора, що забезпечує фіксацію електроніки під час монтажу та пайки. Такий підхід значно спрощує складання пристрою та забезпечує акуратне розміщення компонентів.

Далі детально розглянемо спроектовані елементи корпусу, які були виготовлені для складання прототипу пристрою. Основа (рис. 2.12) — базова частина конструкції, до якої кріпляться приводи (знизу) та інші компоненти (зверху);

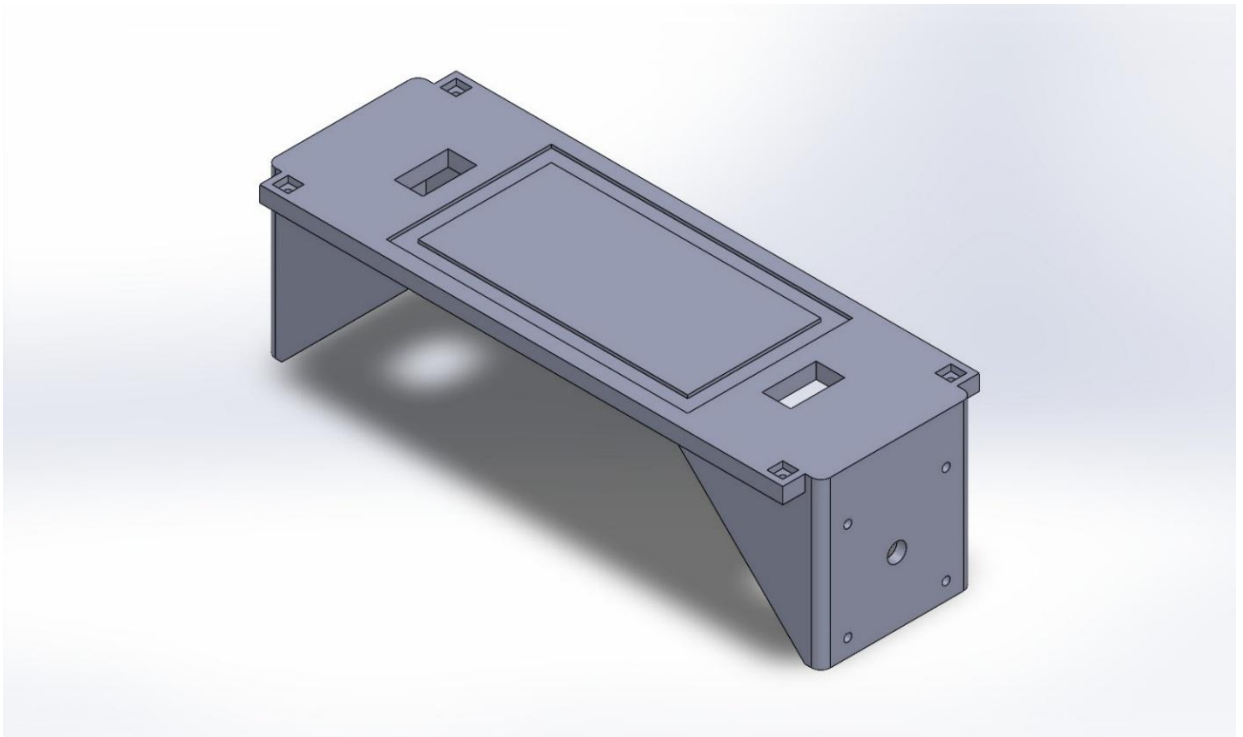


Рисунок 2.12 – Основа платформи

Відсік під акумулятори (рис. 2.13) — прямокутна порожнина для встановлення блоку живлення з виводом проводів через бокові прорізи;

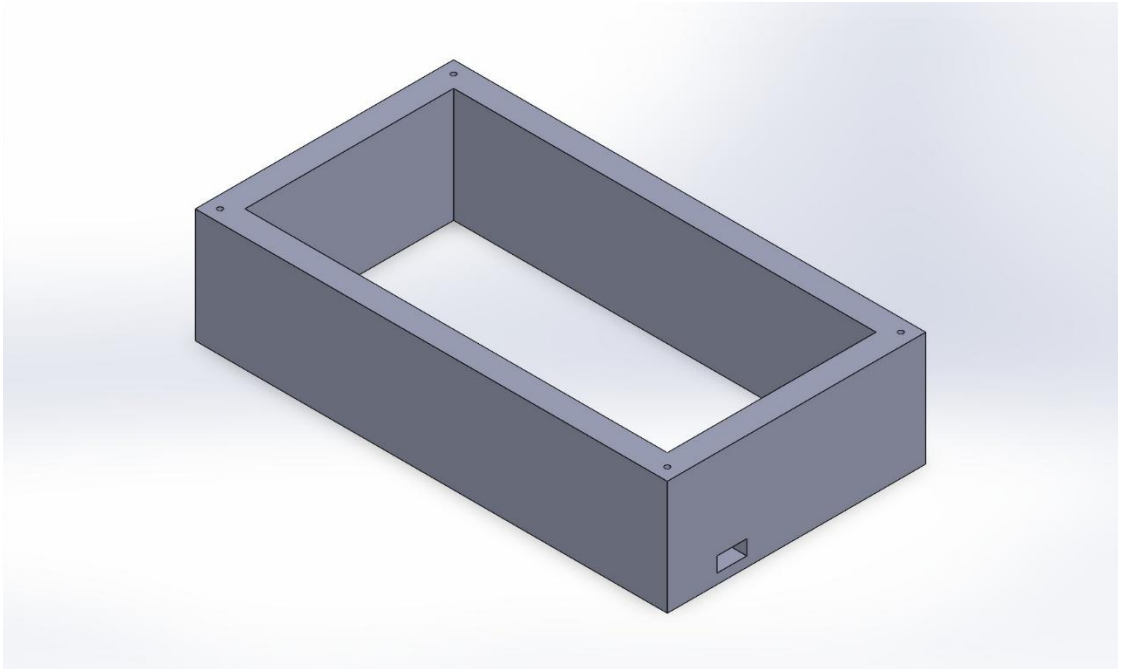


Рисунок 2.13 – Відсік під акумулятори

Накривка акумуляторного відсіку (рис. 2.14) — з пазами для надійного розміщення мікроконтролера, сенсора та двох драйверів;

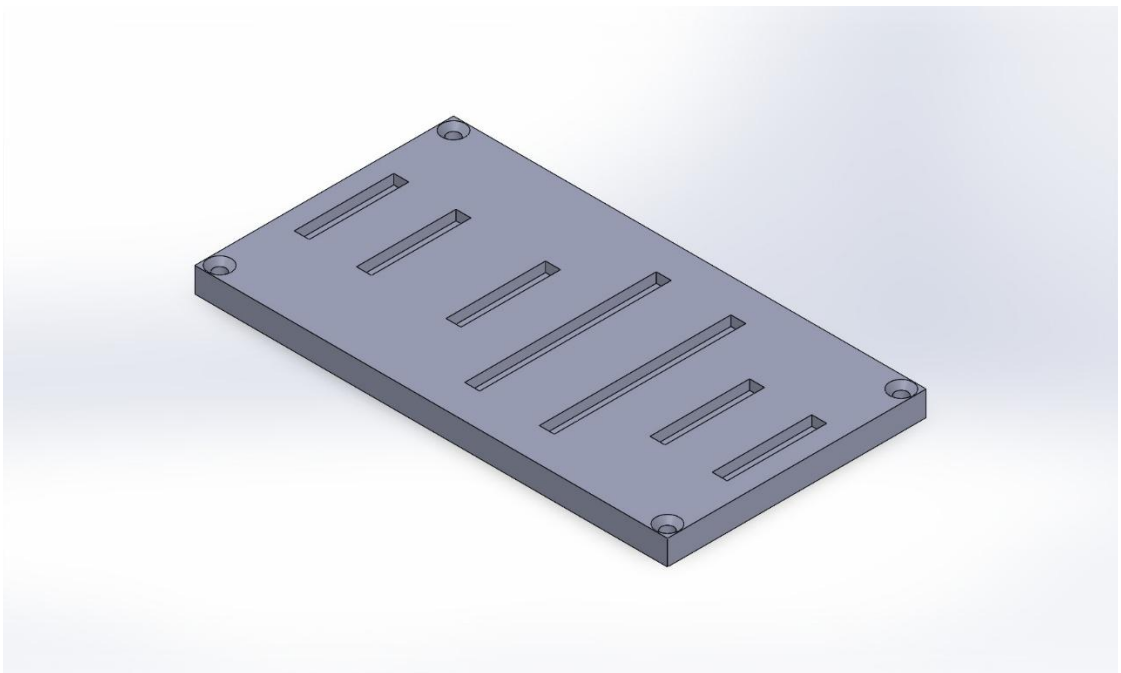


Рисунок 2.14 – Кришка акумуляторного відсіку

Чотири стійки (рис. 2.15) — вертикальні елементи, що з'єднують нижній та верхній рівень корпусу;

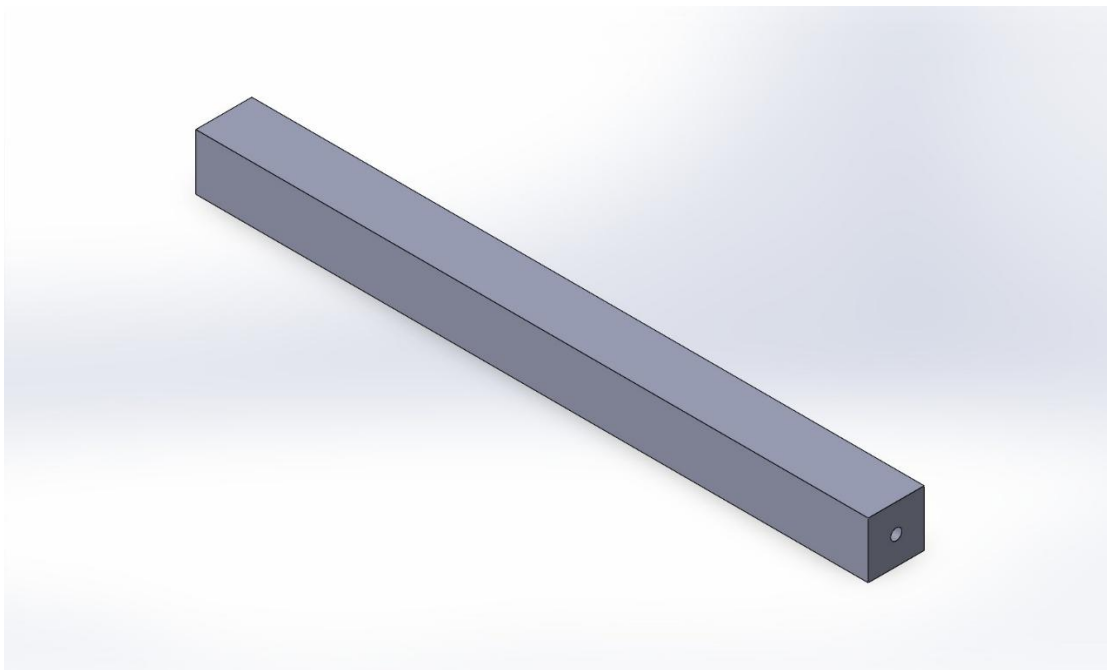


Рисунок 2.15 – Стійка другого рівня

Верхня накривка (рис. 2.16) — плоска деталь, що завершує конструкцію та слугує функціональною опорною поверхнею.

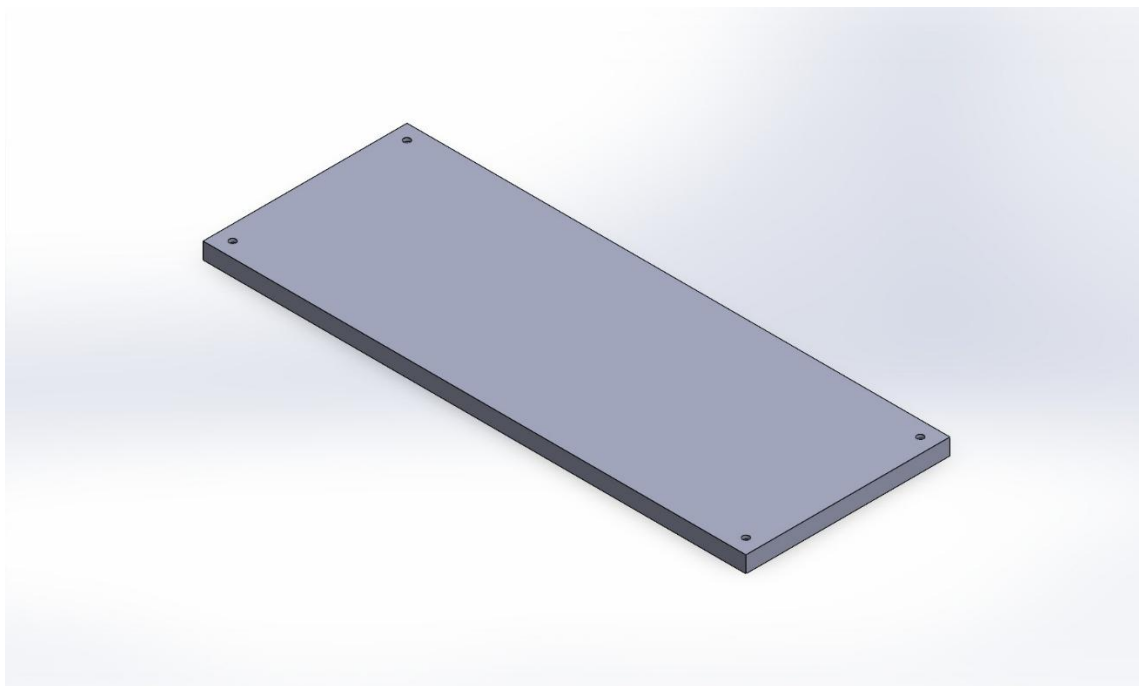


Рисунок 2.16 – Верхня накривка

2.5.2 Збірка корпусу

Після виготовлення всіх частин корпусу методом 3D-друку було проведено остаточне складання конструкції стабілізаційної платформи, показане на рисунку 2.17. Збирання виконувалося поетапно з дотриманням розташування елементів та їх послідовності монтажу.

На першому етапі до основи корпусу встановлюються електроприводи. Для забезпечення надійної фіксації двигунів у спеціально передбачених посадочних місцях використовуються гвинтові з'єднання, що гарантують жорсткість кріплення та точне позиціонування.

Далі до основи приклеюється зовнішній корпус акумуляторного відсіку, який утворює порожнину для елементів живлення. В середину цього блоку вкладається внутрішній відсік під акумулятори. Такий підхід дозволяє при необхідності легко замінити відсік або виконати його обслуговування.

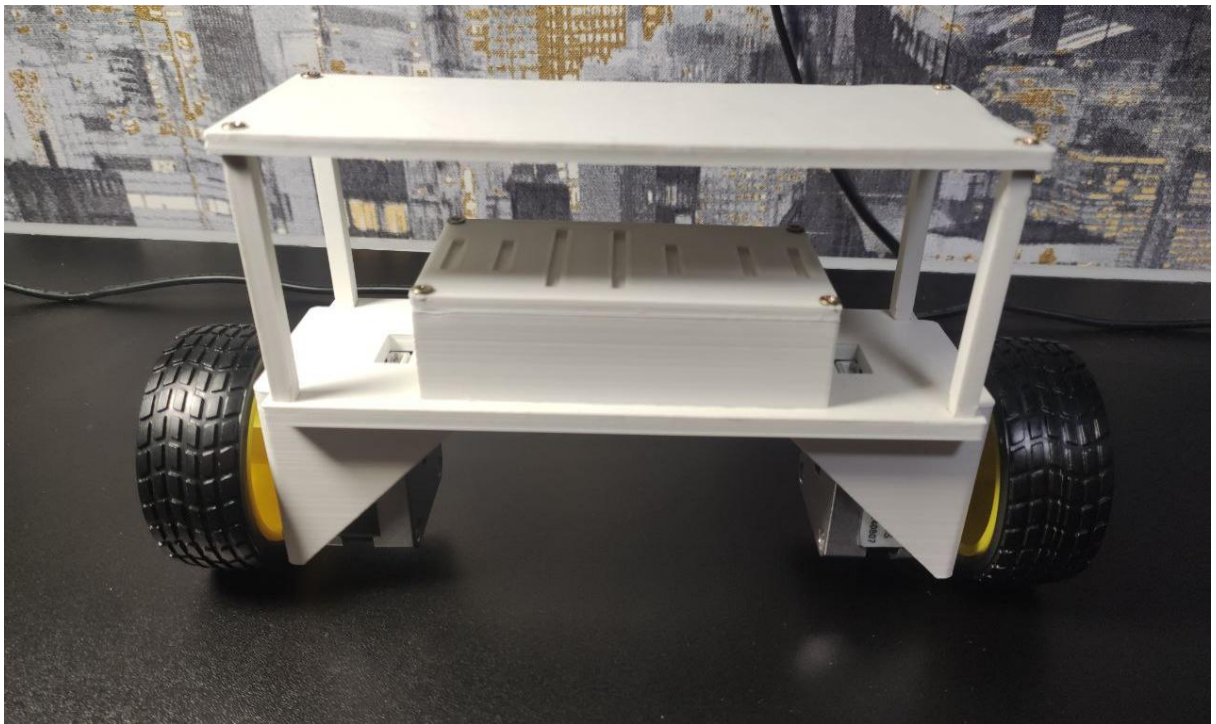


Рисунок 2.17 – Зібраний корпус

Після встановлення акумуляторів монтаж продовжується встановленням кришки акумуляторного блоку, яка кріпиться до корпусу за допомогою шурупів. Наступним етапом є монтаж чотирьох вертикальних

стійок, які слугують опорними елементами для верхнього рівня конструкції. Завершується збірка встановленням верхньої кришки, що утворює завершений другий рівень пристрою. Ця кришка, як і всі інші зовнішні деталі, фіксується до корпусу шурупами, що забезпечує розбірність конструкції без втрати жорсткості.

Загальна конфігурація корпусу дозволяє швидко розбирати та збирати пристрій при необхідності технічного обслуговування, заміни електроніки або модернізації. Всі кріплення виконані таким чином, щоб забезпечити надійність і повторюваність збирання без шкоди для точності монтажу.

2.6 Розробка програмного забезпечення

2.6.1 Загальна архітектура програмного забезпечення

Програмне забезпечення двоколісної балансуючої платформи реалізовано на мікроконтролері Arduino Nano, який є центральним елементом керування. Головним завданням програмного коду є безперервне зчитування даних з інерціального датчика, їх обробка за допомогою ПД-регулятора та формування керуючих сигналів для крокових двигунів, забезпечуючи таким чином динамічне балансування платформи.

Загалом, архітектура програмного забезпечення є циклічною та складається з наступних ключових етапів:

- Ініціалізація та налаштування: На початку роботи системи відбувається ініціалізація периферійних пристроїв, таких як датчик MPU6050 та бібліотека для ПД-регулятора, а також налаштування пінів мікроконтролера для керування двигунами. Включає калібрування датчика для точного визначення початкового положення.

- Зчитування даних з датчиків: Мікроконтролер постійно опитує гіроскоп і акселерометр, інтегровані в модуль MPU6050, для отримання інформації про кут нахилу платформи.
- Обробка даних та розрахунок керуючого сигналу: Отриманий кут нахилу подається на вхід ПІД-регулятора, який розраховує необхідний керуючий сигнал. Цей сигнал відображає ступінь та напрямок корекції, необхідної для повернення платформи до бажаного вертикального положення.
- Керування виконавчими механізмами: Розрахований керуючий сигнал перетворюється на конкретні команди для крокових двигунів, визначаючи кількість кроків та напрямок обертання кожного колеса.

Огляд використовуваних бібліотек:

Для спрощення розробки та підвищення ефективності коду, у проекті використовуються три Arduino-бібліотеки:

Wire.h — стандартна бібліотека Arduino, яка забезпечує обмін даними через шину I2C. У цьому проекті вона використовується для зв'язку мікроконтролера з інерціальним вимірювальним модулем MPU6050. За допомогою функцій Wire.begin() та Wire.setClock(400000) встановлюється зв'язок із датчиком і задається частота I2C-шини (400 кГц), що забезпечує швидке передавання даних [43].

I2Cdev.h — допоміжна бібліотека, яка абстрагує роботу з I2C-пристроями, спрощуючи доступ до їхніх регістрів. Вона використовується спільно з бібліотекою MPU6050 для більш надійної та зручної роботи з внутрішніми параметрами сенсора. Ця бібліотека полегшує обробку I2C-запитів і дозволяє уникнути прямого використання низькорівневих функцій бібліотеки Wire. [44].

MPU6050_6Axis_MotionApps_V6_12.h — це розширена бібліотека для роботи з MPU6050, яка використовує вбудований цифровий процесор руху (DMP) для обробки даних. Вона дозволяє зчитувати орієнтацію в просторі у

вигляді кватерніонів і кутів нахилу (yaw, pitch, roll). Завдяки функціям `mpu.dmpInitialize()`, `mpu.dmpGetQuaternion()`, `mpu.dmpGetYawPitchRoll()` та іншим, значно спрощується процес отримання згладжених даних про положення платформи. Це дозволяє реалізувати більш точний і стабільний контроль [45].

Таке поєднання бібліотек дозволяє ефективно організувати зчитування даних з IMU, обробку сигналів у режимі реального часу, управління двигунами за допомогою PID-регуляторів, а також закладає основу для подальшого вдосконалення системи.

2.6.2 Отримання та обробка даних з датчиків

Призначення інерціального датчика. MPU6050 – це інтегрований 6-осьовий IMU, який об'єднує 3-осьовий гіроскоп та 3-осьовий акселерометр в одному компактному корпусі.

Гіроскоп: вимірює кутову швидкість обертання об'єкта навколо трьох осей (X, Y, Z). Його показання дозволяють визначити, наскільки швидко платформа нахиляється або обертається. Дані гіроскопа є точними на коротких проміжках часу, але схильні до дрейфу (накопичення помилки) з часом [44].

Акселерометр: вимірює лінійне прискорення по трьох осях (X, Y, Z). Завдяки гравітації, акселерометр також може використовуватися для визначення кута нахилу об'єкта відносно земної поверхні. Показання акселерометра є стабільними на довгому проміжку часу, але чутливі до вібрацій та зовнішніх прискорень [44].

Призначення MPU6050 у даному проекті полягає у безперервному моніторингу кута нахилу платформи відносно вертикальної осі. Саме цей кут є основною входною змінною для системи балансування, оскільки він вказує на відхилення платформи від бажаного (вертикального) положення.

Принцип отримання кута нахилу (з використанням `mpu.getAngleX()`):

Для отримання стабільного та надійного значення кута нахилу, що не страждає від дрейфу гіроскопа та шумів акселерометра, застосовується метод об'єднання даних з обох сенсорів.

Гіроскоп надає інформацію про швидкість зміни кута. Якщо інтегрувати ці значення, можна отримати поточний кут. Проте, навіть незначні шуми у вимірюваннях гіроскопа з часом накопичуватимуться, призводячи до "дрейфу" кута – він повільно, але постійно відхилятиметься від істинного значення.

Акселерометр надає "абсолютний" кут відносно горизонту (або вертикалі, завдяки силі тяжіння). Цей кут є стабільним у довгостроковій перспективі, оскільки він завжди орієнтований на гравітацію. Однак, акселерометр дуже чутливий до вібрацій та лінійних прискорень, які виникають під час руху платформи, що робить його показання "шумними" у короткостроковій перспективі.

Функція `mpu.getAngleX()`, яка використовується у коді, є результатом застосування внутрішнього фільтра у бібліотеці `MPU6050_light`. Вона повертає вже оброблений та відфільтрований кут нахилу платформи навколо осі X (що відповідає її нахилу вперед/назад), що є безпосереднім `input` для ПІД-регулятора. Це значно спрощує розробку, оскільки розробнику не потрібно самостійно реалізовувати складні алгоритми фільтрації даних [44].

Важливість калібрування датчика. Калібрування датчика MPU6050 є критично важливим етапом для забезпечення точності вимірювань і, як наслідок, ефективності балансування. В процесі виробництва та подальшого використання датчики можуть мати невеликі систематичні помилки у своїх показаннях.

Гіроскоп може показувати невелику кутову швидкість навіть у стані спокою (коли немає обертання).

Акселерометр може давати ненульові показання, коли він ідеально вирівняний по осі, або навпаки, показувати нуль, коли є невеликий нахил.

Функція `mpu.calcOffsets()` виконує автоматичне калібрування MPU6050. Під час цього процесу платформа повинна перебувати у стабільному, нерухомому, горизонтальному положенні. Бібліотека зчитує показання датчика протягом певного часу, усереднює їх і розраховує поправки, які потім автоматично віднімаються від усіх подальших вимірювань. Це гарантує, що:

- У стані спокою гіроскоп показуватиме нульову кутову швидкість.
- Акселерометр надаватиме точніші дані для визначення кута нахилу.

Без належного калібрування, навіть якщо платформа перебуває у вертикальному положенні, датчик може повідомляти про невеликий нахил, що призведе до постійної некоректної роботи ПІД-регулятора та неможливості стабільного балансування. Отже, калібрування є першим кроком до отримання достовірних вхідних даних для системи керування.

2.6.3 Керування виконавчими механізмами

Вихідний сигнал ПІД-регулятора (`output`), розрахований бібліотекою `PID_v1:Compute()`, є основною керуючою величиною. Цей сигнал являє собою ціле число в діапазоні, визначеному `pid.SetOutputLimits(-300, 300)`. Позитивне значення `output` вказує на необхідність руху в одному напрямку для корекції нахилу, тоді як негативне значення – в протилежному. Абсолютне значення `output` пропорційне величині необхідної корекції [45].

Безпосередньо з `output` ПІД-регулятора генеруються два ключові параметри для керування кроковими двигунами:

Напрямок обертання (`direction`): Визначається знаком `output`. Якщо `output > 0`, це означає напрямок руху вперед, а якщо `output < 0` – протилежний.

Кількість кроків (`steps`): Визначається абсолютним значенням `output`. Чим більше абсолютне значення `output`, тим більше кроків повинні зробити двигуни, що призводить до швидшої та інтенсивнішої корекції положення.

Таким чином, вихід ПІД-регулятора є безпосереднім індикатором того, наскільки сильно і в який бік потрібно рухати платформу для відновлення рівноваги.

2.6.4 Математична модель регулятора

Вихідний сигнал розраховується як сума трьох складових, кожна з яких помножена на свій коефіцієнт:

$$out = P \cdot kP + I \cdot kI + D \cdot kD \quad (2.3)$$

Де: out — кількість кроків двигуна;

kP , kI , kD — PID-коефіцієнти, які налаштовуються експериментально відповідно до інерційності платформи, сили реакції та бажаного ступеня згладження [46].

У роботі застосовуються такі змінні:

Input – кут нахилу платформи по осі X, отриманий з MPU6050;

setpoint – задане значення кута;

err – поточна похибка;

dt – час між оновленнями;

output – керуючий сигнал, що відповідає швидкості та напрямку обертання двигунів.

Пропорційна складова (P) розраховується як різниця між уставкою та поточним значенням:

$$P = \text{setpoint} - \text{input} \quad (2.4)$$

Ця компонента формує основну частину реакції системи: чим більша похибка — тим сильніше обертається мотор. У стабілізуючих платформах саме P-компонента забезпечує основну відповідь на зміну кута.

Інтегральна складова (I) накопичує помилки з часом:

$$I = I + (\text{setpoint} - \text{input}) \cdot dt \quad (2.5)$$

Ця складова компенсує залишкову похибку, яку не здатна виправити лише P-частина, особливо в умовах довготривалого відхилення центра мас.

Диференційна складова (D) розраховується за швидкістю зміни похибки:

$$\text{err} = \text{setpoint} - \text{input} \quad (2.6)$$

$$D = \frac{\text{err} - \text{prevErr}}{dt} \quad (2.7)$$

$$\text{prevErr} = \text{err} \quad (2.8)$$

Ця компонента відіграє роль демпфера — зменшує ривки при зміні положення, згладжує імпульси й стабілізує реакцію двигунів при швидких рухах корпусу [46], [45].

У результаті PID-регулятор формує керуючий сигнал output, який перетворюється на відповідну кількість імпульсів STEP для драйверів A4988. Залежно від знаку цього сигналу визначається напрямок обертання (DIR) обох двигунів. Завдяки дзеркальному підключенню фаз другого двигуна, напрямок для нього інвертується програмно.

2.7 Перевірка працездатності двоколісної балансуючої платформи

Під час перевірки працездатності було здійснено експерименти, що підтверджують роботу прототипу та функціонування алгоритмів стабілізації. Тестування проводилось у статичних та динамічних умовах з метою виявлення реакції системи на різні варіанти зовнішнього впливу, а також для оцінки точності, стабільності та адаптивності роботи ПІД-регулятора.

Перший експеримент полягав у спробі зберегти платформу у вертикальному положенні без будь-яких додаткових навантажень. Після увімкнення живлення і проходження автоматичної калібровки інерціального сенсора MPU6050 платформа переходила у стабілізований режим. Система реагувала на найменші відхилення від вертикалі, компенсуючи їх обертанням коліс у відповідному напрямку. У результаті було досягнуто помітне утримання рівноваги, яке підтримувалося протягом кількох хвилин без падіння, що свідчить про коректну роботу апаратної та програмної частини системи.

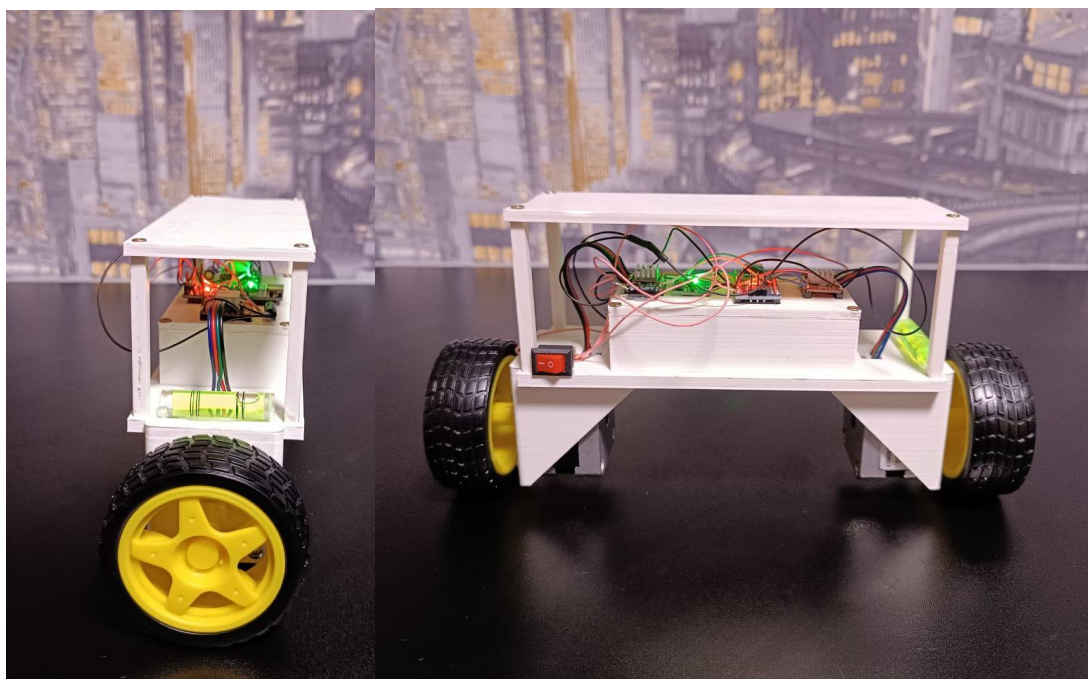


Рисунок 2.18 – Статичне випробування виробу

Другий експеримент мав на меті оцінити, як впливає зміщення центру маси на стабільність роботи платформи. Для цього на верхню кришку конструкції було встановлено додатковий об'єкт (смартфон) у різних положеннях. Коли об'єкт був розміщений приблизно по центру, тобто його вага не викликала суттєвого зміщення центра тяжіння, система залишалась стабільною — платформа утримувала вертикальне положення і не здійснювала значних переміщень. Натомість, коли той самий об'єкт був помітно зсунений в один бік і частково звисав із кришки, центр маси конструкції зміщувався, і система вже не могла досягти статичної рівноваги. У такому випадку платформа починала повільно й стабільно рухатись у напрямку зміщення, постійно намагаючись підставити опору під новий центр мас. Це підтвердило, що система адекватно реагує на розподіл навантаження, але при значному зміщенні маси стабілізація перетворюється на рухову компенсацію, що відповідає очікуваній поведінці інверсного маятника з динамічною стабілізацією.



Рисунок 2.19 – Випробування з додатковим об'єктом

Третій експеримент перевіряв здатність платформи повертатись у стабільне вертикальне положення після зовнішнього впливу. Конструкцію було навмисно відхилено на кут приблизно 40° , після чого її було відпущено. В обох напрямках — як уперед, так і назад — система розпізнавала відхилення, оперативно формувала відповідний керуючий сигнал та за декілька секунд стабілізувала платформу.

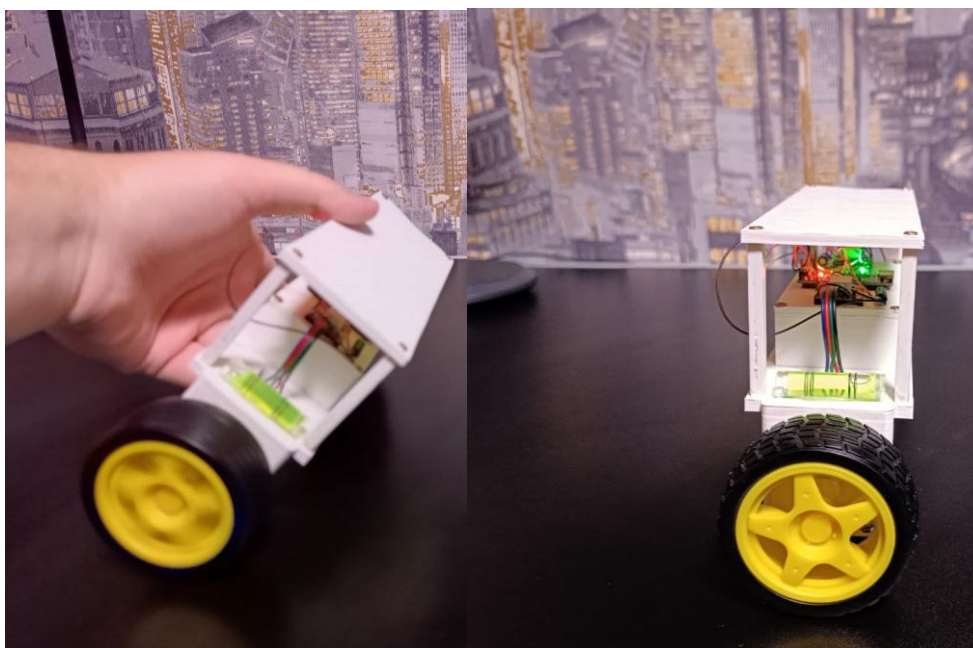


Рисунок 2.20 – Випробування з нахилом

Усі три експерименти підтвердили, що обчислювальні алгоритми функціонують у режимі реального часу з високою швидкістю реакції. Вбудована система зворотного зв'язку, побудована на основі інерціального сенсора та PID-регулятора, забезпечує ефективну стабілізацію платформи навіть у разі зовнішніх збурень або зміщення центру маси. Схема алгоритму роботи системи наведена на рисунку 2.21, що ілюструє послідовність виконання основних дій та логіку реагування системи на зміни положення.

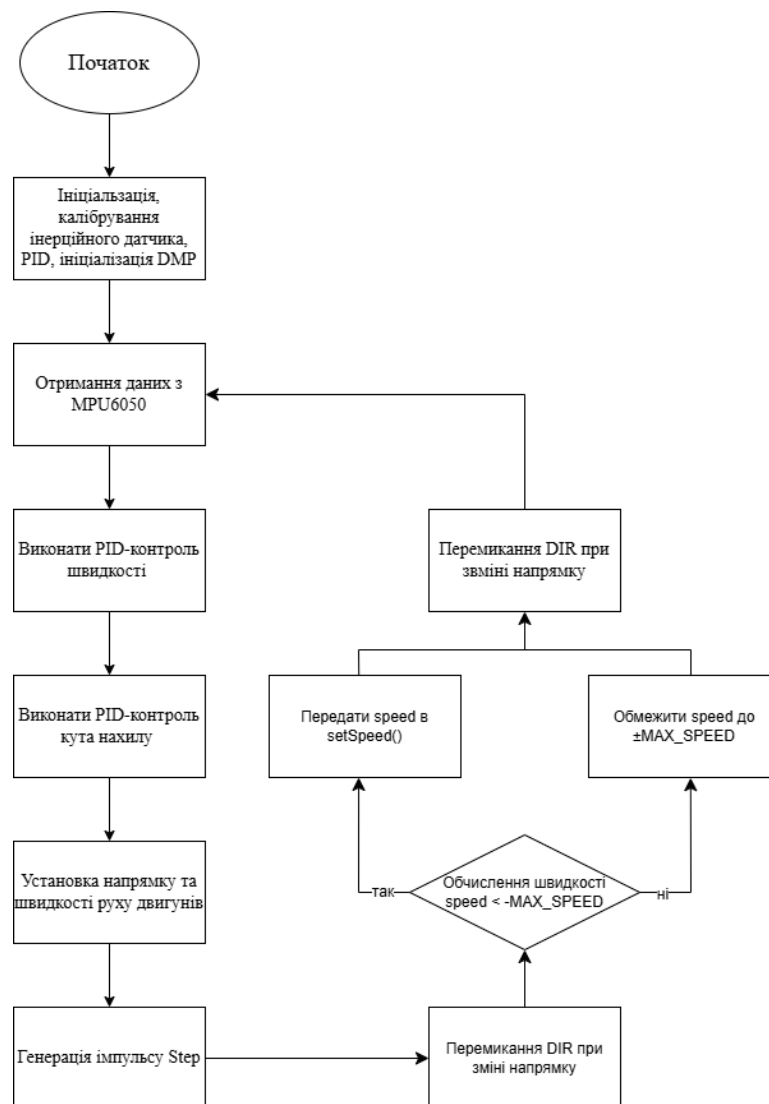


Рисунок 2.21 – Схема алгоритму роботи

Результати випробувань засвідчили функціональну придатність макетного зразка до виконання завдань підтримання рівноваги, що відповідає технічним вимогам до систем подібного типу.

ВИСНОВОК ДО РОЗДІЛУ 2

У другому розділі дипломного проекту було здійснено практичну реалізацію двоколісної балансуєчої платформи. Основна увага приділялася вибору необхідних компонентів, розробці електричних схем, конструюванню корпусу та створенню програмного забезпечення.

Корпус платформи було спроектовано в середовищі SolidWorks та виготовлено методом 3D-друку з PLA-пластику, що дозволило створити модульну конструкцію з можливістю легкого технічного обслуговування та модернізації. Програмне забезпечення включало реалізацію PID-регулятора, який забезпечує стабільність роботи системи шляхом обробки даних із датчиків та формування відповідних команд для керування двигунами. Для спрощення розробки застосовувалися спеціалізовані бібліотеки, що працюють із датчиком MPU6050 та PID-регулятором.

Проведені тестування підтвердили ефективність розробленої платформи: вона здатна підтримувати вертикальне положення, компенсувати зовнішні збурення і адаптуватися до змін у центрі маси. Отримані результати демонструють успішне виконання поставлених завдань — створення функціонального прототипу, який може стати базою для подальших досліджень та вдосконалень. Ця розробка засвідчила можливість реалізації стабілізаційних систем із застосуванням доступних компонентів і сучасних алгоритмів управління.

ВИСНОВКИ

У межах дипломного проекту було розроблено двоколісну балансуєчу платформу, яка функціонує за принципом інверсного маятника з використанням цифрової системи стабілізації. Основною метою роботи було створення функціонального макетного пристрою, здатного автоматично підтримувати вертикальне положення у просторі. У результаті проекту поставлена мета була повністю досягнута.

У першому розділі проведено теоретичне обґрунтування задачі стабілізації нестійких систем, зокрема на прикладі інверсного маятника. Розглянуто принципи роботи гіроскопів та акселерометрів, їхню роль у системах автоматичного балансування, а також практичне застосування у сучасній техніці — від побутових пристроїв до авіації та транспортних засобів. Значну увагу приділено опису PID-регулятора як одного з найефективніших алгоритмів зворотного зв'язку. Теоретичний аналіз також охопив історичні аспекти розвитку стабілізаційних систем і приклади реалізації аналогічних пристроїв.

У другому розділі виконано практичну реалізацію проекту: проведено обґрунтований вибір елементної бази, що включає мікроконтролер, сенсор MPU6050, драйвери A4988, крокові двигуни NEMA 17 та джерело живлення на основі акумуляторів 18650. Розроблено структурну та електричну схеми пристрою, змодельовано і виготовлено корпус за допомогою 3D-друку з PLA-пластику з урахуванням функціонального розміщення всіх елементів. Програмну частину реалізовано на основі PID-регулятора, що працює в режимі реального часу з даними, зчитаними з інерціального сенсора. Система формує керуючі сигнали, які адаптивно компенсують нахили корпусу, підтримуючи його вертикальне положення.

Експериментальні дослідження, проведені в процесі тестування, підтвердили функціональність макетного зразка. Платформа демонструє стабільну роботу як у базовому режимі, так і за наявності зовнішніх збурень

або зміни центру мас. Система самостійно повертається у рівновагу після відхилення, що свідчить про ефективність реалізованого алгоритму.

Таким чином, результати проекту підтвердили доцільність використання простих і доступних апаратних засобів для створення ефективної динамічно стабілізованої системи. Розроблений прототип може бути використаний як навчальний або демонстраційний зразок для вивчення принципів стабілізації, роботи інерціальних сенсорів, а також алгоритмів автоматичного керування на основі зворотного зв'язку.

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

- [1] Inverted pendulum. *Wikipedia*. URL: https://en.wikipedia.org/wiki/Inverted_pendulum (дата звернення: 15.04.2025).
- [2] Lundberg K. H., Barton T. W. History of inverted-pendulum systems. *IFAC Proceedings Volumes (IFAC-PapersOnline)*. 2009. С. 131–135. URL: <https://doi.org/10.3182/20091021-3-jp-2009.00025>.
- [3] Торпеда Вайтгеда. *Wikipedia*. URL: https://en.wikipedia.org/wiki/Whitehead_torpedo (дата звернення: 15.04.2025).
- [4] Ship stabilizing gyroscopes USS Henderson 1917. *Wikipedia*. URL: https://uk.wikipedia.org/wiki/%D0%A4%D0%B0%D0%B9%D0%BB:Ship_stabilizing_gyroscopes_USS_Henderson_1917.jpg (дата звернення: 15.04.2025).
- [5] Gait analysis using wearable sensors / W. Tao та ін. *Gait analysis*. 2012. С. 2255–2283. URL: <https://doi.org/10.3390/s120202255>.
- [6] Ring Laser Gyroscopes. *Glenair*. URL: <https://www.glenair.com/> (дата звернення: 17.04.2025).
- [7] Lawrence A. Modern Inertial Technology. *Mechanical Engineering*. 1993. URL: <https://doi.org/10.1007/978-1-4684-0444-9>.
- [8] Intel волоконно-оптичний гіроскоп. *Defence express*. URL: https://defence-ua.com/weapon_and_tech/vid_mikroshemi_intel_z_aliepress_u_rashiskij_raketi_tornado_s_zalezhit_zhittja_amerikanskogo_astronavta-11210.html (дата звернення: 18.04.2025).
- [9] *Liocrebifx*. URL: <http://ua.liocrebifx.com/fiber-optic-gyroscope-components/fiber-optic-gyroscope-optical-module/lkf-om120-fiber-optic-gyro-optical-module.html> (дата звернення: 18.04.2025).
- [10] Harve C. L. The fiber-optic gyroscope. *Artech House*. 2014.

- [11] “Meet Dean Kamen and His Team: Inventors of the Segway Human Transporter,” <https://www.thoughtco.com/segway-human-transporter-1992424>.
- [12] Vibrating structure gyroscope. *Wikipedia*. URL: https://en.wikipedia.org/wiki/Vibrating_structure_gyroscope#MEMS_gyroscopes (дата звернення: 19.04.2025).
- [14] Update to Terms of Service. *Linkedin*. URL: <https://www.linkedin.com/pulse/airplane-stability-control-brief-overview-lucas-telles--mmnrf/> (дата звернення: 19.04.2025).
- [15] Institute P. Airplane Stability - Balanced Flight Easily Explained - Pilot Institute. *Pilotinstitute*. URL: <https://pilotinstitute.com/airplane-stability/> (дата звернення: 21.04.2025).
- [16] Garmin G5 EFIS Instrument from Aircraft Spruce Europe. *Aircraftspruce*. URL: <https://www.aircraftspruce.eu/garmin-g5-efis-instrument.htm> (дата звернення: 22.04.2025).
- [17] Gyroscopic Flight Instruments. *Skybrary*. URL: <https://skybrary.aero/articles/gyroscopic-flight-instruments> (дата звернення: 23.04.2025).
- [18] Гіроскутер Segway Xiaomi Ninebot Mini. *Orange-drive*. URL: <https://orange-drive.com.ua/mini-sigvey-ninebot/giroskuter-ninebot-mini/giroskuter-segway-xiaomi-ninebot-mini-girobord-z-ruchkoyu-chorniy/> (дата звернення: 24.04.2025).
- [19] The4. How Do Hoverboards Work?. *Hypergogo*. URL: <https://www.hypergogo.com/blogs/news/how-do-hoverboards-work> (дата звернення: 25.04.2025).
- [20] Motorcycle stability control (MSC). *Bosch-mobility*. URL: <https://www.bosch-mobility.com/en/solutions/driving-safety/motorcycle-stability-control/> (дата звернення: 26.04.2025).

- [21] Що таке система ESP і як вона працює. *Avtobloknot*. URL: <https://avtobloknot.com.ua/shho-take-systema-esp-i-yak-vona-praczyuye/> (дата звернення: 27.04.2025).
- [22] The development of vehicle stability control at Ford / H. E. Tseng та ін. *IEEE/ASME Transactions on Mechatronics*. 1999. URL: <https://doi.org/10.1109/3516.789681>.
- [23] Електронний контроль стійкості. *Wikipedia*. URL: https://en.wikipedia.org/wiki/Electronic_stability_control (дата звернення: 30.04.2025).
- [24] Пустовіт Н. Що таке гіроскоп у телефоні та як він працює?. *Mycounter*. URL: <https://mycounter.com.ua/scho-take-hiroskop-u-telefoni-vidkryvaemo-taemnytsi-tsoho-vazhlyvoho-komponenta/> (дата звернення: 01.05.2025).
- [25] Все про маятникові годинники. *Secunda*. URL: <https://secunda.com.ua/ua/articles/vse-pro-mayatnykovi-godynnyky/10891/> (дата звернення: 02.05.2025).
- [26] Зворотний маятник. *Wikipedia*. URL: https://uk.wikipedia.org/wiki/%D0%97%D0%B2%D0%BE%D1%80%D0%BE%D1%82%D0%BD%D0%B8%D0%B9_%D0%BC%D0%B0%D1%8F%D1%82%D0%BD%D0%B8%D0%BA (дата звернення: 01.05.2025).
- [27] What is a PID Controller?. *Dwyeromega*. URL: <https://www.dwyeromega.com/en-us/resources/pid-controllers?srsId=AfmBOorEaqdxi-l6nUm3wqcC1KYilezYsZKAExXD-mAYpSjSZteR1tuJ> (дата звернення: 01.05.2025).
- [28] Як навчитися кататися на гіроскутері?. *Infostat*. URL: <https://www.com.ua/sport/yak-navchitisya-katatisya-na-giroskuteri.html> (дата звернення: 01.05.2025).
- [29] How Does a PID Controller Work?. *Dwyeromega*. URL: <https://www.dwyeromega.com/en-us/resources/how-does-a-pid-controller-work?srsId=AfmBOopgRJGqWW2uggefob2wpnXZMa52fQzELrHZ5VrrVE1qBZKwdntF> (дата звернення: 02.05.2025).

- [30] DCCNano. *Mini-tech*. URL: <https://www.mini-tech.com.ua/arduino-nano-ch340-type-c> (дата звернення: 02.05.2025).
- [31] Простими словами, що таке мікроконтролер Arduino. *Bitkit*. URL: <https://bitkit.com.ua/shho-take-arduino?srsId=AfmBOopUyA4qHGtMp1c2TDY6FiaQ9F1keht-XQcLolGdIIYVsrQn0pol> (дата звернення: 03.05.2025).
- [32] Nano | Arduino Documentation. *Arduino*. URL: <https://docs.arduino.cc/hardware/nano/> (дата звернення: 03.05.2025).
- [33] Мотор з редуктором. *Uamper*. URL: <https://uamper.com/%D0%9C%D0%BE%D1%82%D0%BE%D1%80-%D1%81-%D1%80%D0%B5%D0%B4%D1%83%D0%BA%D1%82%D0%BE%D1%80%D0%BE%D0%BC-%D0%BE%D0%B4%D0%BD%D0%BE%D1%81%D1%82%D0%BE%D1%80%D0%BE%D0%BD%D0%BD%D0%B8%D0%BC-%D0%B2%D0%B0%D0%BB%D0%BE%D0%BC> (дата звернення: 03.05.2025).
- [34] Кроковий двигун NEMA 17 17HS2408. *Mini-tech*. URL: <https://www.mini-tech.com.ua/ua/17hs2408-nema17-shagoviy-motor> (дата звернення: 04.05.2025).
- [35] Посібник з NEMA 17 Steper Motors. *Ariat-tech*. URL: <https://ua.ariat-tech.com/blog/guide-to-nema-17-stepper-motors-how-they-work,advantages-and-disadvantages,how-to-use-them,and-their.html> (дата звернення: 04.05.2025).
- [36] Драйвер крокового двигуна A4988. *Mini-tech*. URL: <https://www.mini-tech.com.ua/ua/drayver-shagovogo-dvigatelya-a4988> (дата звернення: 05.05.2025).
- [37] A4988 Stepper Motor Driver Carrier Board, Black Edition. *Parallax*. URL: <https://www.parallax.com/product/a4988-stepper-motor-driver-carrier-board-black-edition/> (дата звернення: 05.05.2025).

- [38] GY-521 6DOF гіроскоп + акселерометр на чіпі MPU-6050. *Mini-tech*. URL: <https://www.mini-tech.com.ua/ua/gy-521-6dof-trehosevoy-giroskop-akselerometr-mpu6050> (дата звернення: 06.05.2025).
- [39] Акселерометр і гіроскоп MPU-6050 GY-521 модуль 6DOF. *Arduino*. URL: https://arduino.ua/prod512-akselerometr-i-giroskop-mpu-6050-modul-6dof?srsltid=AfmBOop4r-1R5qEeA_SAL_tcD7cP2HkxVS8ptTwxFPvkijz_gdefDPw (дата звернення: 06.05.2025).
- [40] Акумулятор Li-Ion NCR18650B. *Mini-tech*. URL: <https://www.mini-tech.com.ua/ua/akkumulyator-li-ion-ncr18650b-3400-mah> (дата звернення: 07.05.2025).
- [41] 18650 battery case. *Mini-tech*. URL: <https://www.mini-tech.com.ua/ua/batarejnyj-otsek-2%D1%8518650-smd> (дата звернення: 07.05.2025).
- [42] Конденсатор 100 uF. *Mini-tech*. URL: <https://www.mini-tech.com.ua/ua/kondensator-elektroliticheskij-100uf-16v> (дата звернення: 07.05.2025).
- [43] GitHub - johnrickman/LiquidCrystal_I2C: LiquidCrystal Arduino library for the DFRobot I2C LCD displays. *Github*. URL: https://github.com/johnrickman/LiquidCrystal_I2C (дата звернення: 15.05.2025).
- [44] 1. MPU6050_6Axis_MotionApps20.h at master jrowberg. *Github*. URL: https://github.com/jrowberg/i2cdevlib/blob/master/ESP32_ESP-IDF/components/MPU6050/MPU6050_6Axis_MotionApps20.h (дата звернення: 15.05.2025).
- [45] The Arduino Playground. *Arduino*. URL: <https://playground.arduino.cc/> (дата звернення: 15.05.2025).
- [46] Introduction: PID Controller Design. *Ctms*. URL: <https://ctms.engin.umich.edu/CTMS/index.php?example=Introduction§ion=ControlPID>. (дата звернення: 16.05.2025).

ДОДАТОК А

Код програми

```
#include "I2Cdev.h"
#include "MPU6050_6Axis_MotionApps_V6_12.h"
#include "Wire.h"
#define START_BYTE 1010
bool dmpInitialized = false;
uint8_t devStatus;
uint8_t fifoBuffer[64];
Quaternion q;
VectorFloat gravity;
float ypr[3];
MPU6050 mpu;
void initializeMpu() {
    mpu.reset();
    delay(100);
    mpu.initialize();
    devStatus = mpu.dmpInitialize();
    if (devStatus == 0) {
        Serial.println("Calibrating offsets");
        mpu.CalibrateAccel(15);
        mpu.CalibrateGyro(15);
        mpu.PrintActiveOffsets();
        mpu.setDMPEEnabled(true);
        Serial.println("DMP initialized successfully");
        dmpInitialized = true;
    } else {
        Serial.println("DMP Initialization failed");
```



```

if (new_values_ready) {
    if (current_values.dir != new_values.dir) {
        current_values.dir = new_values.dir;
        current_values.negative_counter = current_values.counter;
        current_values.counter = 0;
        digitalWrite(DIR_PIN1, current_values.dir);
        digitalWrite(DIR_PIN2, !current_values.dir);
    }
    current_values.step_rate = new_values.step_rate;
    new_values_ready = false;
}

if (current_values.negative_counter == 0) {
    current_values.counter += current_values.step_rate;
} else {
    if (current_values.negative_counter > current_values.step_rate) {
        current_values.negative_counter -= current_values.step_rate;
    } else {
        current_values.counter += current_values.step_rate -
current_values.negative_counter;
        current_values.negative_counter = 0;}
}

if (current_values.counter >= VIRTUAL_TICKS_PER_STEP) {
    current_values.counter -= VIRTUAL_TICKS_PER_STEP;
    port_d_step_mask |= (1 << STEP_PIN1);
    port_d_step_mask |= (1 << STEP_PIN2);}
}

void setSpeed(int16_t speed) {
    new_values.dir = speed > 0 ? FORWARD_DIR : BACKWARD_DIR;

```

```

        new_values.step_rate    =    (VIRTUAL_TICKS_PER_STEP    /
TICKS_PER_SECOND) * abs(speed);
    new_values_ready = true;}
#include "PID.h"
uint32_t previous_micros;
uint32_t current_micros;
float dt;
float target_speed = 0;
float target_angle = 0;
#define SPEED_KP 0.000015
#define SPEED_KI 0.0000000
#define SPEED_KD 0.00000027
#define ANGLE_KP 200.0
#define ANGLE_KI 5.0
#define ANGLE_KD 25.0
#define MAX_SPEED 500
#define MAX_ACCEL 700.0
PID speed_pid(SPEED_KP, SPEED_KI, SPEED_KD, -M_PI/3, M_PI/3, 0,
0);
PID angle_pid(ANGLE_KP, ANGLE_KI, ANGLE_KD, -MAX_ACCEL,
MAX_ACCEL, -0.35, 0.35);
void setup() {
    Serial.begin(115200);
    pinMode(ENABLE_PIN, OUTPUT);
    digitalWrite(ENABLE_PIN, HIGH);
    pinMode(STEP_PIN1, OUTPUT);
    digitalWrite(STEP_PIN1, LOW);
    pinMode(DIR_PIN1, OUTPUT);
    pinMode(STEP_PIN2, OUTPUT);
    digitalWrite(STEP_PIN2, LOW);

```

```

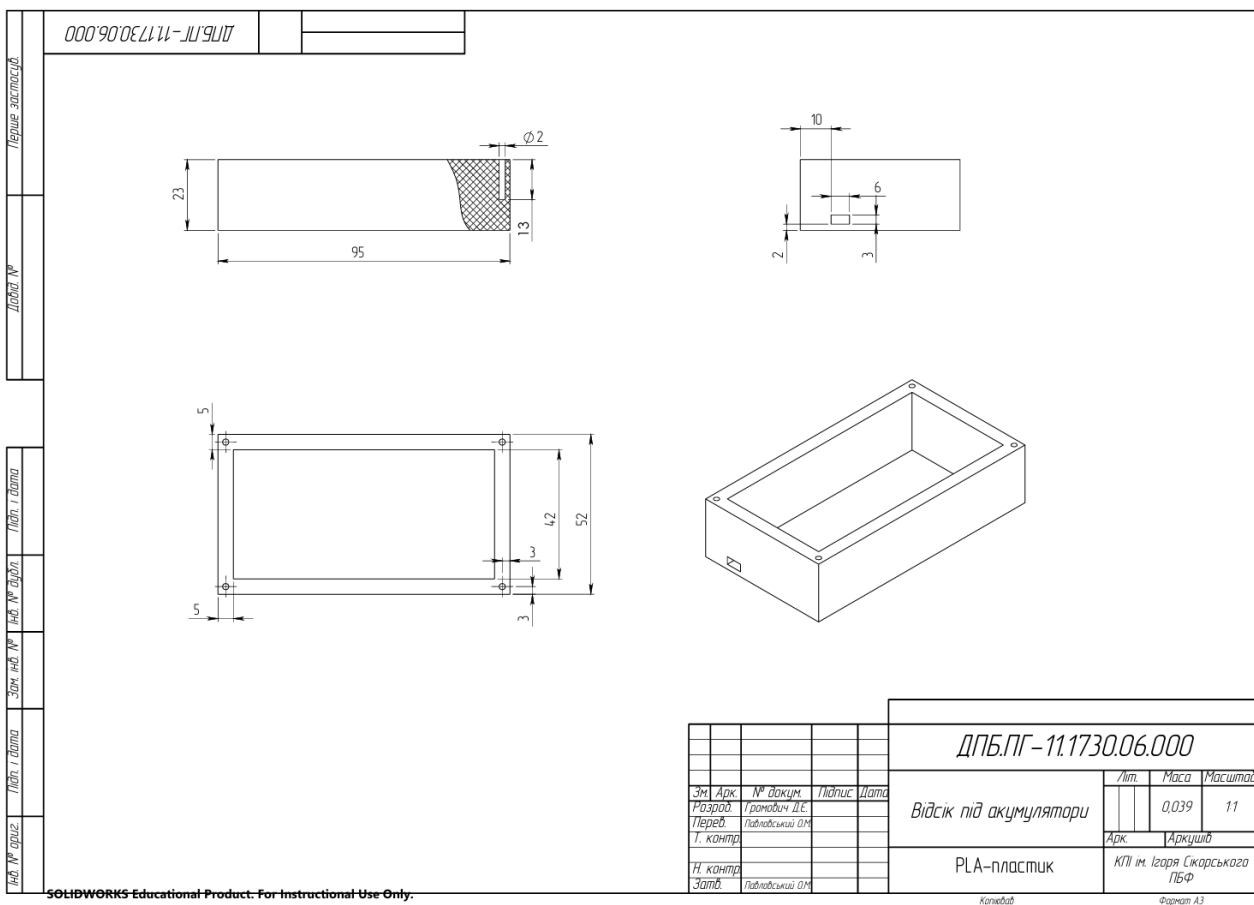
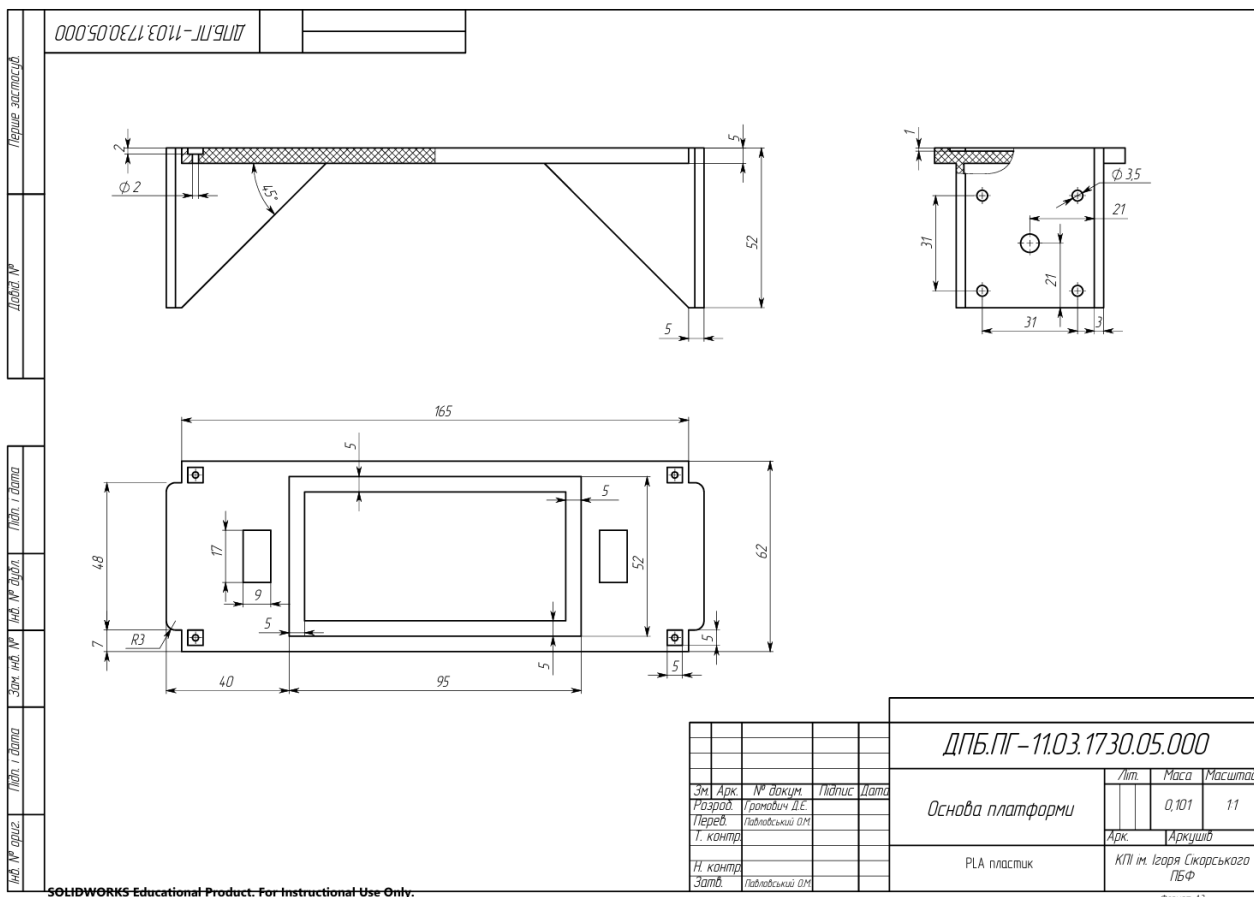
pinMode(DIR_PIN2, OUTPUT);
Wire.begin();
Wire.setClock(400000);
initializeMpu();
digitalWrite(ENABLE_PIN, LOW);
TCCR1A = 0;
TCCR1B = (1 << WGM12) | (1 << CS10);
OCR1A = 0x01F3;
TIMSK1 |= (1 << OCIE1A);
current_values.dir = 2;
current_values.counter = 0;
current_values.negative_counter = 0;
current_values.step_rate = 0;
previous_micros = micros();
void loop() {
    if (!dmpInitialized) return;
    while (!mpu.dmpGetCurrentFIFOPacket(fifoBuffer)) {}
    mpu.dmpGetQuaternion(&q, fifoBuffer);
    mpu.dmpGetGravity(&gravity, &q);
    mpu.dmpGetYawPitchRoll(ypr, &q, &gravity);
    current_micros = micros();
    dt = ((float)(current_micros - previous_micros)) / 1000000.0;
    previous_micros = current_micros;
    target_angle = speed_pid.update(target_speed, (float)speed, dt);
    speed += -angle_pid.update(target_angle, -ypr[2], dt);
    if (speed > MAX_SPEED) speed = MAX_SPEED;
    if (speed < -MAX_SPEED) speed = -MAX_SPEED;
    setSpeed(speed);
}

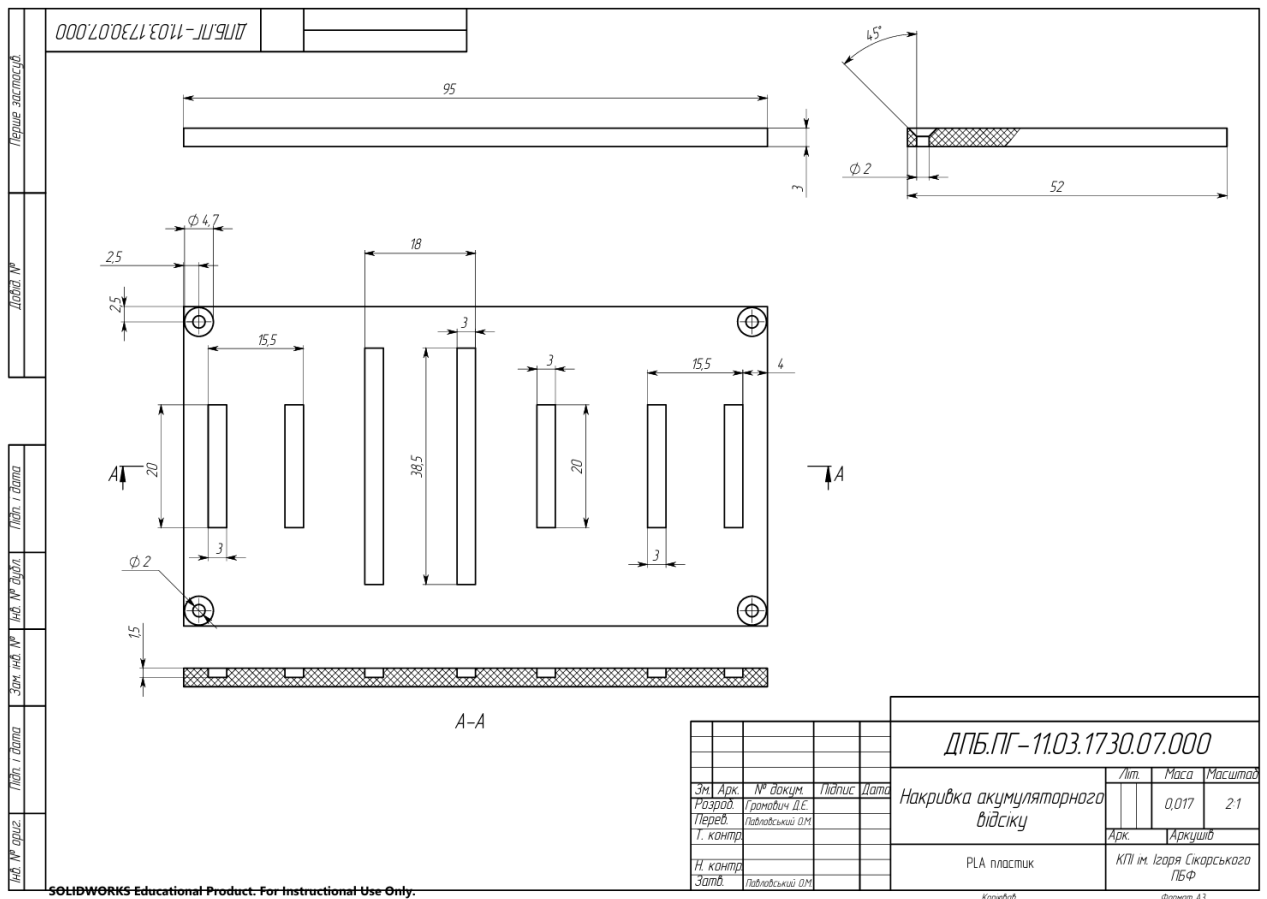
```

ДОДАТОК Б

Кресленики

Перше застосує.		Формат	Зона	Позн.	Позначення	Назва	Кільк.	Примітки
						Документація		
						Складальні одиниці		
Додат. №	A1		1	ДПБ.ПГ-11.03.1730.01.000 СК	Двоколісна стабілізаційна платформа	1		
	A1		2	ДПБ.ПГ-11.03.1730.02.000 СхЕ	Схема електрична	1		
	A2		3	ДПБ.ПГ-11.03.1730.03.000 СхА	Схема алгоритму	1		
	A2		3	ДПБ.ПГ-11.03.1730.04.000 СхС	Схема структурна	1		
					Деталі			
Підпис і дата	A3		4	ДПБ.ПГ-11.03.1730.05.000	Основа платформи	1		
	A3		5	ДПБ.ПГ-11.03.1730.06.000	Відсік під акумулятори	1		
	A3		6	ДПБ.ПГ-11.03.1730.07.000	Накривка акумуляторного відсіку	1		
	A4		7	ДПБ.ПГ-11.03.1730.08.000	Стійка	4		
	A4		8	ДПБ.ПГ-11.03.1730.09.000	Накривка	1		
Інв. № дубл.			9		Шуруп універсальний М2,5х16	12		
			10		Гвинт М3х8	8		
Зам. інв. №								
Підпис і дата								
Інв. № проєкт.								
					ДПБ.ПГ-11.03.1730.00.000			
	Зм.	Арк.	№ докум.	Підп.	Дата			
	Розроб.		Грамович Д.Е.					
	Переб.		Павловський О.М.					
	Н. контр.							
	Затв.		Павловський О.М.					
						Двоколісна балансуєча платформа		
						Літ.	Арк.	Аркушів
						0	1	1
						КПІ ім. Ігоря Сікорського ПБФ		





1 |

Перше застосує.

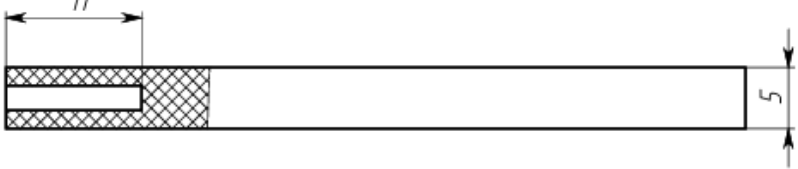
Добуд. №

ДПБ.ПГ-11.03.1730.08.000

2 отв. $\Phi 2$

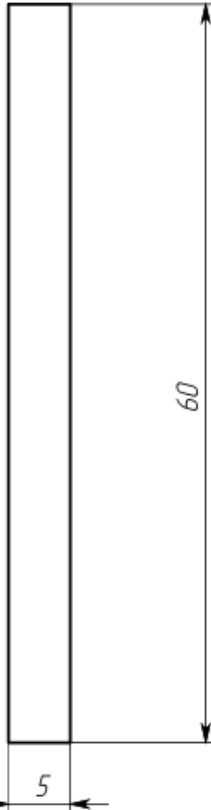


11



5

60



5

Підп. і дата

Інв. № докл.

Зам. інв. №

Підп. і дата

Інв. № орг.

Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата
Розроб.		Громобич Д.Є.		
Перев.		Павловський О.М.		
Т. контр.				
Н. контр.				
Затв.		Павловський О.М.		

ДПБ.ПГ-11.03.1730.08.000

Стійка

PLA пластик

Лім.	Маса	Масштаб
	0,002	1:1

Арк.

Аркуші

СOLIDWORKS Educational Product. For Instructional Use Only.

1

Копія

Формат А4

1

Перше застосує.	ДПБ.ПГ-11.03.1730.09.000								
Додат. №									
Підп. і дата									
Інв. № докл.									
Зам. інв. №									
Підп. і дата									
Інв. № орг.	Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата	ДПБ.ПГ-11.03.1730.09.000 Накривка PLA пластик	Лист	Маса	Масштаб
	Розроб.	Громиш Д.Е.						0,05	1:1
	Перев.	Павловський О.М.						Арк.	Аркушів
	І. контр.							КПІ ім. Ізгоря Сікорського ПБФ	
	Н. контр.								
	Затв.	Павловський О.М.							

SOLIDWORKS Educational Product. For Instructional Use Only.

1 | Копіював

Формат А4