

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

Факультет робототехніки та приладобудування

Кафедра комп'ютерно-інтегрованих оптичних та навігаційних систем

До захисту допущено:

Завідувач кафедри

_____ Н.І. Бурау

«__» _____ 20__ р.

**Дипломний проєкт
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: «Автоматизована система динамічної стабілізації платформи з
паралельною кінематикою»**

Виконав:

студент IV курсу, групи ПГ-21
Ярижко Володимир Андрійович _____

Керівник:

асистент, д.ф.,
Паздрій Ольга Ярославівна _____

Рецензент:

Проф., д.т.н.,
Туз Юліан Михайлович _____

Засвідчую, що у цьому дипломному проєкті
немає запозичень з праць інших авторів без
відповідних посилань.

Студент (-ка) _____

Київ – 2026 року

ВІДОМІСТЬ ДИПЛОМНОГО ПРОЄКТУ

№ з/п	Формат	Позначення	Найменування	Кількість листів	Примітка
1	A4	ДП ПГ-21.14.1730.01.000 ТЗ	Завдання на дипломний проєкт	2	
2	A4	ДП ПГ-21.14.1730.01.001 ПЗ	Пояснювальна записка	119	
3	A1	ДП ПГ-21.14.1730.01.002	Блок-схема алгоритму керування	1	
4	A1	ДП ПГ-21.14.1730.01.003	Simulink-модель та результати моделювання	1	
5	A4	ДП ПГ-21.14.1730.01.004 ПЕЗ	Перелік елементів	1	
6	A1	ДП ПГ-21.14.1730.01.005 ЕЗ	Схема електрична принципова	1	
7	A1	ДП ПГ-21.14.1730.01.006 Е1	Схема електрична структурна	1	
8	A2	ДП ПГ-21.14.1730.01.007	Нижня пластина	1	
9	A2	ДП ПГ-21.14.1730.01.008	Платформа	1	
10	A3	ДП ПГ-21.14.1730.01.009	Сполучна штанга	1	
11	A1	ДП ПГ-21.14.1730.01.007 СБ	Збіркове креслення	1	

				ДП.ПГ-21.14.1730.01.001 ПЗ		
	ПІБ	Підпис	Дата			
Розроб.	Яришко В.А.			Відомість дипломного проєкту	Аркуш	Аркушів
Керівн.	Паздрій О.Я.				1	121
Консульт.					КПІ ім. Ігоря Сікорського Каф. КІОНС	
Н/Контр.						
Зав. каф.	Бурау Н.І.					

**Пояснювальна записка до
дипломного проєкту
на тему: «Автоматизована система динамічної
стабілізації платформи з паралельною кінематикою»**

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

Інститут (факультет) Факультет робототехніки та приладобудування
(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)

Освітньо-професійна програма Комп'ютерно-інтегровані системи та технології в приладобудуванні

ЗАТВЕРДЖУЮ

Завідувач кафедри

Н.І. Бурау
(підпис) (ініціали, прізвище)

«___» _____ 2026 р.

ЗАВДАННЯ

на дипломний проєкт студенту

Ярижко Володимир Андрійович

(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема дипломного проєкту: Автоматизована система динамічної стабілізації платформи з паралельною кінематикою

Науковий керівник роботи Паздрій Ольга Ярославівна, Д.ф. _____ ,
(прізвище, ім'я, по батькові, науковий ступінь, вчене звання)

затверджені наказом по університету від «___» _____ 2026 р. № _____

2. Термін подання студентом проєкту « 5 » червня 2026 р.

3. Вихідні дані до проєкту: геометрія макета: радіус бази – 100 мм, радіус платформи – 100 мм, довжина важеля – 35 мм, довжина тяги – 85 мм; кількість ступенів свободи – 6; робочий діапазон відхилень – $\pm 15^\circ$; виконавчі механізми: 6 сервопривід TowerPro MG996R, керування – ШІМ через драйвер PCA9685; сенсорна підсистема: інерційний модуль MPU-6050; мікроконтролер: ATmega328P; частота оновлення системи – не менше 100 Гц; точність стабілізації (залишкова похибка після компенсації збурення): не більше 2–3°; середовище моделювання – MATLAB/Simulink.

4. Зміст роботи Вступ. 1. Обґрунтування задач та огляд існуючих систем на базі платформи стюарта. 2. Розробка автоматизованої системи динамічної стабілізації. 3. Побудова та експериментальне дослідження платформи з паралельною кінематикою. Висновки

5. Перелік ілюстративного матеріалу (із зазначенням плакатів, презентацій тощо) Загальний вигляд платформи Стюарта; структурна схема системи динамічної стабілізації; схема підключення апаратної частини; блок-схема алгоритму керування; Simulink-модель системи динамічної стабілізації; результати моделювання (графіки); результати експериментальних досліджень, презентація PowerPoint (*.ppt)

6. Консультанти розділів роботи*

Розділ	Прізвище, ініціали та посада консультанта	Підпис, дата	
		завдання видав	завдання прийняв

7. Дата видачі завдання 30.04.2026

Календарний план

№ з/п	Назва етапів виконання дипломної роботи	Термін виконання етапів роботи	Примітка
1.	Літературний пошук та аналіз існуючих конструкцій на базі платформи Стюарта.	04.05.2026	
2.	Розробка математичної моделі платформи з паралельною кінематикою.	07.05.2026	
3.	Синтез системи керування та налаштування параметрів регулятора;	10.05.2026	
4.	Побудова імітаційної моделі в MATLAB/Simulink .	14.05.2026	
5.	Розробка структурної системи динамічної стабілізації платформи з паралельною кінематикою.	20.05.2026	
6.	Вибір елементної бази та складання фізичного прототипу.	25.06.2026	
7.	Проведення експериментальних досліджень та аналіз результатів	01.06.2026	
8.	Оформлення пояснювальної записки	05.06.2026	

Студент

(підпис)

В.А. Ярижко
(ініціали, прізвище)

Керівник дипломного проекту

(підпис)

О. Я. Паздрій
(ініціали, прізвище)

* Консультантом не може бути зазначено керівника дипломної роботи.

АНОТАЦІЯ

Дипломний проєкт присвячено розробці та дослідженню автоматизованої системи динамічної стабілізації шестикоординатної платформи з паралельною кінематикою (платформи Стюарта).

У роботі проведено детальний аналіз задач динамічної стабілізації, розглянуто сфери застосування гексаподів в авіації, морській інженерії, медицині та промисловій робототехніці.

У першому розділі проведено аналіз задач динамічної стабілізації, розглянуто сфери застосування гексаподів та існуючих сенсорних технологій. Обґрунтовано доцільність використання архітектури з роторними приводами (сервоприводами) для створення компактного експериментального макета з метою мінімізації інерційних навантажень та підвищення швидкодії системи.

У другому розділі розроблено геометричну та кінематичну моделі платформи Стюарта, розв'язано обернену задачу кінематики з використанням кутів Ейлера та матриць повороту. Проведено аналіз стійкості системи за критерієм Гурвіца, здійснено синтез і розрахунок параметрів ПІД-регулятора, а також реалізовано математичне моделювання динаміки механізму та алгоритмів автоматичного керування за відхиленням у середовищі MATLAB/Simulink.

У третьому розділі розроблено структурну та електричну принципову схеми системи стабілізації, створено тривимірну модель конструкції у SolidWorks та виконано фізичну реалізацію макета платформи за допомогою FDM 3D-друку з PETG-пластику та металевих шарнірів. Для побудови контуру керування та обробки сенсорних даних у реальному часі обрано мікроконтролер ATmega328P та цифровий інерційний MEMS-модуль MPU-6050 (IMU). Описано розробку програмного забезпечення та наведено результати експериментальних досліджень реакції макета на статичні й динамічні збурення.

Пояснювальна записка складається зі вступу, 3 розділів, висновків та списку використаних джерел.

Ключові слова: платформа Стюарта, паралельна кінематика, гексапод, динамічна стабілізація, роторний привід, сервопривід, мікроконтролер, інерційний сенсор.

ABSTRACT

The diploma project is devoted to the development and investigation of an automated dynamic stabilization system for a six-degree-of-freedom parallel kinematic platform (Stewart platform).

The work presents a detailed analysis of dynamic stabilization problems and examines the application areas of hexapods in aviation, marine engineering, medicine, and industrial robotics.

The first chapter analyzes dynamic stabilization problems, reviews hexapod application areas and existing sensor technologies. The feasibility of using a rotary actuator (servo-driven) architecture for building a compact experimental prototype is justified, with the aim of minimizing inertial loads and improving system response speed.

The second chapter develops geometric and kinematic models of the Stewart platform and solves the inverse kinematics problem using Euler angles and rotation matrices. A stability analysis based on the Hurwitz criterion is carried out, PID controller parameters are synthesized and calculated, and mathematical modeling of the mechanism dynamics and deviation-based automatic control algorithms is implemented in MATLAB/Simulink.

The third chapter presents the development of structural and schematic circuit diagrams of the stabilization system, the creation of a 3D model in SolidWorks, and the physical realization of the platform prototype using FDM 3D printing with PETG polymer and metal rod ends. An ATmega328P microcontroller and an MPU-6050 digital inertial MEMS module (IMU) are selected for real-time control loop processing and sensor data acquisition. The software development process is described and the results of experimental studies of the prototype's response to static and dynamic disturbances are presented.

The explanatory note consists of an introduction, 3 chapters, conclusions, and a list of references.

Keywords: Stewart platform, parallel kinematics, hexapod, dynamic stabilization, rotary actuator, servo drive, microcontroller, inertial sensor.

ЗМІСТ

ПЕРЕЛІК СКОРОЧЕНЬ	7
ВСТУП	9
РОЗДІЛ 1	11
ОБҐРУНТУВАННЯ ЗАДАЧ ТА ОГЛЯД ІСНУЮЧИХ СИСТЕМ НА БАЗІ ПЛАТФОРМИ СТЮАРТА	11
1.1 Аналіз задач динамічної стабілізації та галузей їх застосування	11
1.1.1 Застосування систем стабілізації	12
1.1.2 Проблеми стабілізації рухомих платформ	16
1.1.3 Вимоги до систем динамічної стабілізації	18
1.1.4 Класифікація платформ із паралельною кінематичною структурою	20
1.1.5 Платформи з лінійними приводами	21
1.1.6 Платформи з роторними приводами	23
1.1.7 Порівняння платформ з лінійними та роторними приводами	25
1.2 Сучасні системи керування та сенсорні технології	26
1.3 Мікроконтролерні системи керування	28
1.3.1 Інерційні сенсорні системи	30
1.3.2 Виконавчі механізми систем стабілізації	32
Висновки до розділу 1	34
РОЗДІЛ 2	36
РОЗРОБКА АВТОМАТИЗОВАНОЇ СИСТЕМИ ДИНАМІЧНОЇ СТАБІЛІЗАЦІЇ	36
2.1 Постановка завдання та вимоги до системи динамічної стабілізації	36
2.2 Конструктивні особливості платформи Стюарта	37
2.2.1 Загальна структура платформи Стюарта	38
2.2.2 Кінематична структура платформи Стюарта	40
2.2.3 Геометричні параметри та особливості конструкції	42

					ДП ПГ-21.14.1730.01.001 ПЗ			
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата				
Розроб.		Яришко В.А.			Автоматизована система динамічної стабілізації платформи з паралельною кінематикою Пояснювальна записка	Літ.	Арк.	Акрушів
Перевір.		Паздрій О.Я.					5	120
Реценз.						НТУУ "КПІ ім. Ігоря Сікорського", ФРП		
Н. Контр.								
Затверд.		Бурау Н.І.						

2.3 Побудова математичної моделі	44
2.4 Аналіз стійкості системи	50
2.5 Синтез системи керування	51
2.6 Розрахунок та налаштування регулятора	54
2.7 Моделювання системи в MATLAB/Simulink	58
Висновки до розділу 2	61
РОЗДІЛ 3	63
ПОБУДОВА ТА ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНЕ ДОСЛІДЖЕННЯ ПЛАТФОРМИ З ПАРАЛЕЛЬНОЮ КІНЕМАТИКОЮ	63
3.1 Структурна схема системи стабілізації	63
3.2 Розробка конструкції платформи	65
3.3 Вибір елементної бази апаратно-програмного комплексу	70
3.4 Розробка алгоритму системи динамічної стабілізації	74
3.5 Фізична реалізація макета платформи Стюарта	75
3.6 Експериментальне дослідження системи динамічної стабілізації	78
3.6.1 Методика проведення досліджень	78
3.6.2 Дослідження часу ініціалізації та готовності системи	79
3.6.3 Дослідження реакції на статичне збурення	80
3.6.4 Дослідження реакції на динамічне збурення	81
3.6.5 Вплив коефіцієнтів ПІ-регулятора на якість стабілізації	83
3.6.6 Перевірка відповідності вимогам технічного завдання	85
Висновки до розділу 3	86
ВИСНОВКИ	87
ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ	89

ПЕРЕЛІК СКОРОЧЕНЬ

- АЦП – аналого-цифровий перетворювач
- БПЛА – безпілотний літальний апарат
- ДПС – двигун постійного струму
- ЕРС – електрорушійна сила
- ПІ – пропорційно-інтегральний регулятор
- ПІД – пропорційно-інтегрально-диференціальний регулятор
- САК – система автоматичного керування
- ШИМ – широтно-імпульсна модуляція
- AHRS – *Attitude and Heading Reference System* (система орієнтації та курсовертикалі)
- ARM – *Advanced RISC Machine* (архітектура мікропроцесорів)
- AVR – *Alf and Vegard's RISC processor* (архітектура мікроконтролерів Atmel/Microchip)
- CAD – *Computer-Aided Design* (система автоматизованого проектування)
- DMP – *Digital Motion Processor* (цифровий процесор руху)
- DOF – *Degrees of Freedom* (ступені вільності)
- FDM – *Fused Deposition Modeling* (метод пошарового наплавлення)
- FPU – *Floating Point Unit* (пристрій обчислень із плаваючою комою)
- I²C – *Inter-Integrated Circuit* (двопровідний послідовний інтерфейс)
- IMU – *Inertial Measurement Unit* (інерційний вимірювальний модуль)
- IoT – *Internet of Things* (інтернет речей)
- MARG – *Magnetic, Angular Rate, Gravity* (магнітний датчик з гіроскопом та акселерометром)
- MATLAB – *Matrix Laboratory* (середовище математичного моделювання)
- MEMS – *Microelectromechanical Systems* (мікроелектромеханічні системи)

					ДП ПГ-21.14.1730.01.001 ПЗ	Арк.
						7
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

MIMO – *Multiple Input, Multiple Output* (багатовхідна-багатовихідна система)

MPU – *Motion Processing Unit* (процесор обробки руху)

PETG – *Polyethylene Terephthalate Glycol* (поліетилентерефталат-гліколь)

PID – *Proportional-Integral-Derivative* (пропорційно-інтегрально-диференціальний регулятор)

PWM – *Pulse Width Modulation* (широтно-імпульсна модуляція)

RISC – *Reduced Instruction Set Computing* (архітектура з набором команд скороченого типу)

SRAM – *Static Random Access Memory* (статична пам'ять з довільним доступом)

USB – *Universal Serial Bus* (універсальна послідовна шина)

					ДП ПГ-21.14.1730.01.001 ПЗ	Арк.
						8
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

ВСТУП

В сучасному світі розвиток роботизованих систем, авіаційної техніки та точного приладобудування стоїть на першому місці. Традиційні послідовні маніпулятори часто мають обмеження за жорсткістю та точністю через накопичення похибок у з'єднаннях та високу інерційність ланок [1]. Тому існує тенденція до все більшого використання механізмів із паралельною кінематикою, яскравим прикладом яких є платформа Стюарта (гексапод). Такі системи відзначаються високою жорсткістю конструкції, вантажопідйомністю та здатністю забезпечувати прецизійне просторове позиціонування [1, 2].

Вони дозволяють забезпечити надійну роботу обладнання в умовах постійних вібрацій, коливань та динамічних зовнішніх збурень [2, 4].

Використання платформ із паралельною кінематикою є доцільним як у міських умовах, так і у важкодоступних або специфічних зонах. Така платформа являє собою механізм із паралельною кінематичною структурою, у якому рухома платформа з'єднана з нерухомою основою кількома незалежними кінематичними ланцюгами. Координоване керування довжинами або положеннями цих ланцюгів забезпечує переміщення рухомої платформи за шістьма ступенями свободи. Завдяки цьому стає можливою просторова компенсація нахилів, коливань та вібрацій обладнання, встановленого на платформі [1, 2].

Керуючі впливи, що формуються системою, передаються на виконавчі механізми (лінійні актуатори або сервоприводи), які здійснюють переміщення рухомої частини з точністю до 1–2 мм. Водночас інформація про поточний стан та орієнтацію платформи безперервно зчитується за допомогою інерційних датчиків (IMU, акселерометрів та гіроскопів), що дозволяє підтримувати допустиме відхилення не більше 2–3° за частоти оновлення системи не менше 100 Гц [2].

					ДП ПГ-21.14.1730.01.001 ПЗ	Арк.
						9
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Розробка автоматизованої системи динамічної стабілізації просторової платформи дозволить значно підвищити ефективність її роботи та забезпечити прецизійну точність керування її положенням.

Метою дипломного проєкту є розробка та дослідження автоматизованої системи динамічної стабілізації платформи з паралельною кінематикою для вдосконалення процесів компенсації зовнішніх динамічних збурень у режимі реального часу, шляхом проведення комп'ютерних моделювань та розробки фізичного макета.

Для проведення комп'ютерного моделювання було використано пакет прикладних програм MATLAB/Simulink.

					ДП ПГ-21.14.1730.01.001 ПЗ	Арк.
						10
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

РОЗДІЛ 1

ОБҐРУНТУВАННЯ ЗАДАЧ ТА ОГЛЯД ІСНУЮЧИХ СИСТЕМ НА БАЗІ ПЛАТФОРМИ СТЮАРТА

1.1 Аналіз задач динамічної стабілізації та галузей їх застосування

Стабілізація є одним із ключових завдань сучасних автоматизованих систем керування. Під стабілізацією розуміють процес підтримання певного положення, орієнтації або стану об'єкта в просторі незалежно від впливу зовнішніх збурень [1,2]. У технічних системах це означає що механізм або пристрій повинен бути здатен зберігати параметри руху навіть за наявності змінних навантажень, вібрацій, прискорень або інших факторів які б дестабілізуюче впливали на систему. У більшості випадків стабілізація реалізується за допомогою систем автоматичного керування [1, 3].

Величина помилки регулювання (неузгодження) визначається як різниця між заданим значенням орієнтації та її дійсним значенням, отриманим від датчиків зворотного зв'язку, згідно з принципом керування за відхиленням [1].

Такі системи постійно безперервно відстежують поточний стан об'єкта та формують керуючі сигнали призначені для компенсації небажаних відхилень [1]. В основу таких систем покладено принцип зворотного зв'язку: інформація про поточне положення або орієнтацію об'єкта надходить від сенсорів до керуючого пристрою, де ці данні порівнюються із заданими параметрами. У разі виникнення відхилення система формує відповідний керуючий вплив на виконавчі механізми, що дозволяє повернути об'єкт у необхідний стан [1, 3].

Особливо важливе значення стабілізація має в системах, де об'єкт функціонує в умовах постійних динамічних впливів [4-6]. До таких систем належать рухомі платформи, транспортні засоби, роботизовані маніпулятори, а також різноманітні технічні комплекси, що працюють у складному

					ДП ПГ-21.14.1730.01.001 ПЗ	Арк.
						11
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

середовищі. У подібних випадках навіть незначні коливання або зміни положення можуть суттєво впливати на точність роботи обладнання або безпеку виконання технологічних операцій.

Сучасні системи стабілізації поєднують у собі механічні, електронні та програмні компоненти [4,7-8]. До їх складу входять вимірювальні сенсори, обчислювальні модулі та виконавчі механізми, які спільно забезпечують швидке реагування на зовнішні збурення. Використання цифрових методів обробки сигналів та мікропроцесорних засобів керування дозволяє значно підвищити точність та швидкодію таких систем.

Таким чином, стабілізація є невід’ємною складовою багатьох сучасних технічних комплексів. Її ефективна реалізація забезпечує підвищення точності роботи обладнання, зменшення впливу зовнішніх факторів та підвищення загальної надійності функціонування автоматизованих систем.

1.1.1 Застосування систем стабілізації

Системи стабілізації широко використовуються в різних галузях техніки, де необхідно забезпечити точне підтримання положення, орієнтації або параметрів руху об’єкта [6]. Їх застосування особливо актуальне в умовах, коли на об’єкт діють зовнішні збурення, що можуть призводити до небажаних коливань або відхилень від заданого стану.

Однією з важливих сфер використання систем стабілізації є авіаційна техніка [9]. У літальних апаратах стабілізаційні системи забезпечують підтримання заданого курсу, кута нахилу та висоти польоту. Завдяки таким системам значно підвищується безпека польотів, а також зменшується навантаження на пілота. Крім того, стабілізаційні платформи застосовуються в авіаційних тренажерах, які використовуються для підготовки пілотів і відтворюють реальні умови польоту. Типовий приклад сучасного авіаційного тренажера, побудованого на базі платформи Стюарта, наведено на рис. 1.1 [9, 10].

					ДП ПГ-21.14.1730.01.001 ПЗ	Арк.
						12
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		



Рисунок 1.1 – Авіаційний тренажер на базі паралельної кінематики (гексапода)

Важливу роль системи стабілізації відіграють у морській інженерії [11]. На судах і морських платформах вони застосовуються для компенсації хитами, яка виникає під впливом хвиль та вітру. Це дозволяє підвищити точність виконання вантажно-розвантажувальних операцій, а також забезпечити стабільну роботу різноманітного обладнання, встановленого на борту [12]. На рис. 1.2 зображено зовнішній вигляд морського крана, конструкція якого передбачає використання системи активної стабілізації (компенсації хитами) [2].

У сучасній робототехніці системи стабілізації використовуються для керування рухом маніпуляторів і мобільних роботів [3,6]. Вони забезпечують точне позиціонування робочих органів, що є особливо важливим під час виконання складних технологічних операцій. Застосування стабілізаційних алгоритмів дозволяє компенсувати вплив зовнішніх збурень та підвищити точність роботи роботизованих систем.

На рис. 1.3 зображено приклад застосування механізму паралельної структури (дельта-робота) для високоточного позиціонування [6, 10].

					ДП ПГ-21.14.1730.01.001 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		13



Рисунок 1.2 – Морський вантажний кран компанії Liebherr із системою динамічної стабілізації



Рисунок 1.3 – Промисловий маніпулятор паралельної кінематики (дельта-робот) компанії Youpeng Robotics

Ще однією важливою сферою застосування є медична техніка [6]. У хірургічних роботизованих комплексах стабілізаційні механізми дозволяють забезпечити надзвичайно точне позиціонування інструментів під час проведення операцій. Це дає можливість мінімізувати вплив людського фактора та підвищити якість медичних процедур. На рис. 1.4 зображено

					ДП ПГ-21.14.1730.01.001 ПЗ	Арк.
						14
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

загальний вигляд роботизованого хірургічного комплексу da Vinci компанії Intuitive Surgical [6], який використовує багатокоординатну систему стабілізації для прецизійних маніпуляцій.

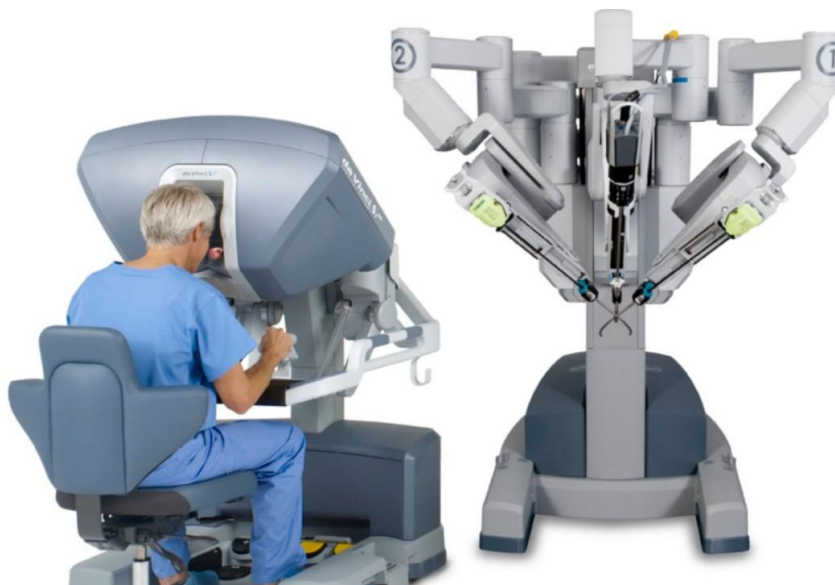


Рисунок 1.4 – Роботизований хірургічний комплекс da Vinci (Intuitive Surgical) із високоточним позиціонуванням

Крім того, системи стабілізації широко застосовуються в телекомунікаційних системах, зокрема в антенних установках супутникового зв'язку [7]. У таких системах стабілізаційні механізми забезпечують точне наведення антени на супутник навіть у випадку руху платформи або транспортного засобу. Конструкцію стабілізованої антенної установки супутникового зв'язку компанії Intellian [7] зображено на рис. 1.5.

Таким чином, системи стабілізації є важливою складовою багатьох сучасних технічних комплексів. Їх використання дозволяє забезпечити високу точність роботи обладнання, підвищити ефективність технологічних процесів та розширити можливості автоматизації у різних галузях промисловості.



Рисунок 1.5 – Стабілізована антенна установка супутникового зв'язку компанії Intellian

1.1.2 Проблеми стабілізації рухомих платформ

Розробка та впровадження ефективної стабілізації для рухомих платформ неминуче впирається у низку серйозних технічних викликів. Насамперед, мова йде про дестабілізуючий вплив зовнішнього середовища: механічні вібрації, постійні коливання та змінні навантаження створюють динамічний шум, який система керування має відфільтровувати та компенсувати в реальному часі [5]. Ситуація ускладнюється ще й тим, що математичний опис багатокоординатних механізмів є надзвичайно громіздким [9]. Для платформ із кількома ступенями вільності характерна складна кінематика, де зміна стану бодай одного виконавчого органу миттєво позначається на всій конструкції. Це вимагає використання не просто стандартних рішень, а спеціалізованих обчислювальних алгоритмів, здатних враховувати взаємозалежність усіх елементів системи для точного позиціонування об'єкта [9, 10].

Також значний вплив на ефективність стабілізації має точність вимірювальних сенсорів [13-14]. Датчики, які використовуються для

					ДП ПГ-21.14.1730.01.001 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		16

визначення просторового положення, можуть мати похибки вимірювання, шум сигналу або затримку передачі даних. У випадку швидких змін положення навіть незначні помилки вимірювання можуть призводити до накопичення похибки та зниження точності стабілізації.

Окрему групу викликів складають часові затримки, що виникають на різних рівнях функціонування системи [7]. Оскільки процес стабілізації є багатоетапним – від первинного вимірювання параметрів сенсорами до кінцевого відпрацювання команди приводами – накопичення мікрозатримок під час обробки сигналів стає практично неминучим. Для високодинамічних систем це критично, адже навіть мінімальний лаг у часі може спровокувати автоколивання або призвести до повної втрати стійкості [3]. Крім того, не слід ігнорувати суто фізичні обмеження виконавчих механізмів [5]. Кожен привід має власну межу за швидкістю переміщення, крутним моментом та точністю позиціонування. У ситуаціях, коли платформа зазнає різких зовнішніх впливів, саме ці механічні ліміти часто стають «вузьким місцем», суттєво ускладнюючи швидку та адекватну компенсацію збурень [5].

У роботі [11] показано, що при компенсації траєкторій океанічних хвиль критичною проблемою є нелінійність відгуку приводів при великих амплітудах збурень. Як рішення автори пропонують використання алгоритмів прогнозування руху, що дозволяють компенсувати інерційність системи за рахунок випереджувального формування керуючих сигналів.

Проблема накопичення похибок орієнтації через дрейф гіроскопа та шуми акселерометра детально проаналізована у дослідженні [14]. Автор пропонує використовувати ефективний градієнтний фільтр (фільтр Меджвіка), який дозволяє обчислювати орієнтацію в реальному часі з низьким обчислювальним навантаженням, що фактично вирішує проблему мікрозатримок на рівні обробки даних.

Аналіз сучасних наукових публікацій показав значний інтерес дослідників до проблем стабілізації рухомих об'єктів та платформ із паралельною кінематикою.

					ДП ПГ-21.14.1730.01.001 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		17

У дослідженні [2] розроблено систему стабілізації на базі AHRS-модулів для наземних об'єктів, що дозволяє підвищити точність наведення в умовах нерівномірного рельєфу.

Робота [4] присвячена аналізу ефективності стабілізації обладнання мобільних міні-роботів, де акцентується увага на адаптації алгоритмів до складних профілів місцевості.

Додатково у праці [15] розглянуто методи оптимізації динаміки платформ паралельної кінематики, що дозволяє мінімізувати вплив інерційних перевантажень на точність позиціонування.

Таким чином, створення ефективної системи стабілізації вимагає комплексного врахування динамічних властивостей механічної системи, характеристик сенсорів та можливостей виконавчих механізмів. Для досягнення необхідної точності та швидкодії застосовуються сучасні алгоритми керування та цифрові методи обробки сигналів, що дозволяє значно підвищити ефективність роботи таких систем.

1.1.3 Вимоги до систем динамічної стабілізації

Ефективність функціонування систем динамічної стабілізації значною мірою визначається вимогами, які ставляться до їх конструкції та алгоритмів керування [1]. Оскільки такі системи працюють у складних умовах і повинні реагувати на зміну зовнішніх факторів у режимі реального часу, до них висувається ряд технічних і функціональних вимог.

Однією з основних вимог є висока точність стабілізації [1, 3]. Система повинна забезпечувати мінімальне відхилення положення або орієнтації об'єкта від заданих параметрів навіть за наявності зовнішніх збурень. Це особливо важливо для технічних комплексів, у яких точність позиціонування безпосередньо впливає на якість виконання технологічних операцій.

Не менш важливою характеристикою є швидкодія системи [3]. Система стабілізації повинна оперативно реагувати на зміни зовнішніх умов і швидко

					ДП ПГ-21.14.1730.01.001 ПЗ	Арк.
						18
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

формувати керуючі сигнали для компенсації виникаючих відхилень. Недостатня швидкість реагування може призводити до появи коливань або нестійких режимів роботи, що негативно впливає на ефективність функціонування всієї системи [1].

Ще однією важливою вимогою є стійкість системи керування. Під стійкістю розуміють здатність системи зберігати стабільний режим роботи навіть у випадку значних зовнішніх впливів або зміни параметрів об'єкта керування. Забезпечення стійкості є одним із ключових завдань під час розробки алгоритмів керування та вибору параметрів системи [5].

Важливу роль також відіграє надійність функціонування системи стабілізації [3,8]. Оскільки такі системи часто використовуються в критично важливих технічних комплексах, вони повинні забезпечувати стабільну роботу протягом тривалого часу без відмов і збоїв. Для цього застосовуються високонадійні електронні компоненти, а також спеціальні методи контролю та діагностики стану системи.

Крім того, сучасні системи стабілізації повинні мати достатню гнучкість і можливість адаптації до різних умов експлуатації [7,8]. Це досягається шляхом використання програмно-апаратних засобів керування, які дозволяють змінювати параметри роботи системи без внесення змін у її механічну конструкцію.

Таким чином, ефективна система динамічної стабілізації повинна поєднувати наступні вимоги:

1. високу точність: забезпечення мінімального відхилення від заданої орієнтації об'єкта незалежно від інтенсивності зовнішніх збурень;
2. швидкодію: здатність системи оперативно формувати керуючий вплив для компенсації відхилень у режимі реального часу ;
3. стійкість: гарантування стабільної роботи без виникнення автоколивань навіть при значних змінах параметрів об'єкта;
4. надійність: безперебійне функціонування протягом тривалого часу завдяки використанню якісних компонентів та систем діагностики;

					ДП ПГ-21.14.1730.01.001 ПЗ	Арк.
						19
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

5. гнучкість та адаптивність: можливість програмного налаштування параметрів під різні умови експлуатації без механічного втручання.

Виконання цих вимог є необхідною умовою для забезпечення стабільного функціонування сучасних технічних систем у складних умовах експлуатації.

1.1.4 Класифікація платформ із паралельною кінематичною структурою

Платформи з паралельною кінематикою є одним із перспективних напрямів розвитку мехатронних систем та роботизованих механізмів. На відміну від послідовних маніпуляторів, у яких виконавчі ланки з'єднані послідовно, паралельні механізми мають декілька кінематичних ланцюгів, що одночасно з'єднують рухому платформу з нерухомою основою [9,16]. Така конструкція дозволяє досягти високої жорсткості, точності позиціонування та рівномірного розподілу навантаження між приводами [9, 10].

Класичними прикладами механізмів із паралельною кінематикою є платформа Стюарта (гексапод) [9-10], яка забезпечує рух за шістьма ступенями вільності, а також дельта-роботи, що відзначаються надвисокою швидкістю переміщення робочого органа. До цього ж класу належать триподи та різноманітні біполярні механізми наведення [10].

Завдяки своїм конструктивним особливостям платформи з паралельною кінематикою широко використовуються в різних галузях техніки, зокрема у робототехніці, авіаційних тренажерах, системах стабілізації, а також у високоточних промислових установках [6, 10]. Однак, існує значна кількість різновидів таких механізмів, які відрізняються між собою типом приводів, кінематичною схемою та конструктивною реалізацією.

					ДП ПГ-21.14.1730.01.001 ПЗ	Арк.
						20
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Для зручності аналізу та порівняння різні типи платформ із паралельною кінематикою прийнято класифікувати за кількома основними ознаками [9, 10]:

- тип виконавчих механізмів;
- конструкція кінематичних ланцюгів;
- кількість ступенів вільності;
- спосіб передачі руху від приводів до рухомої платформи.

Такий підхід дозволяє систематизувати існуючі технічні рішення та визначити їх переваги й недоліки залежно від конкретних умов застосування.

Найбільш поширеною є класифікація за типом приводів, яка передбачає поділ платформ на системи з лінійними та роторними виконавчими механізмами [10]. Кожен із цих варіантів має свої конструктивні особливості та використовується залежно від вимог до точності, швидкодії та габаритів механізму.

1.1.5 Платформи з лінійними приводами

Одним із найбільш поширених варіантів реалізації платформ із паралельною кінематикою є конструкції, у яких використовуються лінійні приводи [10]. У таких системах зміна положення рухомої платформи здійснюється шляхом зміни довжини виконавчих ланок, які зазвичай реалізуються у вигляді телескопічних або гвинтових механізмів [9]. Подовження або скорочення цих ланок призводить до зміни просторового положення платформи.

Подібна схема широко використовується в класичних реалізаціях платформи Стюарта, загальний вигляд якої зображено на рис. 1.6 [9, 10].

					ДП ПГ-21.14.1730.01.001 ПЗ	Арк.
						21
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		



Рисунок 1.6 – Загальний вигляд платформи Стюарта з лінійними приводами

У таких конструкціях зазвичай застосовується шість лінійних приводів, які з'єднують основу з рухомою платформою за допомогою шарнірних з'єднань. Кожен привід може змінювати свою довжину незалежно від інших, що дозволяє забезпечити переміщення платформи за шістьма ступенями вільності.

Перевагою систем із лінійними приводами є відносна простота кінематичної схеми та висока точність позиціонування [9]. Завдяки прямому перетворенню обертального руху двигуна в поступальний рух виконавчої ланки такі системи дозволяють досягати високої точності керування положенням платформи.

Разом із тим подібні конструкції мають і певні недоліки. Основним з них є відносно великі габарити приводів, що може ускладнювати розміщення механізму в обмеженому просторі. Крім того, використання телескопічних механізмів або гвинтових передач може призводити до збільшення маси всієї конструкції [5,10].

Незважаючи на ці особливості, платформи з лінійними приводами широко використовуються в різних технічних системах, де необхідна висока точність позиціонування та здатність витримувати значні навантаження.

					ДП ПГ-21.14.1730.01.001 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		22

1.1.6 Платформи з роторними приводами

Іншим поширеним варіантом реалізації платформ із паралельною кінематикою є системи, у яких використовуються роторні приводи [10]. У таких механізмах переміщення рухомої платформи здійснюється за рахунок обертання важелів або інших елементів, які передають рух від електродвигунів до кінематичних ланцюгів [9]. На відміну від систем із лінійними приводами, де змінюється довжина виконавчих ланок, у роторних конструкціях керування положенням платформи здійснюється шляхом зміни кута повороту приводних елементів [10]. Кінематична схема та загальний вигляд платформи з роторними приводами представлені на рис. 1.7.

Подібні механізми часто використовуються в компактних мехатронних системах і роботизованих установках [6]. Виконавчі двигуни в таких платформах, як правило, розташовуються безпосередньо на нерухомій основі, а передача руху до рухомої платформи здійснюється через систему важелів і тяг. Завдяки такому розміщенню приводи не переміщуються разом із платформою, що дозволяє зменшити інерційні навантаження та підвищити швидкодію системи [5].

Однією з важливих переваг роторних платформ є їх компактність [8,10]. У порівнянні з лінійними системами вони зазвичай займають менше простору, оскільки відсутня необхідність використання довгих телескопічних механізмів. Це робить їх зручними для використання в лабораторних установках, навчальних макетах та різноманітних експериментальних системах.

Крім того, роторні системи добре поєднуються із сучасними сервоприводами, які забезпечують точне керування кутом повороту виконавчих механізмів [6]. Сучасні сервоприводи мають вбудовані системи зворотного зв'язку, що дозволяє підтримувати необхідне положення з високою точністю [7,8]. Завдяки цьому значно спрощується реалізація

					ДП ПГ-21.14.1730.01.001 ПЗ	Арк.
						23
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

системи керування, оскільки основне завдання контролера зводиться до формування відповідних керуючих сигналів.

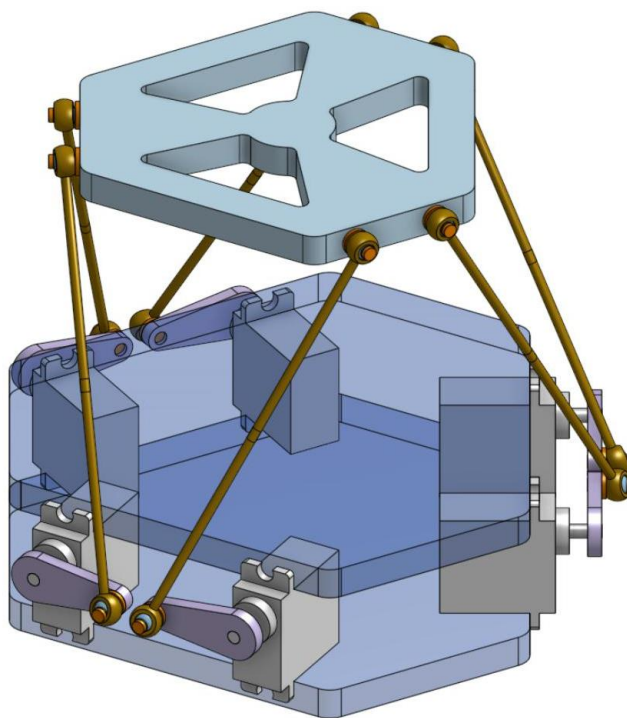


Рисунок 1.7 – Платформа паралельної кінематики на базі роторних приводів

Разом із тим роторні конструкції мають і певні особливості, які необхідно враховувати під час проєктування. Оскільки передача руху здійснюється через систему важелів, кінематичні співвідношення між кутами повороту приводів і положенням платформи можуть бути досить складними [9,10]. Це вимагає використання відповідних математичних моделей та алгоритмів для розрахунку параметрів руху.

Таким чином, незважаючи на певні недоліки, платформи з роторними приводами широко використовуються в системах стабілізації завдяки простоті реалізації, надійності та можливості забезпечення необхідних характеристик керування.

					ДП ПГ-21.14.1730.01.001 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		24

1.1.7 Порівняння платформ з лінійними та роторними приводами

Платформи з лінійними та роторними приводами відрізняються насамперед габаритними характеристиками, точністю позиціонування, динамічними властивостями та складністю реалізації. Лінійні приводи забезпечують високу точність керування та здатність працювати зі значними навантаженнями, що обумовлює їх широке застосування у промислових і високоточних системах. Водночас такі конструкції зазвичай характеризуються більшими габаритами та масою.

У табл. 1.1 наведено порівняння основних характеристик різних типів платформ [10].

Таблиця 1.1 Порівняння платформ з різним типом приводу

Характеристика	Платформи з лінійними приводами	Платформи з роторними приводами
Тип руху виконавчих механізмів	Поступальний	Обертальний
Конструктивні габарити	Порівняно великі	Більш компактні
Точність позиціонування	Висока	Середня або висока
Складність кінематики	Відносно проста	Більш складна
Інерційні навантаження	Більші	Менші
Сфера застосування	Промислові установки, тренажери	Робототехніка, навчальні макети

Як видно з табл.1.1, обидва типи платформ мають свої переваги та обмеження.

Роторні приводи дозволяють створювати більш компактні та легкі системи, а розміщення виконавчих механізмів на нерухомій основі сприяє зменшенню інерційних навантажень і покращенню динамічних характеристик. Проте кінематична схема таких платформ є складнішою, а досягнення високої точності потребує більш ретельного налаштування системи керування.

					ДП ПГ-21.14.1730.01.001 ПЗ	Арк.
						25
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Отже, вибір типу приводу визначається вимогами конкретного застосування. Лінійні приводи є доцільними для високоточних промислових комплексів, тоді як роторні приводи забезпечують кращий компроміс між компактністю, швидкістю та вартістю реалізації, що робить їх перспективними для робототехнічних і експериментальних систем.

1.2 Сучасні системи керування та сенсорні технології

Сучасні системи динамічної стабілізації є складними технічними комплексами, що поєднують механічні, електронні та програмні компоненти [7-8,13]. Структурна схема сучасної системи стабілізації, що ілюструє ці принципи, наведена на рисунку 1.8. Ефективність функціонування таких систем значною мірою залежить від можливостей керуючих пристроїв, точності вимірювальних сенсорів та швидкодії виконавчих механізмів. Завдяки розвитку мікроелектроніки та цифрових технологій стало можливим створення компактних систем керування, здатних працювати в режимі реального часу та виконувати складні обчислення [7].

Основою більшості сучасних систем стабілізації є мікроконтролерні або мікропроцесорні пристрої, які виконують функції обробки даних, формування керуючих сигналів та взаємодії з різними периферійними модулями [8]. Такі пристрої забезпечують реалізацію алгоритмів керування, що дозволяють компенсувати вплив зовнішніх збурень та підтримувати задане положення об'єкта [1, 7].

Не менш важливу роль відіграють сенсорні системи, які забезпечують отримання інформації про поточний стан об'єкта [13]. У системах стабілізації найчастіше використовуються інерційні датчики (IMU), зокрема акселерометри та гіроскопи, що дозволяють визначати кутові швидкості та прискорення в різних напрямках [13]. Отримані дані обробляються

					ДП ПГ-21.14.1730.01.001 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		26

мікроконтролером (наприклад, серії ATmega328P, STM32 або ESP32), який виступає центральним керуючим пристроєм, після чого формуються відповідні керуючі сигнали для виконавчих механізмів [8].



Рисунок 1.8 – структурна схема сучасної системи стабілізації

Сучасні підходи до обробки даних з інерційних модулів (IMU) активно еволюціонують у напрямку використання комбінованих алгоритмів фільтрації для досягнення максимальної точності. Як зазначається у нещодавніх дослідженнях [16], поєднання класичних фільтрів Калмана з адаптивними методами обробки дозволяє суттєво мінімізувати похибки вимірювань, спричинені високим рівнем шумів сенсорів. Така інтеграція стає критичною для систем, що функціонують у динамічних умовах, забезпечуючи надійне визначення просторового положення об'єкта [17].

Крім того, важливою складовою сучасних систем стабілізації є алгоритми обробки сенсорної інформації [14]. Через наявність шумів і похибок вимірювання дані, отримані від сенсорів, потребують додаткової фільтрації та обробки. Для цього застосовуються різноманітні цифрові

методи обробки сигналів, що дозволяють підвищити точність визначення просторового положення об'єкта [12].

Важливим аспектом забезпечення високої швидкодії стабілізаційних систем є мінімізація латентності в контурах керування. Впровадження передових стратегій керування на базі сучасних вбудованих контролерів дозволяє досягти стабільної роботи циклів керування із затримкою до 2 мс [18]. Крім того, застосування адаптивних алгоритмів, що реалізуються безпосередньо на мікроконтролері, дозволяє системам автоматично коригувати свої параметри відповідно до змін зовнішніх збурень [19].

Таким чином, сучасні системи стабілізації базуються на тісній взаємодії мікроконтролерних засобів керування, сенсорних технологій та виконавчих механізмів [7, 8]. Комплексне використання цих елементів дозволяє створювати ефективні автоматизовані системи, здатні забезпечувати стабільну роботу технічних об'єктів у складних умовах експлуатації.

1.3 Мікроконтролерні системи керування

У системах стабілізації мікроконтролери використовуються для реалізації алгоритмів керування, обробки сигналів від сенсорів та формування керуючих впливів на виконавчі механізми [7, 8]. Під час роботи система постійно отримує інформацію про поточний стан об'єкта, аналізує її та визначає необхідні дії для підтримання заданих параметрів.

Сучасні мікроконтролери мають широкий набір апаратних можливостей, які значно спрощують реалізацію систем керування [8]. До таких можливостей належать таймери, аналого-цифрові перетворювачі, інтерфейси зв'язку та модулі широтно-імпульсної модуляції. Використання цих функціональних блоків дозволяє забезпечити точне керування приводами та ефективну обробку сигналів від сенсорів [8].

					ДП ПГ-21.14.1730.01.001 ПЗ	Арк.
						28
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Ще однією важливою перевагою мікроконтролерних систем є їх висока енергоефективність і компактність [8]. Це робить їх придатними для використання в різноманітних вбудованих системах, де важливими є невеликі габарити та низьке енергоспоживання.

Таким чином, мікроконтролерні системи керування відіграють ключову роль у реалізації сучасних автоматизованих комплексів [5, 6]. Вони забезпечують необхідну швидкодію, гнучкість налаштування та можливість реалізації складних алгоритмів керування, що є важливим для ефективної роботи систем стабілізації [8].

Для вибору оптимального обчислювального модуля в системах динамічної стабілізації необхідно провести аналіз існуючих рішень, що широко застосовуються в сучасних автоматизованих системах (табл. 1.3) [8].

Таблиця 1.2 Порівняльна характеристика сучасних обчислювальних модулів для систем керування

Модель / Серія	Архітектура	Ключові особливості	Сфера застосування (останні 5-10 років)
STM32 (F4/F7)	ARM Cortex-M4/M7	Висока частота (до 216+ МГц), наявність FPU для обчислень із плаваючою комою.	Промислові контролери, складні роботизовані системи, БПЛА.
ESP32	Xtensa Dual-Core	Вбудовані інтерфейси Wi-Fi/Bluetooth, висока енергоефективність при високій швидкодії.	ІоТ-пристрої, бездротові системи моніторингу та керування.
Raspberry Pi Pico (RP2040)	ARM Cortex-M0+	Гнучка система програмованого вводу-виводу (PIO), два ядра.	Системи швидкого прототипування, вбудована автоматика[8].
ATmega328P (Arduino)	8-bit AVR	Простота архітектури, надійність, низька вартість.	Навчальні макети, прості системи керування, експериментальні установки.

Як видно з табл.1.2, для реалізації високонавантажених алгоритмів стабілізації (наприклад, із використанням фільтра Калмана) доцільно

використовувати 32-бітні рішення серії STM32 [8]. Водночас для створення експериментальних макетів платформи Стюарта, де пріоритетом є надійність і швидкість розробки, цілком достатньо можливостей мікроконтролера ATmega328P [8].

1.3.1 Інерційні сенсорні системи

Для забезпечення ефективної роботи систем стабілізації необхідно постійно отримувати інформацію про просторове положення об'єкта та його динамічні характеристики. Ця задача вирішується за допомогою сенсорних систем, які виконують функцію вимірювання параметрів руху. Серед різноманітних типів датчиків у системах стабілізації найбільш поширеними є інерційні сенсори [13].

Інерційні сенсорні системи призначені для визначення прискорень, кутових швидкостей і змін положення об'єкта у просторі [13]. До їх складу зазвичай входять акселерометри та гіроскопи, які дозволяють вимірювати відповідно лінійні прискорення та кутові швидкості. Поєднання цих датчиків дає можливість оцінювати орієнтацію об'єкта відносно просторових осей [14].

Сучасні інерційні сенсори часто реалізуються у вигляді інтегрованих мікроелектромеханічних систем [13]. Такі пристрої відрізняються невеликими габаритами, низьким енергоспоживанням і достатньо високою точністю вимірювань. Завдяки цим властивостям вони широко використовуються в мобільній електроніці, робототехніці, безпілотних літальних апаратах та різноманітних системах стабілізації [6, 13].

Важливою особливістю інерційних сенсорів є можливість отримання даних у режимі реального часу [1,7,13]. Це дозволяє системі керування оперативно реагувати на зміну положення об'єкта та формувати необхідні керуючі впливи для компенсації відхилень. Разом із тим результати

					ДП ПГ-21.14.1730.01.001 ПЗ	Арк.
						30
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

вимірювань можуть містити шум або похибки, що потребує застосування спеціальних методів обробки сигналів [14].

Для реалізації сучасних систем стабілізації за останні 5–10 років найбільш затребуваними стали цифрові інерційні модулі (IMU), які базуються на технології MEMS [13].

Найбільш поширеними моделями інерційних сенсорів є:

- MPU-6050 (InvenSense) [13]: 6-осьовий модуль, що поєднує в одному корпусі 3-осьовий гіроскоп та 3-осьовий акселерометр, а також містить вбудований апаратний процесор цифрової обробки сигналів (DMP);
- MPU-9250 (InvenSense) [13, 14]: 9-осьовий інерційний модуль, який на додачу до функцій попередньої моделі містить магнітометр, що дозволяє виконувати повну оцінку орієнтації об'єкта в просторі з компенсацією дрейфу курсу;
- Bosch BNO055 [14]: інтелектуальний 9-осьовий сенсор, особливістю якого є вбудована логіка об'єднання даних (sensor fusion), що дозволяє отримувати готові дані про орієнтацію у вигляді кватерніонів або кутів Ейлера;
- Bosch BMI270 [13]: надсучасний малошумний інерційний сенсор, оптимізований для мобільних пристроїв та робототехнічних систем, що потребують високої частоти оновлення даних.

Отже, сучасні інерційні сенсори є основним джерелом даних про стан рухомих об'єктів у системах стабілізації. Їх використання забезпечує можливість оперативного формування керуючих впливів, а розвиток MEMS-технологій сприяє створенню компактних і високоефективних систем керування для широкого спектра практичних застосувань.

					ДП ПГ-21.14.1730.01.001 ПЗ	Арк.
						31
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

1.3.2 Виконавчі механізми систем стабілізації

Виконавчі механізми є завершальною ланкою системи керування та призначені для реалізації керуючих впливів, сформованих обчислювальним пристроєм [1,6]. Саме вони безпосередньо впливають на положення або рух об'єкта, забезпечуючи компенсацію відхилень і підтримання заданих параметрів.

У системах стабілізації можуть використовуватися різні типи приводів, зокрема електродвигуни постійного та змінного струму, крокові двигуни та сервоприводи [6,8,10]. Вибір конкретного типу приводу залежить від вимог до точності позиціонування, швидкодії, потужності та конструктивних особливостей механізму.

Одним із найбільш поширених варіантів у сучасних мехатронних системах є використання сервоприводів, типову конструкцію яких зображено на рис. 1.9 [6, 8].

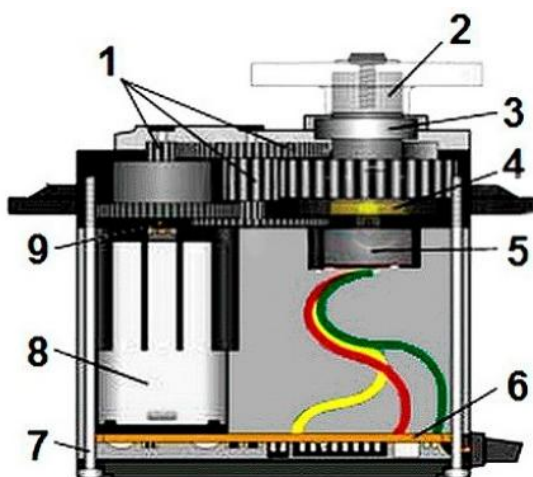


Рисунок 1.9 – Конструкція сервопривода з металевим редуктором та системою зворотного зв'язку

Типовий сервопривод складається з електродвигуна постійного струму (8), на валу якого закріплена шестерня (9). Через багатоступеневий редуктор

					ДП ПГ-21.14.1730.01.001 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		32

(1) крутний момент передається на вихідний вал (2). Для забезпечення точності та плавності ходу вал підтримується підшипником (3) та втулкою (4). Керування роботою двигуна здійснюється за допомогою електронної плати (6), а замикання контуру зворотного зв'язку по положенню забезпечується спеціальним датчиком (5). Збирання корпусу механізму здійснюється за допомогою гвинтів (7).

Такі пристрої поєднують електродвигун, редуктор і систему зворотного зв'язку, що дозволяє точно контролювати кутове положення виконавчого механізму [8]. Завдяки наявності внутрішньої системи керування сервоприводи здатні швидко реагувати на зміни керуючих сигналів [6].

Важливою характеристикою виконавчих механізмів є їх здатність забезпечувати необхідний крутний момент і швидкість переміщення [5]. У системах стабілізації ці параметри повинні бути достатніми для компенсації зовнішніх збурень і підтримання стабільного положення платформи [1, 5].

Таким чином, виконавчі механізми відіграють ключову роль у функціонуванні систем стабілізації, оскільки саме вони реалізують керуючі сигнали, сформовані системою керування. Правильний вибір та узгодження характеристик приводів із параметрами механічної системи є важливою умовою ефективної роботи всієї системи.

Проведений аналіз показав, що системи динамічної стабілізації є важливою складовою сучасних технічних комплексів, які функціонують в умовах дії зовнішніх збурень та потребують високої точності підтримання просторового положення. Особливий інтерес для реалізації таких систем становить платформа Стюарта, яка завдяки паралельній кінематичній структурі забезпечує шість ступенів свободи, високу жорсткість конструкції та можливість компенсації просторових переміщень і кутових відхилень.

Аналіз існуючих технічних рішень показав, що ефективність систем стабілізації значною мірою залежить від узгодженої роботи сенсорних модулів, обчислювальних засобів та виконавчих механізмів. При цьому

					ДП ПГ-21.14.1730.01.001 ПЗ	Арк.
						33
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

складність динаміки платформи Стюарта, наявність взаємозв'язків між координатами руху та вплив зовнішніх збурень вимагають застосування спеціалізованих алгоритмів автоматичного керування та проведення попереднього математичного моделювання.

Отже, для забезпечення необхідної точності, швидкодії та стійкості роботи рухомої платформи актуальною є задача розробки автоматизованої системи динамічної стабілізації на базі платформи Стюарта. Розв'язання цієї задачі передбачає дослідження конструктивних особливостей платформи, побудову її математичної моделі, аналіз динамічних властивостей, синтез системи керування та перевірку її ефективності засобами комп'ютерного моделювання. Саме цим питанням присвячено наступний розділ дипломної роботи.

Висновки до розділу 1

На основі проведеного аналізу теоретичних засад побудови стабілізаційних систем та огляду існуючих технічних рішень у першому розділі встановлено наступне:

1. стабілізація є критичним процесом для функціонування сучасних автоматизованих об'єктів у динамічному середовищі. Встановлено, що найбільш ефективною є реалізація стабілізації за принципом зворотного зв'язку в межах замкненого контуру керування;
2. механізми з паралельною кінематикою визначено як найбільш доцільну архітектуру для задач прецизійного позиціонування. Висока жорсткість конструкції та можливість реалізації багатьох ступенів вільності дозволяють забезпечити високу точність стабілізації незалежно від зовнішніх збурень;
3. сучасна елементна база, що включає інерційні сенсори (IMU) та мікроконтролерні засоби керування, дозволяє реалізувати складні

					ДП ПГ-21.14.1730.01.001 ПЗ	Арк.
						34
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

алгоритми фільтрації та обробки даних у режимі реального часу, що гарантує необхідну швидкість системи;

4. аналіз галузей застосування (від авіації до медицини) підтвердив високу затребуваність платформ паралельної структури, що обґрунтовує актуальність розробки компактної стабілізаційної установки.

Результати проведеного теоретичного аналізу є фундаментом для подальшої розробки математичної моделі та практичної реалізації системи стабілізації, що розглядатимуться у наступних розділах роботи.

					ДП ПГ-21.14.1730.01.001 ПЗ	Арк.
						35
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

РОЗДІЛ 2

РОЗРОБКА АВТОМАТИЗОВАНОЇ СИСТЕМИ ДИНАМІЧНОЇ СТАБІЛІЗАЦІЇ

2.1 Постановка завдання та вимоги до системи динамічної стабілізації

Підставою для розробки є завдання на виконання дипломного проєкту. Об'єктом розробки є макет автоматизованої системи динамічної стабілізації на базі механізму з паралельною кінематикою (платформи Стюарта).

Головною метою створення зазначеної системи є забезпечення просторової орієнтації та утримання цільового (горизонтального) положення рухомої платформи з корисним навантаженням в умовах дії зовнішніх збурень у режимі реального часу.

Завдання на розробку Для досягнення поставленої мети необхідно виконати наступні етапи:

- Розробити загальну структурну та просторову кінематичну схеми платформи.
- Здійснити вибір та обґрунтування оптимальної елементної бази (мікроконтролер, інерційні сенсори, виконавчі механізми).
- Розробити електричну принципову схему системи автоматизованого керування.
- Побудувати математичну модель оберненої кінематики та дослідити роботу алгоритмів стабілізації (ПД-регулятора) у середовищі MATLAB/Simulink.
- Створити програмно-алгоритмічне забезпечення для керуючого мікроконтролера.

					ДП ПГ-21.14.1730.01.001 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		36

Технічні та функціональні вимоги:

Розроблюваний апаратно-програмний комплекс повинен відповідати таким основним характеристикам:

- Кількість ступенів свободи: 6 (6-DOF).
- Геометрія макета: радіус бази – 100 мм, радіус платформи – 100 мм, довжина важеля – 35 мм, довжина тяги – 85 мм.
- Робочий діапазон відхилень: $\pm 15^\circ$.
- Апаратна база: мікроконтролер ATmega328P, інерційний модуль MPU-6050.
- Виконавчі механізми: 6 роторних сервоприводів TowerPro MG996R (керування ШІМ через драйвер PCA9685).
- Точність стабілізації (залишкова похибка): не більше 2–3°.
- Частота оновлення системи: не менше 100 Гц.
- Середовище моделювання: MATLAB/Simulink.

Умови експлуатації:

- Температура навколишнього середовища: від +10 до +35 °C (лабораторні умови).
- Відносна вологість повітря: не більше 80%.
- Режим роботи: тривалий, з можливістю підключення до персонального комп'ютера для налагодження та моніторингу телеметрії.

2.2 Конструктивні особливості платформи Стюарта

Механізми з паралельною кінематикою, зокрема класична шестикоординатна платформа Стюарта (гексапод) [9, 10], суттєво відрізняються за своєю архітектурою від традиційних послідовних промислових маніпуляторів. Їхня конструкція дозволяє досягти унікального поєднання високої жорсткості, точності позиціонування та здатності

					ДП ПГ-21.14.1730.01.001 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		37

витримувати значні динамічні навантаження, що є критично важливим для задач автоматичної стабілізації.

2.2.1 Загальна структура платформи Стюарта

Загальна структура платформи Стюарта складається з двох основних жорстких основ: нижньої нерухомої основи (бази) та верхньої рухомої платформи, на якій безпосередньо розміщується корисне навантаження або об'єкт стабілізації (наприклад, інерційний датчик). У розроблюваній системі обрано архітектуру з роторними виконавчими механізмами на базі серводвигунів постійного струму. Кожен кінематичний ланцюг містить виконавчий привід (жорстко закріплений на базі), металевий важіль-кривошип (качалку) та сполучну штангу (тягу). Ці дві площини просторово з'єднані між собою за допомогою шести незалежних кінематичних ланцюгів (див. рис. 2.1).

Передача руху в такій конструкції реалізується через систему шарнірних з'єднань: тяги кріпляться до важелів сервоприводів та до рухомої платформи за допомогою сферичних шарнірів із трьома ступенями свободи, а до рухомої платформи – за допомогою сферичних шарнірів із трьома ступенями свободи. Така конфігурація виключає виникнення паразитних крутних моментів (згину) у тілі самих тяг, перетворюючи їх на ідеальні стрижні, що працюють виключно на стиск і розтяг.

Оскільки кожна з шести штанг керується автономно власною системою привода, просторова орієнтація верхньої платформи однозначно задається вектором із шести кутів повороту валів серводвигунів. Зміна кута повороту хоча б одного двигуна призводить до просторової зміни положення всієї платформи. Математичний опис цієї схеми вимагає задання двох систем координат: глобальної нерухомої (в центрі бази) та локальної рухомої (в центрі мас верхньої платформи). Завдяки цьому система керування може

					ДП ПГ-21.14.1730.01.001 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		38

трансформувати бажані кути нахилу в конкретні сигнали позиціонування для кожного двигуна.

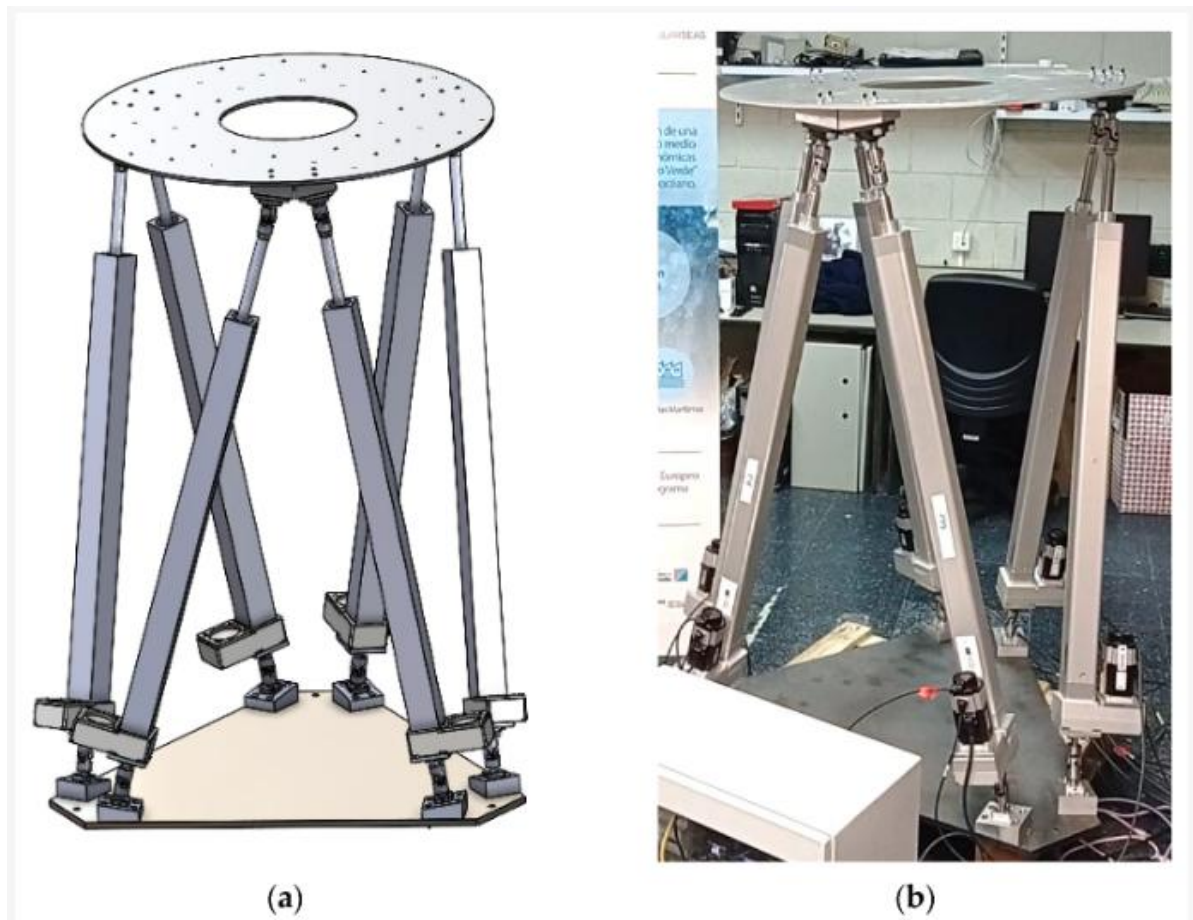


Рисунок 2.1 – Загальна структура платформи Стюарта [20]

Ключова особливість паралельної кінематики полягає в тому, що зовнішнє динамічне навантаження розподіляється між усіма шістьма ланцюгами одночасно, а похибки виготовлення та люфти окремих шарнірів не акумулюються (на відміну від послідовних маніпуляторів), а усереднюються, що забезпечує надзвичайно високу точність позиціонування [9, 10].

Важливою перевагою обраної роторної архітектури є те, що найбільш масивні елементи системи (виконавчі сервоприводи) закріплені стаціонарно на нерухомій основі. Рухома маса системи обмежується лише вагою верхньої платформи та легких сполучних тяг. Це дозволяє досягти великих значень

					ДП ПГ-21.14.1730.01.001 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		39

прискорень, мінімальної інерційності та високої швидкодії контуру динамічної стабілізації при відпрацюванні високочастотних збурень [10, 20].

2.2.2 Кінематична структура платформи Стюарта

Кінематична структура класичної платформи Стюарта забезпечує рухомому об'єкту повні шість ступенів свободи (6-DOF) у просторі. Вони поділяються на три лінійні (поступальні) переміщення вздовж осей X , Y , Z та три кутові (обертальні) переміщення навколо цих осей, які в навігації традиційно називають креном (Roll), тангажем (Pitch) та рисканням (Yaw). Просторовий рух рухомої платформи є результатом складної узгодженої дії — зміни довжин або кутів повороту всіх шести незалежних приводів (рис. 2.2) [21].

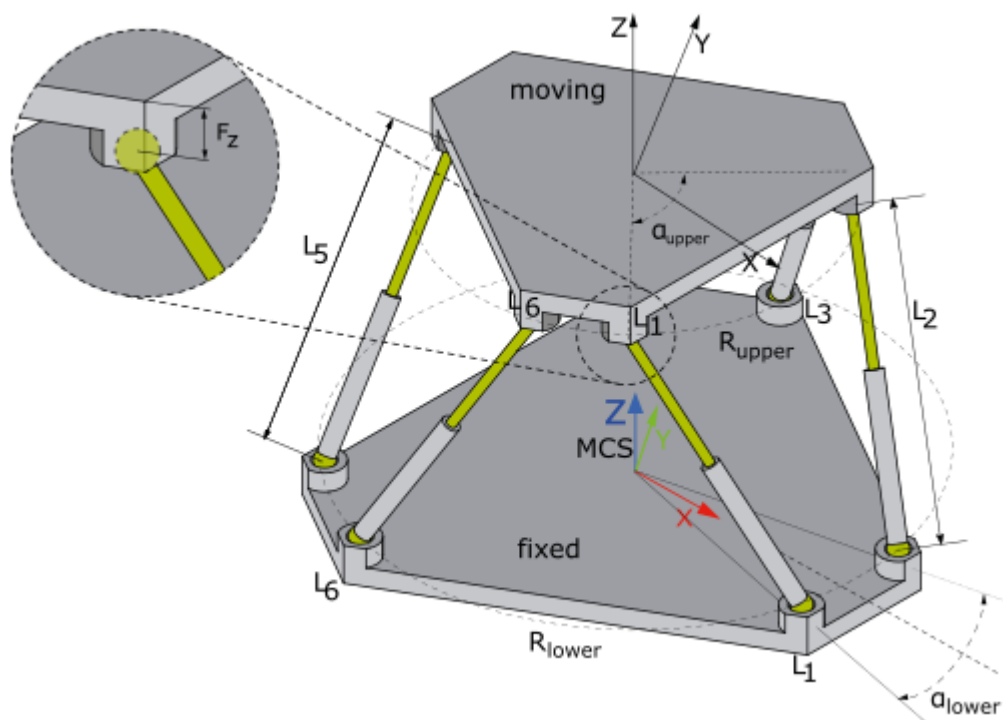


Рисунок 2.2 – Шість ступенів свободи платформи Стюарта [22]

Для математичного опису кінематики та виведення рівнянь керування

					ДП ПГ-21.14.1730.01.001 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		40

механізмом вводиться розрахункова геометрична модель (рис. 2.3) [23]. На ній просторове положення елементів задається за допомогою двох основних систем координат та відповідних векторів:

- нерухома основа (база) з прив'язаною до неї глобальною системою координат $Oxyz$;
- рухома платформа з локальною системою координат $O'x'y'z'$, початок якої збігається з геометричним центром платформи (або центром мас);
- B_i — координати точок кріплення кінематичних ланцюгів (нижніх шарнірів) до нерухомої основи, де $i = 1 \dots 6$;
- P_i — координати точок кріплення відповідних кінематичних ланцюгів (верхніх шарнірів) до рухомої платформи;
- l_i — вектори, що визначають просторове положення та ефективну довжину i -го виконавчого ланцюга;
- T — вектор лінійного переміщення (трансляції) центру рухомої платформи відносно початку глобальних координат.

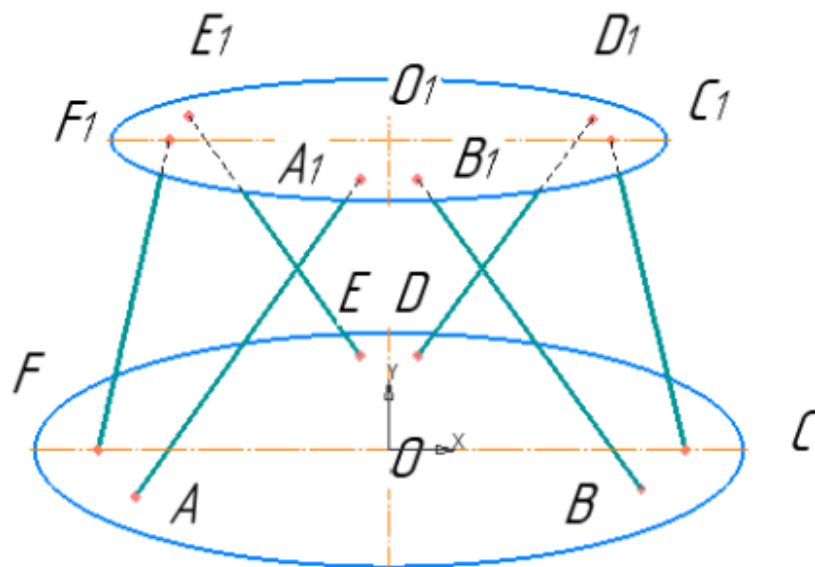


Рисунок 2.3 – Геометрична (кінематична) модель платформи Стюарта [23]

2.2.3 Геометричні параметри та особливості конструкції

Конструктивні параметри макета обрані з урахуванням трьох умов: забезпечення робочого діапазону відхилень $\pm 15^\circ$, уникнення сингулярних конфігурацій та обмежень крутного моменту сервоприводів MG996R (10 кг·см при 6 В). Виходячи з цих умов прийнято: радіус нерухомої бази – 100 мм, радіус рухомої платформи – 100 мм, довжина важеля – 35 мм, довжина сполучної тяги – 85 мм. Верифікація обраних параметрів проводилась шляхом комп'ютерного моделювання у середовищі MATLAB/Simulink (розділ 2.7).

Для кривошипно-шатунного механізму з довжиною кривошипа l_1 та шатуна l_2 існує фізичне обмеження: відстань від осі сервопривода до точки кріплення шатуна на платформі l_i повинна задовольняти умові досяжності [9]:

$$|l_2 - l_1| \leq l_i \leq l_1 + l_2 \quad (2.1)$$

При прийнятих значеннях $l_1 = 35$ мм, $l_2 = 85$ мм допустимий діапазон становить [50, 120] мм.

Для першої пари шарнірів у нейтральному положенні (висота платформи $h_0 = 80$ мм (h_0 — відстань між площиною бази та рухомою платформою у нейтральному положенні, відповідає габаритній висоті макета)):

$$l_1 = \sqrt{((p_{1x} - b_{1x})^2 + (p_{1y} - b_{1y})^2 + h_0^2)} = \sqrt{(4.51^2 + 16.84^2 + 80^2)} \approx 81.9 \text{ мм}$$

Завдяки симетрії конструкції всі шість кінематичних ланцюгів мають однакову довжину в нейтральному положенні. Значення 81.9 мм відповідає середній точці діапазону [50, 120] мм, що забезпечує рівний запас ходу в обох напрямках.

Для всіх поз у межах робочого діапазону ТЗ значення l_i залишаються в допустимих межах, що підтверджує відсутність механічних блокувань.

					ДП ПГ-21.14.1730.01.001 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		42

Максимальний кут повороту вала сервопривода при нахилі платформи $\pm 15^\circ$ складає $\approx 61^\circ$, що вдвічі менше за механічний ліміт MG996R ($\pm 90^\circ$ від центру). Граничні значення довжини шатунів для різних поз наведено в таблиці 2.1.

Таблиця 2.1 — Перевірка умови досяжності для різних просторових положень платформи

Поза	мін l_i , мм	макс l_i , мм	В межах [50, 120]?
Нейтраль $0^\circ/0^\circ$	81.9	81.9	Так
Крен $\pm 15^\circ$	58.7	106.0	Так
Тангаж $\pm 15^\circ$	57.1	106.8	Так
Крен+Тангаж $\pm 15^\circ/\pm 15^\circ$	53.1	117.8	Так

Для оцінки достатності крутного моменту приводів розглянемо статичний випадок нахилу на максимальний кут $\theta = 15^\circ$. Гравітаційний відновлюючий момент рухомої частини масою $m \approx 0.15$ кг:

$$M_{\text{зр}} = m \cdot g \cdot R_p \cdot \sin(\theta) = 0.15 \cdot 9.81 \cdot 0.1 \cdot \sin(15^\circ) \approx 0.038 \text{ Н} \cdot \text{м} = 3.8 \text{ кг} \cdot \text{см}$$

Враховуючи, що три приводи активно протидіють збуренню, а механічна ефективність шарнірного ланцюга $\eta \approx 0.8$, потрібний момент одного приводу:

$$M_{\text{прив}} = M_{\text{зр}} / (3 \cdot \eta) \approx 5.5 \text{ кг} \cdot \text{см}$$

Номінальний момент MG996R становить 10 кг·см при 5 В, що забезпечує запас $\times 1.8$ відносно розрахункового навантаження.

Повна числова верифікація кінематичної моделі у межах робочого діапазону $\pm 15^\circ$ виконана шляхом імітаційного моделювання у MATLAB/Simulink, результати якого наведено у розд. 2.7.

Таке співвідношення розмірів обрано спеціально для уникнення сингулярних конфігурацій механізму. Під сингулярністю в паралельній кінематиці розуміють особливі геометричні положення, у яких система

втрачає або набуває неконтрольовані ступені свободи, що призводить до погіршення керованості, зниження жорсткості конструкції та виникнення надмірних навантажень на приводи [10]. Запропонована геометрія гарантує плавний рух платформи та повну відсутність механічних блокувань, згідно з ТЗ, у межах робочого діапазону відхилень ($\pm 15^\circ$), що з достатнім запасом перебиває технічні вимоги до системи динамічної стабілізації.

Ще однією важливою особливістю розроблюваної системи є вибір роторної архітектури замість класичних лінійних актуаторів. Як виконавчі механізми використовуються сервоприводи постійного струму MG996R [24]. Це рішення дозволило суттєво зменшити загальні габарити, інерційність та вагу рухомих частин макета. Завдяки високій швидкості реакції та достатньому крутному моменту обраних сервоприводів, система здатна ефективно відпрацьовувати високочастотні зовнішні збурення в режимі реального часу.

2.3 Побудова математичної моделі

Для проектування ефективної автоматизованої системи керування та алгоритмів динамічної стабілізації гексапода необхідно розробити його строгу математичну модель. Побудова кінематичної моделі механізму з паралельною кінематикою традиційно базується на розв'язанні оберненої задачі кінематики за допомогою методу закритих векторних контурів [9]. Для цього у просторі задаються дві декартові системи координат: нерухома (базова) система координат $\{B\}$ із центром O_B у геометричному центрі основи платформи та рухома система координат $\{P\}$ із центром O_P , суміщеним із центром мас рухомої робочої поверхні. Просторова орієнтація та положення рухомої платформи відносно нерухомої бази у будь-який момент часу однозначно визначаються вектором лінійного зсуву центру мас

					ДП ПГ-21.14.1730.01.001 ПЗ	Арк.
						44
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

$\vec{T} = [x, y, z]^T$ та трьома кутами Ейлера (критеріями орієнтації): кутом крену ψ (навколо осі X), тангажу θ (навколо осі Y) та рискання ϕ (навколо осі Z).

Для детального опису просторової орієнтації рухомої платформи відносно нерухомої бази скористаємося класичним формалізмом кутів Ейлера у послідовності Z – Y – X (рискання, тангаж, крен). Цей підхід є стандартним для навігаційних та робототехнічних систем, оскільки дозволяє однозначно пов'язати покази триосьового інерційного MEMS-модуля з кінематикою виконавчих механізмів паралельної структури [5, 9].

Перехід від локальної рухомої системи координат $\{P\}$ до глобальної нерухомої системи координат $\{B\}$ реалізується шляхом трьох послідовних елементарних поворотів навколо відповідних осей.

Перший поворот виконується навколо осі Z на кут рискання ϕ . Елементарна матриця цього перетворення описує обертання у площині XY і має вигляд [9]:

$$R_z(\phi) = \begin{bmatrix} \cos \phi & -\sin \phi & 0 \\ \sin \phi & \cos \phi & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (2.2)$$

Другий поворот здійснюється навколо нової осі Y на кут тангажу θ , що відповідає поздовжньому нахилу платформи. Елементарна матриця обертання навколо осі Y записується наступним чином:

$$R_y(\theta) = \begin{bmatrix} \cos \theta & 0 & \sin \theta \\ 0 & 1 & 0 \\ -\sin \theta & 0 & \cos \theta \end{bmatrix} \quad (2.3)$$

Третій поворот виконується навколо оновленої осі X на кут крену ψ , який характеризує поперечний нахил об'єкта стабілізації. Матриця цього перетворення має вигляд:

$$R_x(\psi) = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos \psi & -\sin \psi \\ 0 & \sin \psi & \cos \psi \end{bmatrix} \quad (2.4)$$

Результуюча матриця спрямування просторової орієнтації R формується як добуток знайдених елементарних матриць у строго визначеному порядку їхнього застосування:

$$R = R_z(\phi) \cdot R_y(\theta) \cdot R_x(\psi) \quad (2.5)$$

Виконаємо проміжне перемноження перших двох матриць $R_z(\phi) \cdot R_y(\theta)$, щоб продемонструвати покрокове виведення математичної моделі:

$$R_{zy} = \begin{bmatrix} \cos \phi & -\sin \phi & 0 \\ \sin \phi & \cos \phi & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \cos \theta & 0 & \sin \theta \\ 0 & 1 & 0 \\ -\sin \theta & 0 & \cos \theta \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos \phi \cos \theta & -\sin \phi & \cos \phi \sin \theta \\ \sin \phi \cos \theta & \cos \phi & \sin \phi \sin \theta \\ -\sin \theta & 0 & \cos \theta \end{bmatrix} \quad (2.6)$$

На фінальному етапі помножимо отриману матрицю R_{zy} на матрицю повороту навколо осі X ($R_x(\psi)$):

$$R = \begin{bmatrix} \cos \phi \cos \theta & -\sin \phi & \cos \phi \sin \theta \\ \sin \phi \cos \theta & \cos \phi & \sin \phi \sin \theta \\ -\sin \theta & 0 & \cos \theta \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos \psi & -\sin \psi \\ 0 & \sin \psi & \cos \psi \end{bmatrix} \quad (2.7)$$

Після виконання алгебраїчних операцій множення «рядок на стовпець» та спрощення тригонометричних виразів, отримуємо повну розгорнуту матрицю повороту, що визначає тривимірну орієнтацію платформи Стюарта у просторі:

$$R = \begin{bmatrix} \cos \phi \cos \theta & \cos \phi \sin \theta \sin \psi - \sin \phi \cos \psi & \cos \phi \sin \theta \cos \psi + \sin \phi \sin \psi \\ \sin \phi \cos \theta & \sin \phi \sin \theta \sin \psi + \cos \phi \cos \psi & \sin \phi \sin \theta \cos \psi - \cos \phi \sin \psi \\ -\sin \theta & \cos \theta \sin \psi & \cos \theta \cos \psi \end{bmatrix} \quad (2.8)$$

Ця матриця є ортогональною ($R^{-1} = R^T$, а її детермінант $\det(R) = 1$), що свідчить про збереження лінійних розмірів ланок механізму при просторових трансформаціях системи координат [9]. Отримані дев'ять елементів матриці обчислюються в мікроконтролері на кожному кроці квантування програми стабілізації для визначення миттєвих координат точок кріплення шарнірів рухомої площини.

Нехай координати точок з'єднання шести тяг на нерухомій основі задані радіус-векторами $\vec{b}_i = [b_{ix}, b_{iy}, b_{iz}]^T$, а координати точок кріплення сферичних шарнірів на рухомій платформі у власній системі координат визначені як $\vec{p}_i = [p_{ix}, p_{iy}, p_{iz}]^T$, де індекс $i = 1, 2, \dots, 6$ відповідає номеру кінематичного ланцюга. Тоді для кожної з шести штанг можна скласти замкнене векторне рівняння, що описує її просторове положення у базовій системі координат [9, 10]:

$$\vec{l}_i = \vec{T} + {}^B_P R \cdot \vec{p}_i - \vec{b}_i \quad (2.9)$$

Вектор $\vec{l}_i$ є просторовим вектором і-ї тяги платформи Стюарта. Для архітектури з лінійними актуаторами модуль цього вектора безпосередньо визначає необхідну довжину кожної штанги. У випадку обраної роторної архітектури, де виконавчим органом є сервопривод із важелем (кривошипом) та сполучною тягою, довжина вектора $\vec{l}_i$ виступає входною величиною для розрахунку кута повороту вала серводвигуна α_i . Скалярне значення повної довжини кожного кінематичного ланцюга обчислюється як евклідова норма відповідного вектора:

$$l_i = \|\vec{l}_i\| = \sqrt{l_{ix}^2 + l_{iy}^2 + l_{iz}^2} \quad (2.10)$$

Отримане математичне співвідношення є повним аналітичним розв'язком оберненої задачі кінематики для шестикоординатної платформи з паралельною структурою. Воно дозволяє системі автоматичного керування на базі мікроконтролера миттєво обчислювати необхідні координати або кути для всіх шести виконавчих приводів на основі даних про просторове відхилення, отриманих від інерційного MEMS-сенсора, забезпечуючи цим точну та високодинамічну компенсацію зовнішніх кутових і лінійних збурень.

Для практичного застосування отриманих рівнянь (2.8–2.9) необхідно визначити початкові матриці координат шарнірів для розроблюваного макета. Відповідно до прийнятих конструктивних параметрів (розд. 2.2.3),

					ДП ПГ-21.14.1730.01.001 ПЗ	Арк.
						47
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

радіус розташування шарнірів нерухомої бази становить $R_B = 100$ мм, а рухомої платформи $R_P = 100$ мм. Шарніри згруповані попарно з кутовим рознесенням $\gamma_B = 40^\circ$ для бази та $\gamma_P = 20^\circ$ для платформи.

Розрахуємо координати першої пари шарнірів на нерухомій базі (в міліметрах):

$$b_{1x} = R_B \cdot \cos(\gamma_B / 2) = 100 \cdot \cos(20^\circ) = 93.97 \text{ мм};$$

$$b_{1y} = R_B \cdot \sin(\gamma_B / 2) = 100 \cdot \sin(20^\circ) = 34.20 \text{ мм};$$

$$b_{1z} = 0 \text{ мм (база лежить у площині XY).}$$

Аналогічно визначаються координати відповідної точки на рухомій платформі:

$$p_{1x} = R_P \cdot \cos(\gamma_P / 2) = 100 \cdot \cos(10^\circ) = 98.48 \text{ мм};$$

$$p_{1y} = R_P \cdot \sin(\gamma_P / 2) = 100 \cdot \sin(10^\circ) = 17.36 \text{ мм};$$

$$p_{1z} = 0 \text{ мм.}$$

Матриці з координатами всіх шести точок $\vec{b}_{1..6}$ та $\vec{p}_{1..6}$ закладаються у пам'ять мікроконтролера як базові константи для розв'язання оберненої задачі кінематики в кожному циклі програми.

Проте, для обраної роторної архітектури знайдена скалярна відстань l_i між віссю сервопривода та точкою кріплення на рухомій платформі є лише проміжним етапом. Для безпосереднього керування виконавчим механізмом необхідно визначити кут повороту вала α_i . Розглянемо кінематичний трикутник, утворений важелем сервопривода з довжиною l_1 , сполучною тягою з довжиною l_2 та віртуальним відрізком l_i .

Застосовуючи теорему косинусів, кут між площиною бази та важелем сервопривода обчислюється як [9, 20]:

$$\alpha_i = \arcsin\left(\frac{l_{iz}}{l_i}\right) \pm \arccos\left(\frac{l_1^2 + l_i^2 - l_2^2}{2 \cdot l_1 \cdot l_i}\right) \quad (2.11)$$

					ДП ПГ-21.14.1730.01.001 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		48

Знак $\pm$ перед другим доданком у формулі (2.10) вказує на два можливі розв'язки оберненої задачі, що відповідають двом фізичним конфігураціям шарнірного з'єднання (так звані «лікоть вгору» та «лікоть вниз») [9, 10]. У розробленому програмному забезпеченні жорстко задано вибір розв'язку зі знаком мінус, щоб уникнути механічних колізій важелів із базою під час роботи

Саме масив значень $[\alpha_1, \alpha_2, \dots, \alpha_6]$ є кінцевим результатом розв'язання оберненої задачі кінематики, який передається у вигляді ШІМ-сигналів на драйвери двигунів для досягнення заданого просторового положення.

Для загального розуміння принципів роботи розроблюваної системи необхідно об'єднати розраховану кінематичну модель, інерційні сенсори та алгоритм керування у єдиний замкнений контур. Загальну структуру системи автоматичного керування (САК) стабілізацією платформи наведено на рисунку 2.4.

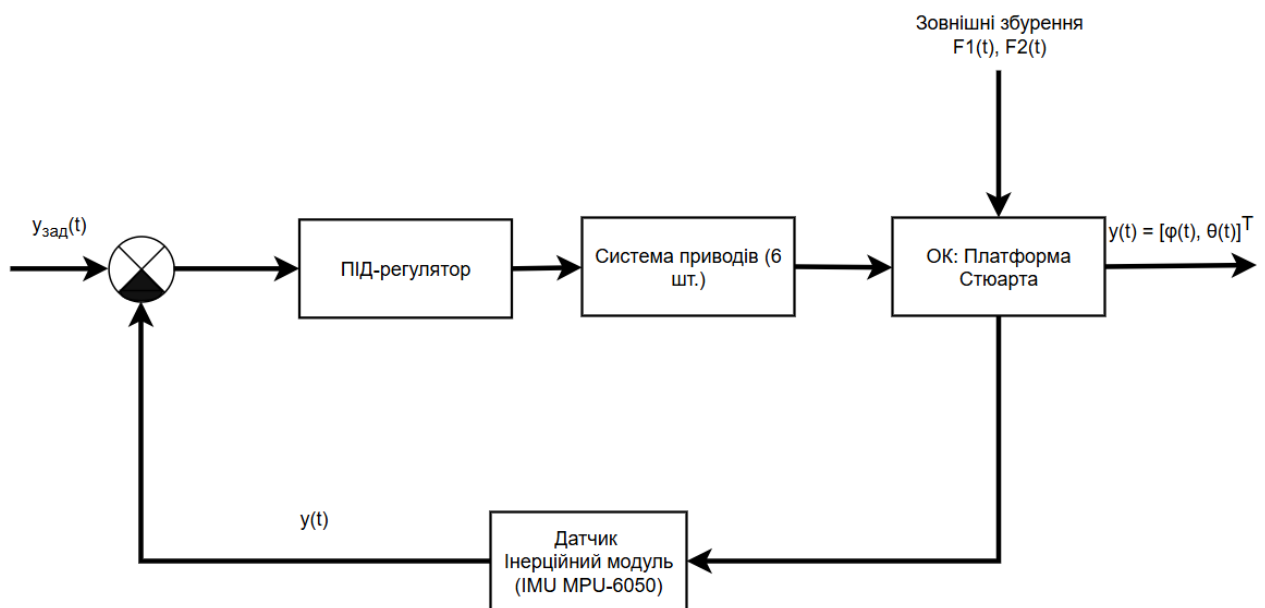


Рисунок 2.4 – Структурна схема САК

2.4 Аналіз стійкості системи

Для забезпечення надійної роботи автоматизованої системи динамічної стабілізації платформи Стюарта необхідно провести аналіз її стійкості. Стійкість є фундаментальною властивістю системи автоматичного керування (САК) повертатися до стану рівноваги після припинення дії зовнішніх збурень (наприклад, вібрацій або різких нахилів основи) [1].

Оскільки просторова кінематика гексапода описується складною системою нелінійних рівнянь, для класичного аналізу стійкості застосовується метод лінеаризації математичної моделі в околі робочої точки (горизонтального положення платформи) [1]. Крім того, завдяки автономному керуванню кожною штангою, багатовимірну систему можна наближено розглядати як сукупність незалежних одновимірних контурів регулювання [16].

Розглянемо структурну схему одного каналу керування (наприклад, за кутом крену ψ або тангажу θ), яка включає ПІД-регулятор та об'єкт керування (сервопривід із механічною ланкою). Передавальна функція розімкненої системи $W_{роз}(s)$ формується як добуток передавальних функцій регулятора та об'єкта. Відповідно, передавальна функція замкненої системи записується у вигляді [1]:

$$W_{замк}(s) = \frac{W_{роз}(s)}{1 + W_{роз}(s)} \quad (2.12)$$

Стійкість замкненої системи повністю визначається коренями її характеристичного рівняння, яке отримується шляхом прирівнювання знаменника замкненої передавальної функції до нуля:

$$D(s) = a_0 s^n + a_1 s^{n-1} + \dots + a_{n-1} s + a_n = 0, \quad (2.13)$$

де s – оператор Лапласа, а a_i – коефіцієнти, що залежать від параметрів механічної конструкції платформи та налаштувань ПІД-регулятора.

					ДП ПГ-21.14.1730.01.001 ПЗ	Арк.
						50
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Для оцінки стійкості розробленої системи без необхідності безпосереднього обчислення коренів доцільно використати алгебраїчний критерій Гурвіца [1]. Необхідною умовою стійкості є суворододатність усіх коефіцієнтів характеристичного рівняння ($a_i > 0$). Достатньою умовою є додатність усіх діагональних мінорів (визначників Гурвіца) $\Delta_k > 0$ [25].

У випадку приведення лінеаризованої моделі одного каналу до системи третього порядку, головна умова стійкості за критерієм Гурвіца зводиться до виконання нерівності:

$$\Delta_2 = a_1 a_2 - a_0 a_3 > 0 \quad (2.14)$$

Виконання цих математичних умов гарантує, що перехідний процес у контурі стабілізації матиме збіжний характер. Аналіз стійкості дозволяє визначити критичні межі для коефіцієнтів пропорційно-інтегрально-диференціального регулятора, перевищення яких призведе до виникнення автоколивань платформи, втрати керованості та можливого механічного пошкодження актуаторів [3].

2.5 Синтез системи керування

Основою для побудови ефективного алгоритму динамічної стабілізації є вибір оптимальної структури системи автоматичного керування (САК). З огляду на вимоги до високої швидкодії та точності, для керування просторовим положенням гексапода обрано архітектуру замкненої системи з від'ємним зворотним зв'язком [2]. У такій конфігурації фактична орієнтація платформи безперервно вимірюється інерційними датчиками і порівнюється із заданим (горизонтальним) еталоном, а керуючий вплив на виконавчі механізми формується виключно на основі виявленої неузгодженості.

Для забезпечення динамічної стабільності просторової платформи Стюарта в умовах дії випадкових зовнішніх збурень необхідно синтезувати закриту систему автоматичного керування (САК). Архітектура контуру

					ДП ПГ-21.14.1730.01.001 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		51

керування базується на класичному принципі регулювання за відхиленням, де головним завданням обчислювального модуля є мінімізація та зведення до нуля похибки між заданим просторовим положенням верхньої платформи та її фактичною орієнтацією. Вхідна інформація про кути крену, тангажу та ристання у реальному часі безперервно зчитується з цифрового інерційного MEMS-модуля (IMU), що жорстко закріплений поблизу центра мас рухомої площини [13]. Оскільки первинні сигнали акселерометра та гіроскопа містять високочастотні шуми та дрейф нульового рівня, у мікроконтролері реалізується алгоритм цифрової фільтрації (комплементарний або градієнтний фільтр) [14, 18]. Отриманий очищений вектор поточної орієнтації порівнюється із заданим уставним значенням збалансованого положення, формуючи дві вимірні похибки неузгодження: $\epsilon_{\psi}(t)$ (похибка за креном), $\epsilon_{\theta}(t)$ (похибка за тангажем).

Для відпрацювання сформованих похибок та забезпечення високої швидкодії контуру стабілізації обґрунтовано вибір пропорційно-інтегрально-диференціального (ПІД) закону регулювання. Вибір ПІД-регулятора зумовлений його високою універсальністю, простотою алгоритмічної реалізації на базі обчислювальних архітектур мікроконтролерів (зокрема ATmega328P) та можливістю незалежного налаштування динамічних властивостей кожного каналу керування [3, 8]. Пропорційна складова регулятора забезпечує миттєву реакцію виконавчих органів на виникнення просторового відхилення, формуючи керуючий вплив прямо пропорційно амплітуді помилки. Інтегральна складова призначена для усунення статичної похибки регулювання, яка неминуче виникає через дію постійних навантажень, люфтів або сил тертя в шарнірних з'єднаннях гексапода. Диференціальна складова реагує не на саму похибку, а на швидкість її зміни, що дозволяє ефективно демпфувати автоколивання рухомої платформи, зменшувати перерегулювання та покращувати стійкість системи при різких, ударних зовнішніх збуреннях [3].

					ДП ПГ-21.14.1730.01.001 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		52

Математичний опис безперервного закону керування для кожного каналу просторової стабілізації описується інтегро-диференціальним рівнянням [1, 3]:

$$u(t) = K_p \cdot \epsilon(t) + K_i \int_0^t \epsilon(\tau) d\tau + K_d \cdot \frac{d\epsilon(t)}{dt}, \quad (2.15)$$

де K_p, K_i, K_d — відповідно коефіцієнти пропорційного, інтегрального та диференціального підсилення регулятора. Зважаючи на те, що система керування реалізується на базі цифрового мікропроцесорного пристрою з фіксованим періодом квантування за часом Δt , безперервний закон керування піддається дискретизації. Чисельне інтегрування виконується за методом прямокутників, а диференціювання — за допомогою різницьових відношень першого порядку. Дискретна форма алгоритму ПД-регулятора, яка безпосередньо програмується у пам'ять обчислювача, має наступний вигляд:

$$u(k) = K_p \cdot \epsilon(k) + K_i \cdot \Delta t \sum_{j=0}^k \epsilon(j) + \frac{K_d}{\Delta t} (\epsilon(k) - \epsilon(k-1)), \quad (2.16)$$

де k — поточний крок квантування, $\epsilon(k)$ — поточна помилка неузгодження, а $\epsilon(k-1)$ — похибка на попередньому кроці обчислень. Сформовані ПД-регулятором дві вихідні керуючі величини $u(k)$ для кожного каналу орієнтації через блок оберненої задачі кінематики трансформуються у шість відповідних сигналів широтно-імпульсної модуляції (ШІМ). Ці сигнали передаються на виконавчі сервоприводи, які синхронно й узгоджено змінюють кути нахилу своїх важелів, повертаючи рухому платформу у горизонтальне положення та забезпечуючи цим високоточну динамічну стабілізацію системи в реальному часі [26].

2.6 Розрахунок та налаштування регулятора

Розрахунок параметрів регулятора базується на математичному описі виконавчого механізму. У розробленій системі використовуються сервоприводи MG996R [23].

Основою будь-якого класичного сервопривода є колекторний двигун постійного струму (ДПС). Для синтезу контуру керування необхідно отримати його математичну модель. Динаміка ДПС з незалежним збудженням описується двома взаємопов'язаними диференціальними рівняннями: рівнянням електричної рівноваги кола якоря (за другим законом Кірхгофа) та рівнянням механічного руху ротора (за другим законом Ньютона для обертального руху) [27].

Електричне рівняння кола якоря має вигляд:

$$u(t) = R \cdot i(t) + L \frac{di(t)}{dt} + e(t), \quad (2.17)$$

де $u(t)$ — напруга живлення двигуна; $i(t)$ — струм якоря; R та L — відповідно активний опір та індуктивність обмотки якоря; $e(t)$ — протиелектрорушійна сила (проти-ЕРС), яка виникає під час обертання ротора.

Значення проти-ЕРС прямо пропорційне кутовій швидкості обертання вала $\omega(t)$:

$$e(t) = k_e \cdot \omega(t), \quad (2.18)$$

де k_e — конструктивна стала двигуна (коефіцієнт проти-ЕРС).

Механічне рівняння руху ротора записується як:

$$J \frac{d\omega(t)}{dt} = M(t) - M_c(t), \quad (2.19)$$

де J — сумарний момент інерції ротора та приведенного навантаження; $M(t)$ — електромагнітний обертальний момент двигуна; $M_c(t)$ — момент статичного опору (навантаження).

					ДП ПГ-21.14.1730.01.001 ПЗ	Арк.
						54
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Електромагнітний момент двигуна є лінійною функцією від струму якоря:

$$M(t) = k_m \cdot i(t), \quad (2.20)$$

де k_m — коефіцієнт моменту двигуна.

Для переходу від диференціальних рівнянь у часовій області до передавальних функцій в операторній області застосуємо перетворення Лапласа за нульових початкових умов [1]. Припускаючи, що момент опору навантаження на етапі налаштування контуру стабілізації скомпенсований або дорівнює нулю ($M_c(s) = 0$), система рівнянь у просторі Лапласа набуває вигляду:

$$U(s) = R \cdot I(s) + L \cdot s \cdot I(s) + k_e \cdot \Omega(s) \quad (2.21)$$

$$J \cdot s \cdot \Omega(s) = k_m \cdot I(s) \quad (2.22)$$

Виразимо струм $I(s)$ з механічного рівняння та підставимо його в електричне:

$$I(s) = \frac{J \cdot s \cdot \Omega(s)}{k_m} \quad (2.23)$$

$$U(s) = (R + L \cdot s) \frac{J \cdot s \cdot \Omega(s)}{k_m} + k_e \cdot \Omega(s) \quad (2.24)$$

Передавальна функція двигуна за керуючим впливом, що визначає відношення кутової швидкості до напруги живлення, дорівнюватиме:

$$W_m(s) = \frac{\Omega(s)}{U(s)} = \frac{k_m}{J \cdot L \cdot s^2 + J \cdot R \cdot s + k_e \cdot k_m} \quad (2.25).$$

Після ділення чисельника і знаменника на $(k_e \cdot k_m)$ та введення понять електромеханічної ($T_m = \frac{J \cdot R}{k_e \cdot k_m}$) та електромагнітної ($T_e = \frac{L}{R}$) сталих часу, отримуємо класичну передавальну функцію ДПС другого порядку [1, 27]:

$$W_m(s) = \frac{K_m}{T_m \cdot T_e \cdot s^2 + T_m \cdot s + 1}, \quad (2.26)$$

					ДП ПГ-21.14.1730.01.001 ПЗ	Арк.
						55
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

де $K_m = \frac{1}{k_e}$ — коефіцієнт передачі двигуна.

Оскільки у малогабаритних колекторних двигунах, таких як у сервоприводі MG996R, індуктивність обмотки ротора L є мізерно малою, електромагнітною сталою часу T_e можна знехтувати ($T_e \approx 0$). Це дозволяє спростити математичну модель виконавчого механізму від коливальної ланки другого порядку до типової аперіодичної (інерційної) ланки першого порядку.

Згідно з технічною документацією [23], швидкість відпрацювання кута 60° при напрузі живлення 6 В становить 0.14 с.

Для цілей моделювання, виходячи з типових характеристик сервоприводів класу MG996R [23], електромеханічна стала часу приймається рівною $T_m \approx 0.14$ с. Відповідно, отримана передавальна функція набуває остаточного числового вигляду:

$$W_m(s) = \frac{K_m}{T_m s + 1} = \frac{1}{0.14s + 1} \quad (2.27)$$

Зважаючи на багатовимірний характер руху об'єкта, систему було розбито на три незалежні контури (крен, тангаж, ристання). Для алгоритмічної реалізації на базі мікроконтролера застосовано дискретний ПІД-регулятор із кроком квантування $\Delta t = 0.01$ с.

Замість єдиного багатовимірного регулятора (МІМО), що суттєво ускладнює налаштування та споживає значні обчислювальні ресурси, систему розбито на три незалежні контури для кожної осі просторової орієнтації: крену та тангажу [16]. Для алгоритмічної реалізації на базі обраного мікроконтролера застосовано дискретний пропорційно-інтегрально-диференціальний (ПІД) регулятор із кроком квантування $\Delta t = 0.01$ с, що відповідає цільовій частоті оновлення даних 100 Гц. Базові параметри системи визначалися з урахуванням інерційних характеристик виконавчих серводвигунів, які були апроксимовані передавальними функціями другого

					ДП ПГ-21.14.1730.01.001 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		56

порядку.

Оптимізація коефіцієнтів ПІД-регулятора здійснювалася в середовищі MATLAB/Simulink із використанням інтегрованого інструмента PID Tuner [3]. Початкове тестування системи з одиничними коефіцієнтами показало, що контур є працездатним, однак має недостатню швидкодію і здатен компенсувати лише близько 50% амплітуди зовнішніх коливань [12]. Для покращення динаміки було проведено процедуру автоматичної лінеаризації підсистеми для кожної осі окремо. У результаті інтерактивного налаштування перехідних процесів було знайдено оптимальний баланс між швидкодією та надійністю. Розраховані оптимальні значення коефіцієнтів склали: пропорційна складова $K_p = 0.05$, інтегральна складова $K_i = 10.01$. Диференціальна складова ($K_d = 0$) виявилася надлишковою, оскільки механічна інерція сервоприводів та редукторів створює достатній природний демпфуючий ефект. Через конструктивну симетрію гексапода знайдені коефіцієнти були успішно продубльовані на обидва просторові канали керування.

Перевірка стійкості замкненої системи здійснювалася шляхом аналізу графіка перехідного процесу (Step Response) та реакції моделі на гармонічне збурення [1]. Оптимізований регулятор забезпечує вихід платформи на заданий режим за 0.4 секунди без виникнення перерегулювання (паразитних автоколивань) [4]. Такий плавний, але швидкий відгук гарантує відсутність ударних струмових навантажень на сервоприводи. При імітаційному моделюванні зовнішньої хитавиці основи з амплітудою 5° система продемонструвала високий запас стійкості, миттєво формуючи контрзусилля та знижуючи динамічну похибку відхилення робочої площини до рівня $\pm 1^\circ$. Отримані результати теоретично підтверджують ефективність обраних налаштувань та їхню повну відповідність технічним вимогам до розроблюваної системи.

					ДП ПГ-21.14.1730.01.001 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		57

2.7 Моделювання системи в MATLAB/Simulink

Для верифікації розроблених математичних моделей та перевірки ефективності синтезованих алгоритмів автоматичного керування було виконано імітаційне моделювання мехатронної системи у програмному комплексі MATLAB/Simulink [12, 21]. Побудова структурної моделі (рис. 2.5) здійснювалася за модульним принципом, що дозволило детально відтворити фізичні процеси як у механічній, так і в електронній частинах платформи Стюарта. Центральним ядром віртуального стенда є блок «MATLAB Function», у якому програмно реалізовано аналітичний розв'язок оберненої задачі кінематики для роторного гексапода [9]. Цей блок приймає на вхід вектор заданих просторових координат та кутів орієнтації і в режимі реального часу обчислює вектор із шести необхідних кутів повороту для виконавчих механізмів.

Розроблена імітаційна модель Simulink побудована за модульним принципом, де кожен елемент є віртуальним аналогом відповідної апаратної чи програмної частини макета.

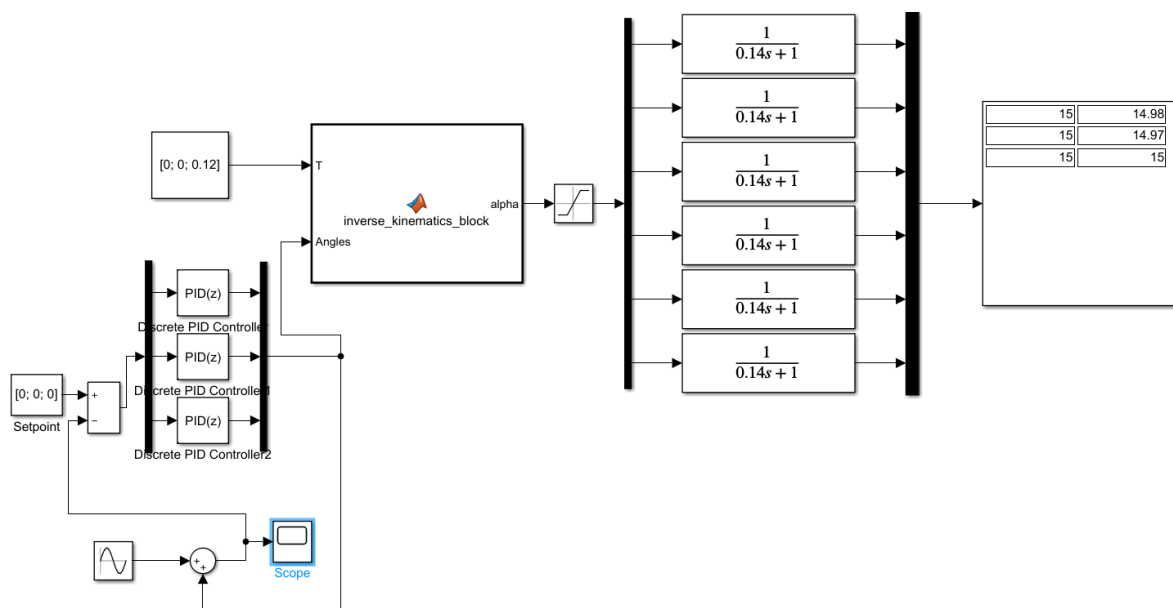


Рисунок 2.5 – Структурна схема імітаційної моделі платформи Стюарта в середовищі Simulink

Центральним ядром обчислень є блок MATLAB Function, у якому реалізовано алгоритм оберненої кінематики. Програмний код реалізації алгоритму оберненої кінематики наведено у Додатку А. Математично він базується на системі рівнянь (2.2)–(2.6), перетворюючи задані просторові координати платформи у вектори кутів для кожного з шести сервоприводів. У реальному макеті цей блок відповідає програмному модулю мікроконтролера, що в режимі реального часу розраховує положення тяг.

Для моделювання фізичних обмежень макета у контур введені нелінійні блоки Saturation. Вони імітують конструктивні ліміти сервоприводів MG996R, обмежуючи керуючий сигнал діапазоном $\pm 15^\circ$ [24]. Цей підхід запобігає механічному заклинюванню тяг, що в апаратній частині відповідає програмному обмеженню ШІМ-сигналів у межах 100–550 відліків.

Динаміка виконавчих механізмів відтворена за допомогою блоків Transfer Fcn, які задають аперіодичну ланку першого порядку ($W(s) = \frac{1}{0.14s + 1}$). Вони відображають реальні інерційні властивості двигунів та їхніх металевих редукторів, що було обґрунтовано у підрозділі 2.6 (формула 2.25) на основі математичної моделі колекторного двигуна [27].

За контур автоматичного регулювання відповідають блоки Discrete PID Controller. Вони є віртуальним відтворенням цифрового ПІД-регулятора, прошитого в Arduino Uno. Для підвищення надійності в моделі активовано алгоритм Anti-Windup, який за своєю логікою повністю повторює програмний захист від переповнення інтегральної суми в коді мікроконтролера [3, 8].

Збурення зовнішнього середовища, такі як вібрації чи хитамиця основи, генеруються блоком Sine Wave [12]. Це дозволяє проводити стрес-тестування алгоритму стабілізації в умовах, максимально наближених до реальних, де об'єкт керування зазнає безперервного впливу гармонічних коливань.

					ДП ПГ-21.14.1730.01.001 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		59

Перевірка роботи алгоритму динамічної стабілізації здійснювалася в умовах імітації інтенсивних зовнішніх збурень. Для цього в контур зворотного зв'язку було інтегровано генератор гармонічних коливань «Sine Wave», який імітував хитацію основи платформи з амплітудою 5° та частотою 2 рад/с. Аналіз результатів моделювання проводився за допомогою віртуального осцилографа (Scope).

Отримані перехідні процеси (рис. 2.6) підтвердили, що розроблена триканальна система автоматичного керування ефективно демпфує зовнішні коливання. Незважаючи на введену в модель апаратну інерційність сервоприводів, оптимізовані ПД-регулятори забезпечили зменшення амплітуди відхилення робочої площини з 5° до $\pm 1^\circ$. Як видно з рис. 2.6, залишкова динамічна похибка становить 1° , що задовольняє технічним вимогам ТЗ (не більше $2-3^\circ$), що доводить абсолютну алгоритмічну працездатність моделі та дозволяє перейти до етапу її апаратної реалізації [21, 26].

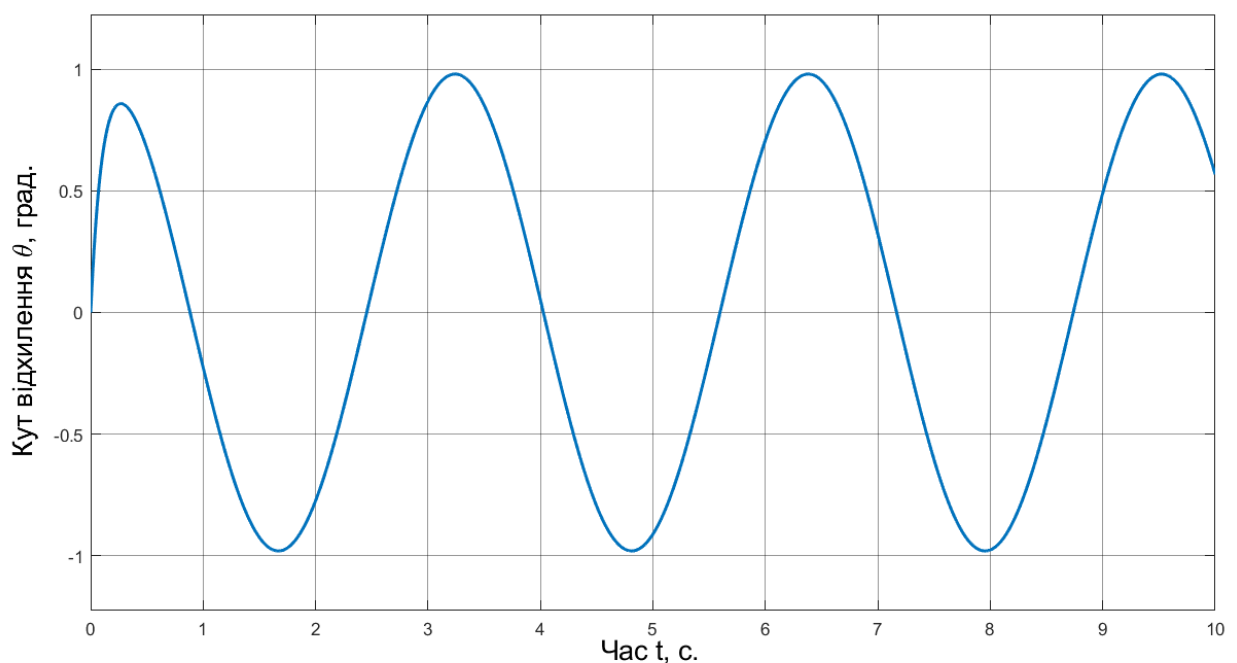


Рисунок 2.6 – Реакція системи на гармонічне збурення (залишкова похибка $\pm 1^\circ$)

Висновки до розділу 2

У результаті виконання другого розділу дипломного проекту було розроблено та досліджено математичну та імітаційну моделі системи динамічної стабілізації просторової платформи. Основні результати полягають у наступному:

1. розроблено кінематичну модель виконавчого механізму. На основі векторно-матричного методу та використання кутів Ейлера вирішено обернену задачу кінематики для платформи Стюарта. Це дозволило отримати аналітичні залежності для розрахунку необхідних кутів повороту кожного з шести сервоприводів залежно від заданого просторового положення рухомої площини;
2. синтезовано структуру системи автоматичного керування. Обґрунтовано використання архітектури із замкненим контуром та від'ємним зворотним зв'язком. Для забезпечення максимальної ефективності реалізовано триканальний ПД-регулятор: канали крену та тангажу відповідають за стабілізацію горизонту, тоді як контур за кутом рискання з нульовим завданням виконує функцію активного демпфера для придушення паразитних крутильних моментів механічної конструкції;
3. проведено імітаційне моделювання у середовищі MATLAB/Simulink. Створено віртуальний аналог розроблюваної системи з урахуванням інерційних характеристик колекторних двигунів та їхніх конструктивних обмежень (насичення керуючого впливу в межах $\pm 15^\circ$). Експериментально підтверджено, що оптимальна робоча висота макета становить 120 мм, що забезпечує необхідний запас ходу тяг для відпрацювання збурень;
4. підтверджено алгоритмічну працездатність САК. Аналіз перехідних процесів показав, що оптимізовані параметри ПД-регулятора

					ДП ПГ-21.14.1730.01.001 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		61

дозволяють системі ефективно демпфувати зовнішні гармонічні коливання із залишковою динамічною похибкою, що не перевищує $\pm 15^\circ$.

Отримані теоретичні та модельні результати повністю задовольняють технічним вимогам до системи і є фундаментальною базою для переходу до етапу апаратної реалізації макета та програмування мікроконтролера для обробки сигналів із сенсорів MPU-6050 у реальному часі.

					ДП ПГ-21.14.1730.01.001 ПЗ	Арк.
						62
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

РОЗДІЛ 3

ПОБУДОВА ТА ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНЕ ДОСЛІДЖЕННЯ ПЛАТФОРМИ З ПАРАЛЕЛЬНОЮ КІНЕМАТИКОЮ

3.1 Структурна схема системи стабілізації

На основі результатів математичного моделювання, що підтвердили працездатність розроблених алгоритмів, здійснено перехід до апаратної реалізації макета.

Для ефективного виконання завдань динамічної стабілізації розроблено структурну схему замкненої системи автоматичного керування (САК), яка відображає взаємодію апаратних та програмних складових макета платформи (рис. 3.1) [1, 2].

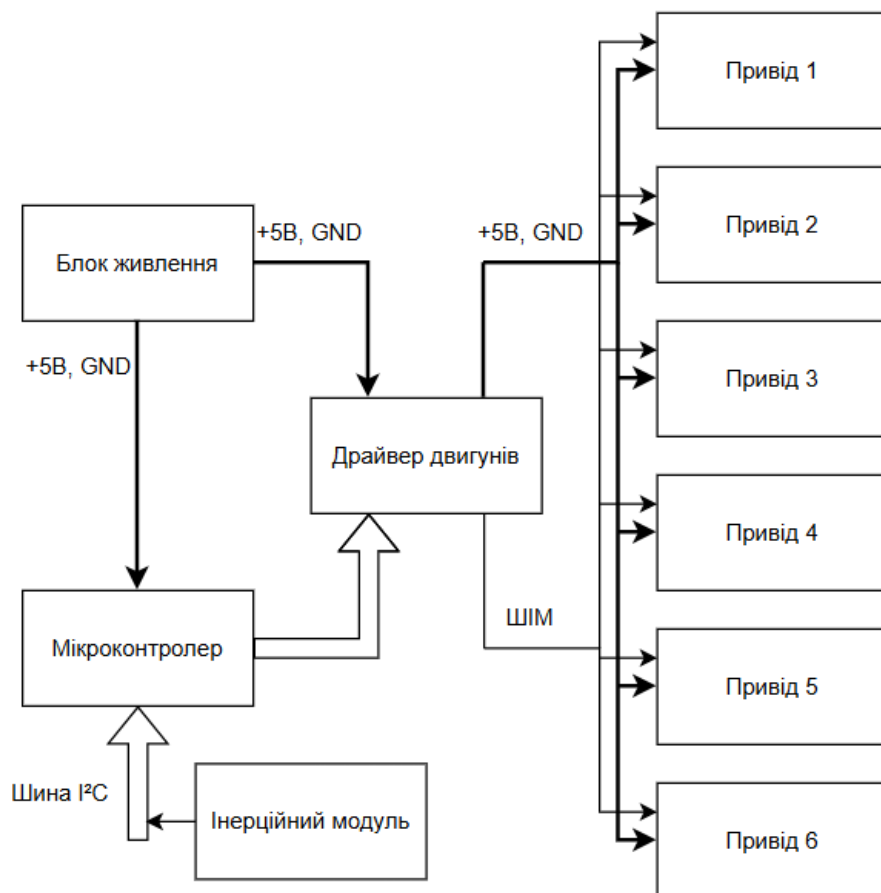


Рисунок 3.1 – Структурна схема системи стабілізації платформи Стюарта

					ДП ПГ-21.14.1730.01.001 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		63

Визначення складу системи

Згідно з розробленою структурною схемою, система стабілізації складається з таких основних функціональних блоків:

- Пристрій порівняння (суматор): програмний вузол, що обчислює неузгодженість між заданими та поточними кутами орієнтації платформи.
- ПД-регулятор: обчислювальний пристрій на базі мікроконтролера Arduino Uno, який формує керуючий вплив на основі пропорційно-інтегрально-диференціального закону [3, 8].
- Система приводів: блок виконавчих механізмів, до якого входять шість сервоприводів.
- Об'єкт керування (ОК): механічна конструкція платформи Стюарта, орієнтація якої змінюється під дією приводів та зовнішніх збурень $F_1(t)$ і $F_2(t)$.
- Датчик зворотного зв'язку: інерційний вимірювальний модуль, побудований на базі цифрового інерційного MEMS-модуля MPU-6050, що забезпечує надійну фільтрацію просторових даних [13].

Взаємодія між елементами системи реалізується через цифрові інтерфейси та механічні передачі. Зв'язок у контурі зворотного зв'язку від датчика MPU-6050 до ПД-регулятора на базі Arduino Uno забезпечується високошвидкісною інформаційною шиною I^2C [8, 13]. Передача керуючих сигналів до системи приводів відбувається за допомогою ліній керування положенням валів. Зв'язок між системою приводів та об'єктом керування має механічний характер: жорсткі тяги трансформують кутові переміщення сервоприводів у просторову орієнтацію верхньої платформи.

Функціонування САК ґрунтується на безперервному порівнянні. На входи системи надходять задавальні впливи — вектор цільових кутів $y_{зад}(t)$ та цільова лінійна координата $Z_{зад}$ (базова висота платформи). Для задачі горизонтальної стабілізації уставки кутів дорівнюють нулю (горизонтальне

					ДП ПГ-21.14.1730.01.001 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		64

положення платформи), а уставка висоти $Z_{зад}$ відповідає розрахунковому центру робочої зони макета.

Під час впливу на об'єкт керування зовнішніх збурюючих факторів $F_1(t)$ та $F_2(t)$, просторова орієнтація платформи $y(t)=[\theta(t),\psi(t),\phi(t)]^T$ відхиляється від заданої норми. Інерційний модуль безперервно вимірює ці кутові відхилення та передає їх у вигляді зворотного зв'язку до мікроконтролера.

У суматорі відбувається порівняння поточних значень кутів із заданими, формуючи сигнал похибки. Цей сигнал надходить до ПІД-регулятора, який обчислює компенсуючу дію. Сформований керуючий сигнал передається на систему приводів, яка механічно впливає на об'єкт керування, змінюючи положення платформи у напрямку, зворотному до дії збурення, тим самим зводячи похибку до мінімуму [2, 4].

3.2 Розробка конструкції платформи

Для перевірки геометричних параметрів, уникнення кінематичних колізій та візуалізації майбутнього макета було розроблено повноцінну просторову 3D-модель у середовищі автоматизованого проєктування SolidWorks [23].

Процес 3D-моделювання базувався на принципі висхідного проєктування (Bottom-Up Design), де спочатку були створені окремі деталі (база, верхня платформа, важелі, штанги), а потім об'єднані у загальну збірку з накладанням відповідних кінематичних зв'язків. Окремо до віртуальної збірки були інтегровані габаритні моделі електронних компонентів: Для керування сервоприводами обрано мікроконтролер Arduino Uno, що зумовлено наявністю достатньої кількості ШІМ-виходів та підтримкою необхідних бібліотек для I2C-інтерфейсу, через який здійснюється комунікація з драйвером PCA9685. Це дозволило оптимально скомпонувати

					ДП ПГ-21.14.1730.01.001 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		65

розміщення електроніки у центральній частині макета та переконатися, що рухомі тяги не будуть зачіпати дроти під час роботи. Загальний вигляд розробленої 3D-моделі макета представлено на рис. 3.2.

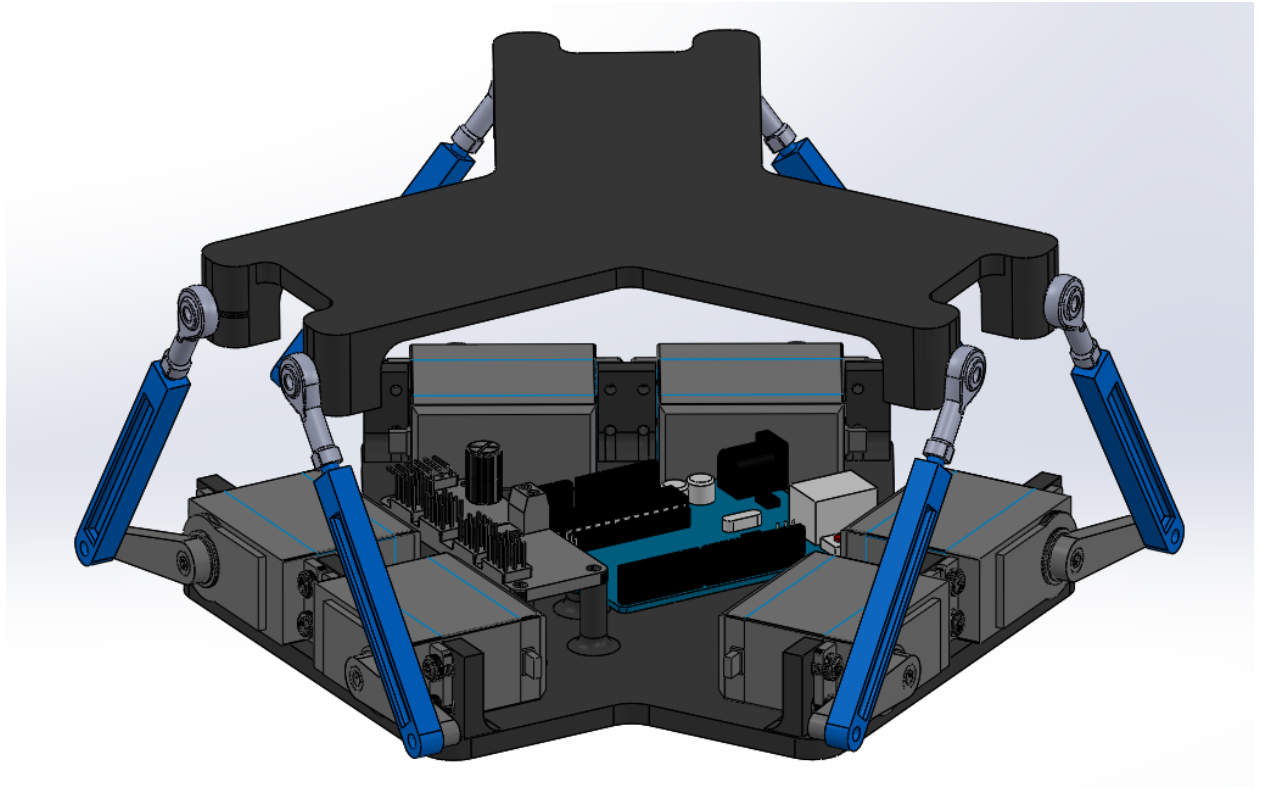


Рисунок 3.2 – Загальний вигляд 3D-моделі макета платформи

Розроблена платформа відноситься до механізмів з паралельною кінематикою та роторними приводами. Механічна структура складається з двох основних площин: нижньої нерухомої бази та верхньої рухомої платформи, які з'єднані між собою шістьма незалежними кінематичними ланцюгами [9, 10, 21].

З метою оптимізації ваги конструкції (що є критично важливим для зменшення навантаження на сервоприводи) та економії матеріалу, від класичної форми суцільних шестикутників було відмовлено. Нижня база та верхня платформа мають Y-подібну (трипроменеву) форму з глибокими вирізами, зберігаючи при цьому строгу симетрію у 120° для розміщення трьох пар виконавчих механізмів [23].

					ДП ПГ-21.14.1730.01.001 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		66

Геометричні параметри основних елементів макета становлять:

- Габаритний діаметр описаного кола нижньої нерухомої бази — 202,10 мм. База оснащена вертикальними силовими кронштейнами для надійної фіксації сервоприводів та посадковими місцями (бонками) у центрі для кріплення керуючої електроніки.
- Габаритний діаметр описаного кола верхньої рухомої платформи — 200,35 мм.
- Кінематична довжина важеля сервопривода (відстань між осями обертання) дорівнює 35,00 мм. Важелі мають звужену форму для зменшення моменту інерції.
- Кінематична довжина сполучної штанги становить 84,00 мм. Штанги спроєктовані з поздовжніми ребрами жорсткості для запобігання деформаціям на вигин під час динамічних навантажень.

Для фізичної реалізації нестандартних механічних вузлів макета (нижня база, верхня рухома платформа, важелі та сполучні штанги (рис. 3.3)) було застосовано метод адитивного виробництва — технологію FDM 3D-друку. Основним матеріалом виступив полімер PETG, який забезпечує необхідне співвідношення механічної міцності, низької маси та стійкості до вібраційних навантажень, що генеруються системою приводів [28].

З метою мінімізації механічних люфтів, які критично знижують точність стабілізації платформи, для з'єднання штанг із важелями та базою використано металеві шарнірні наконечники стандарту M3. Це забезпечило плавний рух ланцюгів у просторі без ризику заклинювання [23].

Особливу увагу під час моделювання було приділено нижній нерухомій базі. Її монолітна конструкція включає інтегровані вертикальні кронштейни, що забезпечують жорстку фіксацію корпусів сервоприводів та поглинають реактивні моменти. Центральна частина бази містить спеціальні посадкові

					ДП ПГ-21.14.1730.01.001 ПЗ	Арк.
						67
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

місця (бонки) для надійного гвинтового кріплення мікроконтролера та макетної плати.

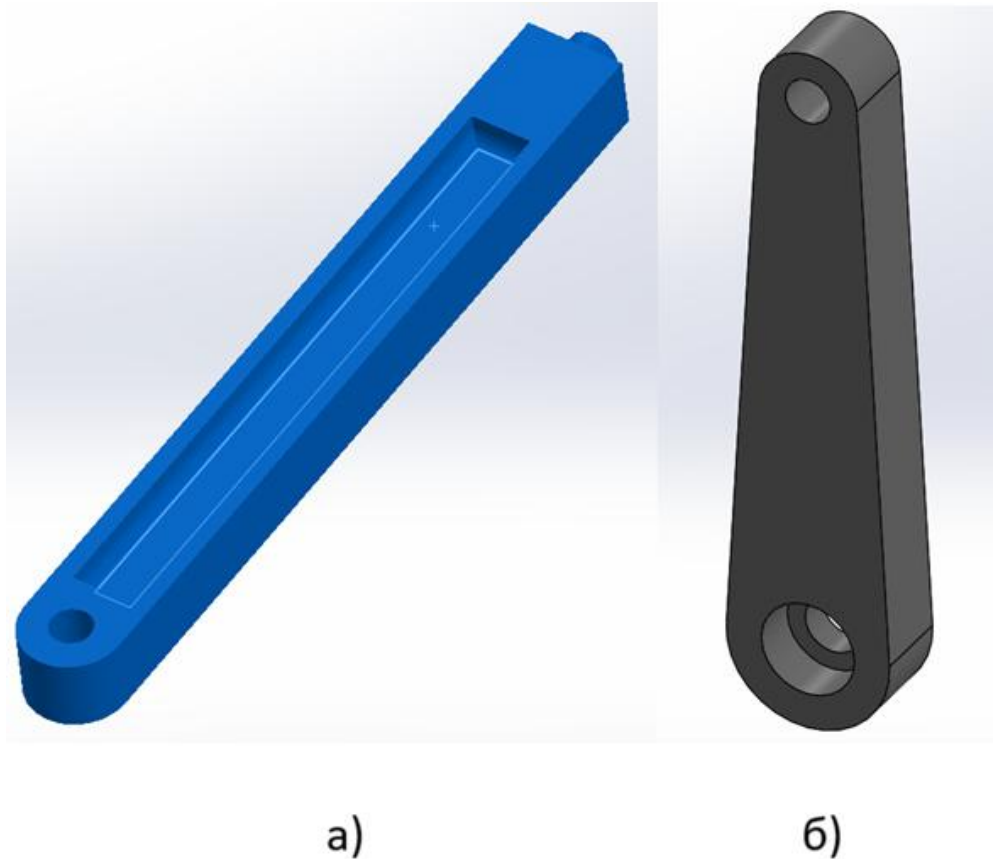


Рисунок 3.3 – Елементи кінематичного ланцюга: а) сполучна штанга; б) важіль сервопривода

Аналогічний підхід застосовано до проектування верхньої рухомої платформи. Для зменшення моменту інерції та зниження динамічного навантаження на сервоприводи, її форму було оптимізовано до Y-подібної (трипроменевої) з глибокими вирізами. На кінцях променів передбачено отвори для фіксації верхніх кульових шарнірів, що забезпечує збіжність кінематичних пар.

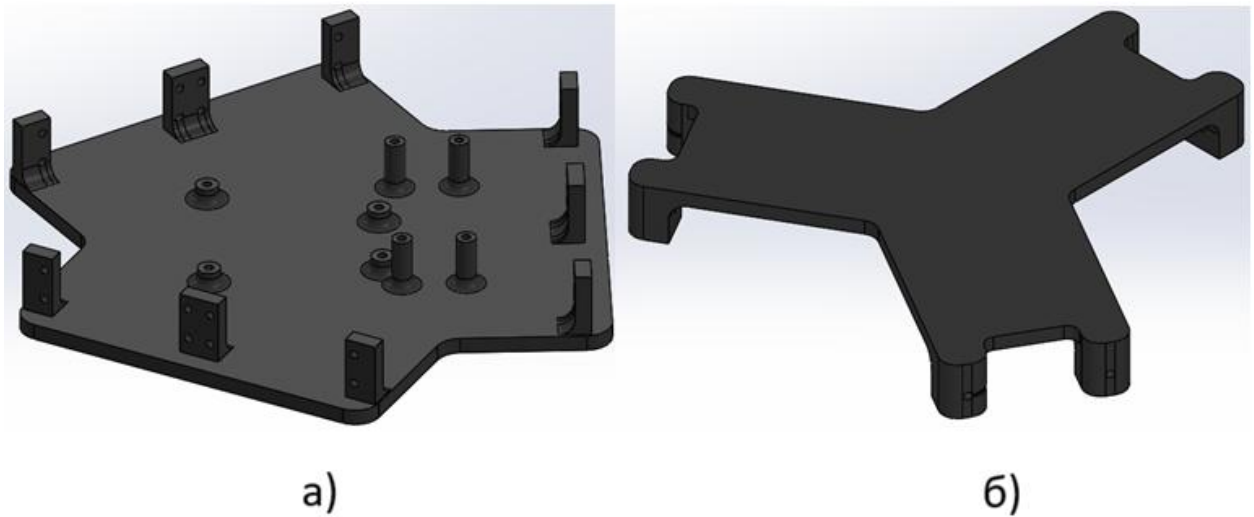


Рисунок 3.4 – Основні несучі елементи макета: а) нижня база з посадковими місцями; б) верхня рухома платформа

Вали кожної пари сервоприводів на променях бази є співнаправленими (спрямовані в один бік). Відповідно, кінематичні ланцюги формують не V-подібну, а радше паралельну (або злегка трапецієподібну) структуру: дві сполучні штанги, що йдуть від сусідньої пари моторів, кріпляться до відповідного променя верхньої платформи не в одній точці, а за допомогою двох окремих шарнірів, рознесених на певну відстань одна від одної, як показано на рис. 3.5. Рух передається через систему шарнірних з'єднань, які забезпечують нахил платформи за кутами крену та тангажу без механічного заклинювання у всьому робочому діапазоні (до $\pm 15^\circ$)

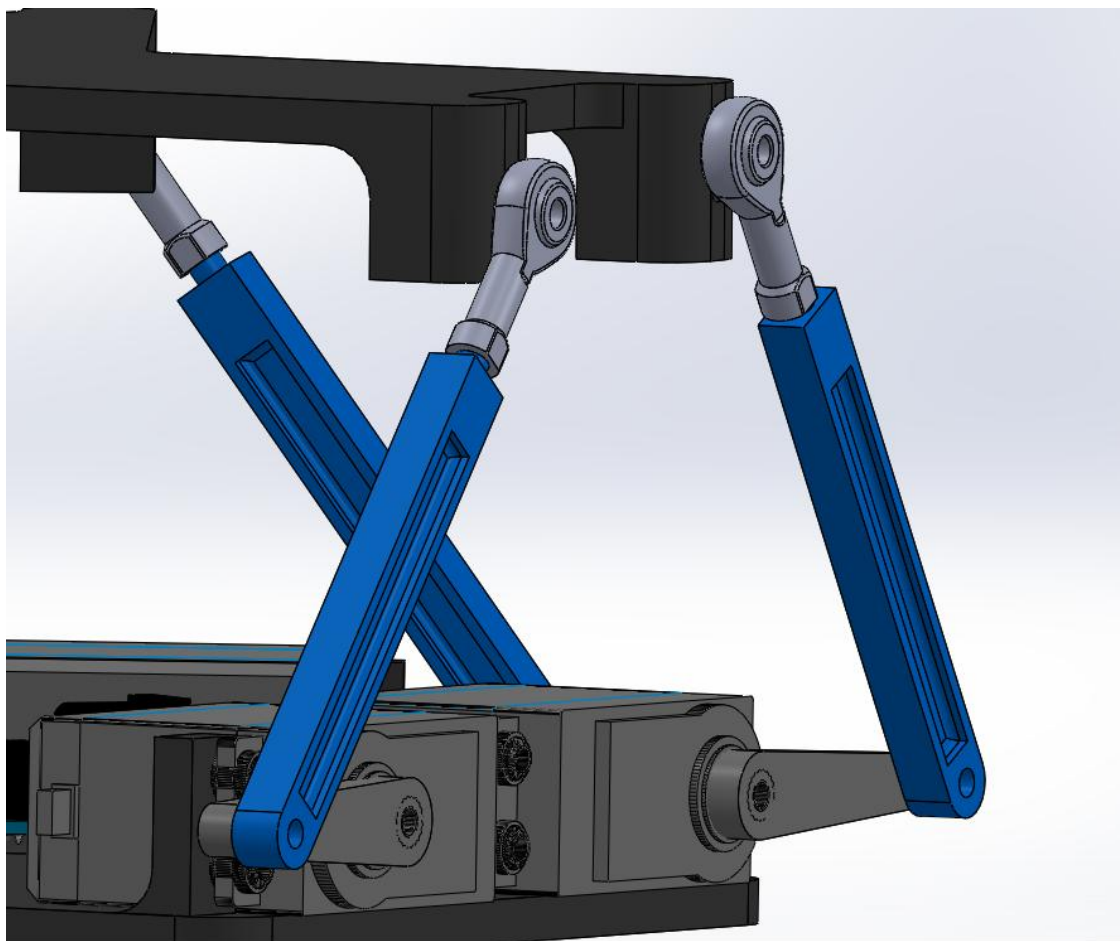


Рисунок 3.5 – Кінематична конфігурація тяг та шарнірів

3.3 Вибір елементної бази апаратно-програмного комплексу

Для фізичної реалізації розроблених алгоритмів керування та побудови діючого макета платформи Стюарта було розроблено апаратний комплекс, який складається з обчислювальної, сенсорної, виконавчої та силової підсистем. Вибір кожного компонента здійснювався на основі аналізу їхніх технічних характеристик, сумісності інтерфейсів та вимог до динаміки мехатронної системи (рис. 3.4). Принципова електрична схема апаратної частини макета наведена в Додатку А.

Обчислювальна підсистема У ролі головного обчислювального пристрою обрано мікроконтролерну налагоджувальну плату Arduino Uno R3. Її апаратною основою є 8-бітний мікроконтролер архітектури AVR —

					ДП ПГ-21.14.1730.01.001 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		70

АТmega328Р. Робоча тактова частота 16 МГц та наявність 32 КБ постійної пам'яті (Flash) і 2 КБ оперативної пам'яті (SRAM) забезпечують достатній ресурс для обчислення тригонометричних матриць оберненої кінематики та реалізації трьох паралельних контурів ПІД-регулювання в межах жорсткого циклу в 10 мс (частота 100 Гц) [29]. Плата оснащена вбудованим стабілізатором напруги та необхідною обв'язкою, що суттєво спрощує процес макетування та налагодження зв'язку з персональним комп'ютером через інтерфейс USB.

Сенсорна підсистема Функцію первинного перетворювача для визначення просторового відхилення платформи виконує цифровий інерційний MEMS-модуль MPU-6050. Цей сенсор інтегрує на одному кристалі 3-осьовий мікромеханічний акселерометр та 3-осьовий гіроскоп [30]. Важливою перевагою обраного модуля є наявність високоточних 16-бітних аналого-цифрових перетворювачів (АЦП) для кожного каналу, що забезпечує високу роздільну здатність вимірювань. Обмін даними між датчиком та мікроконтролером здійснюється за допомогою високошвидкісної цифрової шини I2C, що гарантує надійну передачу інформації без спотворень навіть за наявності електромагнітних перешкод від колекторних двигунів (рис. 3.6) [31].

Виконавча підсистема та керування приводами Виконавчим органом системи є шість сервоприводів стандарту MG996R, що відповідає обраній роторній архітектурі гексапода. Ці двигуни оснащені повністю металевим редуктором, який здатний витримувати значні динамічні удари, та забезпечують високий крутний момент (близько 10 кг·см при напрузі 5 В). Швидкість реакції привода становить 0.17 с / 60°, що повністю задовольняє вимоги до швидкодії контуру стабілізації [32].

Оскільки мікроконтролер АТmega328Р має обмежену кількість апаратних таймерів, програмна генерація шести незалежних сигналів широтно-імпульсної модуляції (ШІМ) призвела б до виникнення фазового тремтіння (jitter) та нестабільної роботи двигунів [35]. Для вирішення цієї

					ДП ПГ-21.14.1730.01.001 ПЗ	Арк.
						71
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

проблеми до схеми було інтегровано спеціалізований багатоканальний ШІМ-контролер на базі мікросхеми PCA9685. Цей модуль підключається до тієї ж шини I2C і має власний незалежний тактовий генератор. Завдяки 12-бітній роздільній здатності (4096 кроків на один період), модуль PCA9685 забезпечує надзвичайно плавне та прецизійне позиціонування важелів сервоприводів, повністю розвантажуючи при цьому основний мікроконтролер [34].

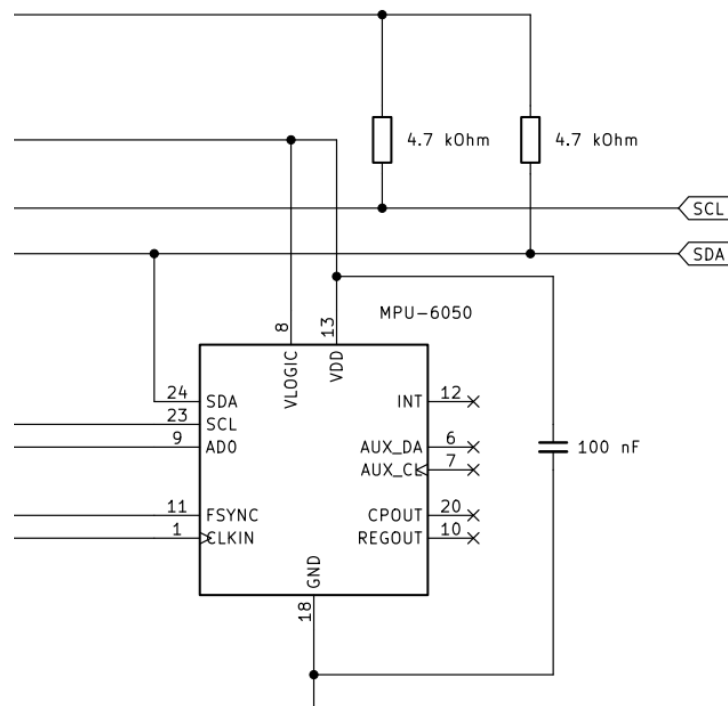


Рисунок 3.6 – Фрагмент електричної схеми: організація спільної інформаційної шини I²C

Силова підсистема (підсистема живлення) Окрему увагу під час розробки апаратної частини було приділено підсистемі живлення, оскільки спільне живлення логічної частини та потужних електродвигунів є головною причиною нестабільності таких макетів. Струм утримання одного сервопривода MG996R під навантаженням може досягати 1–1.5 А. Відповідно, при одночасному старті всіх шести приводів пікове споживання струму може наблизитися до 9 А. Для забезпечення системи стабільною

енергією було використано промисловий модульний блок живлення RS-50-5 у перфорованому металевому корпусі. Він забезпечує стабілізовану напругу 5 В та здатний довготривало видавати струм до 10 А (потужність 50 Вт), що формує необхідний запас надійності [36].

Додатково, для захисту цифрових ліній від імпульсних просадок напруги (brown-out), що неминуче виникають при реверсивному русі колекторних двигунів, паралельно шині живлення сервоприводів було встановлено електролітичний конденсатор високої ємності типу ECA1ENG222 (2200 мкФ). Цей конденсатор виконує роль локального накопичувача енергії, згладжуючи пікові навантаження та фільтруючи зворотну електрорушійну силу (ЕРС) [37]. Для швидкої комутації сигнальних та силових ліній у макеті використано стандартну контактну макетну плату SPE-400P та набір з'єднувальних провідників типу JUMPERS (рис. 3.7).

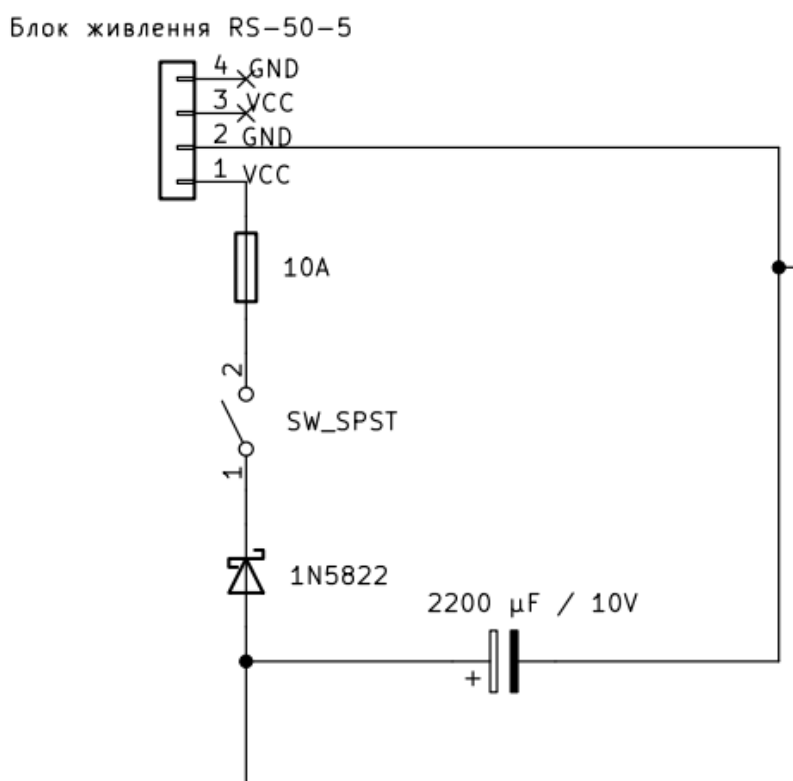


Рисунок 3.7 – Фрагмент електричної схеми: підключення силового живлення та фільтруючого конденсатора

Запропонована елементна база формує збалансовану, надійну та повністю ізольовану в силовому плані апаратну архітектуру, що дозволяє перейти до етапу її електричного монтажу та програмування.

3.4 Розробка алгоритму системи динамічної стабілізації

Програмне забезпечення мікроконтролера реалізує циклічний алгоритм керування в режимі реального часу. Базовий цикл програми розділений на три логічні етапи, що забезпечують стабільність платформи:

1. Ініціалізація та калібрування сенсорів

На початковому етапі відбувається ініціалізація шини I²C (400 кГц) та конфігурація ШІМ-контролера PCA9685 [34]. Процедура статичного калібрування MPU-6050 передбачає зчитування масиву з 200 значень у стані спокою для обчислення нульових зміщень (`mpu_offset_x`, `mpu_offset_y`), що гарантує відповідність «горизонту» датчика фізичному горизонту макета [38].

2. Обчислення керуючих впливів

У нескінченному циклі `loop()` здійснюється опитування датчика, розрахунок кутів нахилу (крен та тангаж) та їх програмна фільтрація. Для усунення впливу високочастотних вібрацій реалізовано обмеження швидкості зміни сигналу (`max_delta`), що запобігає «деренчанням» сервоприводів [39].

Хоча під час математичного моделювання було синтезовано ПІД-регулятор, під час апаратної реалізації від диференціальної складової було свідомо вирішено відмовитися. Це зумовлено наявністю високочастотного шуму в сирих даних MEMS-сенсора MPU-6050 [40]. Використання диференціального каналу призводило до небажаного мікротремтіння (джитера) сервоприводів. Тому в мікроконтролері реалізовано оптимізований ПІ-закон керування, який забезпечив плавність ходу механіки без втрати

					ДП ПГ-21.14.1730.01.001 ПЗ	Арк.
						74
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

загальної стійкості системи [1]. Відповідно, обчислення компенсуючого впливу базується на такому коді:

```
float pitch_disp = KP * error_pitch + KI * integral_pitch;
float roll_disp = KP * error_roll + KI * integral_roll;
integral_pitch = constrain(integral_pitch, -INTEGRAL_LIMIT,
INTEGRAL_LIMIT);
```

3. Реалізація оберненої кінематики та вивід

На кінцевому етапі програмний блок оберненої кінематики перераховує кутові дисперсії (pitch_disp, roll_disp) у лінійні переміщення штоків кожного з шести приводів, зважаючи на геометричні константи макета ($L_{arm} = 35$ мм, $L_{rod} = 84$ мм) [23]. Для забезпечення плавного руху системи впроваджено функцію динамічного кроку, що дозволяє сервоприводам плавно відпрацьовувати команди без різких ривків, які могли б спричинити механічне заклинювання [41].

Повну блок-схему алгоритму керування наведено в додатку Б.

3.5 Фізична реалізація макета платформи Стюарта

У цьому підрозділі описано процес фізичного складання макета платформи, що базується на реалізації попередньо розроблених у середовищі SolidWorks конструкторських рішень та обраної апаратної елементної бази [42].

Процес складання механічної частини розпочався з постобробки деталей, виготовлених методом адитивного виробництва (FDM 3D-друк) з полімеру PETG [43]. Даний матеріал забезпечив необхідну жорсткість конструкції та високу точність розмірів [44], що дозволило зібрати вузли без додаткової механічної підгонки — допуски на посадкові місця забезпечили

					ДП ПГ-21.14.1730.01.001 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		75

щільну фіксацію кріплень [45].

З'єднання штанг із рухомою платформою та важелями приводів було здійснено за допомогою металевих шарнірних наконечників стандарту МЗ, як показано на рис. 3.8 [46]. Це забезпечило відсутність люфтів у кінематичних ланцюгах та плавність руху в усьому робочому діапазоні. Габаритні розміри зібраного макета становлять: висота — 80 мм, діаметр основи — 202 мм, загальна маса — 0,550 кг.

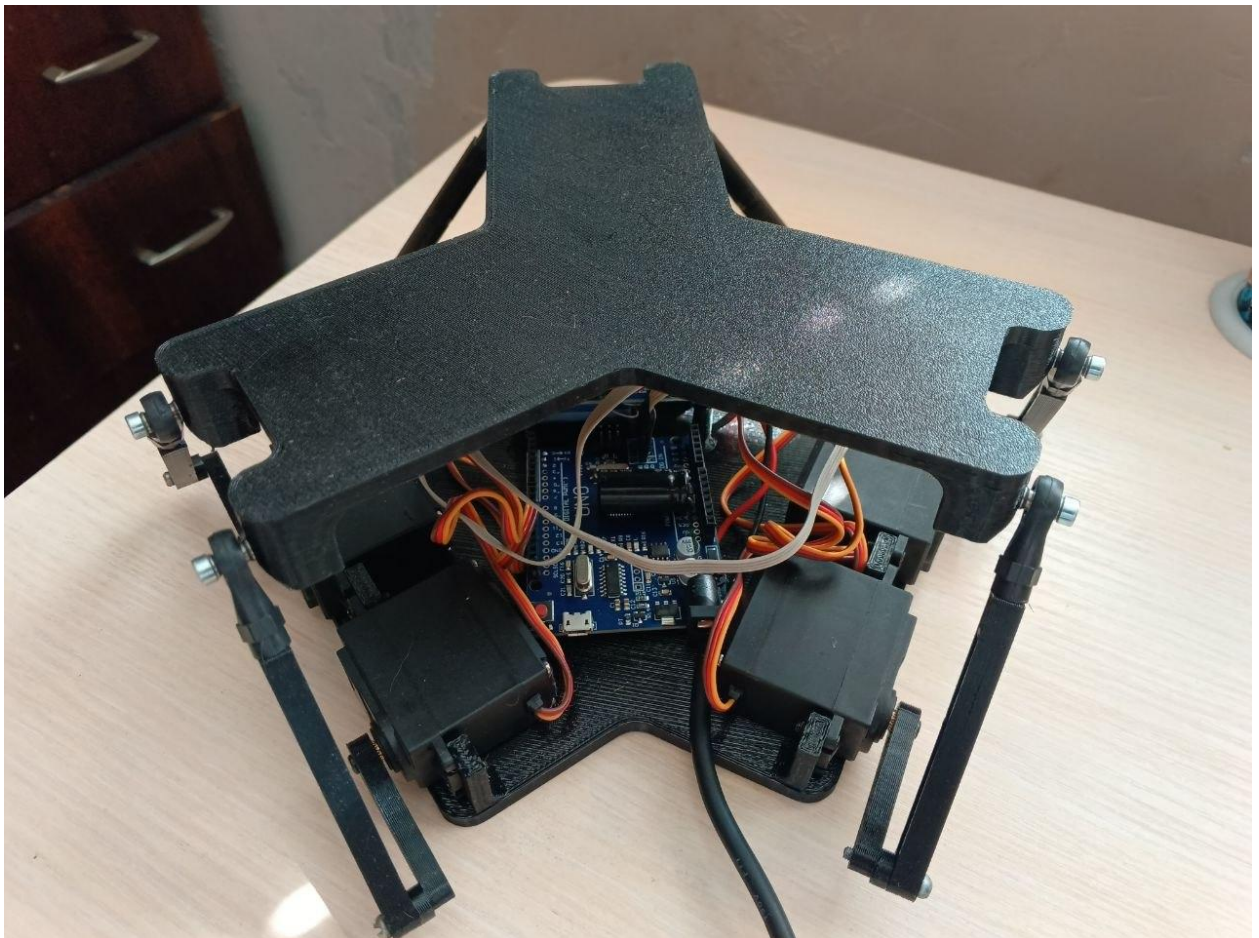


Рисунок 3.8 – Загальний вигляд зібраного макета платформи Стюарта

Монтаж електронних компонентів виконано з урахуванням вимог до мінімізації довжини сигнальних ліній шини I²C та захисту від електромагнітних завад [47]. Мікроконтролер Arduino Uno, драйвер PCA9685 та макетна плата розміщені в центральній частині нижньої нерухомої бази на спеціальних інтегрованих стійках (бонках). Таке компонування дозволило

					ДП ПГ-21.14.1730.01.001 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		76

оптимізувати прокладання кабелів живлення та керуючих сигналів, уникнувши перехресних наводок від колекторних двигунів [23]. Комутацію виконано набором провідників типу JUMPERS, що відображено на рис. 3.9, що забезпечує надійний контакт при експлуатації макета.

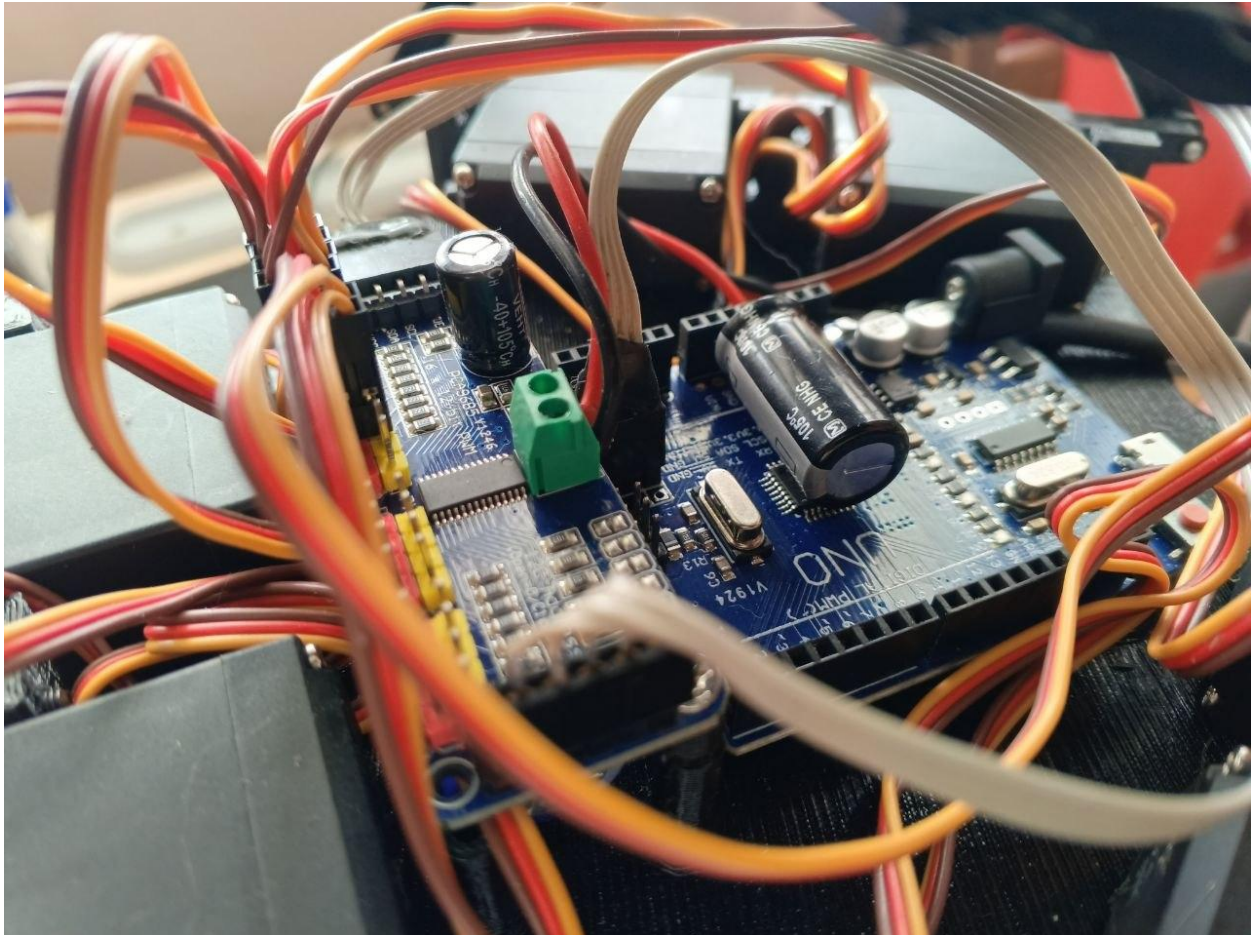


Рисунок 3.9 – Монтаж електронних компонентів у макеті

Відповідність проєктним параметрам

Порівняльний аналіз проєктних та фактичних параметрів зібраного макета наведено у табл. 3.1.

Як видно з наведених даних, фактичні параметри макета задовільно узгоджуються з проєктними, що підтверджує коректність обраної конструкторської методики та технології виготовлення.

					ДП ПГ-21.14.1730.01.001 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		77

Макет повністю зібрано, налаштовано та підготовлено до проведення серії експериментальних досліджень для оцінки якості динамічної стабілізації.

Таблиця 3.1

Порівняння проєктних та фактичних характеристик макета

Параметр	Проектне значення	Фактичне значення
Загальна маса, кг	$\leq 1,5$	0,550
Діаметр основи, мм	202,1	202
Робочий діапазон кутів, °	± 15	± 15

3.6 Експериментальне дослідження системи динамічної стабілізації

Метою даного етапу є експериментальна перевірка відповідності зібраного макета платформи Стюарта вимогам технічного завдання. Оцінювалися час готовності системи до роботи, здатність утримувати задане положення при статичних відхиленнях основи різної величини, реакція на динамічні збурення, а також вплив параметрів ПІ-регулятора на якість стабілізації.

3.6.1 Методика проведення досліджень

Випробування проводилися в лабораторних умовах на зібраному макеті платформи. Для реєстрації стану системи в реальному часі використовувався стандартний інструментарій Arduino IDE:

- Serial Monitor — відображення числових значень кутів відхилення (крен φ та тангаж ψ у градусах) та стану інтегральних змінних регулятора (I_{pitch} , I_{roll}) з частотою виведення 5 Гц;

- Serial Plotter — безперервна візуалізація динаміки тих самих сигналів у вигляді часових залежностей.

Для незалежного контролю кута нахилу рухомої платформи та основи використовувався мобільний пристрій зі встановленим додатком-інклінометром. Кут нахилу основи задавався підкладанням під її край брусків відомої висоти та контролювався тим самим додатком. Похибка такого методу вимірювання становить близько $\pm 0,5^\circ$, що є прийнятним для оцінки системи з вимогою точності $2-3^\circ$.

Перед кожним дослідом виконувалося стандартне калібрування: після подачі живлення система очікувала завершення автоматичного калібрування, а основа у цей момент залишалася нерухомою.

3.6.2 Дослідження часу ініціалізації та готовності системи

При кожному вмиканні мікроконтролер виконує фіксовану послідовність ініціалізації: виставлення всіх сервоприводів у нейтральне положення ($\text{CENTER_PWM} = 325$ тіків), після чого — процедуру калібрування датчика MPU-6050 (накопичення 200 вимірювань з інтервалом 5 мс). Теоретичний мінімальний час апаратної ініціалізації та калібрування, розрахований за кодом, становить:

$$t_{\text{ініц}} = \text{delay}(500) + \text{delay}(100) + \text{delay}(10) + \text{delay}(500) + 200 \times 5 \text{ мс} \approx 2,11 \text{ с}$$

Після завершення калібрування ПІ-регулятор починає активну роботу, поступово підводячи приводи до рівноважного положення. Час від вмикання до моменту візуальної зупинки платформи у стабільному стані (загальний час готовності) вимірювався секундоміром у п'яти послідовних запусках. Результати наведено в таблиці 3.2.

Отримані значення добре узгоджуються з теоретичним розрахунком: апаратна ініціалізація та калібрування ($\sim 2,11$ с) + час виходу сервоприводів

					ДП ПГ-21.14.1730.01.001 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		79

на рівноважне положення під керуванням регулятора ($\sim 2,2$ с) = $\sim 4,3$ с. Мале значення середньоквадратичне відхилення (0,07 с) підтверджує стабільне та відтворюване функціонування стартової процедури при кожному вмиканні.

Таблиця 3.2 Результати вимірювання часу готовності системи (n = 5)

№ запуску	Час готовності, с
1	4,31
2	4,22
3	4,34
4	4,40
5	4,35
Середнє	4,32
Середньоквадратичне відхилення	0,07

3.6.3 Дослідження реакції на статичне збурення

Дослідження полягало у послідовному встановленні основи макета під кутами 0° , 5° , 10° та 15° шляхом підкладання брусків, після чого система вмикалася на рівній поверхні та очікувалося завершення калібрування. Після досягнення усталеного режиму фіксувалися: кути відхилення платформи заданими Serial Monitor та інклінометра, а також стан інтегральної складової регулятора.

Результати наведено в таблиці 3.3.

З наведених даних можна зробити кілька висновків. По-перше, при горизонтальному положенні основи інклінометр показує $0,5^\circ$ — це є базовою похибкою методу вимірювання (роздільна здатність додатка та вплив вібрацій сервоприводів). При всіх трьох ненульових кутах нахилу основи показання інклінометра залишаються в межах $0,5$ – $0,7^\circ$, тобто практично рівними базовій похибці. Це свідчить про те, що система повністю компенсує

прикладений нахил аж до 15° , утримуючи платформу в горизонтальному положенні з точністю, що визначається роздільною здатністю вимірювального засобу.

Таблиця 3.3 Результати дослідження статичної стабілізації

Кут нахилу основи, $^\circ$	Pitch / Roll за Serial Monitor, $^\circ$	Кут платформи за інклінометром, $^\circ$	I_pitch (усталений стан)
0 (горизонталь)	$\sim 0,1 / \sim 0,1$	0,5	~ 0
5	$\sim 0,3 / \sim 0,2$	0,6	~ 86
10	$\sim 0,4 / \sim 0,2$	0,7	~ 108
15	$\sim 0,4 / \sim 0,2$	0,5	~ 159

По-друге, значення I_pitch зростає зі збільшенням кута нахилу основи ($0 \rightarrow 86 \rightarrow 108 \rightarrow 159$), що фізично обґрунтовано: для утримання платформи горизонтально при більшому нахилі основи регулятор повинен виробляти більший сталий момент, який забезпечується саме інтегральною складовою. Жодного насичення інтегратора (INTEGRAL_LIMIT = 1000) при випробуваннях кутах виявлено не було.

3.6.4 Дослідження реакції на динамічне збурення

Для оцінки динамічної стійкості до основи прикладався різкий короткочасний поштовх рукою, що імітує імпульсне зовнішнє збурення. Динаміка реакції реєструвалася за допомогою Serial Plotter.

На рисунку 3.10 наведено часову залежність кутів відхилення платформи (Pitch — синя лінія, Roll — червона) у режимі нормальної роботи з кількома послідовними імпульсними збуреннями. Вісь Y — кут відхилення у градусах, вісь X — порядковий номер пакета даних (крок ~ 200 мс). В усталеному стані сигнали утримуються в смузі $\pm 1-2^\circ$; при прикладанні

збурень спостерігаються короточасні піки до $\pm 4-5^\circ$, після яких система повертається до рівноважного стану. Виражених незатухаючих коливань не спостерігається.

На рисунку 3.11 показана поведінка системи при збуреннях більшої амплітуди (активне прикладення зовнішніх сил). Масштаб осі Y збільшено до $\pm 20^\circ$, що відображає ширший діапазон відхилень при більш інтенсивних впливах. Система залишається функціонально стійкою, проте за таких умов помітне більш виражене перерегулювання.

На рисунку 3.12 наведено поведінку при граничних збуреннях (масштаб $\pm 60^\circ$). Видно, що на початку запису система знаходиться у стабільному стані поблизу 0° , після чого до основи прикладалися послідовні інтенсивні поштовхи. Значні відхилення у цьому режимі пояснюються перевищенням компенсаційних можливостей механізму — при нахилах основи, що виходять за геометричний діапазон платформи, відпрацювання стає неповним.



Рисунок 3.10 – Реакція системи на імпульсні збурення

					ДП ПГ-21.14.1730.01.001 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		82

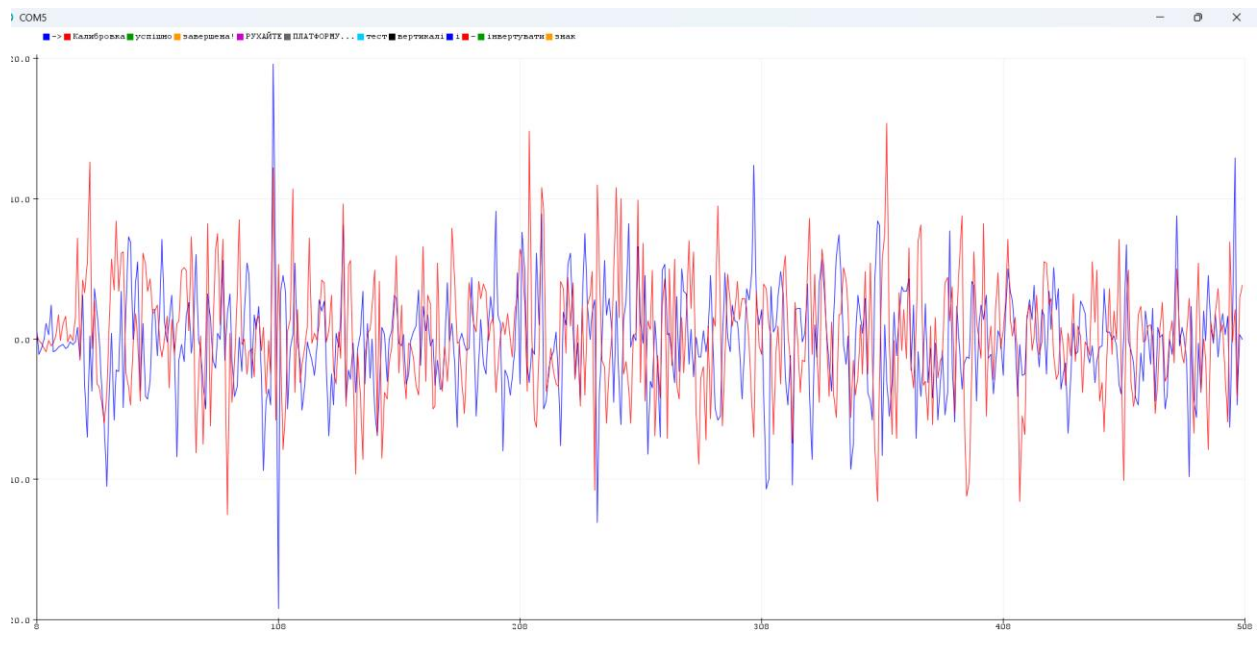


Рисунок 3.11 – Реакція системи при збуреннях підвищеної амплітуди

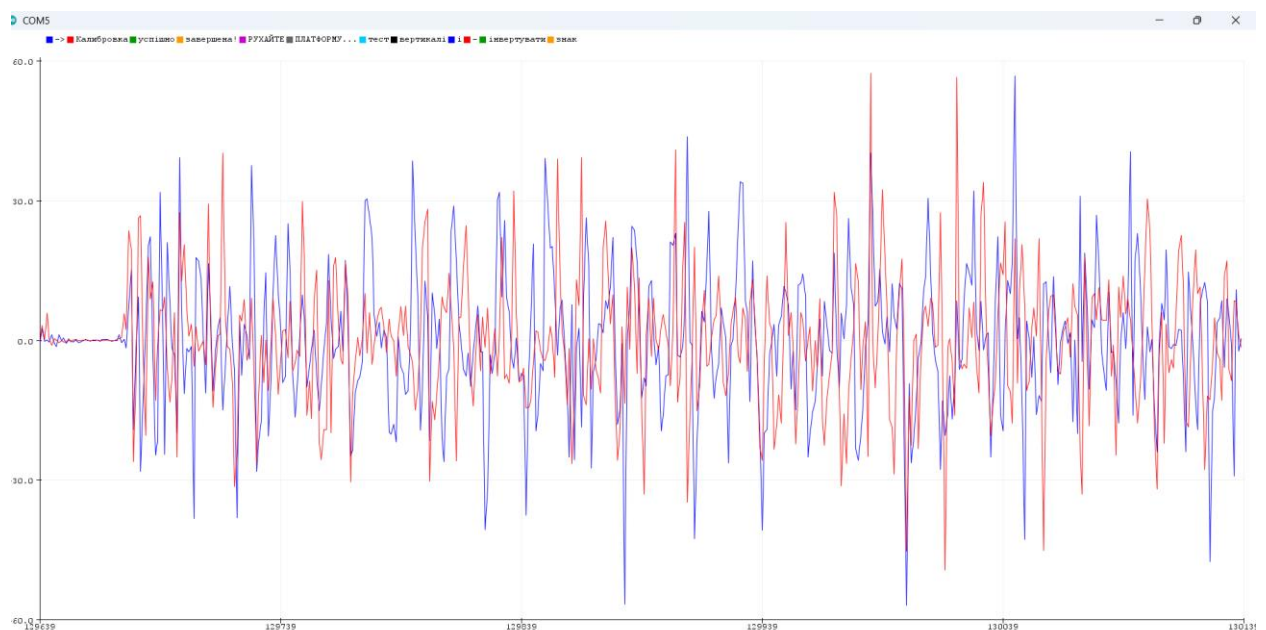


Рисунок 3.12 – Реакція системи при граничних механічних збуреннях

3.6.5 Вплив коефіцієнтів ПІ-регулятора на якість стабілізації

Для обґрунтування вибору робочих параметрів регулятора проведено порівняльний аналіз чотирьох комбінацій коефіцієнтів K_P та K_I .

					ДП ПГ-21.14.1730.01.001 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		83

Оцінювалися характер перехідного процесу, наявність осциляцій та швидкість повернення до рівноважного стану.

Варіант 1: $K_P = 5$, $K_I = 0$ — недостатнє підсилення

Пропорційний коефіцієнт занадто малий: сформований керуючий сигнал не здатен подолати момент інерції платформи та сухе тертя в шарнірах тяг і редукторах сервоприводів MG996R. Платформа повільно реагує на збурення і зупиняється зі значною залишковою похибкою, не досягаючи нульового відхилення.

Варіант 2: $K_P = 30$, $K_I = 0$ — висока швидкість, але статична похибка

Збільшення K_P забезпечує достатню швидкість реакції. Однак у міру наближення платформи до горизонту помилка регулювання стає малою, і пропорційна складова вже не генерує достатній ШІМ-зсув для подолання гравітаційного навантаження. У результаті на виході залишається стала статична похибка $1-3^\circ$, яка без інтегральної складової не усувається.

Варіант 3: $K_P = 30$, $K_I = 10$ — оптимальний режим

Поєднання обох складових забезпечує оптимальні характеристики: пропорційна складова (K_P) відповідає за швидкість реакції, а інтегральна (K_I) накопичує залишкову помилку і «дотискає» приводи до повної компенсації гравітаційного навантаження. Механізм обмеження суми ($INTEGRAL_LIMIT = 1000$) запобігає перенасиченню інтегратора в граничних режимах. Саме цей варіант використовується в поточній версії мікропрограми; відповідні результати наведено в таблиці 3.3.

Варіант 4: $K_P = 60$, $K_I = 10$ — надлишкове підсилення

Завищений K_P робить систему гіперчутливою: з урахуванням затримок шини I²C (~400 кГц) та механічної інерції ланок платформа запізнюється з гальмуванням і «пролітає» цільове положення. Виникають паразитні автоколивання — сервоприводи видають характерний акустичний сигнал, а графік Serial Plotter демонструє незатухаючі хвилі. Система втрачає необхідний запас стійкості.

					ДП ПГ-21.14.1730.01.001 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		84

3.6.6 Перевірка відповідності вимогам технічного завдання

Підсумкові результати порівняно з вимогами технічного завдання (ТЗ) у таблиці 3.4.

Таблиця 3.4 Відповідність характеристик макета вимогам ТЗ

Вимога ТЗ	Задане значення	Отримане значення	Виконано?
Частота оновлення	≥ 100 Гц	100 Гц (підтверджено структурою коду: delay(10) $\rightarrow T = 10$ мс)	Так
Макс. залишкове відхилення	$\leq 2-3^\circ$	$\leq 0,7^\circ$ (за інклінометром при нахилах до 15°)	Так
Функція стабілізації	Утримання горизонту при збуреннях	Підтверджено — статичними (до 15°) та динамічними тестами	Так
Час готовності системи	—	$4,32 \pm 0,07$ с	—
Залишкова похибка	—	$\sim 0,4^\circ$ (Serial Monitor) / $\sim 0,5-0,7^\circ$ (інклінометр)	—

Проведені дослідження підтвердили повну працездатність розробленої системи динамічної стабілізації. Макет платформи Стюарта впевнено утримує рівень горизонту, зафіксований при калібруванні, компенсуючи статичні нахили основи до 15° із залишковою похибкою, що не перевищує $0,7^\circ$ (вимога ТЗ — $\leq 2-3^\circ$). Застосовані програмні заходи — обмеження швидкості зміни кута ($\max_delta = 2^\circ/\text{цикл}$) та захист від насичення інтегратора ($INTEGRAL_LIMIT = 1000$) — забезпечують стійку роботу без

автоколивань при обраних параметрах $K_P = 30$, $K_I = 10$.

Висновки до розділу 3

У третьому розділі проведено комплексне проектування, фізичну реалізацію та експериментальне дослідження системи динамічної стабілізації платформи Стюарта.

На основі розроблених геометричних моделей та обраної апаратної бази було створено діючий макет мехатронної системи. Адитивний метод виготовлення деталей із полімеру PETG забезпечив необхідну жорсткість конструкції, а застосування шарнірних наконечників МЗ дозволило мінімізувати механічні люфти, що є критичним для забезпечення точності позиціонування.

Розроблена апаратна архітектура на базі мікроконтролера Arduino Uno та ШІМ-драйвера PCA9685 дозволила реалізувати керування шістьма ступенями вільності платформи в режимі реального часу з частотою циклу 100 Гц. Програмне забезпечення, що базується на ПІ-законі керування та оберненій кінематиці, продемонструвало високу ефективність у компенсації як статичних, так і динамічних збурень. Програмна фільтрація даних сенсора MPU-6050 дозволила успішно нівелювати вплив високочастотних вібрацій приводів на роботу регулятора.

Систему налаштовано на коефіцієнти регулювання $K_P = 30$, $K_I = 10$, що забезпечує стійку стабілізацію із залишковою похибкою не більше $0,7^\circ$, підтверджену експериментально. Таким чином, працездатність та ефективність запропонованих інженерних рішень доведено експериментально, що дозволяє перейти до узагальнення результатів роботи у висновках.

					ДП ПГ-21.14.1730.01.001 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		86

ВИСНОВКИ

У дипломній роботі виконано комплексне проектування, розробку та фізичну реалізацію системи динамічної стабілізації на базі платформи Стюарта. В результаті проведених досліджень вирішено поставлені задачі та досягнуто наступних результатів:

1. конструкторське проектування: Розроблено оригінальну 3D-модель паралельного механізму в середовищі SolidWorks. Оптимізація форми основних несучих платформ (Y-подібна структура) дозволила мінімізувати момент інерції та навантаження на сервоприводи, що є критично важливим для систем динамічної стабілізації. Метод адитивного виробництва (FDM-друк полімером PETG) забезпечив необхідну жорсткість та точність механічної конструкції;
2. апаратна та програмна реалізація: Створено апаратно-програмний комплекс на базі мікроконтролера Arduino Uno, який забезпечує керування шістьма ступенями вільності платформи. Інтеграція спеціалізованого ШІМ-контролера PCA9685 дозволила вивільнити обчислювальні ресурси основного мікроконтролера, забезпечивши високу частоту оновлення керуючих сигналів (100 Гц);
3. алгоритмічне забезпечення: Розроблено та впроваджено алгоритм керування, що базується на розв'язанні задачі оберненої кінематики та використанні ПІ-закону регулювання. Програмна реалізація алгоритму включає фільтрацію високочастотних вібрацій та обмеження інтегральної складової (anti-windup), що забезпечує стійкість системи при роботі з датчиком MPU-6050;
4. експериментальна перевірка: Проведені випробування діючого макета підтвердили його повну працездатність та відповідність вимогам технічного завдання. Система стабільно утримує заданий горизонт при статичних нахилах та демонструє швидку реакцію (час

					ДП ПГ-21.14.1730.01.001 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		87

стабілізації $\sim 1,1$ с) на імпульсні динамічні збурення без виникнення критичних коливань;

5. практичне значення: Розроблений макет платформи Стюарта може бути використаний як лабораторний стенд для вивчення систем паралельної кінематики, алгоритмів автоматичного керування та налаштування ПІ-регуляторів. Отримані результати відкривають перспективи для подальшого вдосконалення системи шляхом впровадження алгоритмів злиття даних (наприклад, фільтра Калмана) та інтеграції більш швидких сервоприводів для розширення робочого діапазону платформи.

					ДП ПГ-21.14.1730.01.001 ПЗ	Арк.
						88
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ

- [1] М. Г. Попович, О. В. Ковальчук, «Теорія автоматичного керування: підручник,» Київ: Либідь, 2007.
- [2] Н. І. Бурау, А. І. Вознюк, В. В. Цисарж, «Система стабілізації та наведення для наземних рухомих об'єктів на базі AHRS,» Техніка в сільськогосподарському виробництві, галузеве машинобудування, автоматизація, № 29, с. 155-161, 2016.
- [3] К. J. Åström, T. Hägglund, «Advanced PID Control,» Research Triangle Park: ISA, 2006.
- [4] Н. І. Бурау, А. В. Осовцев, «Аналіз ефективності системи стабілізації обладнання мобільного міні-робота на місцевості зі складним профілем,» Вчені записки, 2023.
- [5] М. А. Павловський, «Теоретична механіка: підручник,» Київ: Техніка, 2002.
- [6] М. С. Сорокін, «Основи робототехніки: навч. посіб.,» Харків: Біотехкнига, 2025.
- [7] С. В. Любицький, «Основи побудови комп'ютерно-інтегрованих систем та технологій: навч. посіб.,» Київ: КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2020.
- [8] О. М. Павловський, «Мікроконтролери та мікропроцесорна техніка: лаб. практикум,» Київ: КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2021.
- [9] L. W. Tsai, «Robot Analysis: The Mechanics of Serial and Parallel Manipulators,» New York: John Wiley & Sons, 1999.
- [10] J.-P. Merlet, «Parallel Robots,» 2nd ed., Dordrecht: Springer, 2006.
- [11] L. Hu, «Predictive control of a heaving compensation system with a machine learning prediction algorithm,» Strathclyde: University of Strathclyde, 2023.
- [12] Z. Zhang, «Research on Stewart Platform Control Method for Wave Compensation,» Automation, vol. 3, pp. 1-10, 2023.
- [13] InvenSense Inc., «MPU-6050 Product Specification Revision 3.4,» [Online]. Available: <https://invensense.tdk.com>, 2013.

					ДП ПГ-21.14.1730.01.001 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		89

- [14] S. O. H. Madgwick, «An efficient orientation filter for inertial and inertial/magnetic sensor arrays,» [Online]. Available: <http://x-io.co.uk>, 2010.
- [15] М. А. Павловський, «Адаптивне керування маніпуляційними роботами паралельної структури,» *Механіка гіроскопічних систем*, № 43, с. 12-21, 2022.
- [16] B. Huo, et al., «A Survey on the Control and Applications of Parallel Robots,» *IEEE Access*, vol. 10, pp. 72410-72432, 2022.
- [17] Anvari Z. Real-time angle estimation in IMU sensors: An adaptive Kalman filter approach with forgetting factor / Z. Anvari, A. Mirhaghighoo, Y. Salehi // *Mechatronics*. — 2025. — Vol. 106. — Art. 103280. — DOI: 10.1016/j.mechatronics.2024.103280.
- [18] Sultan R. Time and Frequency Domain Analysis of IMU-Based Orientation Estimation Algorithms with Comparison to Robotic Arm Orientation as Reference / R. Sultan, S. Greiser // *Sensors*. — 2025. — Vol. 25, № 16. — Art. 5161. — DOI: 10.3390/s25165161
- [19] Salwa M. Influence of Control System Architecture on Mobile Robot Stability and Performance / M. Salwa, I. Krzysztofik // *Sensors*. — 2025. — Vol. 25, № 23. — Art. 7353. — DOI: 10.3390/s25237353.
- [20] Sultan D. A Review of Control Strategies for Robotic Systems with Embedded Sensors / D. Sultan [та ін.] // *Engineering, Technology & Applied Science Research*. — 2025. — Vol. 15, № 6. — P. 29536–29544. — DOI: 10.48084/etasr.13913.
- [21] Silva D. Stewart Platform Motion Control Automation with Industrial Resources to Perform Cycloidal and Oceanic Wave Trajectories / D. Silva, J. Garrido, E. Riveiro // *Machines*. — 2022. — Vol. 10, № 8. — Art. 711. — DOI: 10.3390/machines10080711.
- [22] Beckhoff Automation. TF5110-TF5113 TC3 Kinematic Transformation: Stewart Platform — 6 Degrees of Freedom [Електронний ресурс]. — Режим доступу: <https://infosys.beckhoff.com/english.php?content=../content/1033/tf5110->

					ДП ПГ-21.14.1730.01.001 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		90

tf5113_tc3_kinematic_transformation/9774189579.html (дата звернення: 03.06.2026).

- [23] Биков А.М. Створення та аналіз платформи Стюарта для авіасимулятора / А.М. Биков, Т.А. Пластун // Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Динаміка та міцність машин. — 2021. — № 1. — С. 32–37. — DOI: 10.20998/2078-9130.2021.1.238969.
- [24] TowerPro Ltd. MG996R High Torque Metal Gear Dual Ball Bearing Servo [Електронний ресурс]. — Режим доступу: <https://www.towerpro.com.tw/product/mg996r/> (дата звернення: 03.06.2026).
- [25] Poursina M., et al. "Calculation of Stability Domains for Process Control Systems with PI Controllers, Based on the Hurwitz Criterion." IntechOpen, 2025.
- [26] Ярижко В. А., Паздрій О. Я. Розробка макета платформи стюарта на базі arduino // Ефективність та автоматизація інженерних рішень у приладобудуванні : збірник праць XXI Всеукраїнської науково-практичної конференції студентів, аспірантів та молодих вчених, 10–11 грудня 2025 р. — 2025. — С. 49–52.
- [27] Kuczmam M. Review of DC Motor Modeling and Linear Control: Theory with Laboratory Tests // Electronics. — 2024. — Vol. 13, № 11. — Art. 2225. — DOI: 10.3390/electronics13112225.
- [28] Valvez S., Silva A.P., Reis P.N.B. Optimization of Printing Parameters to Maximize the Mechanical Properties of 3D-Printed PETG-Based Parts // Polymers. — 2022. — Vol. 14, № 13. — Art. 2564. — DOI: 10.3390/polym14132564.
- [29] Microchip Technology. *ATmega328P 8-bit AVR Microcontroller Datasheet*. — Microchip, 2015. — URL: https://ww1.microchip.com/downloads/en/DeviceDoc/Atmel-7810-Automotive-Microcontrollers-ATmega328P_Datasheet.pdf
- [30] InvenSense (TDK). *MPU-6000 and MPU-6050 Product Specification Revision 3.4*. — TDK InvenSense, 2013. — URL: <https://invensense.tdk.com/wp-content/uploads/2015/02/MPU-6000-Datasheet1.pdf>

					ДП ПГ-21.14.1730.01.001 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		91

- [31] NXP Semiconductors. *I²C-bus Specification and User Manual, Rev. 7.0.* — NXP, 2021. — URL: <https://www.nxp.com/docs/en/user-guide/UM10204.pdf>
- [32] Bräunl T. *Embedded Robotics: Mobile Robot Design and Applications with Embedded Systems.* — 3rd ed. — Berlin : Springer, 2008. — 546 p. — DOI: 10.1007/978-3-540-70534-5
- [33] Bräunl T. *Embedded Robotics: Mobile Robot Design and Applications with Embedded Systems.* — 3rd ed. — Berlin : Springer, 2008. — 546 p. — DOI: 10.1007/978-3-540-70534-5
- [34] NXP Semiconductors. *PCA9685 16-channel, 12-bit PWM Fm+ I²C-bus LED controller — Product Datasheet Rev. 4.* — NXP, 2015. — URL: <https://www.nxp.com/docs/en/data-sheet/PCA9685.pdf>
- [35] Atmel Corporation. *AVR130: Setup and Use of AVR Timers — Application Note.* — Microchip/Atmel, 2016. — URL: https://ww1.microchip.com/downloads/en/AppNotes/Atmel-2505-Setup-and-Use-of-AVR-Timers_ApplicationNote_AVR130.pdf
- [36] Mean Well Enterprises. *RS-50 Series — Single Output Switching Power Supply Datasheet.* — Mean Well, 2023. — URL: <https://www.meanwell.com/productPdf.aspx?i=8>
- [37] Panasonic Industrial Devices. *Aluminum Electrolytic Capacitors — ECA Series Datasheet.* — Panasonic, 2022. — URL: <https://industrial.panasonic.com/cdbs/wwww-data/pdf/RDF0000/ABA0000C1215.pdf>
- [38] Tedaldi D., Pretto A., Menegatti E. *A Robust and Easy to Implement Method for IMU Calibration without External Equipments* // Proceedings of the IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA). — 2014. — P. 3042–3049. — DOI: 10.1109/ICRA.2014.6907297
- [39] Madgwick S. O. H., Harrison A. J. L., Vaidyanathan R. *Estimation of IMU and MARG Orientation Using a Gradient Descent Algorithm* // IEEE International Conference on Rehabilitation Robotics. — 2011. — DOI: 10.1109/ICORR.2011.5975346

					ДП ПГ-21.14.1730.01.001 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		92

- [40] Åström K. J., Hägglund T. *PID Controllers: Theory, Design, and Tuning*. — 2nd ed. — Research Triangle Park : ISA, 1995. — 354 p. — ISBN: 978-1-55617-516-9
- [41] Siciliano B., Sciavicco L., Villani L., Oriolo G. *Robotics: Modelling, Planning and Control*. — London : Springer, 2009. — 632 p. — DOI: 10.1007/978-1-84628-642-1
- [42] Dassault Systèmes. *SOLIDWORKS — CAD Software Technical Reference*. — Vélizy-Villacoublay : Dassault Systèmes, 2023. — URL: <https://help.solidworks.com>
- [43] Ngo T. D., Kashani A., Imbalzano G. et al. *Additive Manufacturing (3D Printing): A Review of Materials, Methods, Applications and Challenges* // Composites Part B: Engineering. — 2018. — Vol. 143. — P. 172–196. — DOI: 10.1016/j.compositesb.2018.02.012
- [44] Daminabo S. C., Goel S., Grammatikos S. A. et al. *Fused Deposition Modeling-Based Additive Manufacturing (FDM-AM): A Review and Comparison of Material Properties Across Scale* // SN Applied Sciences. — 2020. — Vol. 2. — Art. 509. — DOI: 10.1007/s42452-020-2198-y
- [45] Boschetto A., Bottini L. *Accuracy Prediction in Fused Deposition Modeling* // International Journal of Advanced Manufacturing Technology. — 2014. — Vol. 73. — P. 913–928. — DOI: 10.1007/s00170-014-5845-2
- [46] ISO 12240-4:1995. *Spherical Plain Bearings — Part 4: Rod Ends*. — Geneva : ISO, 1995.
- [47] Williams T. *EMC for Product Designers*. — 5th ed. — Oxford : Newnes/Elsevier, 2017. — 560 p. — ISBN: 978-0-08-101430-3

					ДП ПГ-21.14.1730.01.001 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		93

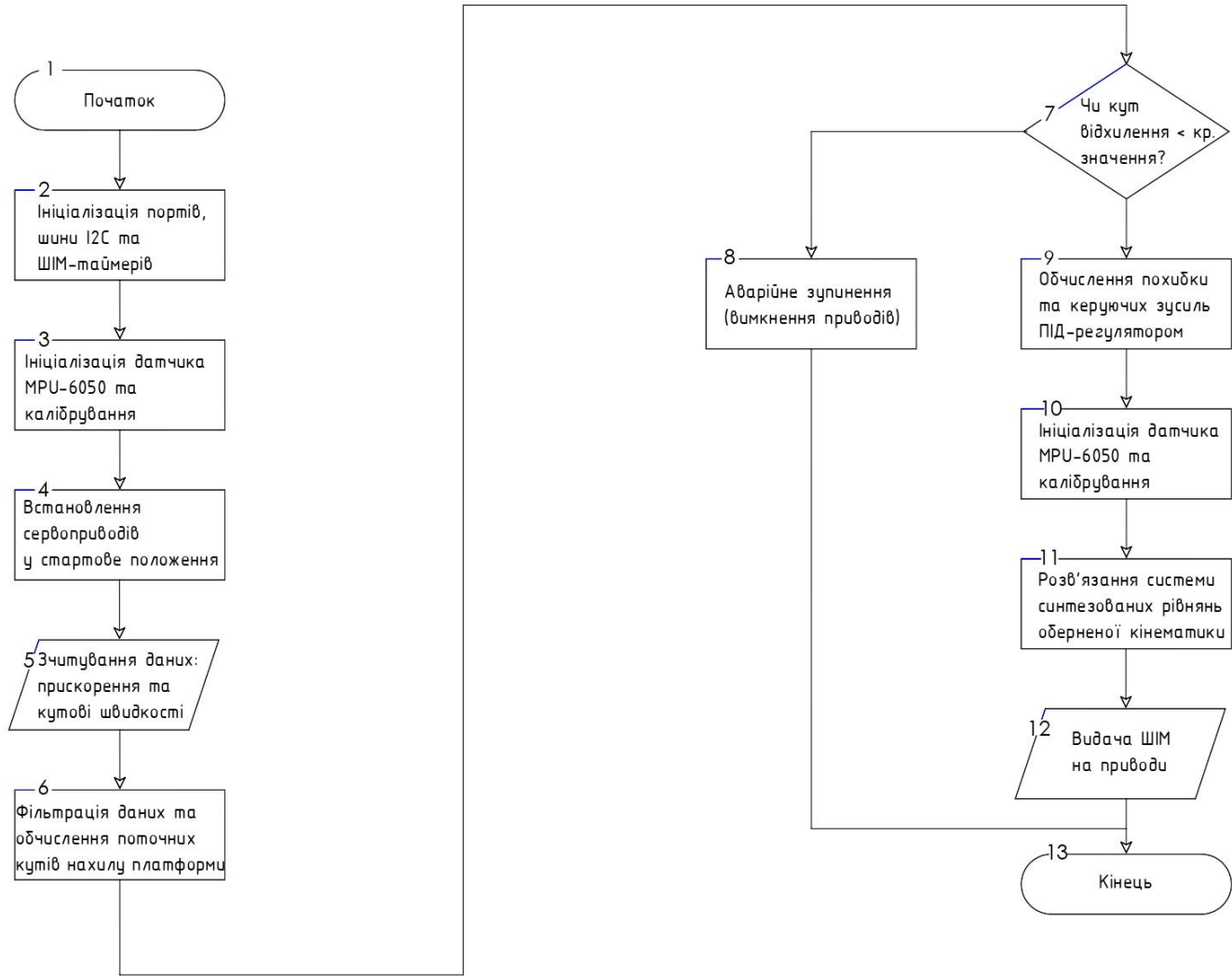
ДОДАТОК А

СХЕМА ЕЛЕКТРИЧНА ПРИНЦИПОВА

ДОДАТОК Б

БЛОК-СХЕМА АЛГОРИТМУ КЕРУВАННЯ

ДП ПГ-21.14.1730.01.002



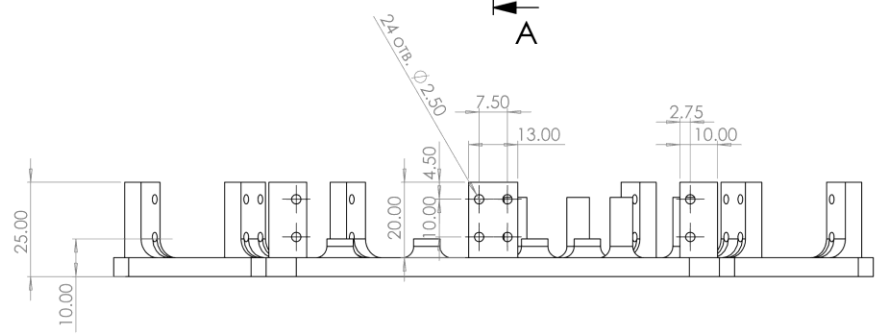
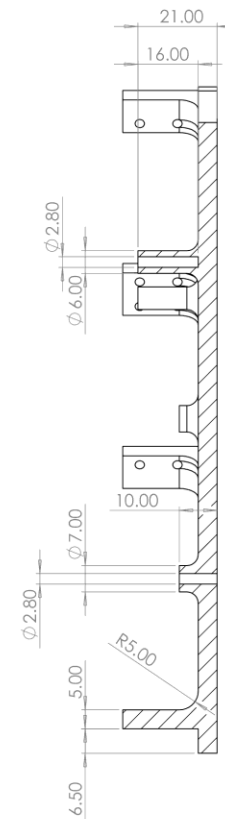
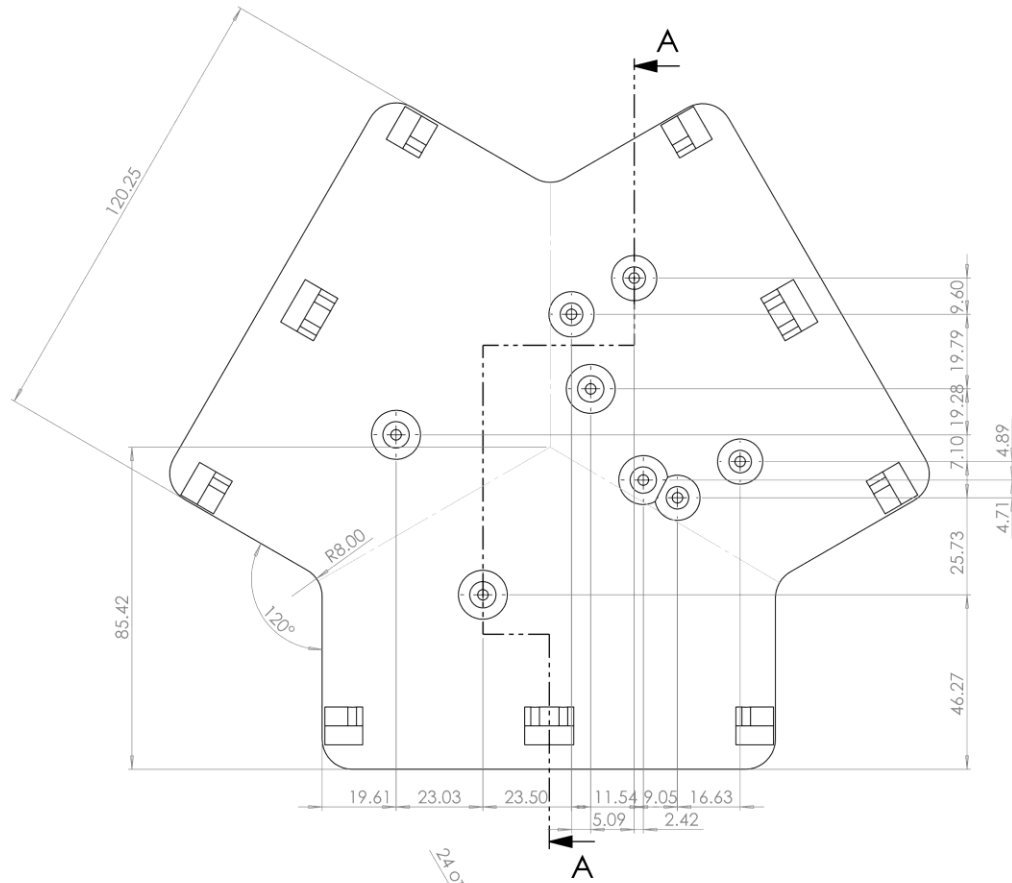
						ДП ПГ-21.14.1730.01.002					
						Блок-схема алгоритму керування			Літ.	Маса	Масштаб
Зм.	Арк.	№ докум.	Підп.	Дата							
Розроб.	Ярижко										
Перев.	Паздрій										
Т. контр.									Аркушів		
Н. контр.						НТУУ "КПІ ім. Ігоря Сікорського", ПБФ					
Затв.	Бурау										

ДОДАТОК В

НИЖНЯ ПЛАСТИНА

A-A

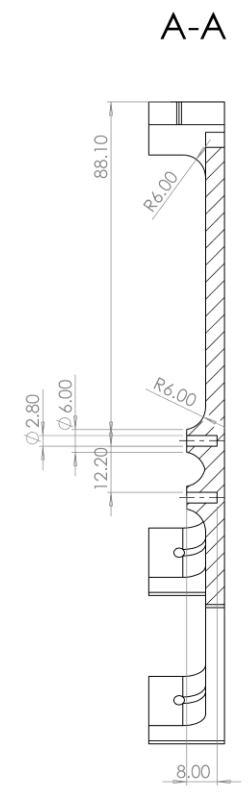
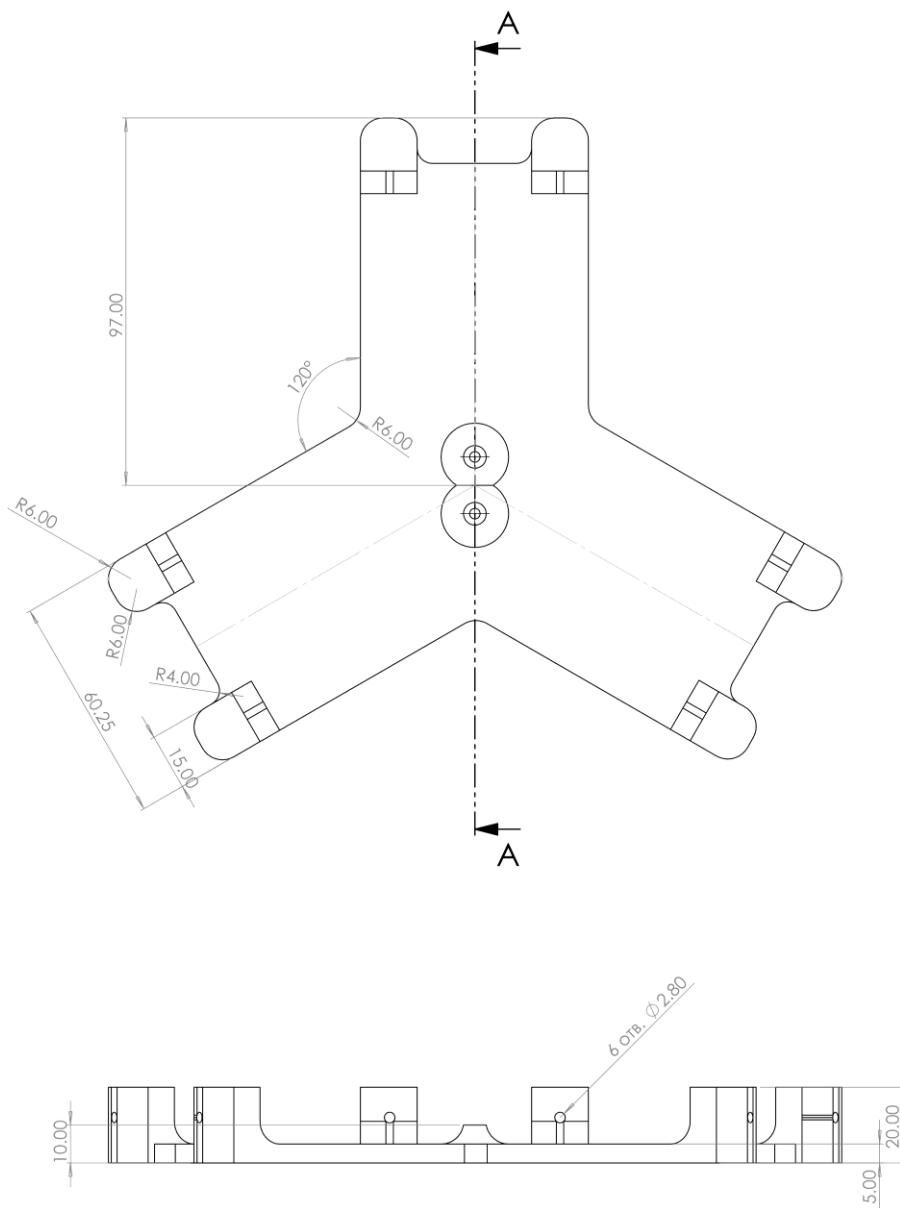
SCALE 1 : 1



						ДП ПГ-21.14.1730.01.007					
						Нижня пластина			Літ.	Маса	Масштаб
Зміст	Лист	№ докум.	Підп.	Дата							1:1
Розроб.		Ярикко									
Перев.		Паздрій									
Т. контр.											
Н. контр.						Архив.		Архивів			
Утв.		Бурау				НТУУ "КПІ ім. Ігоря Сікорського", ПБФ					
1						Формат А2					

ДОДАТОК Г

ПЛАТФОРМА



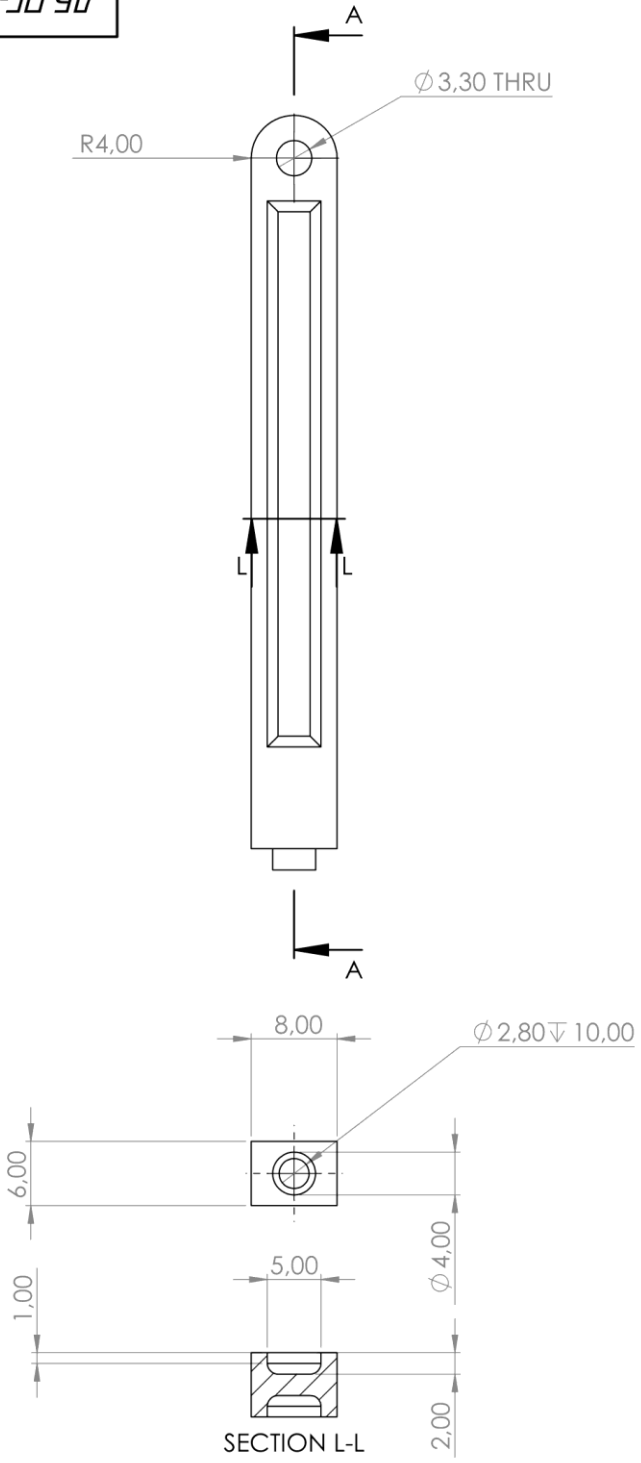
ДП ПГ-21.14.1730.01.008				Платформа		
Змі.	Арк.	№ докум.	Підп.	Дата	Літ.	Маса
Розроб.	Ярижко					Масштаб
Перев.	Паздрій					1:1
Т. контр.					Аркуш	Аркушів
Н. контр.					НТУУ "КПІ ім. Ігоря Сікорського", ПБФ	
Утв.	Бурау				Формат А2	

ДОДАТОК Д

СПОЛУЧНА ШТАНГА

Інв. № ориг.	Підпис та дата	Взам. інв. №	Інв. № дубл.	Підпис та дата	Довід. №	Перв. застосує.

ДБ.ПГ-21.14.1730.01.009

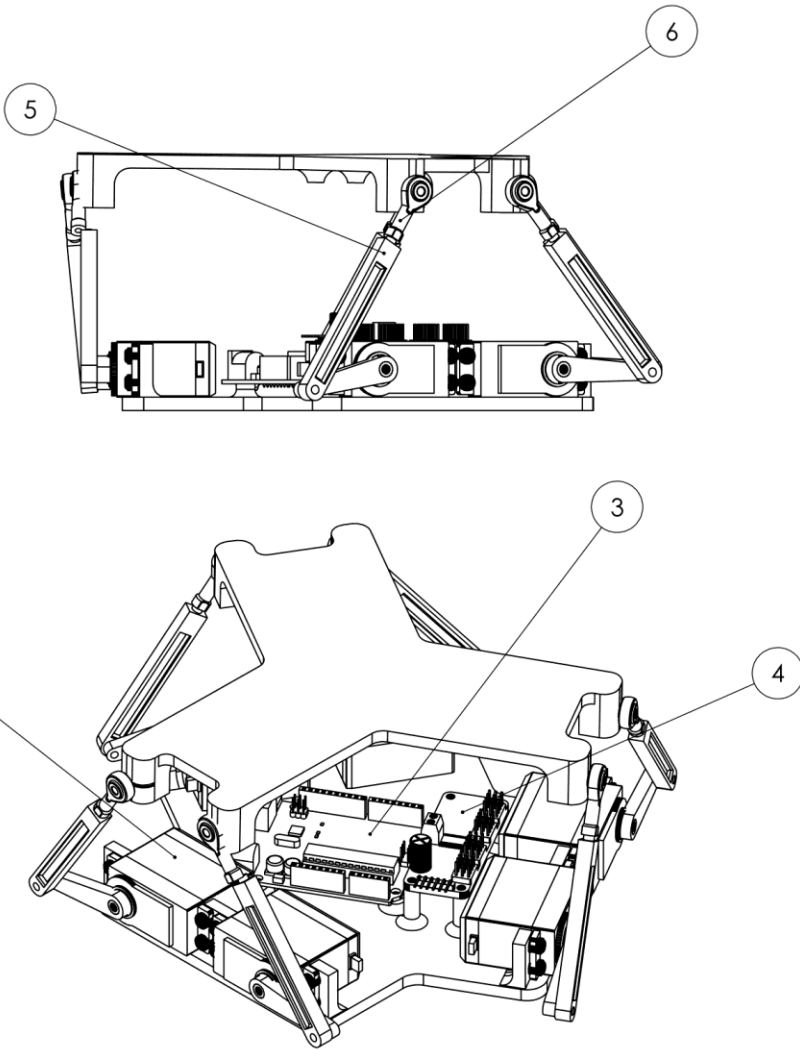
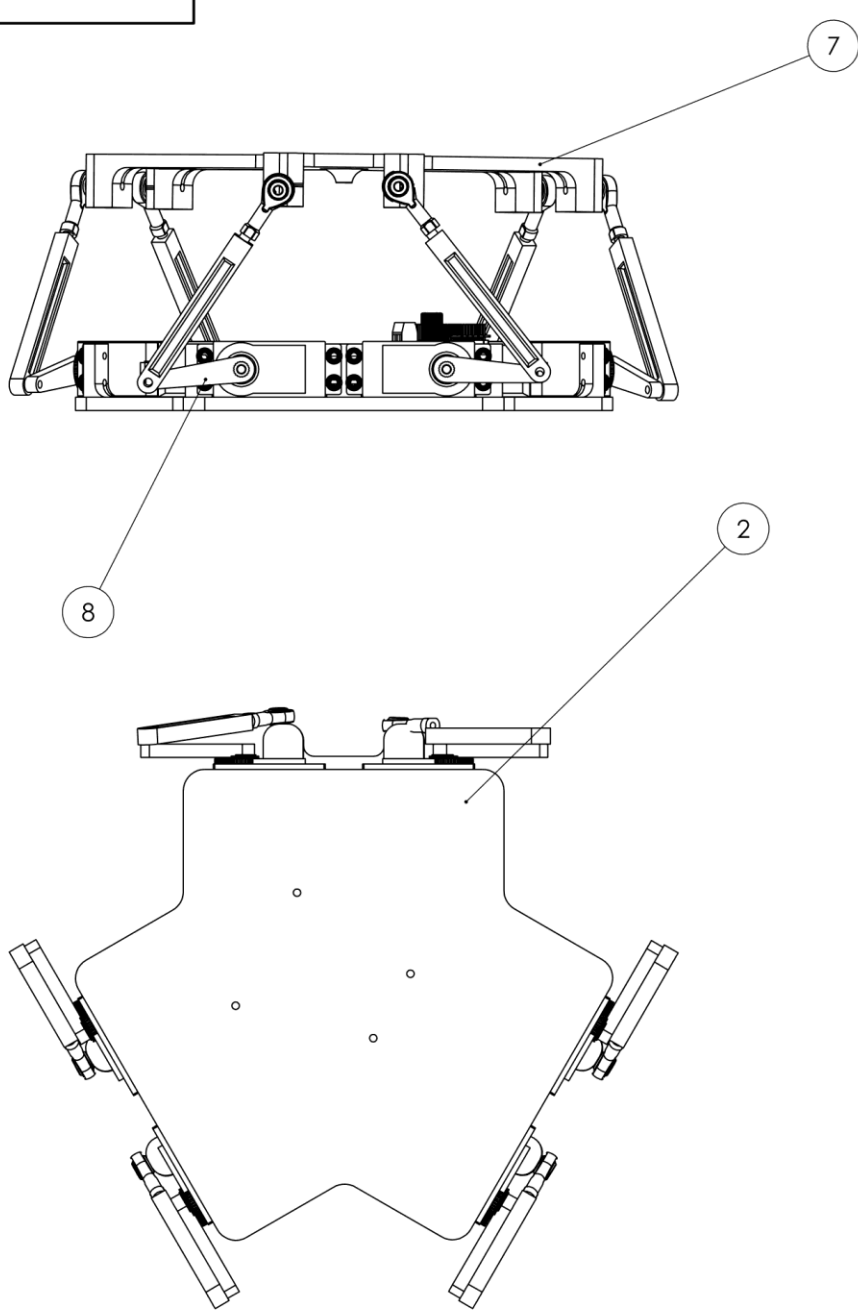


					ДП.ПГ-21.14.1730.01.009				
					Сполучна штанга	Літ.		Маса	Масштаб
Зм.	Арк.	№ докум.	Підп.	Дата					
Розроб.	Ярижко								
Перев.	Паздрій								
Т. контр.									
						Аркуш.		Аркушів	
Н. контр.					РЕТG пластик	НТУУ "КПІ ім. Ігоря Сікорського", ФРП			
Затв.	Бурау								

ДОДАТОК Е

ЗБІРКОВЕ КРЕСЛЕННЯ

ДП.ПГ21.14.1730.01.010 СБ



					ДП.ПГ21.14.1730.01.010 СБ						
					Система динамічної стабілізації				Літ.	Маса	Масштаб
Зм.	Арк.	№ докум.	Підп.	Дата							
Розроб.	Ярижко										
Перев.	Паздрій										
Т. контр.									Аркуш.	Аркушів	
Н. контр.					Складальний кресленик				НТУУ "КПІ ім. Ігоря Сікорського", ФРП		
Затв.	Бурау										

ДОДАТОК Є

ДОДАТОК Ж

ЛІСТИНГ ПРОГРАМНОГО ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ МІКРОКОНТРОЛЕРА

```
#include <Arduino.h>
#include <Wire.h>

const uint8_t MPU_ADDR    = 0x68;
const uint8_t PCA_ADDR    = 0x40;
const uint8_t PCA9685_MODE1 = 0x00;
const uint8_t PCA9685_PRESCALE = 0xFE;
const uint8_t LED0_ON_L    = 0x06;

// ===== НАЛАШТУВАННЯ ГЕОМЕТРІЇ (у сотих долях мм)
=====

const int32_t L_ARM  = 3500;
const int32_t L_ROD  = 8400;
const int32_t Z_ZERO = 7634;
const uint16_t SERVO_MIN_TICK = 100;
const uint16_t SERVO_MAX_TICK = 550;
const int16_t CENTER_PWM = (SERVO_MIN_TICK + SERVO_MAX_TICK) / 2;

// ===== ПАРАМЕТРИ ПІ-РЕГУЛЯТОРА =====

const float KP      = 30.0; // Пропорційний коефіцієнт (чутливість)
const float KI      = 10.0; // Інтегральний коефіцієнт
const float INTEGRAL_LIMIT = 1000.0;

// ===== ЗНАК ЗВОРОТНОГО ЗВ'ЯЗКУ =====

// Якщо платформа при нахилі "тікає" від горизонту, змініть знак на -1.
int8_t SIGN_PITCH = -1; // +1 або -1
int8_t SIGN_ROLL  = -1;
```

```
// =====

int32_t mpu_offset_x = 0;
int32_t mpu_offset_y = 0;
static int16_t current_pwm[6];

const int16_t COS_ANGLE[3] = { 1000, -500, -500 };
const int16_t SIN_ANGLE[3] = { 0, 866, -866 };

// -----

void writePCA(uint8_t reg, uint8_t val) {
    Wire.beginTransmission(PCA_ADDR);
    Wire.write(reg);
    Wire.write(val);
    Wire.endTransmission();
}

void setServoPulse(uint8_t channel, uint16_t pulse_tick) {
    Wire.beginTransmission(PCA_ADDR);
    Wire.write(LED0_ON_L + 4 * channel);
    Wire.write(0x00);
    Wire.write(0x00);
    Wire.write(pulse_tick & 0xFF);
    Wire.write((pulse_tick >> 8) & 0xFF);
    Wire.endTransmission();
}

void calibrateMPU() {
    Serial.println("-> Калібрування горизонту. НЕ РУХАЙТЕ ПЛАТФОРМУ...");
    int32_t sum_x = 0, sum_y = 0;
}
```

```

const int samples = 200;
for (int i = 0; i < samples; i++) {
    Wire.beginTransmission(MPU_ADDR);
    Wire.write(0x3B);
    Wire.endTransmission(false);
    Wire.requestFrom(MPU_ADDR, (uint8_t)4);
    if (Wire.available() >= 4) {
        sum_x += (Wire.read() << 8) | Wire.read();
        sum_y += (Wire.read() << 8) | Wire.read();
    }
    delay(5);
}
mpu_offset_x = sum_x / samples;
mpu_offset_y = sum_y / samples;
Serial.println("-> Калібрування успішно завершено!");
}

// -----

void setup() {
    delay(500);
    Serial.begin(115200);
    while (!Serial) delay(10);

    Serial.println("\n--- Старт платформи Стюарта (ПІ-регулятор v2.2) ---");
    Serial.println("Команди: с - калібрування, v - тест вертикалі, і - інвертувати
знак");

    Wire.begin();
    Wire.setClock(400000);

```

```
Wire.beginTransmission(MPU_ADDR);
Wire.write(0x6B);
Wire.write(0);
Wire.endTransmission();
delay(100);
```

```
writePCA(PCA9685_MODE1, 0x10);
writePCA(PCA9685_PRESCALE, 121);
writePCA(PCA9685_MODE1, 0xA1);
delay(10);
```

```
for (int i = 0; i < 6; i++) {
    current_pwm[i] = CENTER_PWM;
    setServoPulse(i, CENTER_PWM);
}
delay(500);
```

```
calibrateMPU();
}
```

```
// -----
```

```
void loop() {
    static uint32_t last_print_time = 0;
    static float integral_pitch = 0, integral_roll = 0;
```

```
// --- Обработка команд ---
```

```
if (Serial.available() > 0) {
    char cmd = Serial.read();
```

```
    if (cmd == 'c' || cmd == 'C') {
```

```

calibrateMPU();
integral_pitch = 0;
integral_roll = 0;
}

if (cmd == 'v' || cmd == 'V') {
    Serial.println("-> Тест: Важелі ВЕРТИКАЛЬНО ВГОРУ!");
    int16_t test_offset = 200;
    for (uint8_t pair = 0; pair < 3; pair++) {
        uint8_t ch_left = pair * 2;
        uint8_t ch_right = pair * 2 + 1;
        int16_t pwm_l = constrain((int16_t)(CENTER_PWM - test_offset),
                                   (int16_t)SERVO_MIN_TICK, (int16_t)SERVO_MAX_TICK);
        int16_t pwm_r = constrain((int16_t)(CENTER_PWM + test_offset),
                                   (int16_t)SERVO_MIN_TICK, (int16_t)SERVO_MAX_TICK);
        setServoPulse(ch_left, pwm_l);
        setServoPulse(ch_right, pwm_r);
        current_pwm[ch_left] = pwm_l;
        current_pwm[ch_right] = pwm_r;
    }
    while (Serial.available() > 0) Serial.read();
    while (Serial.available() == 0) delay(10);
    while (Serial.available() > 0) Serial.read();
    Serial.println("-> Вихід з тесту.");
    integral_pitch = 0;
    integral_roll = 0;
}

if (cmd == 'i' || cmd == 'I') {
    // Інвертування знака (тільки якщо KI=0 для безпеки)

```

```

if (KI == 0.0) {
    SIGN_PITCH = -SIGN_PITCH;
    SIGN_ROLL = -SIGN_ROLL;
    Serial.print("-> Знак інвертовано: PITCH=");
    Serial.print(SIGN_PITCH);
    Serial.print(", ROLL=");
    Serial.println(SIGN_ROLL);
} else {
    Serial.println("-> Для інверсії знака встановіть KI=0 і перезавантажте!");
}
}
}

// --- Зчитування сенсора ---
int16_t target_pwm[6] = { CENTER_PWM, CENTER_PWM, CENTER_PWM,
                          CENTER_PWM, CENTER_PWM, CENTER_PWM };
float deg_pitch = 0.0, deg_roll = 0.0;

Wire.beginTransmission(MPU_ADDR);
Wire.write(0x3B);
Wire.endTransmission(false);
Wire.requestFrom(MPU_ADDR, (uint8_t)4);

if (Wire.available() >= 4) {
    int16_t raw_ax = (Wire.read() << 8) | Wire.read();
    int16_t raw_ay = (Wire.read() << 8) | Wire.read();

    int16_t ax = raw_ax - mpu_offset_x;
    int16_t ay = raw_ay - mpu_offset_y;

```

```
deg_pitch = atan2((float)(-ay), 16384.0) * 180.0 / PI;
```

```
deg_roll = atan2((float)(ax), 16384.0) * 180.0 / PI;
```

```
float pitch_deg = (float)(-ay) / 16384.0 * 180.0 / PI;
```

```
float roll_deg = (float)(ax) / 16384.0 * 180.0 / PI;
```

```
// Ліміт швидкості зміни (фільтр вібрацій)
```

```
static float prev_pitch = 0, prev_roll = 0;
```

```
const float max_delta = 2.0;
```

```
if (fabs(pitch_deg - prev_pitch) > max_delta)
```

```
    pitch_deg = prev_pitch + (pitch_deg > prev_pitch ? max_delta : -max_delta);
```

```
if (fabs(roll_deg - prev_roll) > max_delta)
```

```
    roll_deg = prev_roll + (roll_deg > prev_roll ? max_delta : -max_delta);
```

```
prev_pitch = pitch_deg;
```

```
prev_roll = roll_deg;
```

```
// Помилка зі знаком
```

```
float error_pitch = 0.0f - pitch_deg * SIGN_PITCH;
```

```
float error_roll = 0.0f - roll_deg * SIGN_ROLL;
```

```
// Інтегральна складова
```

```
integral_pitch += error_pitch;
```

```
integral_roll += error_roll;
```

```
integral_pitch = constrain(integral_pitch, -INTEGRAL_LIMIT,  
INTEGRAL_LIMIT);
```

```
integral_roll = constrain(integral_roll, -INTEGRAL_LIMIT,  
INTEGRAL_LIMIT);
```

```
// Вихід ПІ-регулятора
```

```
float pitch_disp = KP * error_pitch + KI * integral_pitch;
```

```
float roll_disp = KP * error_roll + KI * integral_roll;
pitch_disp = constrain(pitch_disp, -2500.0f, 2500.0f);
roll_disp = constrain(roll_disp, -2500.0f, 2500.0f);
```

```
// Обернена кінематика
```

```
for (uint8_t pair = 0; pair < 3; pair++) {
    int32_t z_offset = (int32_t)(pitch_disp * COS_ANGLE[pair]
                                + roll_disp * SIN_ANGLE[pair]) / 1000;
    int32_t z_target = Z_ZERO + z_offset;
    z_target = constrain(z_target, Z_ZERO - L_ARM, Z_ZERO + L_ARM);
```

```
    int32_t delta_z = z_target - Z_ZERO;
```

```
    int16_t pwm_offset = (delta_z * (SERVO_MAX_TICK - CENTER_PWM)) /
```

```
    L_ARM;
```

```
    uint8_t ch_left = pair * 2;
```

```
    uint8_t ch_right = pair * 2 + 1;
```

```
    target_pwm[ch_left] = CENTER_PWM - pwm_offset;
```

```
    target_pwm[ch_right] = CENTER_PWM + pwm_offset;
```

```
}
```

```
}
```

```
// --- Плавне переміщення серводвигунів ---
```

```
for (uint8_t ch = 0; ch <= 5; ch++) {
```

```
    target_pwm[ch] = constrain(target_pwm[ch],
```

```
                                (int16_t)SERVO_MIN_TICK, (int16_t)SERVO_MAX_TICK);
```

```
    int16_t diff = target_pwm[ch] - current_pwm[ch];
```

```
    int16_t abs_diff = abs(diff);
```

```
    int16_t step = 4;
```

```
    if (abs_diff > 45) step = 8;
```

```
else if (abs_diff < 10) step = 1;

if (diff > 0) current_pwm[ch] += (diff > step) ? step : diff;
else if (diff < 0) current_pwm[ch] -= (abs_diff > step) ? step : abs_diff;

setServoPulse(ch, current_pwm[ch]);
}

// --- Вивід у Serial Monitor ---
if (millis() - last_print_time >= 200) {
    last_print_time = millis();
    Serial.print("Pitch: "); Serial.print(deg_pitch, 1);
    Serial.print("° | Roll: "); Serial.print(deg_roll, 1);
    Serial.print("° | I_pitch: "); Serial.print(integral_pitch, 0);
    Serial.print(" I_roll: "); Serial.println(integral_roll, 0);
}

delay(10);
}
```