

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

Приладобудівний факультет

Кафедра комп'ютерно-інтегрованих оптичних та навігаційних систем

На правах рукопису»
УДК _____ 629.127 _____

«До захисту допущено»
Завідувач кафедри

_____ Надія Бурау
(підпис)

«_____» _____ 2025 р.

Магістерська дисертація

на здобуття ступеня магістра

за освітньо-професійною програмою

**«Комп'ютерно-інтегровані системи та технології в приладобудуванні»
зі спеціальності 174 «Автоматизація, комп'ютерно-інтегровані технології
та робототехніка»**

на тему:

**«Стабілізація обладнання для візуального моніторингу небезпечних
об'єктів»**

Виконав:

студент II курсу, групи ПГ-41мп
Томчук Богдан Миколайович

(підпис)

Науковий керівник:

д.т.н., проф., завідувач кафедри КІОНС
Бурау Надія Іванівна

(підпис)

Консультант з розроблення стартап-проекту:

д.е.н., проф., завідувач кафедри економічної кібернетики
Бояринова Катерина Олександрівна

(підпис)

Рецензент:

к.т.н., доцент
Безугла Наталя Василівна

(підпис)

Засвідчую, що у цій магістерській
дисертації немає запозичень з праць
інших авторів без відповідних
посилань.

Студент _____
(підпис)

Київ – 2025 р.

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

Кафедра комп'ютерно-інтегрованих оптичних та навігаційних систем

Рівень вищої освіти – другий (магістерський)

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

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

ЗАТВЕРДЖУЮ

Завідувач кафедри

_____ Надія БУРАУ

«__» _____ 20__ р.

ЗАВДАННЯ
на магістерську дисертацію студенту

Томчуку Богдану Миколайовичу

1. Тема дисертації «Стабілізація обладнання для візуального моніторингу небезпечних об'єктів»,
науковий керівник Бурау Надія Іванівна, д.т.н., професор, затверджені наказом по університету від «__» _____ 20__ р. № _____
2. Термін подання студентом дисертації: 15 грудня 2025 року
3. Об'єкт дослідження: процес стабілізації обладнання.
4. Предмет дослідження: методи і засоби стабілізації та наведення обладнання; показники якості процесу керування в системі стабілізації.
5. Перелік завдань, які потрібно розробити:
 - 5.1 Огляд стану проблеми: огляд умов експлуатації обладнання для візуального моніторингу небезпечних об'єктів, огляд систем стабілізації обладнання, визначення вимог до системи стабілізації, визначення напрямків вдосконалення систем стабілізації.
 - 5.2 Обґрунтування та створення параметричної 3D-моделі двовісного підвісу
 - 5.3 Моделювання та аналіз напружено-деформованого стану елементів підвісу під впливом статичних та теплових навантажень.

5.4 Обґрунтування вибору виконавчих елементів, розробка структурної схеми системи та програмної моделі системи стабілізації.

5.5 Моделювання та аналіз динамічних характеристик системи стабілізації.

6. Орієнтовний перелік графічного (ілюстративного) матеріалу: презентація

7. Орієнтовний перелік публікацій: стаття у збірнику матеріалів доповідей НТК

8. Консультанти розділів дисертації

Розділ	Прізвище, ініціали та посада консультанта	Підпис, дата	
		завдання видав	завдання прийняв
РОЗДІЛ 1.			
РОЗДІЛ 2.			
РОЗДІЛ 3.			
РОЗДІЛ 4. Розробка стартап-проекту			

9. Дата видачі завдання «10» жовтня 2025 року

Календарний план

№ з/п	Назва етапів виконання магістерської дисертації	Термін виконання етапів магістерської дисертації	Примітка
1.	Огляд стану проблеми	25.10.2025	
2.	Обґрунтування та створення параметричної 3D-моделі двовісного підвісу	05.11.2025	
3.	Моделювання та аналіз напружено-деформованого стану елементів підвісу під впливом статичних та теплових навантажень	15.11.2025	
4.	Обґрунтування вибору виконавчих елементів, розробка структурної схеми системи та програмної моделі системи стабілізації.	20.11.2025	
5.	Моделювання та аналіз динамічних характеристик системи стабілізації	05.12.2025	
6.	Оформлення рукопису магістерської дисертації	15.12.2025	
7.	Оформлення презентації, підготовка до захисту	20.12.2025	

Студент
Науковий керівник дисертації

Богдан ТОМЧУК
Надія БУРАУ

РЕФЕРАТ

У магістерській дисертації розроблено та досліджено систему двовісної стабілізації обладнання для візуального моніторингу небезпечних об'єктів на роботизованих наземних платформах. Проведено аналіз сучасних систем стабілізації, обґрунтовано конструкцію та створено параметричну 3D-модель двовісного підвісу. Виконано моделювання напружено-деформованого стану елементів підвісу з урахуванням статичних і теплових навантажень, а також розроблено структурну та програмну модель системи стабілізації. За результатами імітаційного моделювання досліджено динамічні характеристики системи та підтверджено підвищення точності стабілізації відеозображення в умовах дії зовнішніх збурень. Отримані результати можуть бути використані при створенні та вдосконаленні стабілізованих відеосистем роботизованих платформ спеціального призначення.

Структура та обсяг роботи. Робота складається зі вступу, 4 розділів, висновків, 25 рисунків, 22 таблиць, списку використаної літератури із 65 позицій. Загальний обсяг роботи – 126 сторінки, з них основна частина викладена на сторінках 104.

Ключові слова: роботизована наземна платформа, двовісний гіростабілізований підвіс, стабілізація відеозображення, візуальний моніторинг небезпечних об'єктів.

ABSTRACT

The master's thesis is devoted to the development and investigation of a dual-axis stabilisation system for visual monitoring equipment used on robotic ground platforms operating in hazardous environments. An analysis of existing stabilisation systems is carried out, a parametric 3D model of a dual-axis gimbal is developed, and the stress–strain state of its elements under static and thermal loads is analysed. A structural and software model of the stabilisation system is designed, and its dynamic characteristics are investigated using simulation modelling. The obtained results confirm an improvement in video stabilisation accuracy under external disturbances and can be applied in the design of stabilised visual monitoring systems for special-purpose robotic platforms.

Structure and scope of work. The work consists of an introduction, 4 chapters, conclusions, 25 figures, 22 tables, and a list of 65 references. The total volume of the work is 126 pages, of which the main part is presented on 104 pages.

Keywords: robotic ground platform, two-axis gyro-stabilised suspension, video image stabilisation, visual monitoring of hazardous objects.

ЗМІСТ

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ СКОРОЧЕНЬ	8
ВСТУП.....	9
РОЗДІЛ 1	13
СИСТЕМИ СТАБІЛІЗАЦІЇ ОБЛАДНАННЯ РОБОТИЗОВАНИХ НАЗЕМНИХ ПЛАТФОРМ	13
1.1 Актуальність проблеми	13
1.2 Умови застосування роботизованих наземних платформ	14
1.3 Розвиток роботизованих наземних платформ.....	15
1.4 Технічні та операційні аспекти стабілізації відео	17
1.5 Механічні аспекти стабілізації роботизованих наземних платформ.....	25
1.6 Рельєф та прохідність платформи.....	28
1.7 Атмосферні умови	30
1.8 Температурні впливи та теплове розширення	31
1.9. Мета і завдання даних наукових досліджень	33
РОЗДІЛ 2	36
ПРОЄКТУВАННЯ ТА ДОСЛІДЖЕННЯ ДВОВІСНОГО ПІДВІСУ ДЛЯ СТАБІЛІЗАЦІЇ ВІДЕОЗОБРАЖЕННЯ НА НАЗЕМНИХ ПЛАТФОРМАХ.....	36
2.1 Двовісний підвіс виробництва Wuhan JoHo, як прототип розробки.....	36
2.2 Обґрунтування геометрії та вибору матеріалів для моделі двовісного підвісу	38
2.3. Моделювання статичних навантажень	45
2.4 Моделювання теплового розширення металу.....	50
2.5 Фінальний результат і габаритні розміри.....	53
Висновки до розділу 2	55
РОЗДІЛ 3	57
МОДЕЛЮВАННЯ ТА ДОСЛІДЖЕННЯ СИСТЕМИ СТАБІЛІЗАЦІЇ ДВОВІСНОГО ПІДВІСУ.....	57
3.1. Підбір електродвигунів при моделюванні підвісів	57
3.3 Математична модель підвісу	62
3.4 Структурна схема стабілізації двохосьового підвісу на мобільній платформі	67
3.5 Моделювання системи слідування двовісного підвісу в середовищі Simulink	70
3.6 Моделювання системи стабілізації двовісного підвісу в середовищі	

Simulink	78
Висновки до розділу 3	84
РОЗДІЛ 4	87
РОЗРОБКА СТАРТАП ПРОЕКТУ «Двовісний стабілізований підвіс»	87
4.1 Опис та технологічний аудит ідеї стартап-проекту	87
4.2 Аналіз ринкових можливостей запуску стартап-проекту.....	91
4.3 Розроблення ринкової стратегії та маркетингової програми проекту	96
4.4 Бізнес-модель реалізації стартап-проекту та оцінювання економічної ефективності	103
Висновки до розділу 4	114
ВИСНОВКИ.....	115
ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ	117
ДОДАТОК А	126

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ СКОРОЧЕНЬ

ІВМ – інерційний вимірювальний модуль;

ПІД – пропорційно-інтегрально-диференціальний регулятор;

РНП – роботизована наземна платформа;

САД – система автоматизованого проєктування;

НДТ – температура теплового відхилення;

UV – ультрафіолетове випромінювання.

ВСТУП

У даній роботі досліджено систему двовісної стабілізації відеокамери для візуального моніторингу небезпечних об'єктів.

Актуальність теми. Стабільна передача відеозображення та телеметрії є ключовою умовою успіху дистанційного моніторингу у середовищах, де присутність людини неможлива або небезпечна (зони радіаційного чи хімічного забруднення, райони пожеж, території розмінування тощо). Забезпечення якісного відеопотоку на рухомих роботизованих платформах вимагає інтегрованих сенсорних систем та алгоритмів гіростабілізації, здатних компенсувати вібрації, нерівності рельєфу та інші зовнішні впливи.

Метою роботи є розроблення двовісної системи стабілізації для забезпечення стабільної подачі відеосигналу в реальному часі в системах візуального моніторингу небезпечних об'єктів.

1. Аналіз стану сучасних систем стабілізації обладнання роботизованих наземних платформ.
2. Обґрунтування та створення параметричної 3D-моделі двовісного підвісу.
3. Моделювання та аналіз напружено-деформованого стану елементів підвісу під впливом статичних та теплових навантажень.
4. Обґрунтування вибору виконавчих елементів, розробка структурної схеми системи та програмної моделі системи стабілізації.
5. Моделювання та аналіз динамічних характеристик системи стабілізації.

Об'єкт дослідження є процес стабілізації обладнання для візуального моніторингу.

Предметом дослідження є методи і засоби стабілізації та наведення обладнання; показники якості процесу керування в системі стабілізації.

Методи дослідження – аналіз науково-технічних джерел, тривимірне комп'ютерне моделювання конструкції (CAD), розрахунок напружено-

деформованого стану методом скінченних елементів, імітаційне моделювання системи стабілізації в середовищі MATLAB/Simulink.

Наукова новизна отриманих результатів:

- Запропоновано та обґрунтовано комплексний підхід до моделювання двовісного підвісу, який одночасно враховує механічні, інерційні, теплові та зовнішні впливи;

- Встановлено характер та залежності впливу теплових та вібраційних збурень на точність стабілізації.

Практичне значення отриманих результатів полягає у розробці та програмній реалізації інтегрованої CAD-моделі двовісного підвісу, придатної для подальшої її фізичної реалізації та інтеграції у роботизовані платформи спеціального призначення.

Апробація роботи. Часткові результати роботи були опубліковані на наступній конференції:

- 6-та Міжнародна науково-практична конференція «Evolving Science: Theories, Discoveries and Practical Outcomes», 15-17 грудня 2025.

Публікації. За матеріалами дисертації було опубліковано матеріали доповідей для публікації у збірнику.

Томчук Б. М., Бурау Н. І. Системи стабілізації обладнання роботизованих наземних платформ: стан і тенденції розвитку. Наукові праці ДонНТУ. Серія «Проблеми моделювання та автоматизації проектування». 2025. № 2(22).

У галузі цивільного застосування роботизованих наземних платформ (РНП) відеофіксаційні системи з гіростабілізацією та азимутальною корекцією відіграють вирішальну роль в умовах, коли присутність людини стає неможливою через загрозу здоров'ю або життю [1]. Зони підвищеного радіаційного, хімічного чи біологічного забруднення, пожежі у важкодоступних місцях, землетруси та райони розмінування є прикладами таких умов. Самохідні РНП оснащують мультисенсорними модулями: відеокамерами, тепловізорами, інерційними вимірювальними модулями (ІВМ) та оптичними далекомірами (лідарами), які разом забезпечують стабільний та чіткий відеопотік із точною

візуальною орієнтацією незалежно від руху платформи [1].

Досвід безпілотних операцій у небезпечних зонах показує, що саме стабільна передача зображення й телеметрії стає ключовою умовою успіху дистанційного керування та автоматизованого збору даних у небезпечних середовищах. Під час таких місій наземні та повітряні роботи діють як єдина система, забезпечуючи розвідку та картографування зон із високим рівнем радіації, де людина фізично не може перебувати. Це підкреслює важливість розроблення інтегрованих сенсорних систем та алгоритмів стабілізації, здатних підтримувати якісний відеопотік навіть при вібраціях і різких маневрах платформи [1].

Такі тенденції вказують на необхідність цілісного підходу до проектування безпілотних наземних систем для роботи в небезпечних умовах. Уже на етапі концептуального проектування потрібно враховувати комплексний характер завдань - від вибору сенсорного навантаження й конструкції підвісу до програмних модулів стабілізації та взаємодії людини з машиною. У таких умовах важливим є застосування інтегрованого дизайну, який включає механіку, електроніку й програмне забезпечення у єдину керовану архітектуру, а також створення навчальних і діагностичних інтерфейсів для операторів, що працюють у кризових середовищах [1].

Об'єктом дослідження є процес стабілізації обладнання для візуального моніторингу.

Предметом дослідження є методи і засоби стабілізації та наведення обладнання; показники якості процесу керування в системі стабілізації.

Метою роботи є розроблення двовісної системи стабілізації для забезпечення стабільної подачі відеосигналу в реальному часі в системах візуального моніторингу небезпечних об'єктів.

1. Аналіз стану сучасних систем стабілізації обладнання роботизованих наземних платформ.
2. Обґрунтування та створення параметричної 3D-моделі двовісного підвісу.

3. Моделювання та аналіз напружено-деформованого стану елементів підвісу під впливом статичних та теплових навантажень.

4. Обґрунтування вибору виконавчих елементів, розробка структурної схеми системи та програмної моделі системи стабілізації.

5. Моделювання та аналіз динамічних характеристик системи стабілізації.

Наукова новизна отриманих результатів полягає у тому, що:

- Запропоновано та обґрунтовано комплексний підхід до моделювання двовісного підвісу, який одночасно враховує механічні, інерційні, теплові та зовнішні впливи;

- Встановлено характер та залежності впливу теплових та вібраційних збурень на точність стабілізації. Практичне значення отриманих результатів полягає у розробці та програмній реалізації повноцінної CAD-моделі двовісного підвісу, придатної для подальшої інтеграції у роботизовані платформи.

РОЗДІЛ 1

СИСТЕМИ СТАБІЛІЗАЦІЇ ОБЛАДНАННЯ РОБОТИЗОВАНИХ НАЗЕМНИХ ПЛАТФОРМ

1.1 Актуальність проблеми

Сучасні дослідження у сфері автономних мобільних платформ висвітлюють зростаючу потребу у високоточних засобах відеофіксації для роботи в умовах, де участь людини є недоцільною або небезпечною [1-4]. Так, в розвитку автономних систем особливу актуальність набуває питання дистанційного візуального моніторингу в умовах, коли участь людини є фізично неможливою або небезпечною. Це стосується таких середовищ, як зони радіаційного або хімічного забруднення, підземні споруди зі складним рельєфом, райони пожеж, техногенних катастроф або гуманітарного розмінування. Забезпечення надійного візуального спостереження в реальному часі за допомогою РНП у таких умовах вимагає інтеграції високоточної стабілізації відеосигналу та азимутальної корекції положення камери незалежно від динаміки руху носія [2]. Складність задачі полягає в тому, що платформи зазнають впливу вібрацій, нерівностей поверхні, температурних коливань, пилу та перешкод зв'язку, що призводить до суттєвих спотворень відеозображення, зміщення лінії візування та втрати орієнтації камери.

Особливо критичною є стабілізація зображення при проведенні візуального розпізнавання об'єктів, маніпуляцій з вибухонебезпечними предметами чи під час точного картографування радіаційного фону в закритих середовищах. Крім того, необхідно мати можливість азимутального супроводу цілі без втрати положення при зміні орієнтації платформи або її обертальних рухах [3].

Таким чином, важливими завданнями є дослідження принципів побудови стабілізованих відеофіксаційних систем з азимутальною корекцією для

автономних мобільних роботів різних типів, визначення параметрів, що найбільше впливають на якість відеосигналу в реальному середовищі, та обґрунтування підходів до їх інтеграції у цивільні місії підвищеної небезпеки, де пряме перебування оператора є неможливим [4]. Виконаємо огляд та систематизацію наявних підходів до створення стабілізованих відеосистем на рухомих РНП для завдань дистанційного візуального моніторингу.

1.2 Умови застосування роботизованих наземних платформ

У дослідженнях, присвячених використанню роботів у радіаційно-небезпечних зонах, вказано на важливість забезпечення стабілізованого відеозображення, особливо в поєднанні з датчиками гамма-випромінювання [2]. Платформи повинні працювати автономно та точно позиціонувати себе у складних умовах рельєфу. Зокрема, під час випробувань у Чорнобильській зоні відчуження роботизовані системи зі стабілізованими камерами та лідачами успішно проводили картографування, надаючи зображення оператору в реальному часі без втрати орієнтації при русі або тремтінні платформ [2].

У межах гуманітарного розмінування також активно застосовуються РНП, які поєднують GPS-навігацію з телеманіпуляторами та камерними системами. Камери, встановлені на гіростабілізованих підвісах, дозволяють оператору бачити об'єкти з високою точністю незалежно від руху транспортного засобу. Такі системи дають змогу безпечно виявляти та знешкоджувати вибухонебезпечні предмети без участі сапера безпосередньо в зоні ризику [4].

Під час роботи в умовах пожежогасіння, особливо у випадках, коли об'єкти знаходяться у тунелях, на висоті, або в середовищах з інтенсивним димом, стабілізовані відеосистеми є надзвичайно важливими. Роботизовані системи в таких умовах повинні забезпечувати надійну візуалізацію навіть при частковій втраті GPS-сигналу або за умов зниженої видимості. Для цього камери оснащують тепловізійними сенсорами, стабілізаторами з гіроскопічною компенсацією та функціями азимутального супроводу об'єкта

спостереження [5]. Дослідження у сфері протипожежних безпілотних платформ показали, що для умов із сильними термічними потоками та турбулентністю доцільним є використання ізолюючих демпфуючих контейнерів, в які інтегрується вся відеофіксаційна система. Такі контейнери підтримують температурну стабільність ІВМ і знижують ймовірність перегріву оптичних сенсорів, що особливо актуально в середовищах із високою температурою і димовим середовищем. Крім того, стабілізаційні системи у таких випадках оснащуються функцією динамічного зменшення кута огляду, що дозволяє краще фокусуватися на ключових ділянках навіть при частковій втраті стабілізації [5].

1.3 Розвиток роботизованих наземних платформ

З періоду холодної війни розвиток наземних безпілотних платформ поступово виходив за межі військових лабораторій і почав орієнтуватися на цивільні сфери, де особливого значення набували системи відеофіксації та стабілізації. У 1960–70-ті роки створення перших наукових роботів, таких як “Shakey” у Стенфордському дослідницькому інституті, чи “Stanford Cart”, показало можливість використання камер для автономного пересування [5]. Хоча їхні системи були примітивними - чорно-біле відео із затримками в обробці - вони заклали фундамент для ідеї використання РНП як носіїв сенсорної інформації. Тоді ж почалися перші експерименти зі стереокамерами, які давали змогу будувати тривимірне зображення середовища, однак активної стабілізації ще не існувало, а компенсацію коливань забезпечували лише підвіски або демпфери, подібні до кінооператорських рішень на кшталт Steadicam [5].

Катастрофа на Чорнобильській АЕС у 1986 році стала першим масштабним прикладом застосування РНП у цивільних умовах підвищеної небезпеки. Було використано всі наявні технології для створення роботів “STR-1” та “Klip-1”, а також низки мобільних платформ на базі військових шасі. Робот “STR-1” мав телевізійну камеру з радіаційностійким захистом, що дозволяло оператору віддалено спостерігати за ситуацією на даху третього реактора. Однак

високий рівень іонізуючого випромінювання призводив до швидкого виходу з ладу електроніки, і надійність відеофіксації виявилася обмеженою. У свою чергу, робот “Klin-1” поєднував важке інженерне шасі з дистанційним управлінням і кількома телекамерами, проте також стикався з проблемою перегріву та деградації електронних компонентів [6]. Незважаючи на ці обмеження, досвід Чорнобиля показав критичну потребу у створенні платформ із захищеною відеосистемою та вивів проблему стабільності сигналу на перший план [6].

У 1990-ті та на початку 2000-х років розвиток цивільних РНП тісно пов’язувався із надзвичайними ситуаціями. Одним із символів цього періоду став робот “PackBot” компанії “iRobot” [7]. Хоча його було створено в межах військових контрактів, він швидко знайшов застосування в цивільних аварійно-рятувальних операціях. Після терактів 11 вересня 2001 року “PackBot” уперше використовувався для пошуку постраждалих серед завалів Всесвітнього торгового центру. Вбудована панорамна камера з можливістю повороту і нахилу дозволяла вести огляд навіть у тісних просторах, а під час руху шасі з гусеничними приводами камера мала базову систему амортизації для зменшення вібрацій [7]. Згодом аналогічні роботи залучали під час ліквідації наслідків аварії на АЕС Фукусіма-1 у 2011 році, де їхні відеокамери стали єдиним способом безпечного контролю за станом реакторів [8]. У цих випадках стало очевидним, що ефективність відеоспостереження напряму залежить від здатності системи компенсувати удари, нахили та нерівності поверхні.

У другій половині 2000-х до РНП почали активно інтегрувати лазерні далекоміри та стереокамери, що відкрило нові перспективи у картографуванні та моніторингу довкілля. Наприклад, дослідження “Pierzchała” демонструвало використання невеликої колісної платформи, обладнаної LiDAR Velodyne VLP-16, стереокамерою “Bumblebee”, GPS і інерційним вимірвальним блоком [9]. Застосування граф-SLAM дозволило в реальному часі формувати тривимірні карти лісу з високою точністю. Хоча акцент робився на картографуванні, вирішальним фактором успішності була стабільність відеосигналу, який синхронізувався з даними інерційної навігації, а це вимагало певної компенсації

вібрацій та динамічних похибок [9]. Таким чином, у цивільних застосуваннях, зокрема в екологічному моніторингу, стабільність камери поступово стала не менш важливою, ніж точність сенсорних вимірювань.

У сучасних системах наземних безпілотних платформ стабілізація камер здійснюється за допомогою триосьових гіростабілізованих підвісів. Такі модулі, як “AVT CM202S”, поєднують оптичну HD-камеру з великим зумом та тепловізор, що дозволяє вести спостереження вдень і вночі [10]. Конструкція з безщітковими моторами, гіроскопами та енкодерами підтримує стабільність навіть під час руху по пересіченій місцевості. У разі сильних вібрацій система переходить до вузького поля огляду, що дає змогу концентруватися на цілі без втрати чіткості. Подібні рішення вже не обмежуються аварійними сценаріями: вони активно впроваджуються в картографуванні міських інфраструктур, моніторингу лісових пожеж і гуманітарному розмінуванні [10]. На відміну від перших поколінь РНП із простими телевізійними камерами, сучасні системи поєднують апаратні й алгоритмічні методи стабілізації - від механічного підвісу до цифрової компенсації оптичного потоку, що дає змогу формувати стабільний відеопотік у найскладніших умовах [11].

1.4 Технічні та операційні аспекти стабілізації відео

Інтеграція таких функціональних елементів, як багатоканальні сенсори, алгоритми трекінгу та стабілізації дозволяє РНП ефективно працювати у складних ситуаціях. Наприклад, у платформі “CERBERUS” [12], яка була створена для автономних місій у тунелях, використано поєднання ІВМ, гіростабілізованих камер та лідарів для навігації і передачі стабільного відеопотоку в режимі реального часу. Камери компенсують нахили платформи, автоматично стабілізуючи зображення на етапі збору даних.

У новітніх реалізаціях стабілізаційних систем для мобільних роботизованих платформ акцент дедалі частіше зміщується у бік інтеграції адаптивних обчислювальних моделей компенсації, побудованих на методах

штучного інтелекту. Зокрема, в експериментах із вже зазначеною платформою CERBERUS в роботі [12] застосовано модульну архітектуру, в якій стабілізована система відеофіксації отримує дані не лише з ІВМ, а також з оцінок траєкторії руху, отриманих від навігації на основі нейромережі з глибоким навчанням. Це дозволяє передбачати зміну положення платформи в реальному часі та здійснювати проактивне випереджальне налаштування стабілізації камери, підвищуючи швидкодію системи наведення.

Іншою важливою інновацією є застосування віртуальних стабілізаційних зон (VSA – Virtual Stabilization Areas) [6], які формуються на основі картування лідарами або стереокамерами та призначені для автоматичного налаштування параметрів карданового підвісу ще до фізичного наближення до цілі. Це особливо ефективно при огляді підземних об'єктів або тунелів, де система заздалегідь аналізує конфігурацію середовища та формує профіль стабілізації камери з урахуванням розмірів проходу, потенційних перешкод і траєкторії [12].

Також в роботі [12] увагу приділено сучасній тенденції мініатюризації стабілізованих відеомодулів, що дозволяє інтегрувати їх у компактні РНП для локальних місій розвідки. В таких рішеннях, через обмеження енергоспоживання, використовуються малопотужні гіроскопи з цифровою компенсацією похибок. Комбіноване використання гіроскопа та відеоаналізу зображення (optical flow) дає змогу досягати ефективною стабілізації без великого обчислювального навантаження, що критично для автономної експлуатації в польових умовах[12].

Підготовка операторів та проектування людино-машинного інтерфейсу мають не менше значення, ніж апаратні рішення: від рівня інтерпретації інформації залежить швидкість і точність прийняття рішень у критичних місіях. У складних сценаріях, наприклад під час рятувальних робіт або розмінування, інтерфейс повинен подавати не просто «картинку» з піввісу, а контекстну телеметрію і стан стабілізації, поточні кутові похибки, нагрів сенсорів, рівень заряду, рівень якості каналу зв'язку і забезпечувати зрозумілі режими втручання/автономії. Практичні експерименти на модульних платформах

демонструють, що оператори швидше адаптуються до систем, де людино-машинний інтерфейс підтримує попередні профілі стабілізації (VSA) і надає рекомендації на основі картографічних даних та прогнозів руху, а також має вбудовані навчальні симулятори для відпрацювання типових збоїв і перехідних режимів [12].

У сфері цивільного реагування та ліквідації надзвичайних ситуацій значно зростає інтерес до комплексного застосування РНП та безпілотних літальних апаратів (БПЛА), які здатні виконувати складні завдання шляхом об'єднання переваг обох платформ [13]. У комплексах такого класу БПЛА здійснюють швидке картографування місцевості з використанням лідарів, тепловізійних і відеокамер, тоді як РНП отримує оброблені дані для автономної навігації та локалізації цілей з точним наведенням стабілізованої відеокамери з кардановим підвісом та азимутальним коректором. Зокрема, у праці [13] розглянуто систему, яка дозволяє оптимізувати реакцію на стихійні лиха через ефективну координацію й обмін даними між численними літальними та наземними модулями, забезпечуючи покриття території, що довго перебуває поза прямим радіусом зв'язку. У цьому ж дослідженні описано підхід, за яким наземні платформи отримують постійні оновлення щодо положення об'єктів інтересу з БПЛА, що дозволяє синхронізувати стабілізацію відео у режимі реального часу з урахуванням переміщення цілі. При цьому використовується спеціалізований протокол обміну даними, який містить не лише координати об'єкта, а й параметри його швидкості та орієнтації. Це дозволяє відеосистемам із гіростабілізацією автоматично адаптувати кут нахилу та напрям візування без участі оператора.

Як зазначено в [14], завдання підвісу полягає в обчисленні корекції для кожного виявленого руху в одиниці часу і та компенсації його з дотриманням такої вимоги:

$$\omega T \approx \omega_i, \varphi T \approx \varphi_i, \kappa T \approx \kappa_i \quad (1.1)$$

де $\omega T, \varphi T, \kappa T$ - це заздалегідь визначені кути повороту для кожної осі підвісу; $\omega_i, \varphi_i, \kappa_i$ - відповідно виміряні інерційними датчиками (ІВМ) миттєві кути кутових змін платформи за осями крену (ω), тангажу (φ) та рискання/азимутальної осі (κ), що підлягають компенсації підвісом.

На відміну від кутів $\omega T, \varphi T$, кут κT не визначається абсолютно напрямком сили тяжіння, а визначається відносно засобу, на якому він встановлений, або абсолютно відносно північного напрямку.

Важливу роль в сучасних системах відеофіксації для автономних і дистанційно керованих платформ відіграють гіростабілізовані підвіси з активною компенсацією руху за трьома осями [14]. Механічна структура таких систем включає безщіткові електродвигуни, ІВМ, енкодери та демпферні елементи, що разом формують замкнений контур стабілізації положення лінії візування. При використанні тривісного карданного підвісу на базі бюджетного контролера Storm32 зі здвоєним ІВМ досягається зниження середньоквадратичних значень кутових відхилень платформи до $0,3^\circ-0,5^\circ$ при компенсації змін за кутами крену та тангажу навіть за умов руху по пересіченій місцевості [14]. При цьому завдання такого підвісу полягає в обчисленні корекції для кожного виявленого руху в одиниці часу та компенсації його. Основний ІВМ підвісу встановлюється на кріплення камери підвісу, до його складу входять тривісний акселерометр та тривісний гіроскоп. Приклад контуру управління карданним підвісом наведено на рис. 1.1 [14]. Результати вимірювання обробляються за допомогою фільтрів, калібрування та корекції орієнтації, зазвичай використовується фільтр Калмана. Система визначення положення та курсу (AHRS) обчислює кути орієнтації на основі скоригованих вимірювань ІВМ. Далі для корекції даних AHRS використовується пропорційно-інтегрально-диференціальний (ПІД) регулятор, після якого кути у вигляді імпульсно-широко-модульованого сигналу надходять до драйвера двигуна, який є рухомою камерою, для корекції положення [14].

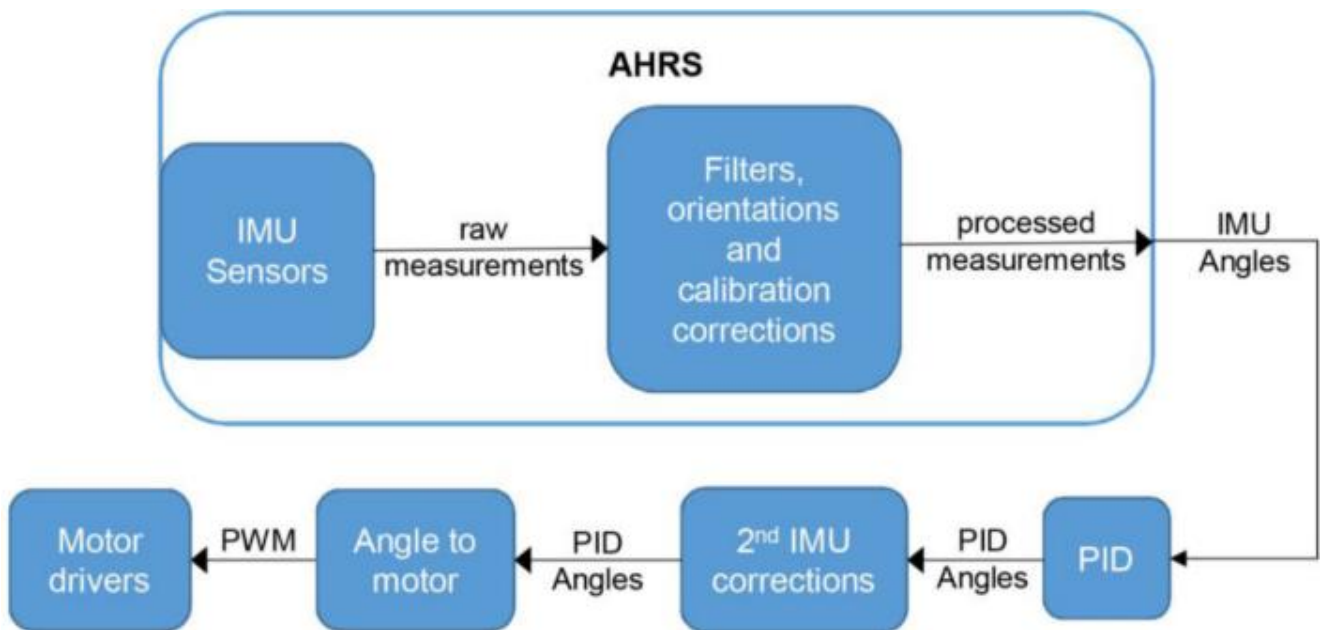


Рис.1.1. Контур управління контролером підвісу [14]

Крім основного, підвіс може використовувати додатковий ІВМ, який розташований на платі контролера. Додатковий ІВМ повинен бути встановлений незалежно від будь-якого двигуна, його використання сприяє підвищенню точності та збільшенню робочого діапазону, а також підтримує більш стабільну вісь ристання [14].

Подібні контури широко використовуються в системах стабілізації гіростабілізованих підвісів як для наземних, так і для повітряних платформ, що підтверджується прикладами з робіт [2,14]. У загальному випадку стабілізаційний контур будується на основі модуляційного керування, фільтрації даних з ІВМ і контуру зворотного зв'язку з використанням стандартних або адаптивних регуляторів.

Стабілізація зображення здійснюється не лише на рівні апаратного забезпечення, а й за допомогою алгоритмів цифрової обробки відеопотоку. У випадку інтеграції оптичного потоку або SIFT-орієнтованих методів обробки кадрів у поєднанні з даними гіроскопа можливо досягти зниження відхилення візуального потоку без втрати точності [9]. Такі підходи демонструють високу

ефективність при швидкісному русі платформи або при експлуатації платформи в умовах динамічних вібрацій. Розширений гібридний метод стабілізації на основі нейромережевої компенсації вектора руху та активного керування з послабленням збурень (як альтернативи ПД-регуляторам) дозволяє зменшити відхилення в осі рискання на понад 80% порівняно з класичним підходом, що було підтверджено серією експериментів на прототипах двовісних стабілізаторів [15].

Як приклад реалізації стабілізаційної системи у просторі станів можна розглянути модель двовісного підвісу, наведену в роботах [16,17]. Контур стабілізації, орієнтації та наведення камери зазвичай реалізується через модель у просторі станів. Для точного керування положенням лінії візування (ЛВ) використовується зворотній зв'язок, адаптивне керування або методи лінеаризації, які дають змогу точно утримувати ціль навіть у разі прискорених рухів носія.

Системи такого типу розглянуто в [16] для віддаленого інспектування об'єктів інфраструктури, таких як мостові конструкції або підземні комунікації, де потрібна точна стабілізація в обмежених просторових умовах.

Одним із широко використовуваних підходів до стабілізації ЛВ є використання експоненційно збіжних законів керування. У роботах [16-18] наведено приклади реалізації таких законів як для сталих орієнтацій, так і для динамічних траєкторій.

Успішна робота стабілізованих відеосистем значною мірою залежить не лише від якості обчислювальних моделей та точності датчиків, але й від прохідності платформи, на якій вони встановлені. Поверхня, по якій рухається носій, часто має складний рельєф, і нерівномірність опорної площини може стати джерелом додаткових коливань. Ці збурення впливають на ефективність стабілізації камери та можуть призводити до похибок у наведенні, особливо у випадках різкого прискорення або ударних навантажень, що передаються на вузол кріплення.

Ще однією важливою темою, є питання копіювання та взаємного (чи

перехресного) калібрування сенсорів у полі : щоб зберегти правдоподібність відеопотоку при деградації окремих компонентів [19]. Сучасні мультисенсорні платформи переходять від концепції «одна камера - один канал» до архітектури з резервуванням і перехресною перевіркою (cross-checking) - тобто декілька сенсорів (оптика, тепловізор, короткохвильовий радар або лідар) працюють разом, і система програмно визначає, який канал дає найбільш надійну інформацію на поточний момент. Наприклад, при сильному дощі чи тумані система може тимчасово зменшити використання інформації оптичного каналу і покластися на лідар/радарні виміри для визначення векторів руху й стабілізації; при сильних електромагнітних перешкодах (наприклад, грозових розрядах) може тимчасово активуватися спеціальний режим гарячого перезавантаження AHRS з більш агресивною фільтрацією та перевітками узгодженості даних інерціальної вимірювальної системи. На практиці це реалізується як багаторівневий стек: апаратна частина (герметизація, демпферні вставки, вакуумні/осушувальні патрони у відсіку сенсорів) плюс низькорівневі низькорівневі вбудовані механізми керування (темпова корекція дрейфу інерціальної вимірювальної системи, компенсація температурної залежності по внутрішнім температурним сенсорам) плюс високорівневі алгоритми (інтеграції даних і динамічне переналаштування ваг при багатоджерельній фільтрації). Вкрай корисною є також можливість онлайн реєстрації умов (температура, вологість, спектр вібрацій) з подальшою відправкою телеметрії на базу для подальшого аналітичного опрацювання та перегляду стратегій технічного обслуговування, що дає змогу після кожної місії виявляти закономірності деградації і корегувати сервісні інтервали та конструктивні зміни. Подібні підходи до мультисенсорного інтеграції та адаптивності описуються у сучасних оглядових статтях про вплив погоди на сенсори та в прикладах реалізації гібридних стабілізаційних рішень [19].

Удосконалення процесів випробувань, валідації та сертифікації стабілізованих відеосистем для РНП вимагає системного підходу, що поєднує лабораторні стендові тести, польові випробування в репрезентативних умовах та

сценарні випробовування в умовах, близьких до аварійних [5]. Стендові тести мають забезпечувати копіювання спектра механічних збурень (низько- та високочастотних), термічних циклів і електромагнітних перешкод для оцінки дрейфу інерціальної вимірювальної системи, стабільності енкодерів і поведінки регуляторів пропорційно-інтегрально-диференціального типу/адаптивних регуляторів під навантаженням. Наступним етапом є інтегровані тести на платформах (на реальному шасі) з відтворенням сценаріїв прохідності, ударних впливів і довготривалого реєстрування для аналізу деградації як апаратної частини, так і алгоритмів. Для цивільних застосувань важливим є також розробити набір процедур приймально-здавальних випробувань із визначенням критичних метрик: середньоквадратична похибка утримання осі, час відновлення позиції після удару, діапазон робочих температур і стійкість до конденсації/запотівання оптики. Ці процедури повинні співставлятися з історичними практиками й рекомендаціями у технічних доповідях і національних збірках з розвитку РНП [5, 8].

Технічне обслуговування, діагностика і логістика підтримки є важливим аспектом, який на пряму впливає на готовність платформи до виконання завдань у серйозних операціях. Розгортання в польових умовах вимагає чітких сервісних інструкцій: доступні для швидкої заміни модулі підвісу й сенсорів, прості процедури калібрування AHRS перед виходом, вбудовані тести самокалібрування під час запуску та записи діагностичних даних для подальшого післяаварійного аналізу, що дозволяють відстежувати тренди деградації (наприклад, поступове зростання шумів інерціальної вимірювальної системи або зниження ресурсу підшипників) [5]. Також доцільно документувати інтервали регламентних перевірок залежно від умов експлуатації, а в критичних випадках використовувати ізольовані демпфувальні контейнери та термоконтроль для підтримки стабільності інерціальної вимірювальної системи і оптики. Такі інженерні й процедурні заходи значно підвищують експлуатаційну тривалість та зменшують кількість відмов у польових умовах [5].

Надійність і відмовостійкість відеосистем є критично важливими в умовах

тривалих місій і при експлуатації в агресивних середовищах. Практично це означає впровадження принципів резервування та перехресної верифікації сенсорних каналів. Архітектура з кількома незалежними каналами (оптичний, тепловий канал, короткохвильовий радар або лідар) дозволяє динамічно перенаправляти сигнал керування на той канал, який дає найбільш стабільну інформацію, наприклад, при тумані або сильному димі, і реалізувати автоматичне переналаштування ваг у фільтрах інтеграції даних [14]. Окрім апаратного резервування, важливо впровадити вбудовані механізми самодіагностики: калібрування в полі, моніторинг температури й вологості у відсіку сенсорів, онлайн реєстрації спектра вібрацій та статистики перешкод із наступним аналізом для визначення трендів деградації й корекції сервісних інтервалів. Такі підходи дозволяють не лише підвищити надійність роботи під час окремої місії, а й зменшити ризик невдалого виконання завдання через вихід із ладу одного елемента системи [14].

1.5 Механічні аспекти стабілізації роботизованих наземних платформ

Механічні рішення для підвісів визначають практичну межу продуктивності систем стабілізації в польових умовах і потребують комплексного інженерного підходу, який поєднує правильне конструювання опорної структури, ретельний вибір підшипникових вузлів, продуману систему демпфування і модульну архітектуру для сервісного обслуговування. Насамперед необхідно визначити частотний спектр збурень платформи і сконструювати пасивний ізолятор таким чином, щоб його власна частота була нижчою за нижню межу спектра шкідливих вібрацій, які потрібно ослабити [2]. При цьому слід враховувати ключовий компроміс, коли надмірне зниження власної частоти призводить до великих відносних переміщень у діапазоні резонансу, що вимагає введення дозованого демпфування для згладжування піка резонансу. Практичне рішення часто базується на багатошаровій конструкції, де

жорстка виносна підвіска забезпечує геометричну стійкість і жорстку опору силовим навантаженням, пружинно-демпферний елемент дає основне зниження переданих низькочастотних коливань, а віброізолюючі вставки з еластичних полімерів поглинають високочастотні складові та локальні удари; серійне розташування ізолюючих ступенів дає мультиплікативне зниження передачі енергії з платформи на оптичний блок, що часто виявляється більш ефективним, ніж спроби повністю компенсувати ті самі збурення тільки активними регуляторами [2].

Вузли підшипників і методи їх встановлення безпосередньо впливають на точність наведення, люфт і довговічність підвісу, тому необхідно враховувати вимоги до терміну служби, умов експлуатації і допустимого технічного обслуговування при виборі конкретного рішення. У малих компактних підвісах часто застосовують керамічні кулькові підшипники, які характеризуються низьким коефіцієнтом тертя, високою стійкістю до корозії і здатністю працювати при низьких температурах з відповідними мастильними сумішами [2]. У важких модульних системах доцільно використовувати герметичні підшипникові вузли або роликові підшипники високої жорсткості з попереднім натягом для виключення “backlash” і забезпечення стабільної зовнішньої орієнтації оптики [2]. Альтернативою підшипникам із зазором є флексорні опори, які забезпечують відсутність люфту і повторювану геометрію руху, що критично для метричних задач, але потребують вищої точності виготовлення і можуть мати обмеження по довговічності при великих циклах навантаження. Вибір мастила є окремою інженерною проблемою: в експлуатаційних умовах з широкими температурними коливаннями застосовують низькотемпературні синтетичні мастила або тверді мастильні покриття, які зберігають триботехнічні характеристики і зменшують потребу в частому технічному втручанні, а для середовищ з високою запиленістю або агресивними середовищами краще використовувати герметичні картриджі з можливістю швидкої заміни [2].

Демпфування і матеріали ізолюючих елементів повинні підбиратися з урахуванням амплітудно-частотної характеристики робочого середовища і

повинні враховувати динамічну взаємодію з приводною частиною підвісу і контролером. Ефективними виявляються комбіновані рішення, де конструктивні демпфери поєднують в собі пружинні елементи для управління статичною жорсткістю і в'язкі просочені або в'язкопружні вставки для розсіювання енергії в резонансній смузі [2]. Застосування шаруватих матеріалів з вбудованою демпфуючою прошарковою смугою дозволяє підвищити структурне демпфування корпусу і зменшити амплітуду власних мод для всіх робочих режимів. Якщо виявляються вузькі спектральні піки, що негативно впливають на якість відео, то доцільно інтегрувати настроювані демпфери або резонансні демпфери масового типу, які налаштовуються під конкретні частоти платформи і дають локальне поглинання енергії без значного впливу на загальну жорсткість механізму [2]. Такі підходи не лише зменшують амплітуду вібрацій на прийомі оптики, але й знижують навантаження на серводвигуни, що веде до меншого струму пуску, зниження пікового навантаження на електроживлення і продовження ресурсу електромеханічних компонентів [2].

Інтеграція пасивних механічних заходів зі стратегіями активного керування вимагає уваги до взаємодії між механічною частиною і контролером, оскільки пасивні елементи змінюють фазову характеристику системи і можуть створювати додаткові затримки або резонансні режими, які потрібно враховувати при налаштуванні фільтрів і спостерігачів. Підхід, який довів свою ефективність у практиці [18], передбачає спочатку апаратну оптимізацію для зменшення вхідних збурень вище тих частот, на яких контроль керування вже неефективний, а потім адаптивне налаштування контролера із врахуванням отриманої амплітудно-частотної характеристики і моделюванням реакції у всьому робочому діапазоні. У проєктуванні це реалізується через поетапну валідацію: модальний аналіз корпусу і вузлів, стендові вимірювання передавання вібрацій, і лише після цього калібрування контролера на реальній платформі з реєстрацією показників і можливістю швидкої заміни модулів демпфування чи підшипників у польових умовах, що критично для збереження операційної готовності платформи [18].

1.6 Рельєф та прохідність платформи

Питання впливу рельєфу на точність стабілізації відеозображення розглянуто у ряді наукових робіт, де підкреслюється роль характеру поверхні, як одного з ключових джерел збурень. Зокрема, встановлено, що навіть помірні нерівності можуть призводити до значних відхилень у положенні відеокамери відносно цільової лінії візування. У дослідженні [20] проаналізовано, як випадкові коливання висоти опорної площини впливають на ефективність стабілізаційної системи, що особливо критично для платформ, які працюють на складному рельєфі поверхні руху. Автори акцентують увагу на необхідності врахування статистичних властивостей профілю дороги при проектуванні підсистеми стабілізації, зокрема в контексті фільтрації та компенсації зовнішніх механічних впливів. Прохідність наземних мобільних роботизованих систем визначається багатьма чинниками, включаючи геометричні параметри шасі, тип підвіски, властивості ґрунту, а також динамічні характеристики руху.

Відомо, що профіль поверхні, по якій пересувається платформа, має випадкову природу і часто описується стаціонарними статистичними моделями, де висота нерівностей підкоряється нормальному або близькому до нього розподілу. При цьому розподіл частоти та амплітуди коливань суттєво залежить від класу дороги або рельєфу, і ці особливості мають бути враховані при конструюванні системи стабілізації [20]. Збурення, що виникають під час руху по нерівній поверхні, передаються на вузол кріплення камери, створюючи додаткові вимоги до швидкодії та точності стабілізаційного контуру. Частотна характеристика таких збурень часто охоплює широкий діапазон, включаючи як низькочастотні компоненти, зумовлені загальним нахилом поверхні, так і високочастотні, які виникають внаслідок дрібних вібрацій. При цьому наявність крутильних коливань і змін кута атаки коліс може призводити до комплексного впливу на орієнтацію камери, що особливо критично під час автоматичного наведення на об'єкт або ведення відеоспостереження [20]. Для зменшення впливу нерівностей на точність наведення важливим є як фізичне демпфування,

так і врахування профілю руху у системі керування. Тому формування вимог до стабілізованого підвісу неможливе без врахування особливостей руху носія у реальному середовищі, зокрема при зміні рельєфу, наявності перешкод, вибоїн, схилів і нерівностей, що не можуть бути передбачені заздалегідь [20].

Як зазначено в [21], ефективність стабілізації значною мірою залежить від здатності системи адаптуватися до типу поверхні, динамічних властивостей руху та характеру збурень, які виникають унаслідок локальних змін рельєфу. У цих роботах підкреслено важливість врахування не лише середньостатистичних параметрів профілю, а й конкретних сценаріїв навантаження на підвіс залежно від умов середовища. Зокрема, запропоновано застосовувати комбіновані регулятори з адаптивним налаштуванням, які здатні реагувати на зміну динамічної картини у реальному часі, зменшуючи негативний вплив короткотривалих ударних та крутильних збурень.

Дослідження впливу середовища на якість стабілізації показали, що при розробці чи вдосконаленні систем стабілізації важливо враховувати не лише розмір перешкод, а й частоту їхнього виникнення. За певних умов дрібні, але часто повторювані нерівності створюють так званий вібраційний фон, на тлі якого стабілізатор повинен утримувати лінію візування без накопичення похибки. З огляду на це, в роботах з оцінки ефективності систем стабілізації пропонується враховувати як випадкову, так і періодичну складову збурень. При цьому особливе значення приділяється узгодженості параметрів регулятора з динамічними характеристиками самого шасі та типом поверхні, по якій рухається платформа. Установлено, що занадто жорстке налаштування ПП-регулятора може спричинити автоколивання або перевищення амплітуди реакції у відповідь на короткочасні удари, тоді як надмірне згладжування робить систему інертною до змін, що виникають у реальному середовищі [21].

Ще одним важливим аспектом є необхідність урахування напрямку і швидкості руху відносно лінії рельєфу. При русі платформи під кутом до нахилу або при гальмуванні на спуску з'являються комбіновані кутові та лінійні збурення, які призводять до зміщення точки фокусування навіть при збереженні

загального положення підвісу. Такі ефекти не можуть бути компенсовані лише апаратно і вимагають прогнозування поведінки платформи на основі оцінки мікропрофілю місцевості. Поєднання інерційних впливів, ударних навантажень, зміни кута нахилу і випадкової вібрації формує складну картину збурень, до якої стабілізована система повинна бути адаптована як на рівні конструкції, так і на рівні керування. Як зазначено у [21], реалізація компенсаційного алгоритму з урахуванням попереднього аналізу характеру покриття дозволяє суттєво підвищити точність стабілізації та зменшити навантаження на приводну частину.

Таким чином, якість стабілізації відеозображення на мобільних платформах у складному рельєфі не може розглядатися окремо від прохідності шасі, кінематики руху та властивостей зовнішнього середовища. Поєднання інерційних впливів, ударних навантажень, зміни кута нахилу і випадкової вібрації формує складну картину збурень, до якої стабілізована система повинна бути адаптована як на рівні конструкції, так і на рівні керування [21].

1.7 Атмосферні умови

Важливо звернути увагу на вплив зовнішніх атмосферних факторів та теплових деформацій конструкцій на роботу стабілізаційної системи. При зміні температури метали, з яких складається каркас підвісу, розширюються або стискаються. Такі незначні зсуви можуть змінити положення оптичної осі, особливо якщо використовуються прецизійні підшипники, енкомери або обертові елементи, де допуск складає частки градуса. Термічне розширення призводить до зменшення зазорів у механічній частині, зсувів фокусування або зміни калібрування сенсорів, що особливо важливо при тривалому перебуванні в умовах високих температур або при переході між різними температурними режимами [22].

Одночасний вплив погодних умов (вологість, вітер, дощ або пил) може суттєво знижувати ефективність роботи як підвісу платформи, так і компонентів ІВМ. Наприклад, волога спричинює конденсацію на сенсорах, зумовлюючи

появу шумових спотворень в акселерометрах або гіроскопах, а пил порушує плавну роботу механіки. Вітер створює додаткові сили та крутильні коливання на платформі, що вимагає від системи стабілізації підвищеної динамічної точності [19,22]. Наслідком комплексного впливу термічних і атмосферних умов може стати поступова генерація похибок стабілізації: при нагріві корпусу ІВМ виникає дрейф показників, що зумовлює зсув орієнтації підвісу, а при охолодженні - змінюється геометрія конструктивних елементів, що призводить до погіршення реакції системи на вхідні збурення [18].

Щоб мінімізувати ці впливи, застосовують такі конструктивні рішення: використання матеріалів з низьким коефіцієнтом теплового розширення; температурну стабілізацію сенсорів; ізоляцію електронних компонентів; адаптивні фільтри з термокомпенсацією [29]. Таким чином, стійкість до кліматичних і температурних коливань є важливою складовою забезпечення надійної стабілізації в реальних умовах експлуатації.

1.8 Температурні впливи та теплове розширення

Наслідком поєднаного впливу термічних і атмосферних умов може стати поступова генерація похибок стабілізації: при нагріві корпусу інерціально вимірювального пристрою виникає дрейф показників, що зумовлює зсув орієнтації підвісу, а при охолодженні - змінюється геометрія конструктивних елементів, що призводить до погіршення реакції системи [24].

Окрім температурних впливів, істотну роль відіграє циклічне чергування режимів «нагрів–охолодження», яке з часом призводить до втоми матеріалів і мікротріщин у місцях кріплення підшипників та опорних вузлів. У вологому середовищі ці дефекти поглиблюються через корозійні процеси, що не лише знижує жорсткість конструкції, а й змінює динамічну реакцію системи стабілізації. При тривалому впливі пилових потоків абразивні частинки проникають у щілини механічних з'єднань, викликаючи зростання моментів тертя та появу мікродрижання під час руху. Для оптичних сенсорів це

проявляється у вигляді поступового зниження чіткості й контрастності відеопотоку. Сильні вітрові навантаження діють не лише на камеру, а й на всю платформу: при русі проти вітру виникають додаткові крутильні моменти на вузлах підвісу, що призводить до підвищених вимог до швидкодії контролерів. Зрештою, поєднання таких факторів може спричиняти накопичувальний дрейф стабілізаційної системи, навіть якщо в ідеальних лабораторних умовах вона демонструє високі показники точності [25]. Для мінімізації цих впливів застосовуються спеціальні герметичні корпуси з пиловологозахистом (IP67 та вище), багат шарові покриття для оптики, а також адаптивні алгоритми, що враховують зміну динаміки платформи залежно від погодних умов [25].

Ефективне енергоменеджмент-рішення для стабілізованих камер та підвісів на мобільних платформах також є важливим для тривалих місій у складних умовах. Архітектура живлення повинна розглядати не лише сумарне споживання (камери, мотор-редуктора підвісу, тепловізор, обчислювальний модуль), а й пікові навантаження при швидких реакціях на зовнішні збурення [23]. Обов'язковим є впровадження сегментованого живлення з буферними накопичувачами для забезпечення миттєвого крутного моменту на моторах підвісу без просідання напруги живлення обчислювальної частини. Сучасною тенденцією є мініатюризація мініатюризація модулів з одночасним запровадженням температурної стабілізації для інерціальної вимірювальної системи і сенсорів, що дозволяє знизити дрейф при нагріві [23]. Конструктивно це вирішується через герметичні відсіки з клімат-контролем, термоізоляційні вставки та використання матеріалів з низьким коефіцієнтом теплового розширення. У проєктуванні також варто інтегрувати менеджмент енергії на рівні ПЗ, що передбачає адаптивне зниження частоти кадру, динамічне зменшення поля огляду при сильних вібраціях, транзиційні режими для тепловізорів та оптики, а також пріоритизація каналів передачі даних залежно від заряду батареї. Ці рішення дозволяють подовжити тривалість місії і зберегти критичну здатність до дистанційного спостереження в екстремальних умовах [23].

Щоб мінімізувати зазначені впливи, застосовують конструктивні рішення, такі як: використання матеріалів з низьким коефіцієнтом теплового розширення, температурну стабілізацію сенсорів, ізоляцію електронних компонентів та адаптивні фільтри з термокомпенсацією [25]. Таким чином, стійкість до кліматичних і температурних коливань є важливою складовою забезпечення надійної стабілізації в реальних умовах експлуатації.

У результаті аналізу та узагальнення існуючих підходів до стабілізації відеофіксаційних систем на мобільних платформах постає потреба у формуванні підходів до детального моделювання двовісного підвісу як об'єкта з характерними інерційними властивостями та залежностями, що враховують збурення і вплив зовнішніх умов. Важливим напрямом подальших досліджень є визначення впливу моментів інерції на стійкість та точність стабілізації, а також необхідність оцінки температурного впливу на геометрію елементів підвісу, що може призводити до відхилень в орієнтації. Такий підхід дозволить сформулювати цілісне уявлення про динамічні характеристики стабілізаційної системи в умовах експлуатації та створить підґрунтя для майбутнього моделювання й оптимізації конструкції.

Проведений огляд свідчить про зростаючу роль гіростабілізованих відеосистем у роботизованих платформах. На основі аналізу літературних джерел визначено основні напрямки розвитку, типові конструктивні та алгоритмічні рішення, а також перспективи їх подальшої інтеграції з адаптивними контролерами та нейромережевими моделями.

1.9. Мета і завдання даних наукових досліджень

Сучасні наукові дослідження у галузі роботизованих наземних платформ спрямовані на створення автономних та дистанційно керованих мобільних систем, здатних виконувати завдання у небезпечних або недоступних для людини середовищах, забезпечуючи надійний моніторинг та стабільний збір візуальної інформації навіть за умов інтенсивних збурень та нерівномірного руху

платформи [1, 7]. Враховуючи розширення спектра застосування РНП у цивільних і спеціалізованих сферах, дослідники прагнуть досягти високої точності наведення та стійкої роботи оптико-електронних комплексів, що робить проблематику стабілізації відеозображення особливо актуальною [11, 20].

Одним із ключових завдань є розроблення та вдосконалення гіростабілізованих систем підвісу камер, що забезпечують компенсацію коливань і зменшення впливу нерівностей рельєфу, динамічних ударів та вібрацій, які супроводжують рух РНП по пересіченій місцевості. Дослідження підтверджують, що застосування багатовісних підвісів і пасивних демпфувальних елементів дозволяє суттєво покращити якість зображення та зменшити похибки орієнтації камери, що є вирішальним для задач спостереження, пошуку або навігації [2, 20, 21].

Паралельно ведеться розвиток алгоритмічних методів активної стабілізації лінії візування. У наукових роботах описано застосування сучасних систем керування — зокрема адаптивних, оптимізаційних та нейромережових підходів, здатних компенсувати зовнішні збурення та забезпечувати плавність та точність руху оптичного модуля. Це дозволяє утримувати ціль або напрям спостереження під час різких змін динаміки платформи, що є критично важливим для точних наводок та безперервного моніторингу [15-17].

Значна увага у літературі приділяється також впливу середовищних факторів на функціонування РНП. Нерівності ґрунту, вібрації, температурні зміни та атмосферні явища здатні суттєво погіршити точність стабілізації та загальну якість роботи сенсорної системи. У відповідних роботах пропонуються методи демпфування, конструктивні заходи термокомпенсації, визначаються режими роботи обладнання в умовах високої вологості, пилу чи теплових градієнтів [19, 20, 22, 24].

Результати численних експериментальних та оглядових досліджень демонструють, що досягнення високої точності наведення камери та стабільного отримання відеозображення вимагає узгодженого підходу, що поєднує конструктивні рішення, алгоритмічні методи та врахування зовнішніх впливів.

Такі підходи є базовими для забезпечення надійності роботизованих платформ при виконанні функцій моніторингу, розвідки та роботи у складних або небезпечних умовах, де стабільність відеосистеми є основою успішності місії [1, 8, 13].

Метою даної роботи є розроблення двовісної системи стабілізації для забезпечення стабільної подачі відеосигналу в реальному часі в системах візуального моніторингу небезпечних об'єктів.

1. Аналіз стану сучасних систем стабілізації обладнання роботизованих наземних платформ.
2. Обґрунтування та створення параметричної 3D-моделі двовісного підвісу.
3. Моделювання та аналіз напружено-деформованого стану елементів підвісу під впливом статичних та теплових навантажень.
4. Обґрунтування вибору виконавчих елементів, розробка структурної схеми системи та програмної моделі системи стабілізації.
5. Моделювання та аналіз динамічних характеристик системи стабілізації.

РОЗДІЛ 2

ПРОЄКТУВАННЯ ТА ДОСЛІДЖЕННЯ ДВОВІСНОГО ПІДВІСУ ДЛЯ СТАБІЛІЗАЦІЇ ВІДЕОЗОБРАЖЕННЯ НА НАЗЕМНИХ ПЛАТФОРМАХ

2.1 Двовісний підвіс виробництва Wuhan Joho, як прототип розробки

У якості прототипу для розробки двовісного підвісу розглянемо конструкцію моделі JHP107-M145A Wuhan Joho, що зображена на рис. 2.1, оскільки її архітектура та функціональні рішення добре відповідають завданням цивільного застосування роботизованих наземних платформ [25]. Обрана платформа має компактну двовісну кінематику, де зовнішня несуча плита виконує роль жорсткої основи для кріплення до носія та служить опорою для азимутального обертання, а внутрішня підвіска утримує мультисенсорний блок і формує вісь тангажного обертання. Таке розділення функцій між несучими елементами дозволяє мінімізувати загальну висоту підвісу і зменшити сумарну інерцію при збереженні жорсткої бази кріплення. Конструктивно це полегшує організацію пустотілої осі для прокладання кабелів і живлення, розміщення енкодерів на флангах у зонах мінімального люфту та реалізацію швидкої заміни сенсорів без повного демонтажу платформи [25].

Механічна частина підвісу в типовому рішенні побудована навколо несучих пластин з жорсткими ребрами і точками кріплення підшипникових вузлів. У місцях з підвищеним навантаженням і контактними поверхнями слід передбачити металеві втулки або локальні посилення, а для ненесучих корпусних деталей використовувати 3D-друковані матеріали, що дозволяє гнучко змінювати форму кожуха, швидко перевіряти посадки і зменшувати вартість прототипування.

Силова і керуюча частина підвісу в типовому електрооптичному та

тепловізійному рішенні реалізована на безщіткових двигунах з жорсткими вимогами. Як можна побачити з характеристик підвісу моделі JHP107-M145A Wuhan Joho [25], при проектуванні власного підвісу слід орієнтуватися на мотори з великою постійною крутного моменту, які дозволять зменшити електромеханічну сталу часу при заданому приведеному моменті інерції сенсорної збірки. Важливо передбачити можливість пропуску кабелів через пустотілий вал, розміщення датчиків положення з високою роздільною здатністю і сумісність з контролерами струму, що підтримують прямий контроль по струму.



Рис.2.1. Підвіс JHP107-M145A виробництва Wuhan Joho [25]

2.2 Обґрунтування геометрії та вибору матеріалів для моделі двовісного підвісу

У сучасних мобільних робототехнічних системах механізми стабілізації, зокрема двовісні підвіси, стали ключовим елементом сенсорних комплексів, оскільки саме вони дозволяють забезпечити стабільність і точність відеопотоку при русі платформи. Досвід використання безпілотних наземних і повітряних систем у небезпечних середовищах, показав, що якість і стабільність зображення є не менш важливими, ніж точність навігації та зв'язку [1]. Це підтверджує необхідність поглибленого вивчення механічних аспектів роботи підвісу, що дозволяє заздалегідь прогнозувати поведінку системи в екстремальних умовах.

Для створення та попереднього дослідження моделі двовісного підвісу було обране середовище SolidWorks, оскільки воно поєднує розвинуті засоби параметричного моделювання, симуляції та аналізу механічних систем і наявний багаторічний практичний досвід роботи саме з цим середовищем, що дало змогу скоротити час на побудову моделі, знизити ризик помилок і швидко виконати серію порівняльних досліджень [26]. Середовище SolidWorks дозволяє створювати тривимірні моделі складних вузлів із високим рівнем деталізації, автоматично розраховувати масоінерційні параметри, виконувати кінематичний та динамічний аналіз, а також оцінювати поведінку системи під дією зовнішніх навантажень і вібрацій. Це особливо важливо для підвісів і систем стабілізації, оскільки точна модель маси й інерції безпосередньо впливає на налаштування приводів та алгоритмів керування [2]. З досвіду роботи [4], створення та тестування роботизованих платформ у небезпечних середовищах також підтверджує користь попереднього комп'ютерного моделювання для мінімізації ризиків і витрат на етапі прототипування. Використання SolidWorks дозволяє реалізувати цикл «модель–аналіз–оптимізація» на початковій стадії проєкту, створювати сценарії навантажень, перевіряти варіанти конструкції, а також швидко адаптувати геометрію під нові умови або вимоги.

На рис. 2.2 представлені конструктивні рішення металевого каркасу

двовісного підвісу, що визначають його несучу здатність, жорсткість та інтерфейси для кріплення сенсорного блоку й приводів. Обґрунтуємо вибір матеріалу, які буде враховано при аналізі в середовищі SolidWorks.

Вибір матеріалу ґрунтується на критеріях мінімальної маси та низького коефіцієнта теплового розширення, що знижує деформації при термопроцесах (в умовах $-10\dots+50\text{ }^{\circ}\text{C}$). Також важливі статична міцність, межа текучості, жорсткість і здатність витримувати термічні цикли [24].

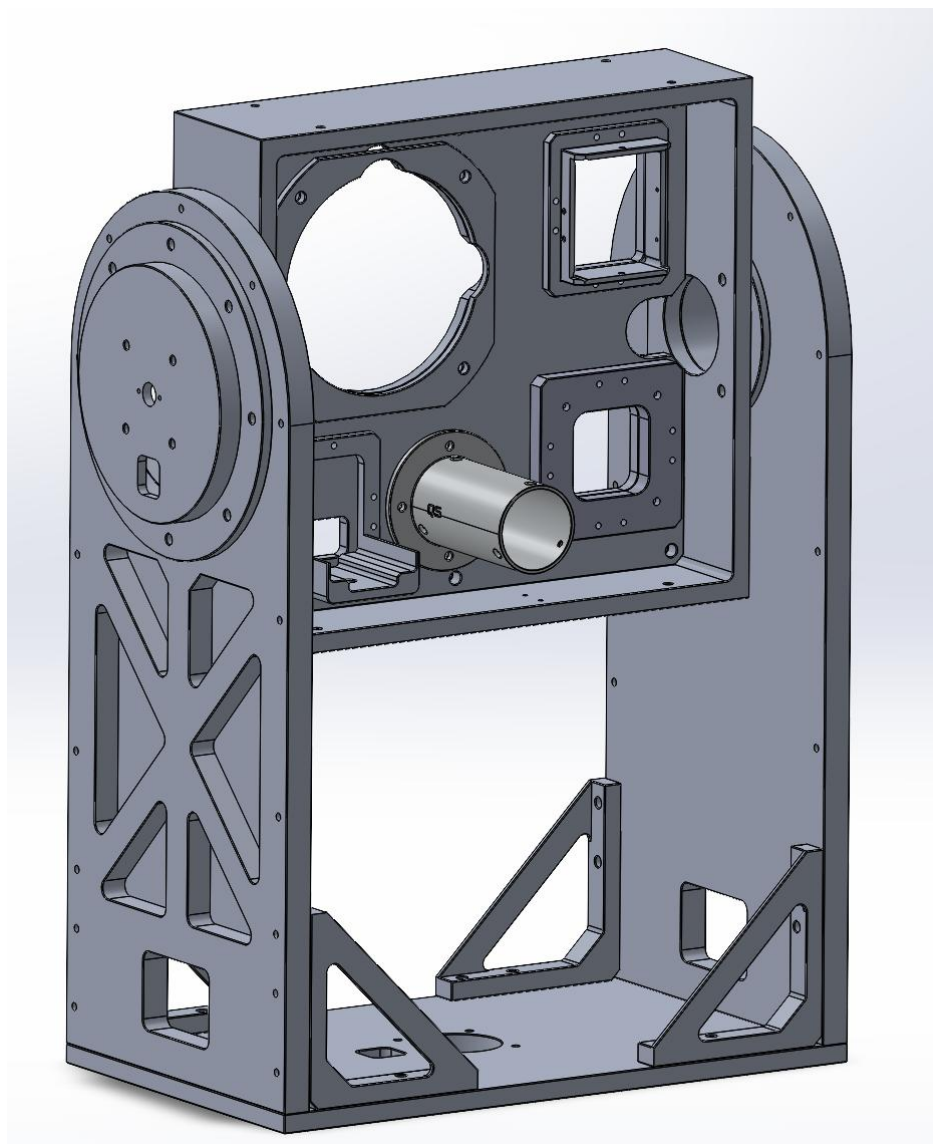


Рис. 2.2. Металевий каркас двовісного підвісу в застосунку SolidWorks

В табл. 2.1 наведено перелік ключових властивостей різних сплавів, що можуть бути використані для побудови каркасу, зібраних з джерел [28-33].

Таблиця 2.1. Властивості каркасних матеріалів

Матеріал	Щільність (г/см ³)	Коефіцієнт теплового розширення (10 ⁻⁶ /°C)	Межа текучості/ тимчасовий опір (МПа)	Модуль Юнга (ГПа)	Коментар
Al 6061– T6 (АДЗ1)	2,70	23,2	276 / 310	68,9	Стандартний конструкційний Al-сплав: помірна міцність, висока пластичність, добра зварюваність. Середній коефіцієнт теплового розширення.
Al 6063– T6	2,70	21,8	214 / 241	68,9	Аналогічна щільність, але найнижчий коефіцієнт теплового розширення серед алюмінію. Нижча міцність, зате краща корозійна стійкість і пластичність.
Al 2024– T3	2,78	23,2	345 / 483	73,1	Високий вміст Cu, висока міцність і втомостійкість. Погана корозійна стійкість. СТЕ близький до 6061.
Al 7075– T6	2,81	23,4	503 / 572	71,7	Найміцніший Al-сплав, але вища щільність і аналогічне теплове розширення. Використовується при критичних навантаженнях.
Mg AZ91D (литьовий)	1,81	26	160 / 245	45	Дуже легкий, але суттєво слабший і має більший коефіцієнт теплового розширення. Підвищена схильність до корозії.
Ti–6Al– 4V (грейд 5)	4,42	8,6	828 / 1000	114	Дуже висока міцність і дуже низький коефіцієнт теплового розширення. Щільність у 1.6 раза більша за алюміній.

Аналіз показав, що сплав 6061–T6 (АДЗ1) є збалансованим варіантом за

міцністю (приблизно 276 МПа) і технологічністю при помірному коефіцієнті теплового розширення $23,2 \times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$. Його близький аналог 6063–Т6 має найнижчий коефіцієнт теплового розширення серед алюмінієвих сплавів ($21,8 \times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$), однак нижчу міцність (близько 214 МПа), тому його доцільно застосовувати там, де критична саме термічна стабільність, а не несуча здатність. Сплав 2024–Т3 вирізняється високою міцністю (345 МПа) і добрим модулем пружності (73 ГПа), проте має аналогічне теплове розширення до 6061 та гіршу корозійну стійкість. Алюміній 7075–Т6 є найміцнішим серед розглянутих алюмінієвих сплавів (понад 500 МПа), але має найвищу щільність і такий самий коефіцієнт теплового розширення, як і інші алюмінієві сплави.

Серед нетрадиційних металів магній AZ91D відзначається дуже низькою густиною ($1,8 \text{ г/см}^3$), що дозволяє суттєво знизити вагу системи, але його коефіцієнт теплового розширення найбільший ($26 \times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$), а міцність низька (близько 160 МПа), що обмежує використання у навантажених вузлах. Титан Ti–6Al–4V, навпаки, має найбільшу густину ($4,4 \text{ г/см}^3$), проте вирізняється надзвичайно високою міцністю (понад 800 МПа) і найнижчим коефіцієнтом теплового розширення серед розглянутих матеріалів ($8,6 \times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$), що робить його найбільш стабільним за геометрією при термічних коливаннях.

Таким чином, якщо пріоритетом є баланс між міцністю та масою, доцільно залишитися на алюмінієвих сплавах серії 6000–7000, наприклад 6061–Т6 або 7075–Т6. Якщо критичним є мінімальне теплове розширення, тоді оптимальним є титан Ti–6Al–4V, хоча він збільшить масу та вартість конструкції.

Наступним розглядаємо вибір пластику для не несучих деталей, які представлено на рис. 2.3. Для них пріоритети зміщуються в бік простоти друку й надійності процесу, стійкості до вологи, стійкості до UV (сонячного випромінювання), ударостійкості/втомостійкості при вібраціях і достатнього теплостійкого запасу (HDT), щоб при $+50^{\circ}\text{C}$ частина не «розм'якшувалася». Для порівняння розглянемо такі пластики: ABS, ASA, PETG, PA6 (нейлон), полікарбонат (PC), PEI та вуглецево-армовані нейлони/філаменти що наведені в табл. 2.2. Основні числові значення (модуль/міцність/HDT/вологопоглинання)

наведено з технічний описів матеріалу (ТОМ) виробників [34-39].

Таблиця 2.2. Властивості корпусних матеріалів

Характеристики	ABS	ASA	PETG	PA6 (нейлон 6)	ПК (полікарбонат)	PEI
Межа міцності при розтягуванні, МПа	33,4	43–44	50,8	≈66	69,1	≈110 (текучість)
Ударна міцність, кДж/м ²	18,0	10,5	2,6	31 (н. надріз)	4,1	~6 (ізод)
Температура тепловідхилення під навантаженням (1.8 МПа), °С	98,2	100,2	74,8	69 (1.8 МПа)	106,6	≈210
Вологопоглинання (рівновага), %	низьке (~0,2)	низьке (~0,2)	0,54	високе (гігроскопічний)	0,253	дуже низьке (стабільний)
UV-стабільність	низька	висока	середня	низька	низька	дуже висока (UV-C резистентний)
Зносостійкість / твердість	середня	середня	середня	висока (низький коеф. тертя)	висока	дуже висока
Друкуваність (усадка, викривлення, адгезія)	сильне викривлення (потрібно нагріта платформа та закритий корпус)	менше викривлення (легше друкувати)	низьке викривлення (добре зчеплення шарів)	сильна усадка/warp (треба сушіння, контроль вологості)	значна усадка (потрібен закритий корпус і ~100°C платформа)	дуже велика усадка (екстр. умови друку)

ASA розроблений як «UV-стабільний ABS» і в ТОМ виробників показує прийнятне співвідношення механічної міцності, теплової стабільності і

вбудованої світлостійкості. Типові значення міцності при розтягуванні 43–44 МПа, показник теплостійкості термопластичних матеріалів 105 °С і низька усадка, при цьому в ТОМ прямо вказана призначення для застосувань на вулиці та в умовах сонячного випромінювання [34]. Для не несучих елементів підвісу це означає, що ASA витримає пряме сонячне випромінювання без швидкого фотодегрейду, зберігатиме колір і механічну цілісність у діапазоні $-10\dots+50$ °С, має достатню ударостійкість для вібраційних режимів і друкується простіше, ніж багато інженерних полімерів. Тому ASA - це найкращий компроміс для частин, що будуть на відкритому повітрі або під сонцем.

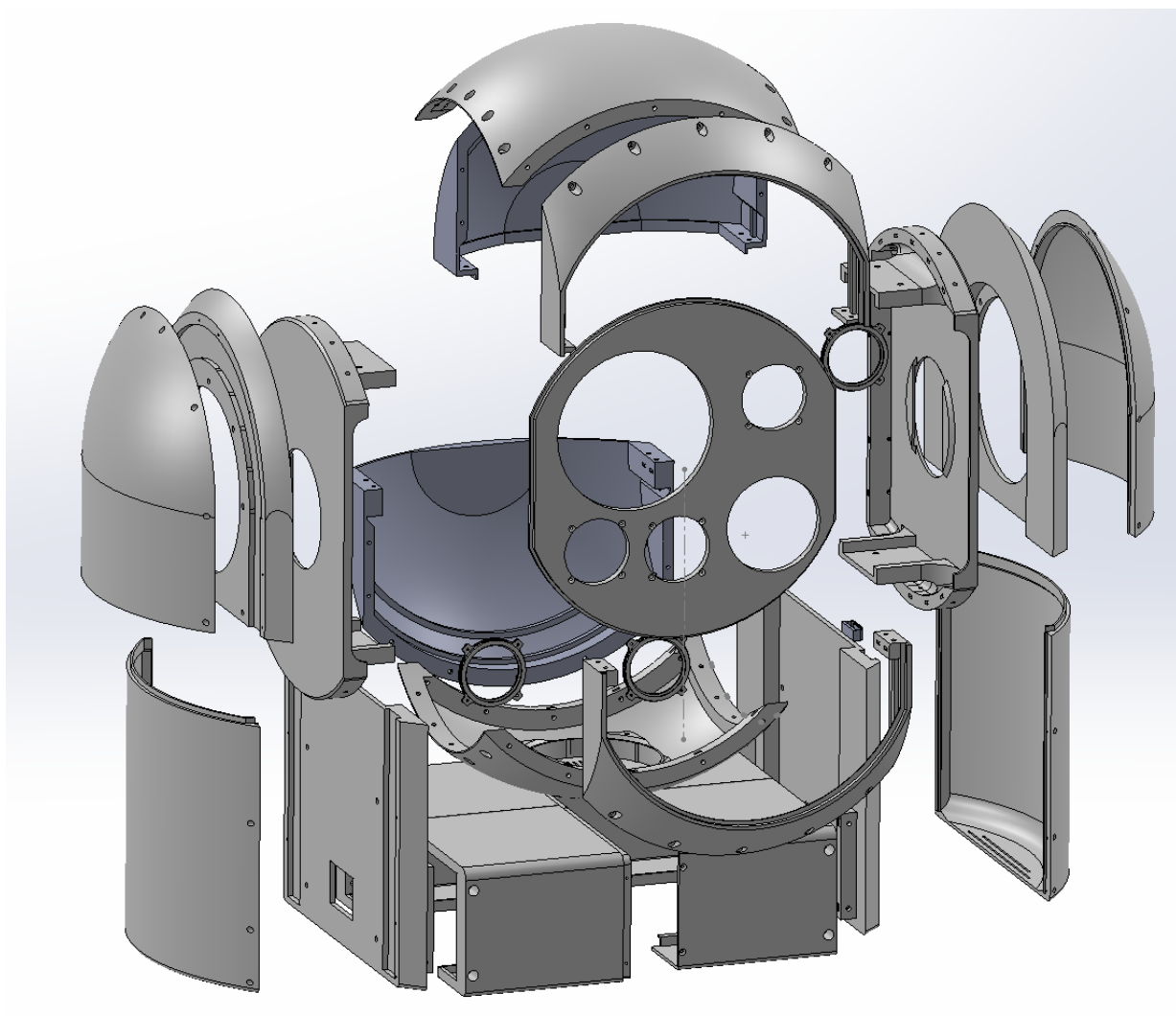


Рис. 2.3. Пластиковий корпус підвісу, рознесений вид у застосунку SolidWorks

Матеріал ABS-філамент дає помірну міцність і хорошу оброблюваність, його температуру тепловідхилення під навантаженням і механічні показники є прийнятними для багатьох корпусних застосувань. Однак ABS швидше втрачає властивості під дією ультрафіолету і має більші складнощі з криволінійною геометрією через сильніше викривлення; також потребує нагрітого столу і закритої камери. Якщо деталі підвісу будуть переважно в межах kabіни платформи або всередині, ABS лишається хорошим вибором [35].

Матеріал PETG поєднує простий друк, відмінну адгезію шарів і добрий хімічний захист та вологостійкість. За ТОМ [36] показує межу текучості 46 МПа і температуру тепловідхилення під навантаженням 76 °С що достатньо для +50 °С експлуатації з запасом, але у прямому сонячному опроміненні PETG може поступово деградувати/змінювати колір. Матеріал PETG - доцільно застосовувати для внутрішніх корпусних деталей або коли потрібна добра стійкість до вологи та легкість друку. Якщо частина може контактувати з водою/конденсатом, то PETG є безпечніший, ніж нейлон.

Нейлон PA6 має відмінну зносостійкість і ударну витривалість; ТОМ [37] демонструють велику межу текучості до 90 МПа. Однак PA6 сильно гідроскопічний: у середовищі з підвищеною вологістю його розміри і міжшарова адгезія змінюються, що робить його ризиковим вибором для деталей, де важлива точна геометрія в умовах вологості чи перепадів вологості. Для корпусних елементів підвісу це рідко є перевагою; для деталей, що потребують великої стійкості до стирання або контактів, можна розглянути армовані CF-варіанти, але друк ускладнюється потребою у суворому сушінні і носіях із твердої сталі.

Матеріал PC дає хорошу механічну міцність і температуру тепловідхилення під навантаженням, що перевищує PETG, але друкувати PC набагато складніше. Для друку потрібен гарячий стіл до 100 °С, закрита камера і контроль вологості, при недотриманні таких вимог можливі проблеми з міжшаровою адгезією [38]. Якщо в моделі є деталі, що мають працювати поруч з нагрівальними елементами або за умов підвищених температур, можна обирати PC, але цей варіант технологічно складний. CF-армовані нейлони або CF-PC

дають набагато вищу жорсткість і температуру тепловідхилення під навантаженням, для не-несучих частин вони виправдані, якщо потрібна підвищена жорсткість або зносостійкість, але вони абразивні для сопел і дорожчі.

Матеріал PEI має температуру кристалізації 217 °C і практично не деформується в межах $-10...+50$ °C; це ідеальний матеріал з погляду довготривалої геометричної стабільності, хімічної і вогнестійкості. Але для друку PEI потрібні промислові принтери, і вартість матеріалу/друку дуже висока [39]. Тому PEI є варіантом лише для промислових потужностей і значного бюджету.

Отже, підсумкове рішення по вибору матеріалу: для наших не несучих корпусних/утримуючих деталей підвісу я рекомендую ASA, як найкращий баланс експлуатаційних властивостей, стабільності і можливості друку.

2.3. Моделювання статичних навантажень

Для несучих частин обрано алюмінієвий сплав 6061-T6 (АД31) як оптимальний компроміс між масою, міцністю, жорсткістю, технологічністю та вартістю. Сплав 6061-T6 має типовий модуль пружності 69 ГПа і межу текучості порядку 270–276 МПа при щільності близько 2,70 г/см³, що дає хороше відношення міцності до маси і дозволяє виготовляти тонкі, легкі несучі пластини, що знижує інерцію підвісу [28].

На рис. 2.4. наведено результати моделювання статичного навантаження в 20 кг на частини підвісу що тримають головну вісь.

На представлених картинках відображено статичну задачу, у якій нижня площа конструкції обмежена за рухом і на верхній ділянці, в області отвору для головної осі, застосовано вертикальне навантаження та прикладені похилі зусилля. Шкала кольорів на рисунках демонструє максимум поля близько $6,97 \cdot 10^5$ Па ($6,97 \cdot 10^5$ Н/м²), у той час як умовна величина межі текучості матеріалу, взята для порівняння в легенді, дорівнює $2,75 \cdot 10^8$ Па.

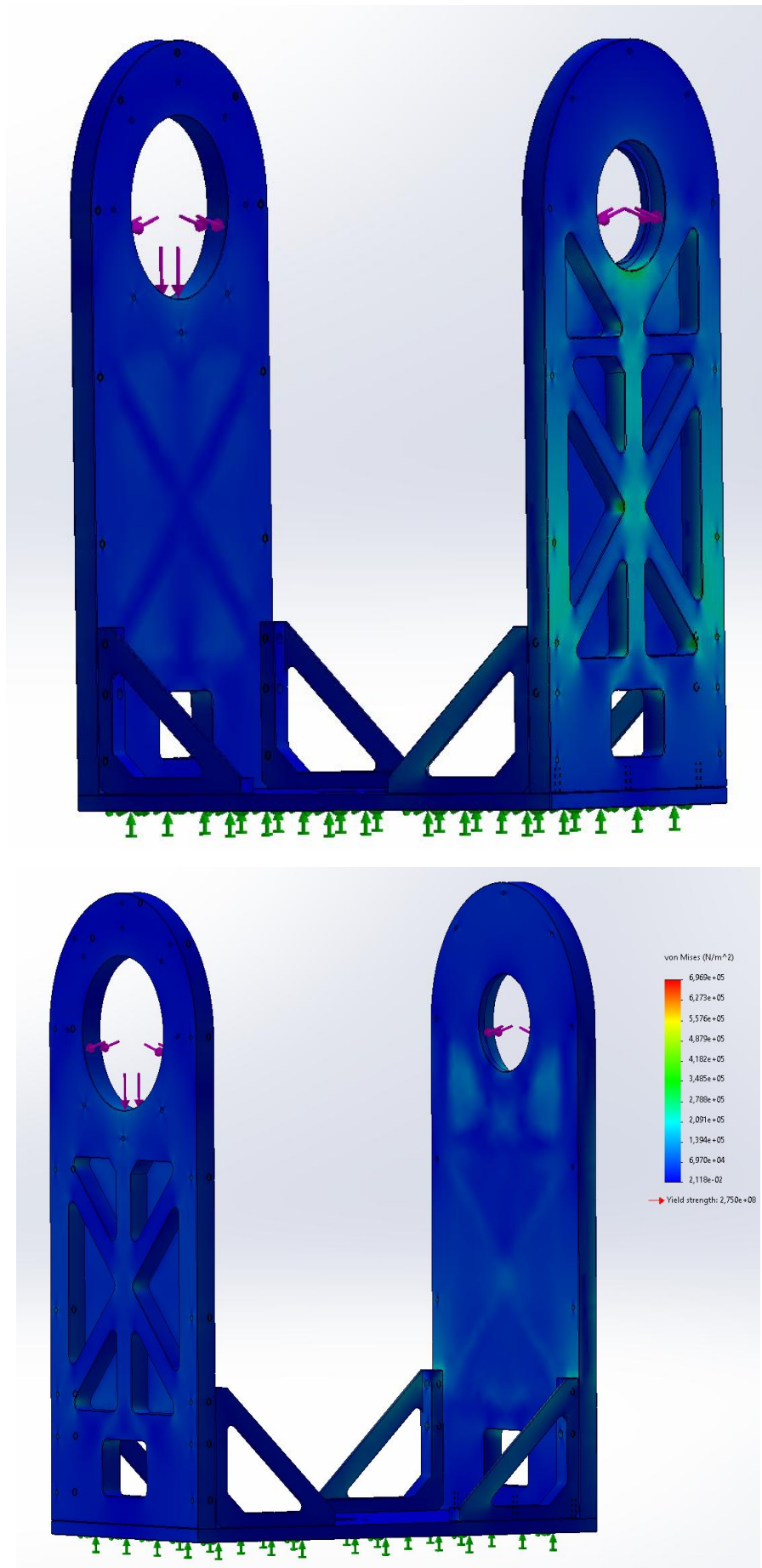


Рис 2.4. Результати моделювання статичного навантаження в 20 кг

Візуально поля напружень мають наступні характерні ознаки: більшість поверхні зайнята синіми відтінками, локальні підвищення зосереджені навколо отворів для осі, у зонах переходу товщин і біля стиків ребер підсилення. Ребра жорсткості з Х-подібним візерунком рівномірно перерозподіляють навантаження по площині, що явно видно у на схемі напружень у місцях перетину ребер, демонструють помірно підвищені значення, але без наближення до ділянки, де матеріал починає деформуватися постійно.

Використовуючи легенду симуляції, розрахунок коефіцієнта запасу стійкості [40] за простим наближенням дає:

$$FoS = \frac{\sigma_{yield}}{\sigma_{max}} = \frac{2,75 \cdot 10^8}{6,97 \cdot 10^5} \approx 395, \quad (2.1)$$

де FoS - коефіцієнт запасу стійкості; σ_{yield} - межі текучості матеріалу; σ_{max} - максимальне еквівалентне напруження.

Отримане значення FoS свідчить про величезний конструктивний запас міцності за умов статичного навантаження в заданому сценарії. Така величина (набагато перевищує типовий проектний запас 1,5–3) означає, що за припущених навантажень несучі плити працюють у вельми консервативному режимі коли значна частина матеріалу виявляється «некорисною» з точки зору міцності і може бути піддана масо- або топологічній оптимізації.

На рис. 2.5. наведено результати моделювання зміщення під статичним навантаженням в 20 кг на частини підвісу що тримають головну вісь.

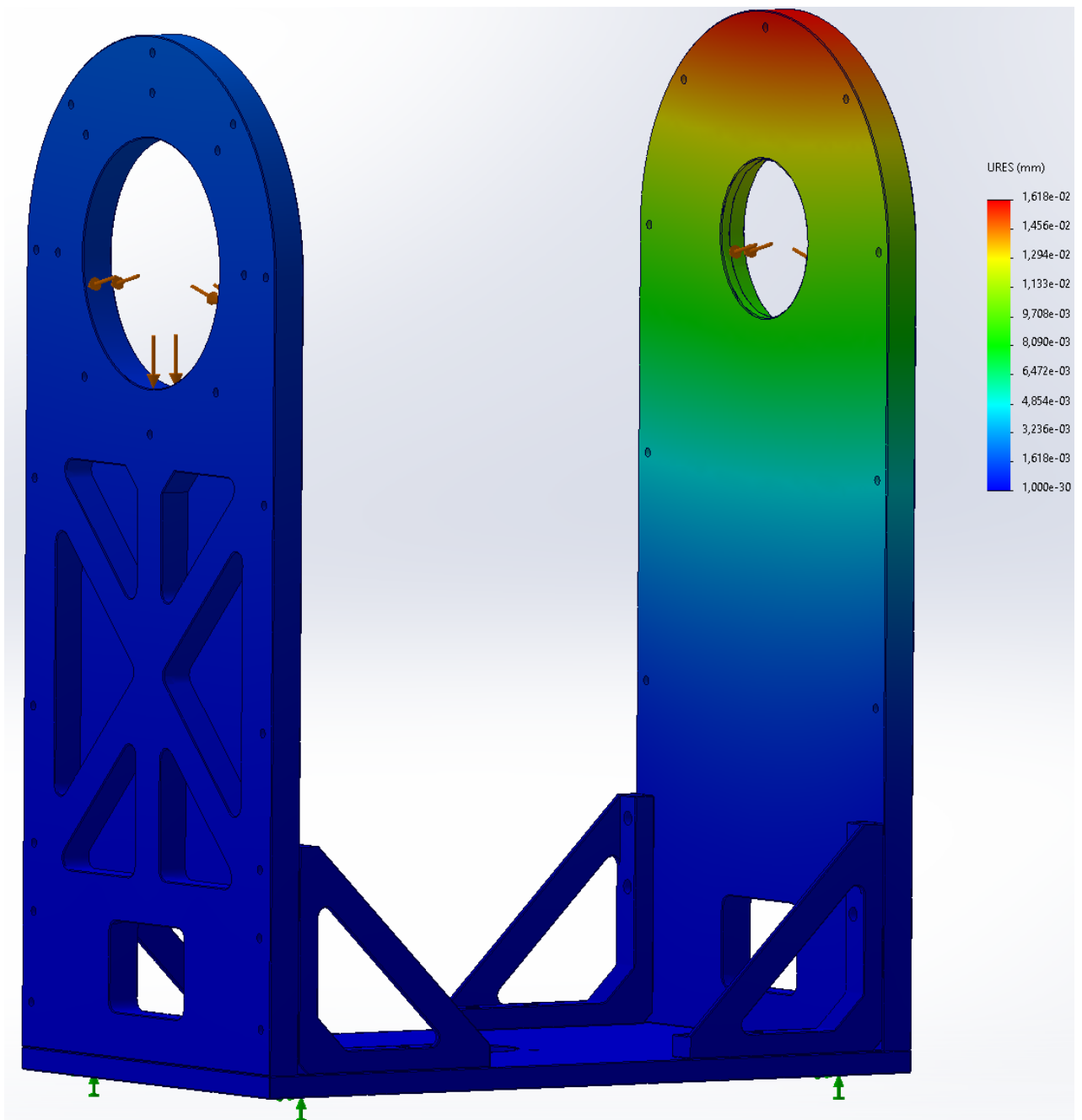


Рис 2.5. Результати моделювання зміщення під статичним навантаженням в 20

кг

На представленому полі розподілу, сумарних зміщень (URES, одиниці - мм) виконано лінійну статичну оцінку переміщень несучої пластини підвісу при тих самих граничних умовах і навантаженні, що й у розглянутій статичній симуляції напружень.. Шкала показує максимальне значення сумарного зміщення близько $1,618 \cdot 10^{-2}$ мм, локалізоване в зоні верхнього торця пластини навколо отвору під вісь (червона зона шкали).

Максимальне лінійне переміщення $U_{\max} \approx 0,0162$ мм є дуже малим в абсолютному виразі. Для оцінки впливу цього зміщення на точність наведення камери доцільно зіставити лінійне зрушення з відповідним кутовим відхиленням осі наведення. Відстань від центра обертання до точки вимірювання дорівнює $R = 100$ мм. Геометрична залежність між лінійним зміщенням Δx і еквівалентним кутовим відхиленням $\Delta\theta$ у наближенні малих кутів задається співвідношенням [41]:

$$\Delta\theta \approx \frac{\Delta x}{R} \approx \frac{0,0162}{100} \approx 0.000162 \text{ рад} = 0.00928^\circ \quad (2.2)$$

Отже, при розглянутому випадку статичного навантаження отримане зміщення відповідає дуже малим кутовим похибкам наведення (порядок десятих часток градуса), які зазвичай є прийнятними для оптико-електронних систем спостереження. Для порівняння: вимоги до точності наведення камер для багатьох цивільних спостережних систем лежать у межах десятків кутових хвилин або кутів порядку $0,1^\circ$; у задачах фотограмметрії та високоточних наводок ці вимоги жорсткіші, але і такі завдання передбачають спеціальні конструктивні рішення [14].

Проведене моделювання двох ключових показників для несучої металевої частини двовісного підвісу на основі алюмінієвих плит зі сплаву 6061-T6 (АД31) дозволяє зробити низку важливих висновків.

По-перше, розподіл напружень показав, що максимальні еквівалентні напруження у найбільш навантажених ділянках становлять лише частку від межі текучості матеріалу. Структура ребер та товщина плит забезпечують рівномірний розподіл напружень, відсутність різко виражених піків і локалізацію деформацій у прогнозованих зонах.

По-друге, аналіз сумарних зміщень показав, що при тих самих навантаженнях максимальне лінійне зміщення у верхній частині конструкції не перевищує $0,016$ мм. Це відповідає дуже малим кутовим відхиленням тобто значно менше, ніж типовий допустимий діапазон для цивільних стабілізованих

систем спостереження. Таким чином, підвіс зберігає геометричну стабільність навіть за навантажень, близьких до розрахункових граничних.

Поєднаний аналіз напружень та зміщень свідчить, що вибір матеріалу 6061-T6 (АДЗ1) для несучої частини підвісу є обґрунтованим з погляду співвідношення маси й жорсткості, низького коефіцієнта теплового розширення та високого ресурсу при циклічних навантаженнях. Конструктивна схема з посиленими ребрами та симетричною компоновкою отворів дозволяє утримувати деформації в межах, що забезпечують точність роботи оптико-електронного обладнання.

Таким чином, результати обох симуляцій підтверджують, що розроблена конструкція відповідає критеріям міцності й жорсткості для умов експлуатації у діапазоні температур -10°C до $+50^{\circ}\text{C}$, а також має значний потенціал для подальшої інтеграції у стабілізаційні системи без потреби у додаткових металевих підсиленнях.

2.4 Моделювання теплового розширення металу

Теплові деформації металевих елементів конструкції належить оцінювати вже на етапі проєктування, оскільки навіть помірні зміни температури можуть породжувати абсолютні зміщення десятих одиниць міліметра на довгих елементах [23]. Для оптико-електронних систем такі лінійні зміщення конвертуються у відповідні кутові помилки наведення і можуть суттєво перевищувати допустимі значення точності. На рис. 2.6. зображено результати моделювання зміщення при нагріванні конструкції до $+50^{\circ}\text{C}$.

Стандартна аналітична база для попередньої оцінки проста і полягає у тому, що лінійне теплове подовження розраховується за формулою $\Delta L = \alpha \cdot L_0 \cdot \Delta T$, а перехід лінійного зсуву у кутове відхилення - за наближенням малих кутів $\theta \approx s / R$ (s - лінійний зсув, R - відстань до оптичної точки). Ці формули використовуються як первинний контроль адекватності результатів скінченно-елементного аналізу і для формування суми похибок системи наведення [42, 43].

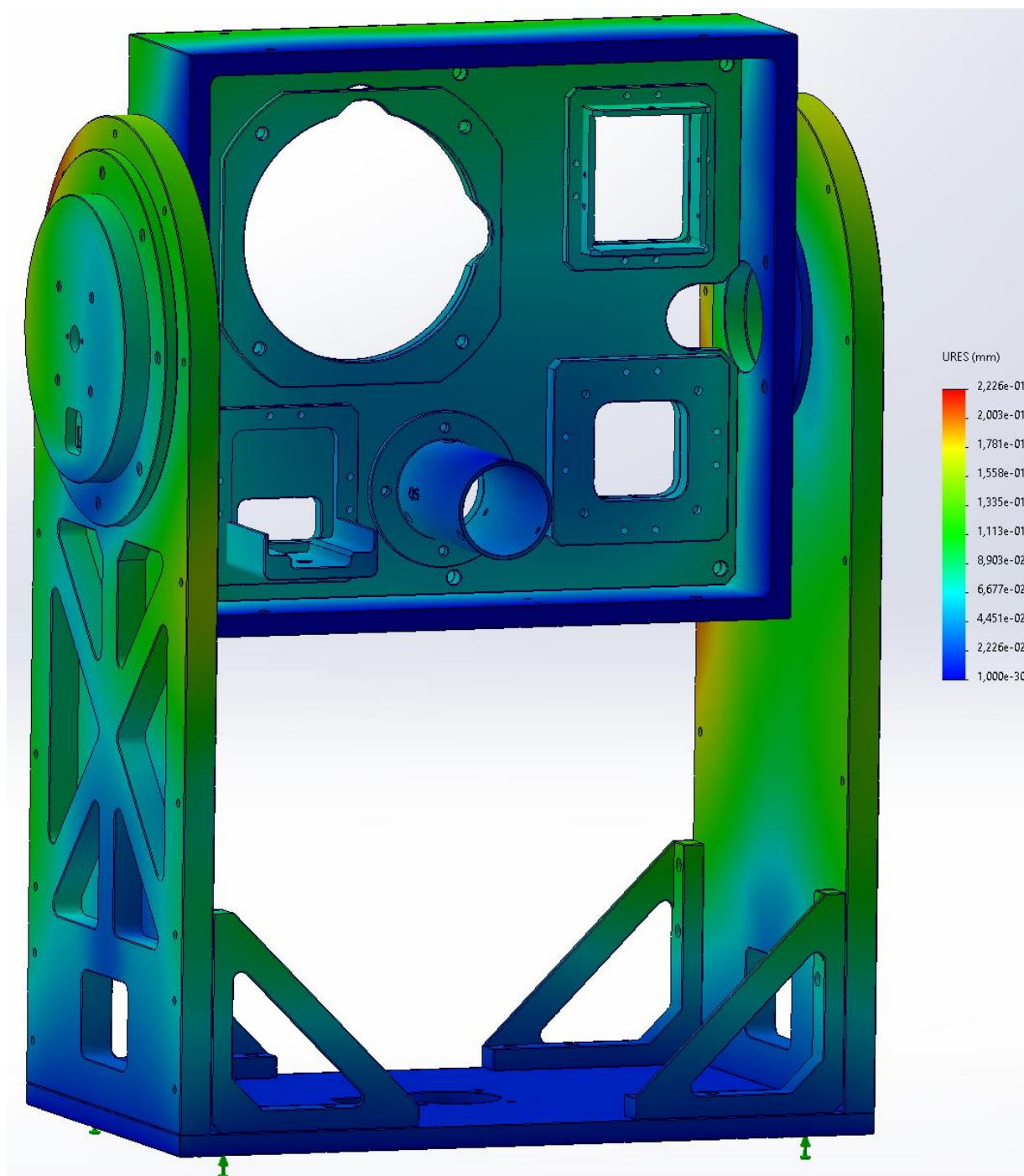


Рис 2.6. Результати моделювання зміщення при нагріванні конструкції до $+50^{\circ}\text{C}$ в застосунку SolidWorks

У SolidWorks Simulation виконано стаціонарну теплову задачу з подальшим статичним аналізом деформацій від температурного поля. Матеріал - алюмінієвий сплав 6061-T6 (АД31) з коефіцієнтом лінійного теплового

розширення $\alpha \approx 23,6 \cdot 10^{-6} \text{ 1/}^\circ\text{C}$ (дані довідників) і базова температура, від якої у SolidWorks Simulation обчислюється теплове розширення, дорівнює $+20 \text{ }^\circ\text{C}$. Робоча температура задана $+50 \text{ }^\circ\text{C}$, отже $\Delta T = 30 \text{ }^\circ\text{C}$. Модель зафіксована в зоні опор нижньої плити, температурне поле задано рівномірно на всі елементи. На карті сумарних зміщень (URES, мм) спостерігається максимальне значення $U_{\text{max}} \approx 0,223 \text{ мм}$ (за шкалою зображення), локалізоване у торцевих/монтажних ділянках верхньої частини корпусу.

Для перевірки узгодженості результатів скінченно-елементного аналізу скористаємося класичною формулою [41]:

$$\Delta L = \alpha L \Delta T, \quad (2.3)$$

де: ΔL - зміна довжини (подовження або скорочення) елемента внаслідок нагрівання або охолодження, м або мм (результат теплового розширення); α - коефіцієнт лінійного теплового розширення матеріалу, $1/^\circ\text{C}$, який показує, на яку частку змінюється довжина матеріалу при зміні температури на $1 \text{ }^\circ\text{C}$; L_0 - початкова довжина елемента при температурі відліку; ΔT - зміна температури [42].

Підставимо $\alpha \approx 23,6 \cdot 10^{-6} \text{ 1/}^\circ\text{C}$, $\Delta T = 30,^\circ\text{C}$ і виведемо характерну довжину L_0 , яка б відповідала спостережуваному $\Delta L \approx 0,223 \text{ мм}$:

$$L \approx \frac{\Delta L}{\alpha \Delta T} = \frac{0,223}{23,6 \cdot 10^{-6} \cdot 30} \approx 314 \text{ мм}. \quad (2.4)$$

Якщо прийняти орієнтовну геометричну довжину у моделі (від опори до зони максимального зсуву) $300\text{--}350 \text{ мм}$, аналітичний результат логічно узгоджується з результатом скінченно-елементного аналізу. Альтернативне пряме обчислення дає для $L = 345 \text{ мм}$:

$$\Delta L = 23,6 \cdot 10^{-6} \cdot 345 \cdot 30 \approx 0,244 \text{ мм}, \quad (2.5)$$

що відрізняється від зчитаного з карти 0,223 мм менш ніж на 10 %. Така близькість свідчить про коректність налаштувань матеріалу і граничних умов у моделі, оскільки деформація в основному обумовлена глобальним лінійним розширенням довгих елементів і прямо пропорційна $L \cdot \Delta T$ [43].

Для переходу від лінійного зсуву до кутового відхилення використовуємо наближення малих кутів, що відповідає формулі (2.2):

$$\begin{aligned} R = 25 \text{ мм: } \Delta\theta &\approx 0,244/25 = 9,76 \cdot 10^{-3} \text{ рад} \approx 0,56^\circ \\ R = 50 \text{ мм: } \Delta\theta &\approx 0,244/50 = 4,88 \cdot 10^{-3} \text{ рад} \approx 0,28^\circ \\ R = 100 \text{ мм: } \Delta\theta &\approx 0,244/100 = 2,44 \cdot 10^{-3} \text{ рад} \approx 0,14^\circ \end{aligned} \quad (2.6)$$

Отже, при $\Delta T = 30 \text{ }^\circ\text{C}$ теплове зміщення приблизно 0,22–0,24 мм трансформується у десятки дугових хвилин (arcmin) або частки градуса залежно від відстані R . Для систем із жорсткими вимогами на наведення (наприклад $<0,1^\circ$) такі значення можуть вже виявитися критичними.

Результати скінченно-елементного аналізу теплового розширення при $T = 50 \text{ }^\circ\text{C}$, аналітично узгоджується з класичною формулою лінійного подовження. Для звичайних геометричних розмірів це призводить до кутових похибок наведення, що можуть становити частки градуса - значення, які необхідно зіставити з технічними вимогами системи. Отже, поряд з механічним проектуванням необхідно включити в проектну документацію оцінку теплових похибок, їхню верифікацію і, за потреби, реалізацію компенсуючих заходів, такий як: матеріальні вставки, конструктивні зміни або програмні поправки.

2.5 Фінальний результат і габаритні розміри

Після проведення аналізу вимог до конструкції, вибору матеріалів, параметричного моделювання ключових вузлів та багатостадійної перевірки міцності, жорсткості та теплової стабільності, було сформовано фінальний

варіант просторової моделі двовісного стабілізованого підвісу, що зображений на рис.2.7. Оптимізація геометрії виконувалася з урахуванням умов реальної експлуатації, можливостей сучасних технологій виготовлення та мінімізації маси при забезпеченні необхідного запасу міцності. Особлива увага приділялася компоновці несучих елементів та раціональному розташуванню приводів з метою досягнення збалансованості системи і зменшення навантаження на виконавчі механізми.

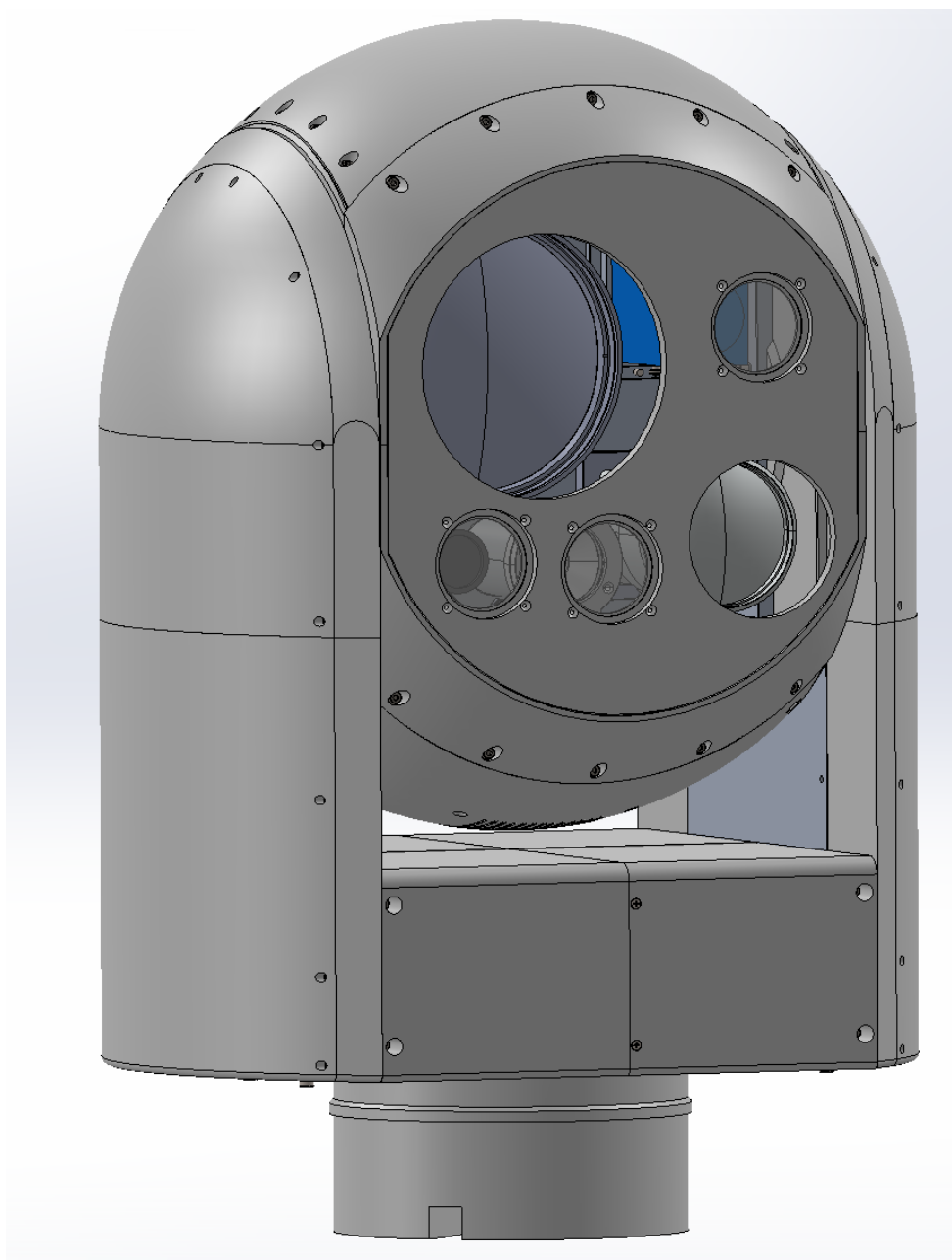


Рис. 2.7. Повна модель двовісного підвісу в застосунку SolidWorks

Сформована тривимірна модель відображає остаточне компоувальне рішення системи стабілізації і містить усі конструктивні елементи, необхідні для інтеграції оптичного обладнання, інерціальних датчиків та приводів керування.

На рис. 2.8 модель двовісного підвісу з габаритними розмірами, що характеризують компактність, ергономіку та монтажну сумісність конструкції з мобільною роботизованою платформою.

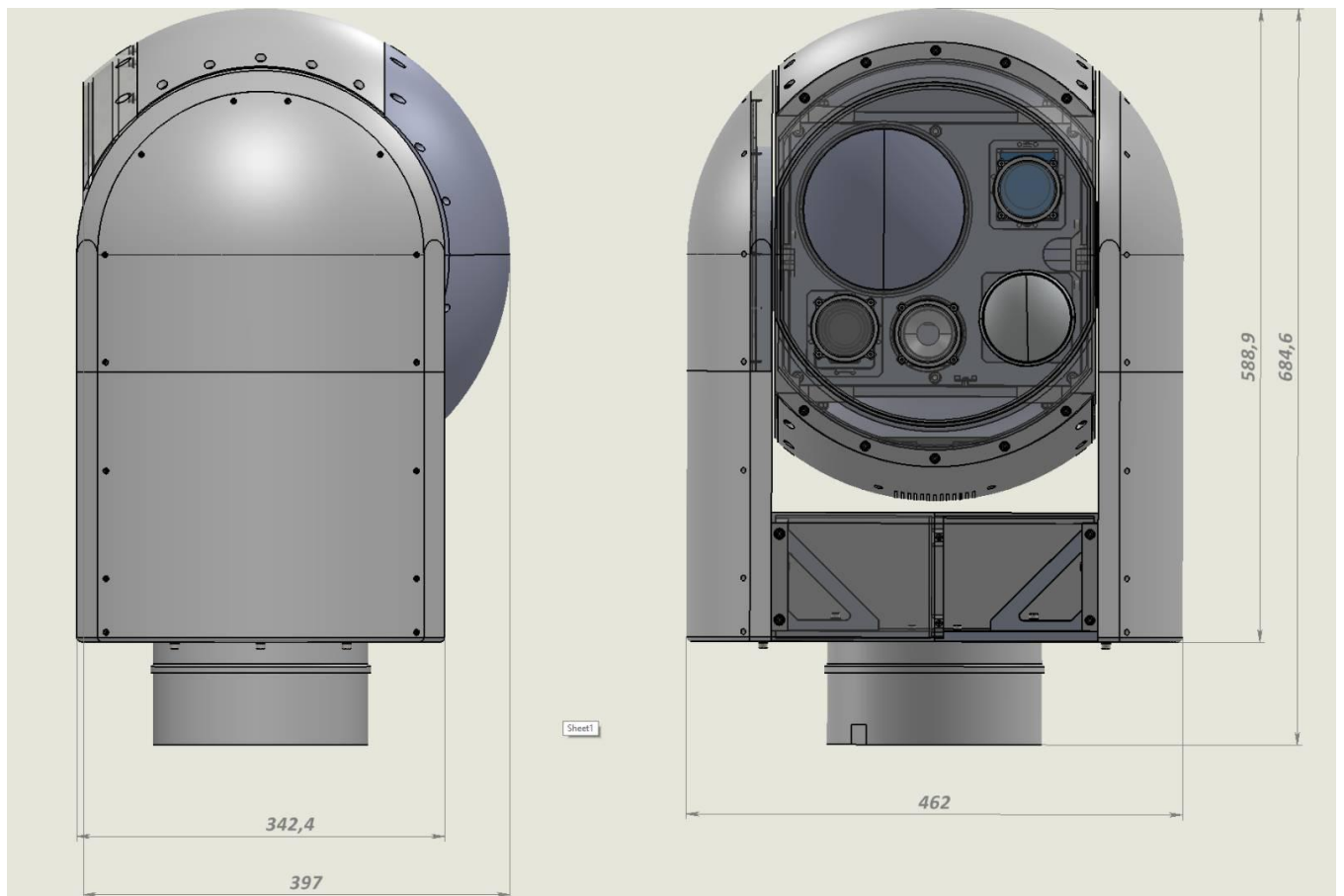


Рис. 2.8. Габаритні розміри розробленого підвісу

Висновки до розділу 2

У другому розділі було проведено розроблення та аналіз CAD-моделі двовісного підвісу підвісу в середовищі SolidWorks. У цьому розділі виконано підбір матеріалів для несучих та допоміжних елементів, а також проведено порівняльний аналіз алюмінієвих сплавів і пластиків, що застосовуються для

виготовлення деталей підвісу. У результаті аналізу визначено, що оптимальним матеріалом для несучої частини є алюмінієвий сплав 6061-T6 (АДЗ1), який забезпечує високу жорсткість при низькій масі та достатню стабільність розмірів у діапазоні температур експлуатації.

Проведено симуляції статичних механічних навантажень, зміщень та теплового розширення у SolidWorks Simulation. За результатами механічного аналізу встановлено, що максимальні напруження у несучій конструкції суттєво нижчі за межу текучості матеріалу, що гарантує високий коефіцієнт запасу міцності та надійну роботу конструкції під статичними навантаженнями. Симуляції теплового розширення для температур 50 °C показали передбачуване збільшення зміщень при зростанні температури, проте отримані величини залишаються у допустимих межах для забезпечення точності позиціонування оптичних вузлів.

Виконано аналіз перетворення лінійних зміщень у кутові похибки наведення. Результати підтвердили, що при зростанні відстані від опорної точки кутова похибка зменшується, що є важливим для конструкторських рішень з розташування сенсорних вузлів.

Отже, у розділі підтверджено працездатність обраної конструкції двовісного підвісу, обґрунтовано вибір матеріалів для його несучих і пластикових частин, а також виявлено ключові фактори, які впливають на точність і стабільність роботи підвісу під дією механічних та теплових навантажень. Отримані результати створюють основу для подальшого вдосконалення конструкції, налаштування системи компенсації похибок і переходу до етапу виготовлення та випробувань.

РОЗДІЛ 3

МОДЕЛЮВАННЯ ТА ДОСЛІДЖЕННЯ СИСТЕМИ СТАБІЛІЗАЦІЇ ДВОВІСНОГО ПІДВІСУ

3.1. Підбір електродвигунів при моделюванні підвісів

Підбір електричного приводу для осей двовісного підвісу є одним із найважливіших інженерних рішень при розробці, оскільки від властивостей обраного мотора безпосередньо залежать як кінцеві характеристики стабілізації, так і архітектура системи керування та конструктивні обмеження всієї установки. Правильно підібраний мотор визначає робочу смугу частот системи, яка є смугою пропускання регулятора, що у свою чергу визначає здатність підвісу швидко і точно компенсувати зовнішні збурення платформи. Навпаки, мотор з невідповідною електромеханічною або електричною сталою часу може бути чинником, який обмежує загальну ефективність системи, суттєво знизити запас стійкості по фазі й амплітуді і ускладнює синтез стійкого ПІД-регулятора. У практичному плані це означає, що вибір мотора впливає не лише на максимальний доступний крутний момент, але й на якість наведення при малих командах, на величину перехідних процесів, на апріорну потребу у компенсуючих алгоритмах та на необхідність апаратних заходів шумоподавлення й демпфування.

Критична роль мотора проявляється також у взаємодії з механічною частиною підвісу: момент інерції ротора співіснує із сумарною інерцією платформи і оптико-електронного навантаження, і від їхнього співвідношення залежать швидкість розгону та стабільність позиціонування [17]. Якщо інерція мотора занадто мала відносно навантаження, привід може не забезпечувати необхідної жорсткості й виникатимуть помітні кутові відхилення. Якщо інерція занадто велика, системі знадобляться потужніші апарати й контролер з іншим налаштуванням, що впливає на енергоспоживання й габарити. Тому підбір

мотора слід розглядати у контексті сумарного «інерційного балансу» системи: оптимальний вибір мінімізує негативний вплив на динаміку при збереженні прийняттого моменту та стабільності.

Точність наведення підвісу залежить не лише від величини крутного моменту, а й від таких суттєвих характеристик, як крокова пульсація моменту, гладкість відгуку при малих струмах і наявність зони нечутливості в приводі та механічних вузлах [18]. Нелінійні ефекти, зокрема сухе тертя в підшипниках і зона нечутливості (“dead-zone”) у силовому каскаді, генерують постійні або перемінні похибки при низьких командах, що для оптичних систем з жорсткими вимогами по точності є значним недоліком. Саме тому важливість підбору мотора полягає у забезпеченні мінімізації цих нелінійностей апаратом на етапі проектування, а не їх компенсації виключно алгоритмічно. Апаратна якість приводу зменшує складність програмної частини, знижує енергетичні втрати і підвищує надійність [18].

3.2. Підбір двигунів для двовісного підвісу

Для аналізу були обрані двигуни зображені на рис. 3.1.

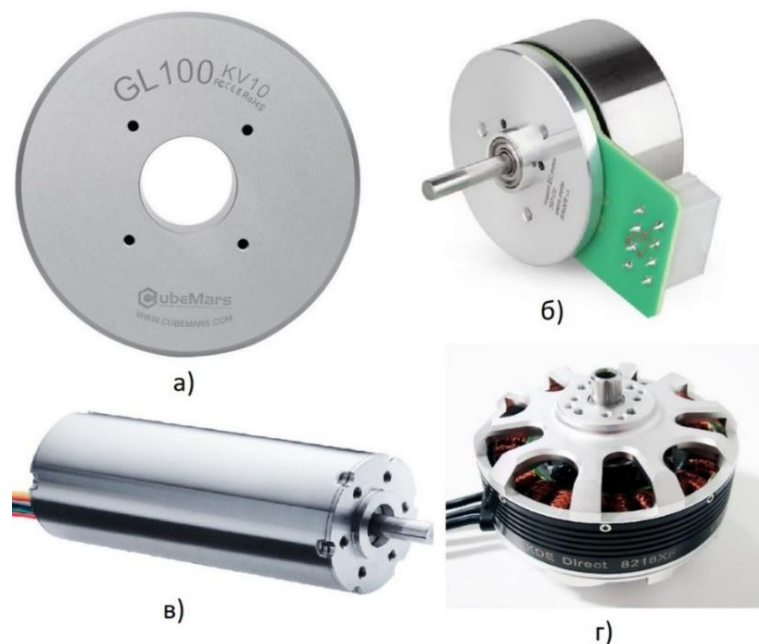


Рис.3.1. Електродвигуни а) T-Motor GL100 KV10 [44] ;б) Maxon EC45 flat [45];в) Faulhaber 3274 [46];г) KDE8218XF-120 [47]

Для знаходження електромеханічної постійної часу використаємо формулу з [48]:

$$\tau_m = \frac{RJ}{K_t^2}, \quad (3.1)$$

де τ_m - електромеханічна (механічна) постійна часу, с; R - активний опір обмоток, Ом; J - приведений момент інерції ротора разом із навантаженням, кг·м²; K_t - постійна крутного моменту двигуна, Н·м/А.

Для знаходження електричної постійної часу використаємо формулу з [49]:

$$\tau_e = \frac{L}{R}, \quad (3.2)$$

де τ_e - електрична постійна часу, с; L - індуктивність фази або міжфазна індуктивність обмоток двигуна, Гн; R - активний опір обмоток фази або міжфазний опір, Ом.

Для забезпечення коректного вибору електроприводів для двовісного підвісу було проведено порівняльний аналіз низки двигунів, що відрізняються конструктивними та електромагнітними параметрами (табл. 3.1). Основну увагу приділено характеристикам, які безпосередньо впливають на динамічні властивості стабілізатора, зокрема: постійній крутного моменту, моменту інерції ротора, електричній та електромеханічній сталим часу, опору та індуктивності обмоток [45-47].

Значення електромеханічної постійної часу і електричної постійної часу були обчислені за допомогою формул (3.1) та (3.2).

Двигун T-Motor GL100 KV10 має явні переваги у вигляді великої постійної крутного моменту, що дає високу жорсткість приводу і можливість безредукторної роботи з навантаженнями приблизно 0,5 кг, причому постійна крутного моменту становить близько 1,03 Н·м/А і дозволяє отримувати номінальний крутний момент 3,0 Н·м при відносно помірних струмах.

Перевагами є мала електрична постійна часу близько 0,000887 с і невелика електромеханічна постійна часу у разі приведеної інерції, що знижує фазові затримки в системі управління. Ці якості полегшують синтез стабільного ПД-регулятора і підвищують стійкість до короточасних збурень [49]. Недоліком цього мотора є його маса і габарити, що при обмеженому просторі підвісу можуть вимагати додаткових конструктивних рішень, а також порівняно високий опір обмоток, що впливає на тепловий режим при тривалій інтенсивній роботі [44].

Таблиця 3.1. Порівняльна таблиця обраних двигунів

Характеристика	T-Motor GL100 KV10 [44]	Maxon EC45 Flat [45]	Faulhaber 3274 (24 В) [46]	KDE8218XF- 120 [47]
Kv, об/хв·В	130	285	340	120
Постійна крутного моменту, Н·м/А	1,03	0,0335	0,0281	0,0796
Опір фаза-фаза, Ом	2,65	0,978	0,253	0,042
Індуктивність фаза-фаза, Гн	$2,35 \times 10^{-3}$	$0,573 \times 10^{-3}$	$64,2 \times 10^{-6}$	200×10^{-6}
Момент інерції ротора, кг·м ²	$2,31 \times 10^{-4}$	$1,35 \times 10^{-5}$	$4,8 \times 10^{-6}$	$3,26 \times 10^{-4}$
Електрична стала часу, с	$8,87 \times 10^{-4}$	$5,86 \times 10^{-4}$	$2,54 \times 10^{-4}$	$5,26 \times 10^{-3}$
Електромеханічна стала часу, с	$5,77 \times 10^{-4}$	$1,18 \times 10^{-2}$	$1,54 \times 10^{-3}$	$2,16 \times 10^{-3}$

Двигун Maxon EC45 flat характеризується високою якістю виготовлення і низькою індуктивністю обмоток, що забезпечує дуже швидко електричну реакцію з електричною постійною часу приблизно 0,000586 с. В поєднанні з невеликою роторною інерцією це робить його прийнятним для точних приводів

з малими навантаженнями. Водночас мала постійна крутного моменту близько $0,0335 \text{ Н}\cdot\text{м}/\text{А}$ у поєднанні з великою приведеною інерцією навантаження призводить до великої електромеханічної постійної часу приблизно $1,1006 \text{ с}$, що робить цей мотор непридатним для безредукторної стабілізації важкої оптики без застосування редуктора або значного підсилення струмового каскаду. Додатково висока вартість і необхідність спеціалізованої електроніки для досягнення повної продуктивності можуть ускладнити інтеграцію в компактні рішення [45].

Двигун Faulhaber серії 3274 характеризується дуже малою індуктивністю обмоток, що дає малу електричну постійну часу близько $0,000254 \text{ с}$ і прийнятну керованість при малих навантаженнях; цей мотор підходить для прецизійних задач з малою масою оптики або у комбінації з редуктором. Однак його мала постійна крутного моменту приблизно $0,0281 \text{ Н}\cdot\text{м}/\text{А}$ у поєднанні з реальною приведеною інерцією призводить до значної електромеханічної постійної часу близько $0,40197 \text{ с}$, через що без додаткової передачі руху він поступається у швидкодії потужнішим моторам підвісу. До недоліків також слід віднести обмежену можливість працювати з великими моментами без нагріву чи перенавантаження та необхідність ретельного підбору редуктора при бажанні зберегти компактність [46].

Двигун KDE8218XF-120 позиціонується як потужний промисловий мотор з невеликим опором обмоток $0,038 \text{ Ом}$ і помірною постійною крутного моменту близько $0,0796 \text{ Н}\cdot\text{м}/\text{А}$, що у підсумку дає відносно невелику електромеханічну постійну часу порядку $0,00945 \text{ с}$ при заданій приведеній інерції і забезпечує добру динаміку без редуктора. Недоліком цього мотора є більша електрична постійна часу, що становить приблизно $0,00526 \text{ с}$ і накладає вимогу на застосування швидкого та якісного струмового контролера для досягнення оптимальної реакції. [47].

Підсумовуючи, переваги T-Motor GL100 KV10 полягають у високій постійній крутного моменту і найкращій електромеханічній динаміці серед розглянутих варіантів що робить його прийнятним для безредукторної інтеграції

з оптикою близько 0,5 кг, його ми і будемо використовувати у наступних дослідженнях. Двигуни Maxon EC45 flat і Faulhaber 3274 мають переваги в електричній швидкодії та прецизійності, але вимагатимуть передачі або іншої системи підсилення моменту при значному навантаженні; KDE8218XF-120 забезпечує компроміс між моментом і динамікою при умові якісного струмового контролера.

3.3 Математична модель підвісу

Для побудови адекватної математичної моделі системи стабілізації двовісного підвісу необхідно врахувати просторову кінематику та динаміку взаємопов'язаних рамок, а також вплив збурень, що виникають під час руху носія. Конструктивно розглянутий підвіс має типову карданну структуру з двома ступенями свободи, що забезпечують компенсацію кутових збурень корпусу платформи шляхом незалежного керування азимутальною та тангажною осями. Для формалізації взаємодії механічних елементів системи доцільно визначити систему координат для кожної рамки, ввести узагальнені координати у вигляді кутів повороту та описати їх еволюцію через кутові швидкості та прискорення.

Подібний підхід детально розглянуто у науковій роботі [50], присвяченій математичному моделюванню підвісу на основі тривимірної кінематики та динаміки руху рамок, де побудовано рівняння руху системи з урахуванням гіроскопічних та коріолісових членів, моментів інерції та зовнішніх збурень. Використовуючи методологічні положення зазначеного дослідження, у даній роботі адаптовано відповідні підходи для конкретної конструкції двовісного підвісу, розробленого у другому розділі.

На рис. 3.2 представлено кінематичну схему двовісного карданного підвісу, який використовується для стабілізації та наведення оптико-електронної системи. Приводи на осях зовнішньої та внутрішньої рамок, що відповідно позначені як ВДВР (виконавчий двигун внутрішньої рамки) та ВДЗР (виконавчий двигун зовнішньої рамки), виконують функції керування

обертанням конструкції. Внутрішня рамка містить камеру та сенсорний модуль, що формують стабілізовану платформу. На схемі також показано напрямок оптичної осі системи спостереження.

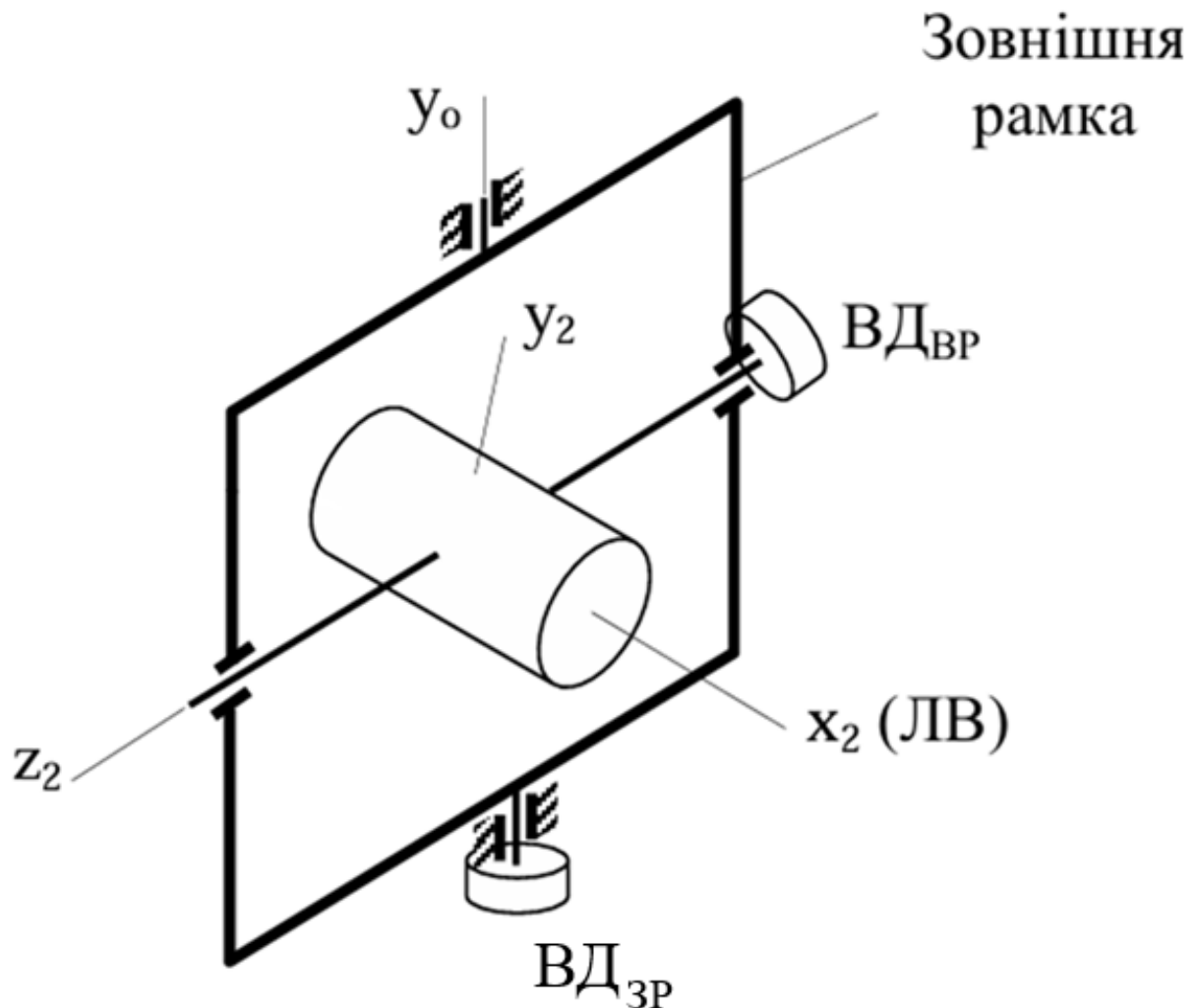


Рис. 3.2. Кінематична схема двовісного підвісу [50]

Для опису просторового положення елементів підвісу введемо систему координат. Основна система координат Oy_0z_0 жорстко пов'язана з корпусом носія. Систему Oy_1z_1 пов'яжемо із зовнішньою рамкою підвісу, а систему $Ox_2y_2z_2$ із внутрішньою рамкою підвісу з встановленою оптичною апаратурою. Кутові переміщення рамок позначаються через φ_y та φ_z відповідно до рис. 3.3, там же показані компоненти абсолютної кутової швидкості носія у відповідних координатних осях $\Omega_{x_0}, \Omega_{y_0}, \Omega_{z_0}$.

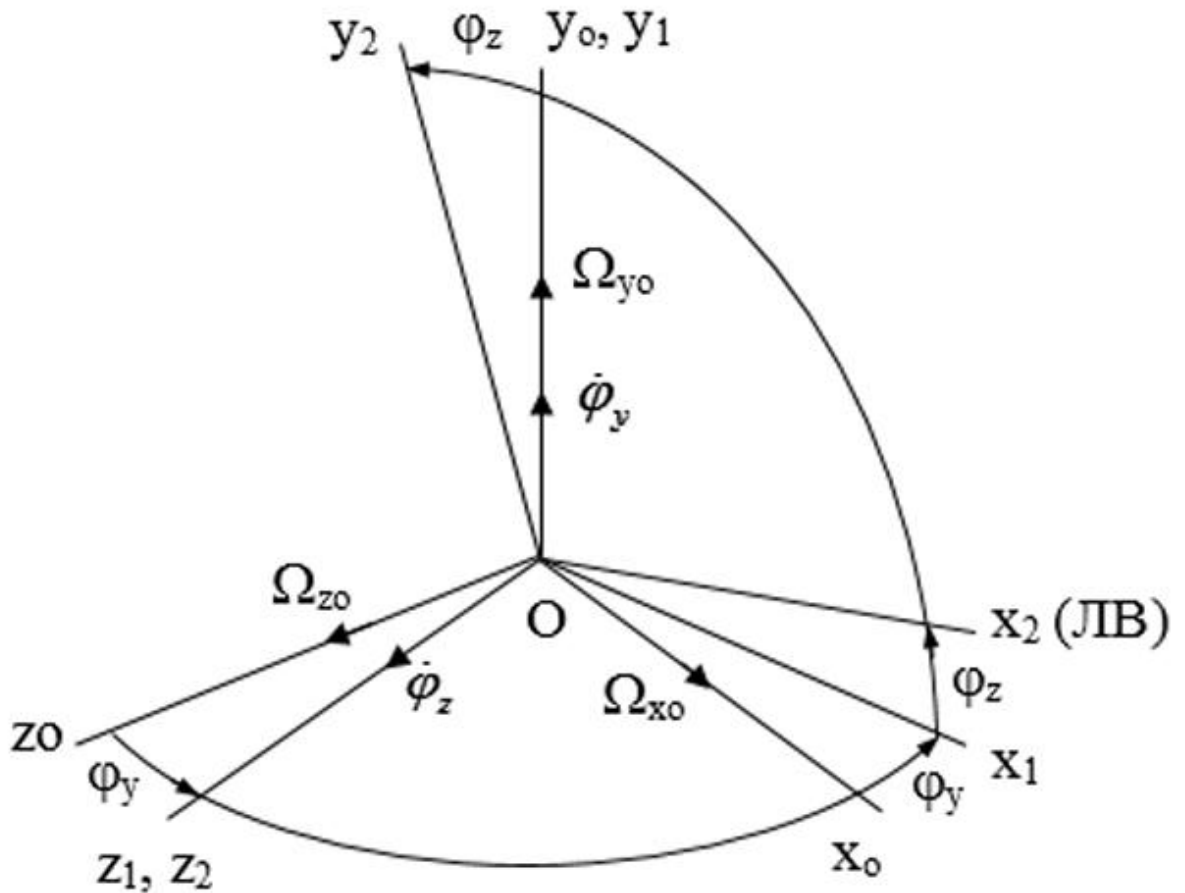


Рис. 3.3. Кінематика кутів повороту рамок підвісу [50]

Для подальшого опису введемо систему координат $Oxyz$, відносно якої внутрішня рамка підвісу розглядається як стабілізована платформа, яка зображена на рис. 3.4 [50]. Лінія візування позначається як ЛВ, а лінія горизонту - як ЛЦ. Кутів відхилення $\Delta\alpha$ та $\Delta\beta$ описують реальний просторовий стан платформи в цій системі координат, що фактично характеризує залишкові помилки стабілізації [50].

На рис. 3.4 схематично подано можливі положення внутрішньої рамки підвісу відносно стабілізованої системи відліку. Параметри $\Delta\alpha, \Delta\beta$ ілюструють відхилення платформи від ідеального положення внаслідок впливу зовнішніх динамічних чинників та похибок регулювання.

Функціонування системи визначається режимом роботи стабілізаційного контуру [50]:

- при активному режимі стабілізації система координат $Oxuz$, яку необхідно стабілізувати, математично вважається нерухомою в інерціальному просторі;
- у режимі супроводження цілі стабілізована система координат $Oxuz$ повертається відповідно до зміни напрямку на об'єкт спостереження;
- у разі використання зовнішнього джерела навігаційної інформації система $Oxuz$ узгоджується з системою $Ox_0y_0z_0$, жорстко закріпленою на платформі-носії.

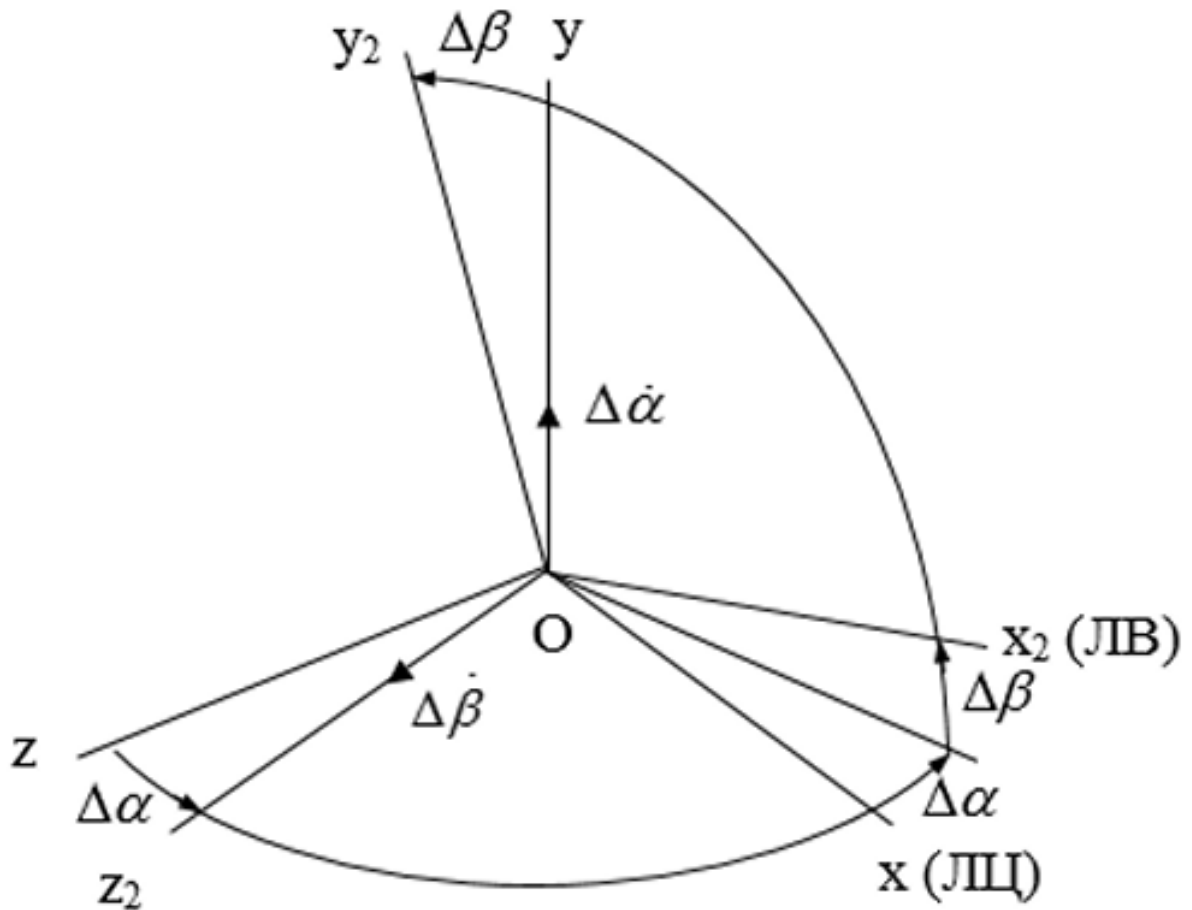


Рис. 3.4. Положення внутрішньої платформи щодо системи координат яка стабілізується [50]

У роботі [50], підставивши співвідношення, вирази для тертя та моменти дебалансу у диференціальні рівняння руху системи, було одержано розгорнуту

систему рівнянь, що описує динаміку внутрішньої рамки. У повному вигляді ці рівняння містять члени з другими похідними по часу кутів, коріолісові і гіроскопічні складові, взаємодійні (перехресні) члени, а також внески від демпфування й зовнішніх моментів. У записаному авторами [50] вигляді, вони набувають наступної форми:

$$\begin{aligned}
 & (J_{1y} + J_{2x} \sin^2 \varphi_z + J_{2y} \cos^2 \varphi_z) \dot{\omega}_{2y2} / \cos \varphi_z + f_1 \omega_{2y2} / \cos \varphi_z = \\
 & = M_{\delta\epsilon 1} - (J_{1y} + J_{2x}) \operatorname{tg} \varphi_z \dot{\omega}_{1x1} - (J_{1x} - J_{1z}) \omega_{1x1} \omega_{1z1} - \\
 & - (J_{2x} \omega_{2x2} \cos \varphi_z + J_{2y} \omega_{2y2} \sin \varphi_z + J_{2z} \omega_{1x1}) \omega_{2z2} - \\
 & - f_1 (\omega_{1x1} \operatorname{tg} \varphi_z - \Omega_{y0}) + M_{mp.c1} + M_{\delta\epsilon\delta 1} + M_{\text{возм}1}; \\
 & J_{2z} \dot{\omega}_{2z2} + f_2 \omega_{2z2} = M_{\delta\epsilon 2} + (J_{2x} - J_{2y}) \omega_{2x2} \omega_{2y2} + \\
 & + f_2 \omega_{1z1} + M_{mp.c2} + M_{\delta\epsilon\delta 2} + M_{\text{возм}2}
 \end{aligned} \tag{3.3}$$

Наведені рівняння є основними, оскільки вони описують обертальний рух внутрішньої рамки відносно абсолютних кутових швидкостей ω_{2y2} і ω_{2z2} .

Також можна подати рівняння руху системи стабілізації у вигляді залежностей між відносними кутовими швидкостями рамок $\dot{\varphi}_y$ та $\dot{\varphi}_z$:

$$\begin{aligned}
 & (J_{1y} + J_{2x} \sin^2 \varphi_z + J_{2y} \cos^2 \varphi_z) \ddot{\varphi}_y + f_1 \dot{\varphi}_y = M_{\text{дв}1} - (J_{1y} + J_{2x} \sin^2 \varphi_z + \\
 & + J_{2y} \cos^2 \varphi_z) \dot{\Omega}_{oy} + \frac{1}{2} (J_{2y} - J_{2x}) [\dot{\omega}_{1x1} \sin 2\varphi_z + \omega_{1x1} \dot{\varphi}_z \cos 2\varphi_z + \\
 & + \omega_{1y1} (\omega_{1z1} + 2\dot{\varphi}_z) \sin 2\varphi_z] + J_{2z} \omega_{1x1} \dot{\varphi}_z - (J_{1x} - J_{1z} - J_{2z} + J_{2x} \cos^2 \varphi_z + \\
 & + J_{2y} \sin^2 \varphi_z) \omega_{1x1} \omega_{1z1} + M_{\text{тр.c}1} + M_{\text{деб}1} + M_{\text{возм}1}; \\
 & J_{2z} \ddot{\varphi}_z + f_2 \dot{\varphi}_z = M_{\text{дв}2} - J_{2z} \dot{\omega}_{1z1} + \frac{1}{2} (J_{2x} - J_{2y}) [(\omega_{1y1}^2 - \omega_{1x1}^2) \sin 2\varphi_z + \\
 & + \omega_{1x1} \omega_{1y1} \cos 2\varphi_z] + M_{\text{тр.c}2} + M_{\text{деб}2} + M_{\text{возм}2}.
 \end{aligned} \tag{3.4}$$

Отримана математична модель двовісного карданного підвісу створює теоретичну основу для подальшої реалізації системи стабілізації та керування в середовищі моделювання. Вона дозволяє описати взаємодію між динамічними

характеристиками елементів підвісу, включно з моментами інерції рамок, впливом зовнішніх моментів, силами тертя та дією регулюючих моментів виконавчих двигунів. Побудовані рівняння відображають характер обертального руху внутрішньої і зовнішньої рамок, а також забезпечують можливість аналізу процесів стабілізації та компенсації збурень. Такий підхід дає змогу перейти від теоретичного опису до побудови практичної моделі, яка відтворює роботу системи стабілізації в умовах реальних динамічних впливів і дозволяє дослідити ефективність керування кутовим положенням підвісу.

3.4 Структурна схема стабілізації двохосьового підвісу на мобільній платформі

Розглянемо функціональну схему стабілізації двовісного підвісу з збуренням від руху мобільної платформи, наведену в роботі [51], яка зображена на рис. 3.5.

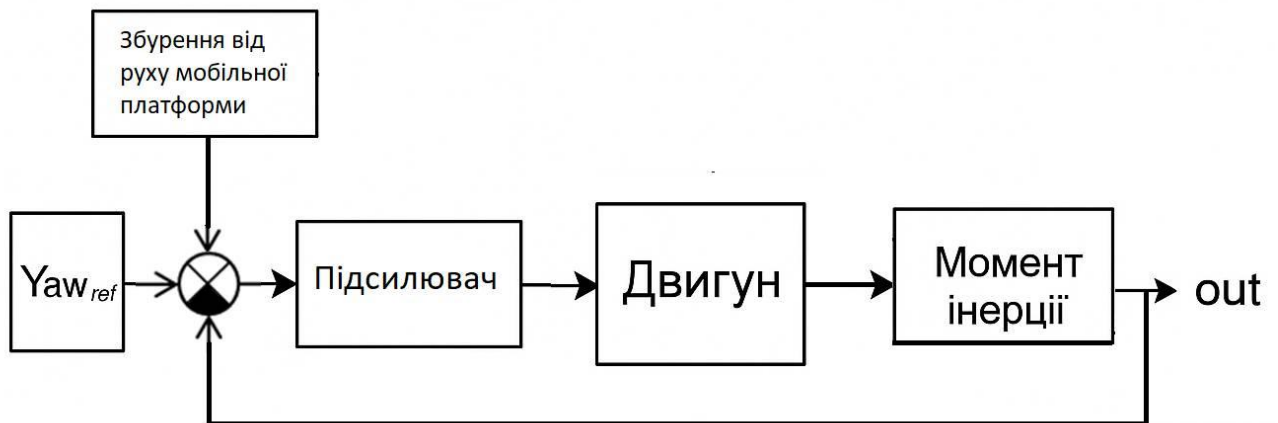


Рис. 3.5. Функціональна схема стабілізації двохосьового підвісу

Лінійний підсилювач моделюється як чистий коефіцієнт:

$$W_{\Pi}(s) = Ka. \quad (3.5)$$

Як модель двигуна постійного струму використовується аперіодична ланка:

$$W_{\text{дв}}(s) = \frac{K_{\text{дв}}}{T_{\text{дв}}s+1}, \quad (3.6)$$

де $K_{\text{дв}}$ - коефіцієнт підсилення, $T_{\text{дв}}$ - стала часу мотора.

Передатна функція механічної ланки інерції з демпфуванням. Механічна ланка з інерцією J_L і в'язким демпфером B підпорядковується рівнянню $J_L \ddot{\theta} + B \dot{\theta} = M$, де M - вхідний крутний момент, θ - кут повороту. Перейшовши в простір Лапласа, отримуємо $J_L s^2 \Theta(s) + B s \Theta(s) = M(s)$. Звідси передатна функція описується виразом [51]:

$$W_{\text{ін}}(s) = \frac{\theta_{\text{ін}}(s)}{M(s)} = \frac{1}{J_L s^2 + B s}. \quad (3.7)$$

Це узгоджується з [52], тому передатна функція ланки з інерцією та демпфуванням - саме $1/(J_L s^2 + B s)$.

Модель мобільної платформи - як динамічна ланка для збурення. За умовою [51], модель машини задаємо аперіодичною першого порядку:

$$W_{\text{моб}} = \frac{\Theta_{\text{моб}}(s)}{D_{\text{ін}}(s)} = \frac{K_{\text{моб}}}{T_{\text{моб}}s+1}, \quad (3.8)$$

де $D_{\text{ін}}(s)$ вхід генератора збурень (наприклад випадкові коливання опорної поверхні), $T_{\text{моб}}$ - часова стала реакції платформи, вихід $\Theta_{\text{моб}}(s)$ - кут платформи, який додається до кута підвісу для утворення виміряного значення.

Визначимо передатну функцію розімкненої системи. Виходячи з рис. 3.5 та посібника [53], передатна функція розімкненого контуру визначається як добуток передатних функцій окремих ланок:

$$W_{\text{роз}}(s) = W_{\text{П}}(s) \cdot W_{\text{дв}}(s) \cdot W_{\text{ін}}(s) \quad (3.9)$$

Підставивши значення з виразів (3.5)-(3.7) – отримаємо:

$$W_{\text{роз}}(s) = Ka \cdot \frac{K_{\text{дв}}}{T_{\text{дв}}s+1} \cdot \frac{1}{s(J_Ls+B)}. \quad (3.10)$$

Далі визначимо стійкість системи. Передатна функція замкненої системи стабілізації за посібником [53], визначається як :

$$\Phi(s) = \frac{W_{\text{роз}}(s)}{1+W_{\text{роз}}(s)} \quad (3.11)$$

Після підстановки (3.10), отримаємо:

$$\Phi(s) = \frac{K_{\text{роз}}}{(T_{\text{дв}}J_L)s^3 + (J_L + BT_{\text{дв}})s^2 + Bs + K_{\text{роз}}} \quad (3.12)$$

Отримана передатна функція дозволяє провести визначення її на стійкість. Для подальшого аналізу стійкості за критерієм Гурвіца підставляємо числові значення, що використовуються в моделі ризкання: $K_{\text{роз}} = 20$, $T_{\text{дв}} = 0,0005$ с. Визначено з моделі підвісу з застосування SolidWorks що: $J = 1,300525$ кг·м², $B = 0,05$ Нм·с. З виразу (3.12) запишемо характеристичний поліном замкненої системи:

$$D(s) = 0,00065025s^3 + 1,300525s^2 + 0,05s + 20 \quad (3.13)$$

Для отриманого характеристичного поліному запишемо визначники Гурвіца трьох порядків, як зазначено у посібнику [53].

$$\Delta_3 = \begin{vmatrix} 1,300525 & 20 & 0 \\ 0,00065025 & 0,05 & 0 \\ 0 & 1,300525 & 20 \end{vmatrix} = 1.040425 > 0.$$

$$\Delta_2 = \begin{vmatrix} 1,300525 & 20 \\ 0,00065025 & 0,05 \end{vmatrix} = 0.05202125 > 0. \quad (3.14)$$

$$\Delta_1 = 0,00065025 > 0.$$

Система стійка, тому що усі визначники Гурвіца і коефіцієнти характеристичного поліному додатні.

3.5 Моделювання системи слідкування двовісного підвісу в середовищі Simulink

Для моделювання двовісного підвісу в середовищі Simulink обрана, що відображає реальний контур керування - від генерації еталонного сигналу до утворення куту положення підвісу через ланки підсилення, привода і механіки платформи. Середовище Matlab/Simulink було вибрано через наявність готових блоків для реалізації регуляторів, передатних функцій і суматорів, можливість швидкої перевірки часових та частотних характеристик, зручність побудови блок-діаграм і автоматичного запис результатів, а також через особистий досвід застосування цього інструменту під час навчання і розробок. Модель ристання і тангажу, що зображена на рис. 3.6, була сформована використовуючи роботи [51,54], та структурну схему з п. 3.4. Вхідні сигнали кута задаються стандартними блоками Sine Wave та Step, що дає можливість генерувати як постійні завдання положення, так і гармонічні або імпульсні впливи для тестування перехідних характеристик. Командна частина контуру реалізована як пропорційно-інтегрально-диференціальний регулятор у розгорнутому вигляді: пропорційна частина позначена коефіцієнтом 20, інтегруюча частина реалізована через інтегратор 1/s з підсиленням 10, а похідна частина - через блок

обчислення різниці $\Delta u/\Delta t$ з підсиленням 2; такий розподіл блоку дозволяє явно показати роль кожної складової в алгоритмі і полегшує реалізацію обмеження інтегратора й апаратних фільтрів похідної при тестуванні. Сумарний сигнал виходу регулятора подається на обмежувач насичення, що виконує роль механізму обмеження інтегратора і захищає привід від перевищення допустимої напруги або команди, а також реалізує практичну фізичну відсічку по діям привода [49].

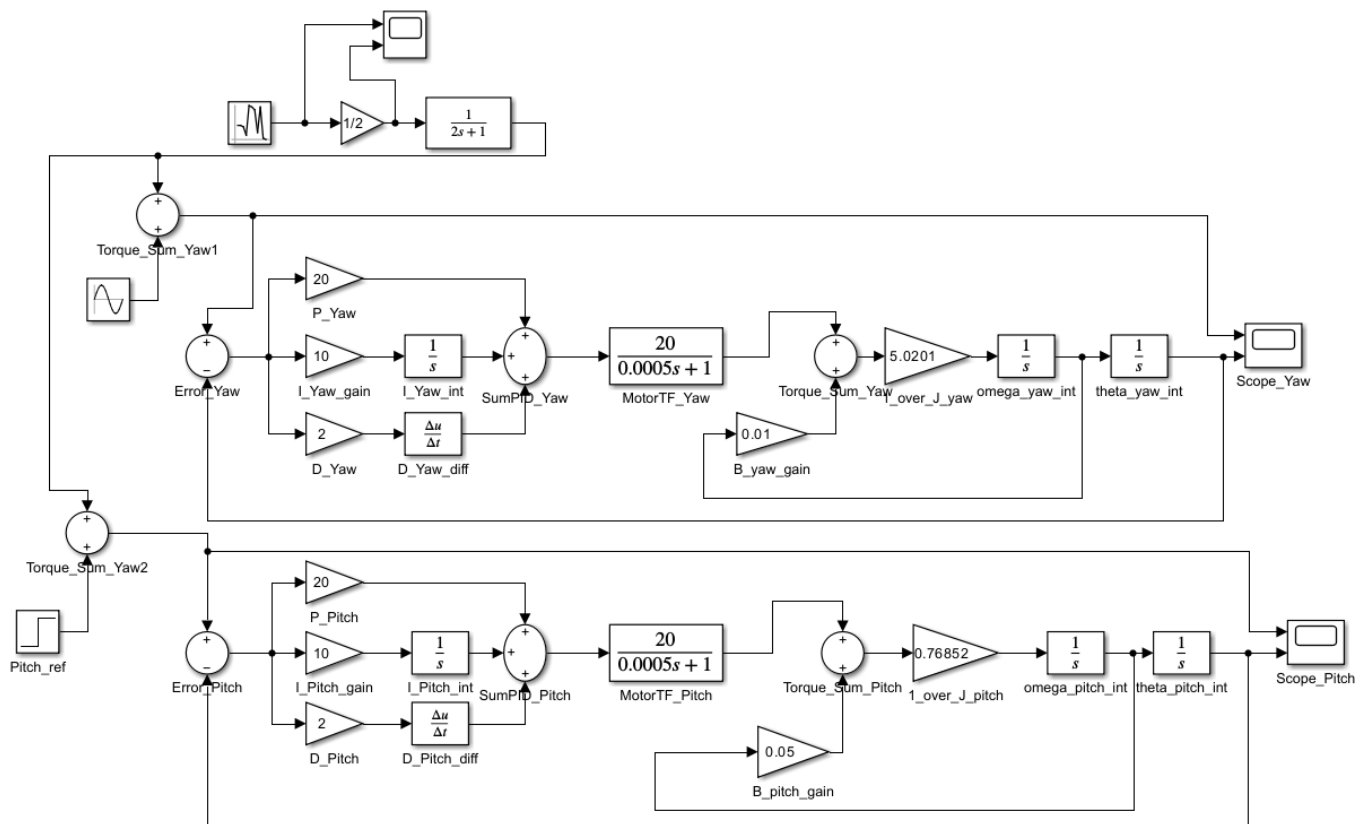


Рис. 3.6. Змодельована система двовісного підвісу в середовищі Simulink

Привід у моделі представлено розділено: статичне підсилення виділено окремо для зручності налаштування, а безпосередня динаміка двигуна моделюється блоком виду $\frac{K_{ДВ}}{T_{ДВ}s+1}$. У наведеному варіанті використано числові параметри $K_{ДВ} = 20$ і $T_{ДВ} = 0,0005$ с, що відповідає швидкій аперіодичній реакції двигуна в робочій смузі частот і дає змогу розглядати його електромагнітні

процеси у вигляді одного ефективного полюса. Після моторної ланки сигнал інтерпретується як сумарний керуючий сигнал (через суматор, у який у разі потреби можуть додаватися інші моменти - збурювальні або компенсаційні) і надалі подається на блок, що перетворює сигнал у зміну кутової швидкості з урахуванням моменту інерції підвісу. У схемі для цього використано коефіцієнт 5.0201, який є оберненим значенням сумарного моменту інерції системи (тобто $1/J$), таким чином механічна частина реалізована через рівняння руху ротаційної ланки у вигляді $J\ddot{\theta} + B\dot{\theta} = M$. На практиці це реалізовано послідовністю: множник $1/J$ - інтегратор $1/s$ (отримання кутової швидкості) - другий інтегратор $1/s$ (отримання кута). Обране числове значення J отримано з CAD-моделі SolidWorks шляхом сумування масових і інерційних характеристик несучих плит і закріплених вузлів. У нашому випадку воно дорівнює приблизно $0,1992 \text{ кг} \cdot \text{м}^2$ (тобто $1/J \approx 5,02$), а значення в'язкого демпфування B апроксимовано як $0,01 \text{ Н} \cdot \text{м} \cdot \text{с}$ для відображення втрат у підшипниках і вузлах тертя. Зворотній зв'язок у механіці реалізований через віднімання сигналу в'язкого демпфування, що формується множенням кутової швидкості на підсилювач B_yaw_gain , це дозволяє врахувати просту модель в'язкого демпфування та вплив механічних втрат на динаміку.

У верхній частині схеми присутній блок збурення, який проходить через фільтр/ланку платформи, змодельована коефіцієнтом $1/2$ та передана через аперіодичну ланку виду $1/(T_{\text{car}}s + 1)$ з часовою сталою, яка у поточній реалізації моделює динаміку носія і демонструє, як зовнішні механічні збурення фільтруються системою носія перед тим, як дійти до підвісу у вигляді обертового моменту. Такий підхід дозволяє моделювати реальний шлях передачі нерівностей дороги та інерційної відповіді носія на впливи, тобто платформа вносить власне згладження динаміки збурень і затримку їхнього передавання, що є важливим для аналізу взаємодії підвісу і носія.

Побудуємо логарифмічну амплітудну та фазову частотну характеристики, які зображені на рис 3.7, розімкненої системи riskання та визначимо запас стійкості системи.

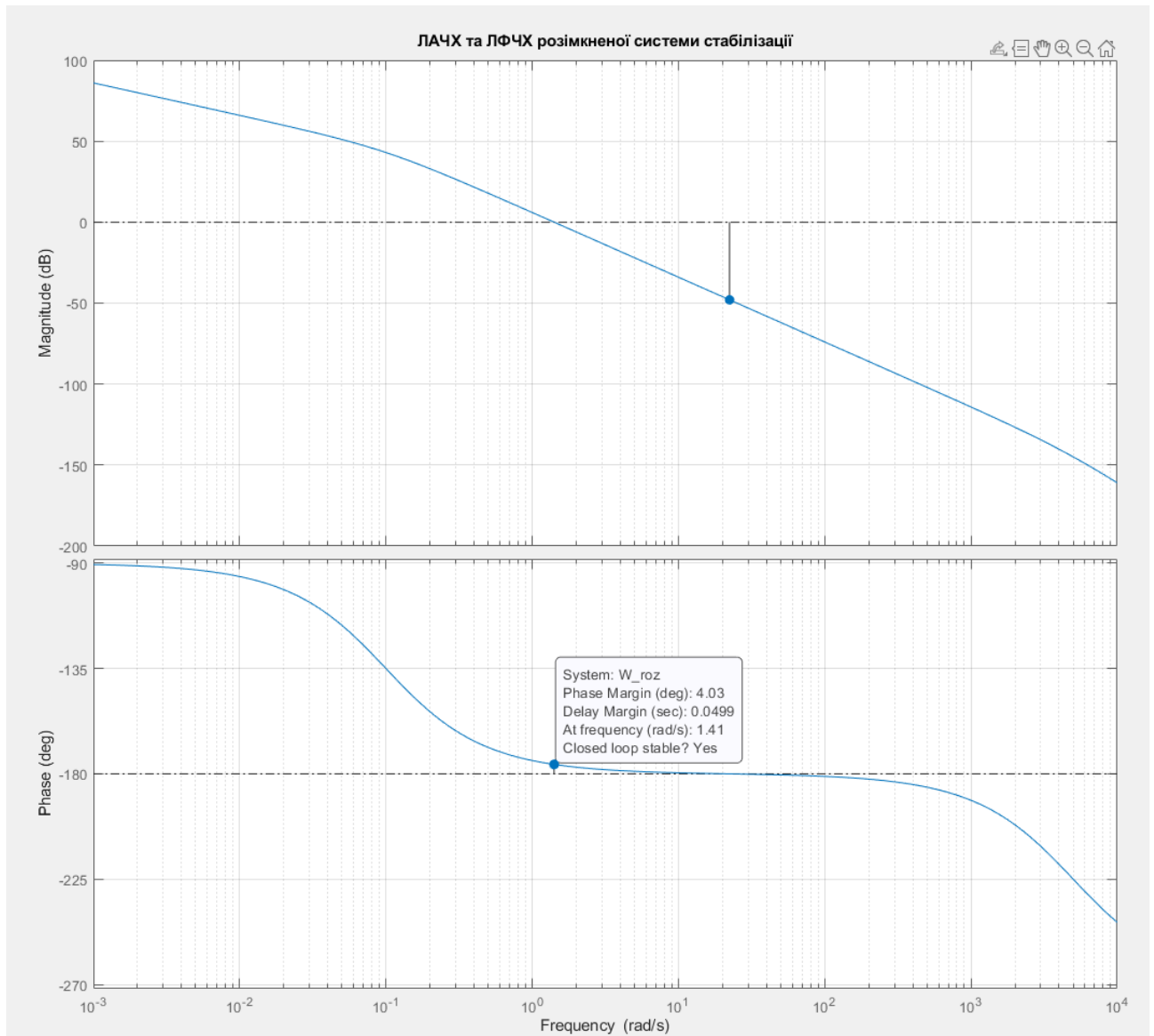


Рис. 3.7. Графіки ЛАЧХ та ЛФЧХ розімкнутої системи

З отриманої характеристики, що зображена на рис 3.7, виходить що запас стійкості по фазі $\varphi=4.03$.

Змоделюємо рух мобільної платформи по звивистій дорозі і задамо еталонну траєкторію рискання, що дає змогу перевірити якість утримання азимуту: для цього використано блок синусоїдального сигналу з амплітудою 30° та частотою 1 рад/с, а додатково на вхід підмішано випадкове збурення, згенероване блоком Random Number із математичним сподіванням 0, дисперсією 600 град^2 , при часі дискретизації 0,2 с, що відповідає швидким кутовим коливанням високої інтенсивності. Початкове значення генератора (зерно)

встановлено як 30, що забезпечує відтворюваність експерименту.

Така форма випадкового сигналу коректно моделює стохастичні вібрації широкого спектра, що виникають при русі по нерівній, структурно деградованій дорозі, де поверхня характеризується різкими локальними змінами рельєфу та випадковими механічними ударами. Відомо, що подібні умови спричиняють швидкі, статистично непередбачувані кутові прискорення та вібрації у навігаційних та стабілізаційних системах наземних роботизованих платформ, що детально описано в роботах з аналізу впливу дорожнього профілю та зовнішніх збурень на точність стабілізації камер і сенсорів [20, 21]. На рис. 3.8 представлений результат моделювання рискання.

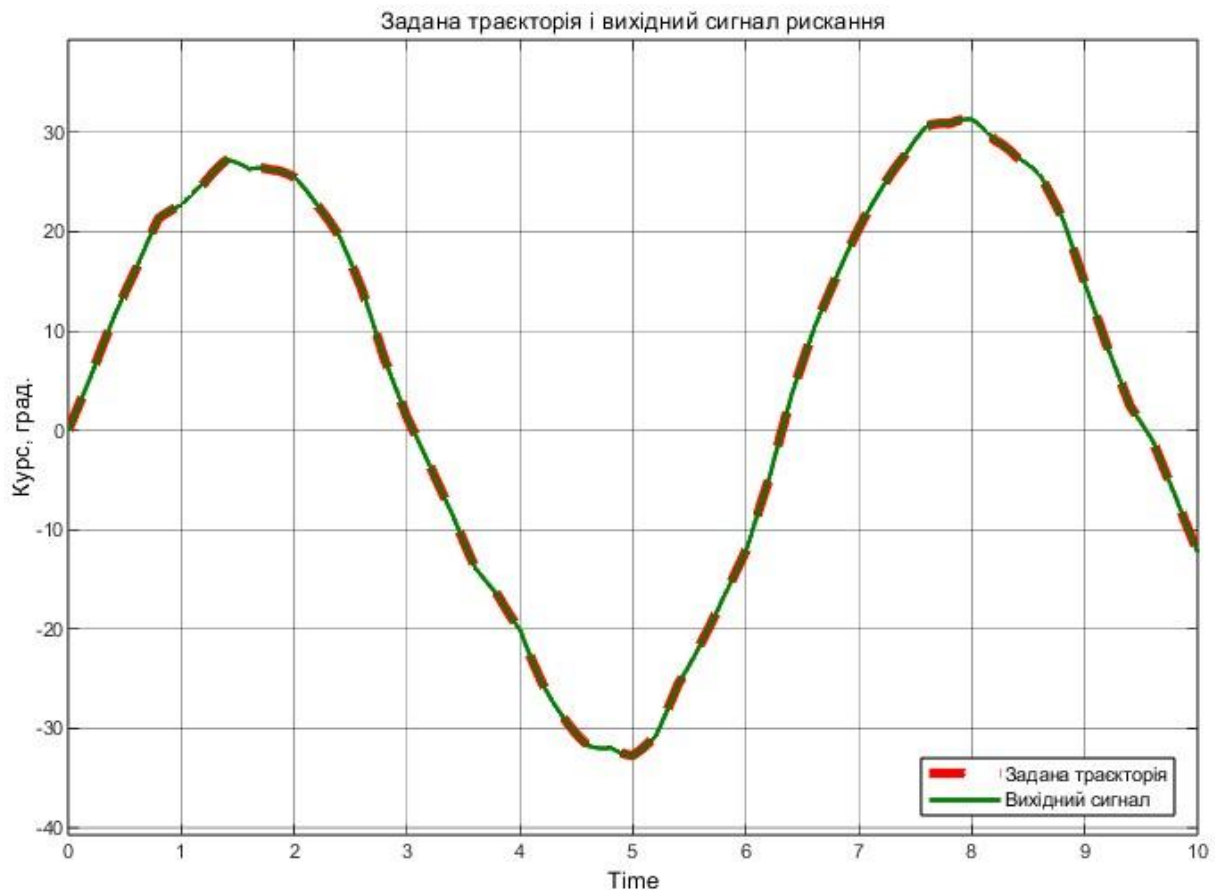


Рис. 3.8. Графік заданої і вихідної траєкторії рискання при часі моделювання 10

с.

Візуальна оцінка показує, що вихід системи наближено слідує заданій формі по амплітуді й фазі пікові значення і положення максимумів майже

співпадають, що свідчить про добру якість слідування в умовах періодичного впливу. Невеликі локальні відхилення від ідеальної синусоїди помітні в областях піків і спадів і мають випадковий характер, що узгоджується з накладанням шумового збурення. Ці відхилення не призводять до накопичувальної тенденції або автоколивань, отже система зберігає стійкість при заданому рівні шуму.

Змоделюємо рух мобільної платформи по нерівностях і перевіримо якість слідування по тангажу: для цього використано блок крокової дії з часом переходу 5 с, початковим значенням 0° та кінцевим значенням 50° , а для відтворення динаміки випадкових збуджень, характерних для руху по деформованому ґрунтовому або дорожньому профілю, на вхід додатково подається стохастичне збурення, згенероване блоком Random Number із математичним сподіванням 0, дисперсією 600 град^2 , при часі дискретизації 0,2 с, початкове значення генератора 30. На рис. 3.9 представлений результат моделювання слідування по тангажу.

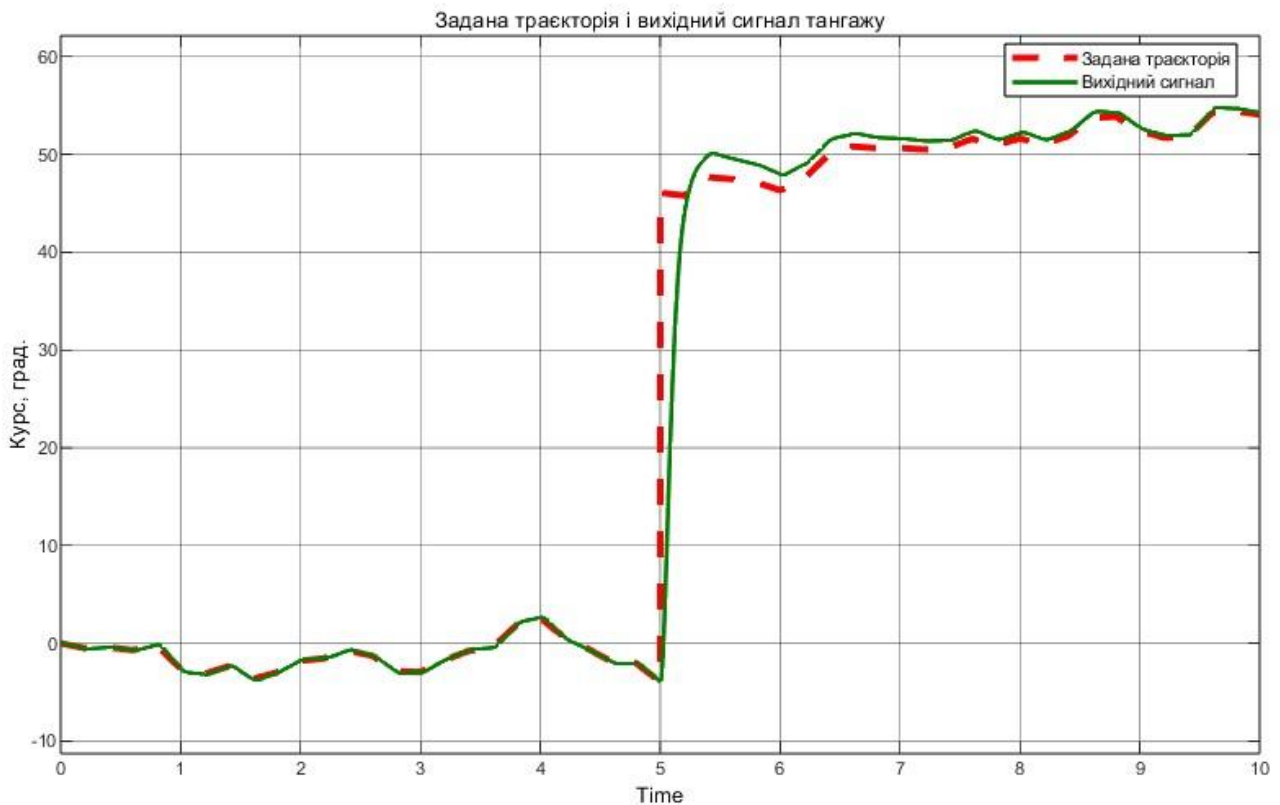


Рис. 3.9. Графік заданої і вихідної траєкторії тангажу при часі моделювання 10 с.

До моменту п'ятої секунди система працювала в умовах випадкових збурень із середньоквадратичною похибкою близько 2° . У момент подачі командного стрибка з 0° до 50° відбувся швидкий перехід вихідного сигналу. Час досягнення значення 45° градусів склав близько 0,2 секунди від моменту подачі стрибка. Пікове перевищення над задавальним рівнем становило приблизно три градуси, тобто максимальне миттєве значення виходу досягало близько 53° . Після піку спостерігалось загасаюче коливання, вихід усталився в робочому інтервалі на рівні приблизно п'ятдесяти градусів з випадковими флуктуаціями на рівні однієї градусної одиниці. Час входження в діапазон відхилень $2,5^\circ$ градуси від бажаного значення склав приблизно 0,4 секунди після початку переходу. Для досягнення більш жорсткого критерію точності 1° час слідкування складає орієнтовно 0,9 с. Оцінка середньоквадратичної помилки по всьому інтервалу експерименту дає величину близько $0,8^\circ$, середнє абсолютне відхилення в усталеному режимі лежить в межах 1° .

Обрана структура регулятора забезпечує високу швидкодію при одночасному збереженні стійкості під дією збурення. Механічні параметри підвісу і параметри приводу дозволяють досягати бажаної установки за час, сумірний з вимогами для задач відеоспостереження з портативної платформи, при цьому короткочасні перерегулювання не перевищують кількох градусів і не викликають накопичувальної помилки.

На графіку змінювання кута тангажу, що зображено на рис. 3.10, показано реакцію підвісу на ступінчасту команду до 50° з накладеним випадковим збуренням, як у минулому аналізі. Протягом усього інтервалу вихідний сигнал утримується навколо заданого рівня з незначними флуктуаціями. На початковому переході спостерігається швидкий підйом та помірне перевищення над задавальним рівнем після чого відбувається загасаюче коливання і встановлення в інтервалі близько п'ятдесяти градусів. Режим після завершення перехідного процесу характеризується невеликими випадковими коливаннями амплітудою близько 1° , на тлі яких епізодично спостерігаються поодинокі пікові збурення величиною до $2-3^\circ$.

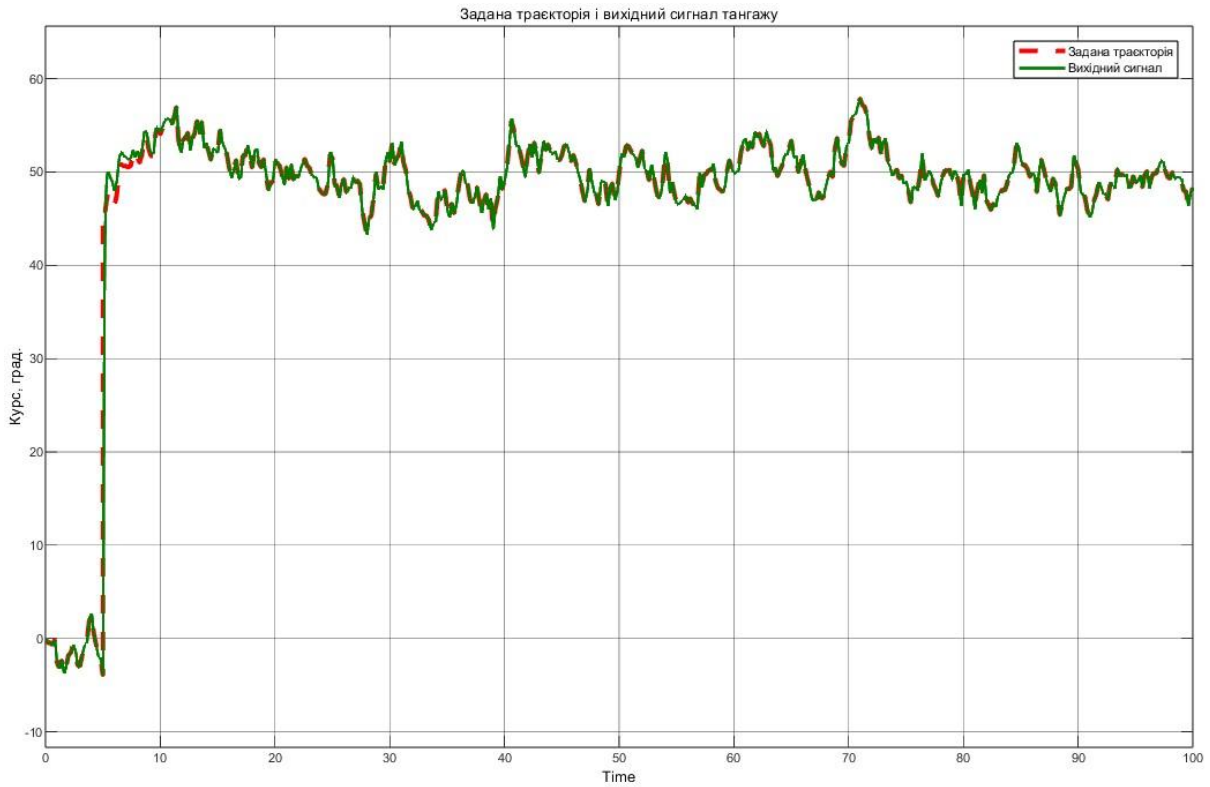


Рис. 3.10. Графік заданої і вихідної траєкторії тангажу при часі моделювання 100 с.

Графік змінювання кута рискання наведено на рис. 3.11.

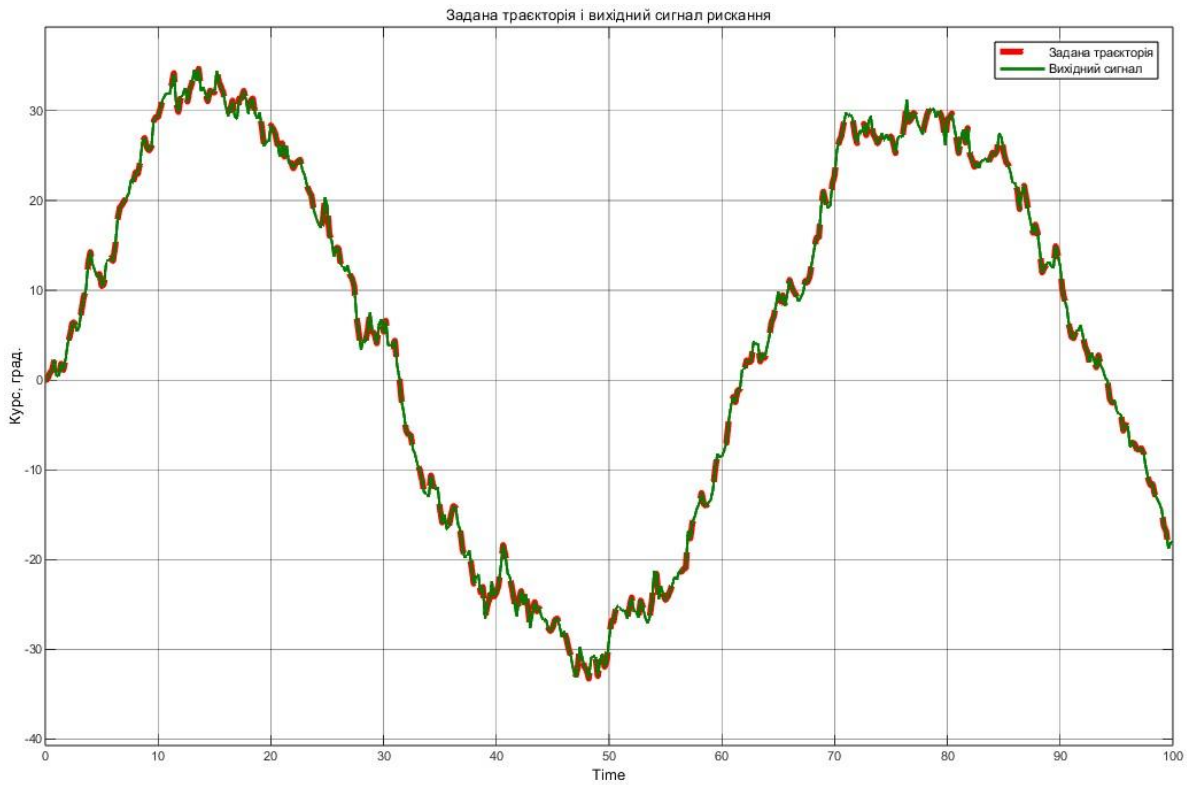


Рис. 3.11. Графік заданої і вихідної траєкторії рискання при часі моделювання 100 с

На графіку змінювання кута рискання видно добру слідувальність заданому синусному сигналу з амплітудою порядку 30° і частотою 0.1 рад/с. Вихідна крива практично накладається на задану, локальні розбіжності відповідають випадковим збуренням і апаратним обмеженням привода.

За 100 с система не проявила ознак нестійкої поведінки або накопичувальних дрейфів. Відсутність зростання амплітуди коливань свідчить про стійкість при заданих параметрах регулятора та механіки. Невеликі нерегулярні зубці на виходах не змінюють загальної стійкості і мають локальний хаотичний характер, що свідчить про вплив вимірювального шуму або локальних насичень привода

3.6 Моделювання системи стабілізації двовісного підвісу в середовищі Simulink

На рис. 3.12 подано модель двовісної системи стабілізації, у якій збережено загальну структуру регуляторного контуру, сформовану раніше для задачі стеження, проте змінено спосіб подавання зовнішніх впливів. На відміну від попередньої моделі, де збурення надходили безпосередньо на вхід як складова заданого сигналу, у цьому варіанті вони вводяться на етапі формування сумарного моменту. Такий підхід дає змогу дослідити реакцію підвісу саме як стабілізатора, оцінити вплив зовнішніх механічних коливань на кутове положення та проаналізувати здатність системи компенсувати збурення без зміни командного завдання.

На рис. 3.13 наведено результат моделювання роботи системи стабілізації рискання. На відміну від попереднього режиму стеження, на вхід контуру заданим сигналом через блок константи подається нульовий курс, а збурення формується у вигляді неперіодичної траєкторії кутового повороту платформи, що змінюється у діапазоні приблизно від $+20^\circ$ до -80° .

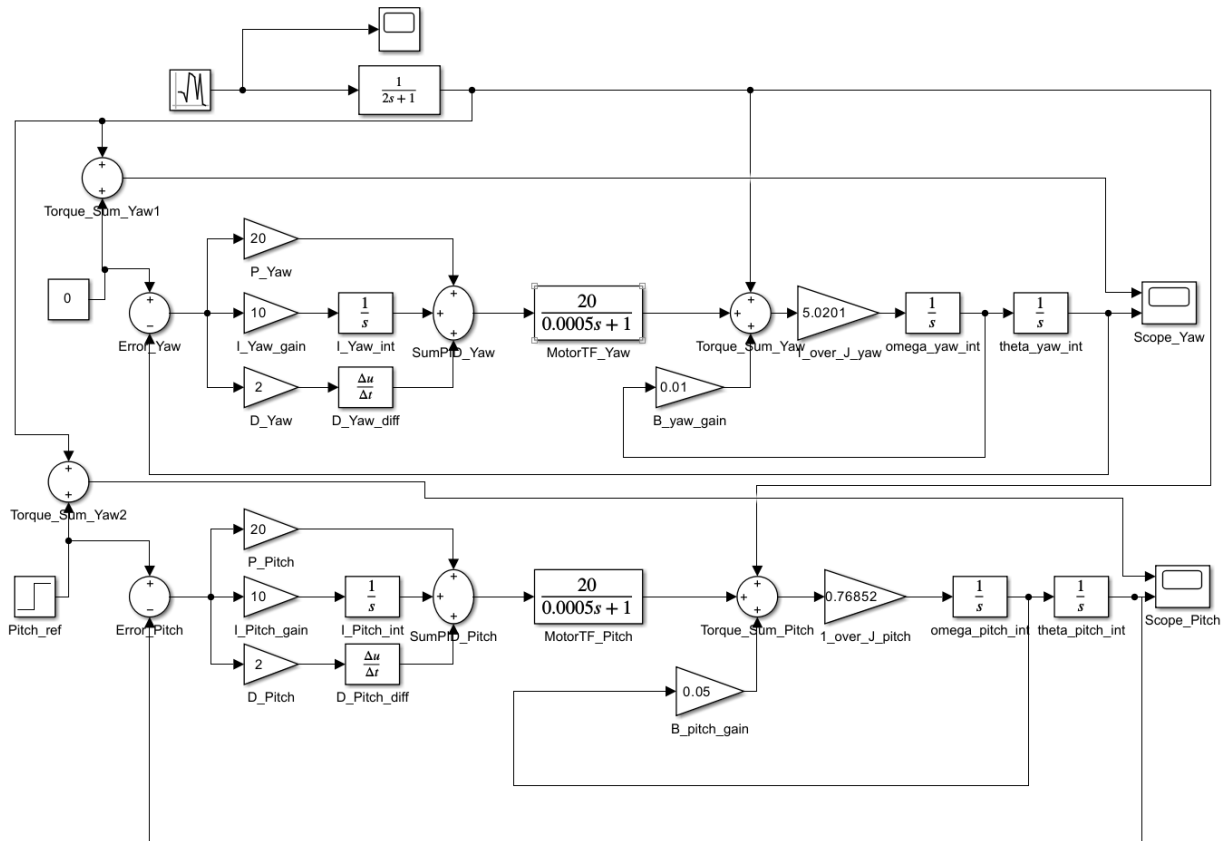


Рис. 3.12. Змодельована система двовісного підвісу в середовищі Simulink

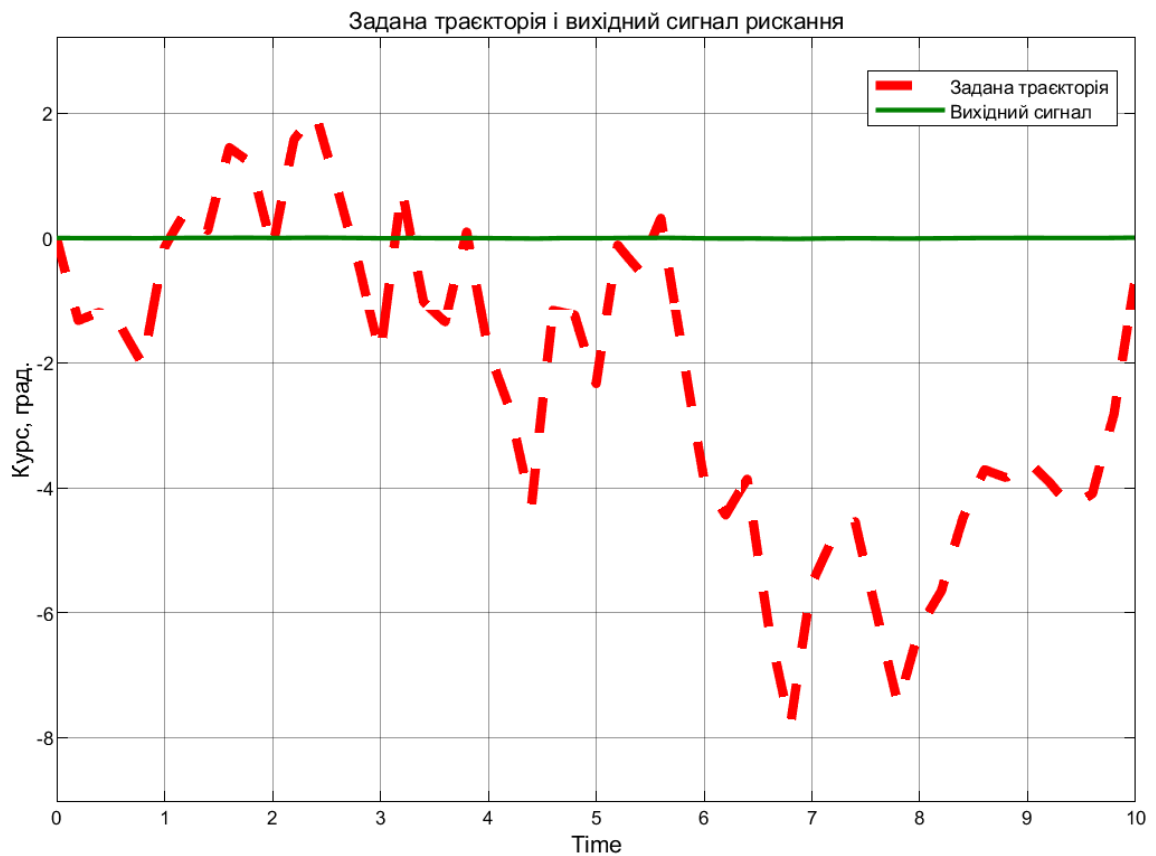


Рис. 3.13. Вихідний сигнал рихання при дії кутових збурень платформи за умови нульового еталонного курсу і часі моделювання 10 с.

Аналіз результатів моделювання показує, що зелена крива, яка відображає вихід системи стабілізації, утримує фіксоване значення, тоді як червона пунктирна лінія демонструє значні неперіодичні кутові відхилення платформи у діапазоні від приблизно $+2^\circ$ до -8° . Незважаючи на таку амплітуду та нерівномірність сигналу збурення, вихідний сигнал залишається сталим. Це свідчить про те, що система зберігає задану орієнтацію без появи коливальних режимів або накопичувальних помилок, забезпечуючи стабільність курсування навіть за умов інтенсивних кутових впливів орієнтації при діях інтенсивних кутових збурень платформи.

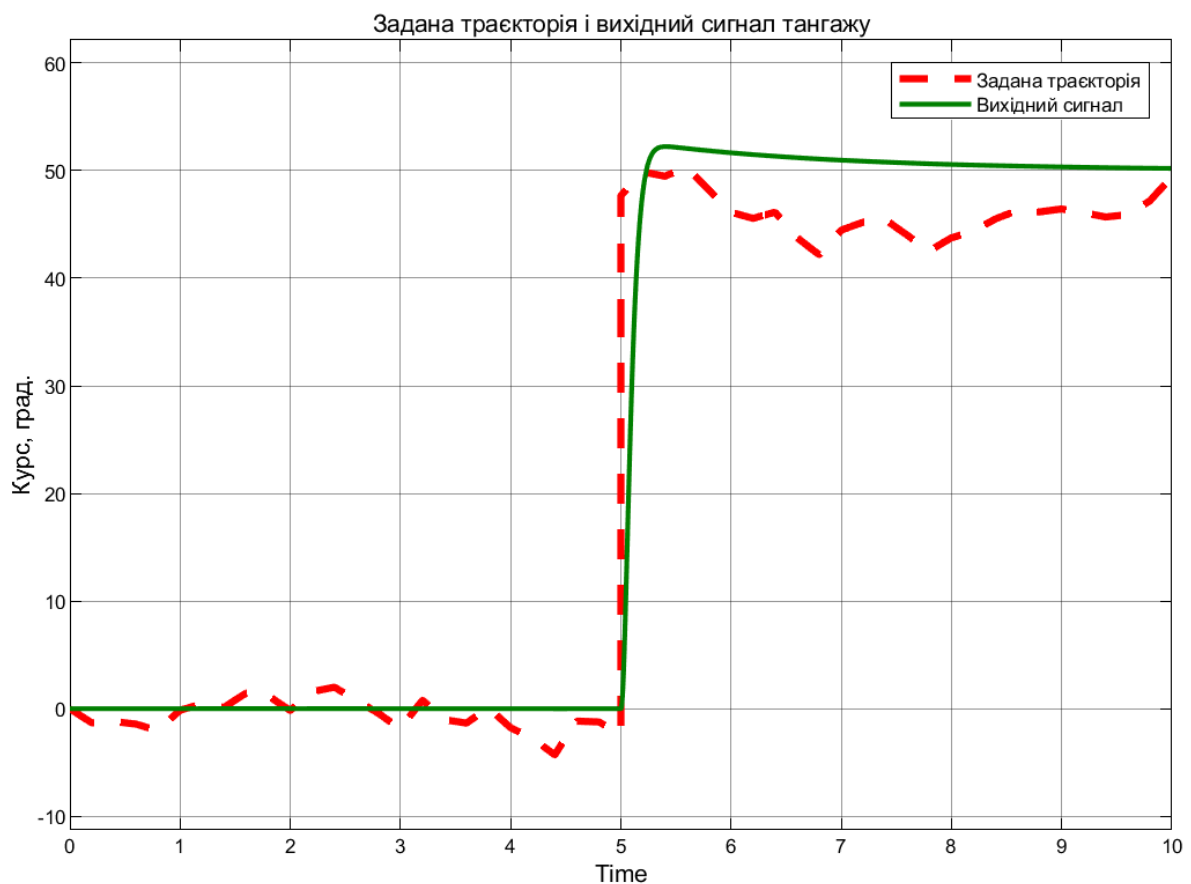


Рис. 3.14. Реакція системи стабілізації тангажу на крокове перенаведення підвісу і збуренні при часі моделювання 10 с.

На рис. 3.14 подано результат моделювання роботи системи стабілізації по осі тангажу. У цьому експерименті заданий сигнал формується кроковим блоком, який у момент часу 5 с змінює командне значення з нульового рівня на

орієнтацію близько 50° . Такий режим дозволяє оцінити здатність контуру швидко виконувати перенаведення підвісу на новий кут та визначити характер перехідного процесу.

Зелена крива відображає реакцію системи стабілізації. Після моменту часу 5 с спостерігається швидкий перехід із нульового положення до нового кута: час наростання становить орієнтовно 0,3-0,5 с. Максимальне перерегулювання не перевищує приблизно $2-3^\circ$ відносно заданих 50° , що відповідає відносному перерегулюванню близько 4–6 %. Надалі вихідний сигнал монотонно зменшується до стаціонарного значення, яке відрізняється від середнього значення заданого кута не більше ніж на $1-2^\circ$, тобто статична похибка є малою. Відсутність автоколивань і накопичувального дрейфу свідчить про те, що налаштування контуру забезпечують динамічно коректне перенаведення підвісу та достатню точність стабілізації орієнтації по осі тангажу.

На рис. 3.15 подано результат тривалого моделювання (100 с) дії стохастичного збурення на систему стабілізації по осі рискання.

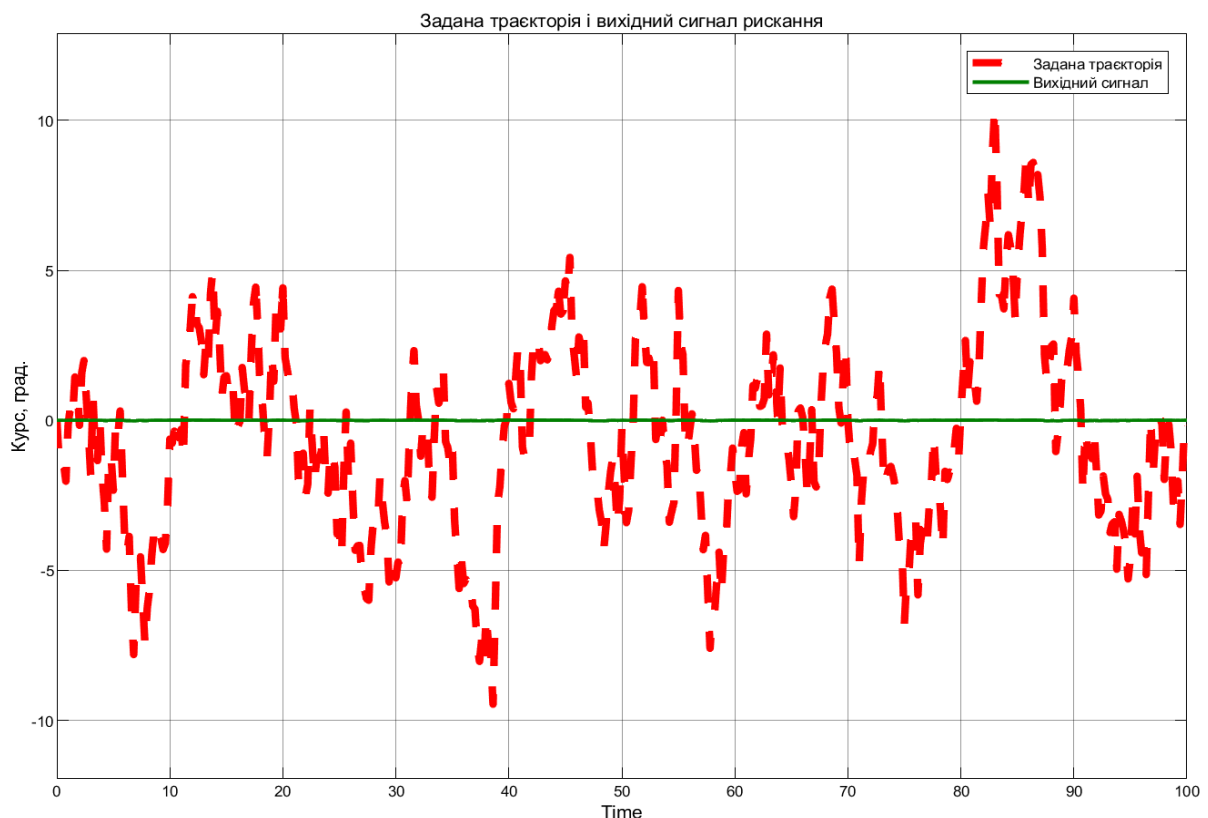


Рис. 3.15. Вихідний сигнал рискання при дії кутових збурень платформи за умови нульового еталонного курсу і часі моделювання 100 с

Заданий сигнал, сформований як випадкова траєкторія, що змінюється в діапазоні приблизно від $+5^\circ$ до -10° і характеризується високою частотою та нерівномірністю коливань, що відтворює впливи, які виникають під час руху платформи по складному рельєфу. На відміну від короткого перехідного режиму, дана симуляція дозволяє оцінити поведінку системи на протяжному часовому інтервалі та виявити можливі прояви накопичувальних похибок або зниження ефективності стабілізації.

Зелена крива, яка відображає вихід стабілізованої осі, демонструє сталість та відсутність змін упродовж усього періоду спостереження, незважаючи на значну амплітуду зовнішніх коливань. Вихідний сигнал не повторює стохастичну динаміку збурення і не проявляє дрейфу чи поступового відхилення від нульового рівня. Відсутність накопичення помилки на інтервалі 100 с свідчить про належно сформований баланс між пропорційною, інтегральною та диференціальною складовими регулятора, що забезпечує стійкість системи та запобігає збудженню коливальних режимів у довготривалому режимі роботи.

На рис. 3.16 представлено реакцію системи стабілізації по осі тангажу під час тривалого моделювання тривалістю 100 с. Заданий сигнал формується кроковою зміною командного кута, що відбувається на початку моделювання та встановлює нове положення орієнтації на рівні приблизно 50° . Додатково до цього задання накладено випадкове збурення з дисперсією у межах приблизно $\pm 5^\circ$, що відтворює нерівномірні динамічні впливи під час руху платформи зовнішнім середовищем.

Після різкого переходу з нульового рівня до заданого кута система демонструє швидкий перехідний процес із характерним піковим значенням близько 52° та подальшим згасанням. До моменту стрибка вихідний сигнал перебуває у стабілізованому стані на рівні близькому до нуля, що свідчить про відсутність початкових коливань і правильне функціонування контуру в усталеному режимі. Основна частина перехідного процесу завершується протягом приблизно 1–1,5 с після зміни командного кута, після чого реакція

системи набуває сталого значення. У подальшому вихід утримується поблизу заданої орієнтації без ознак дрейфу або накопичувальної помилки.

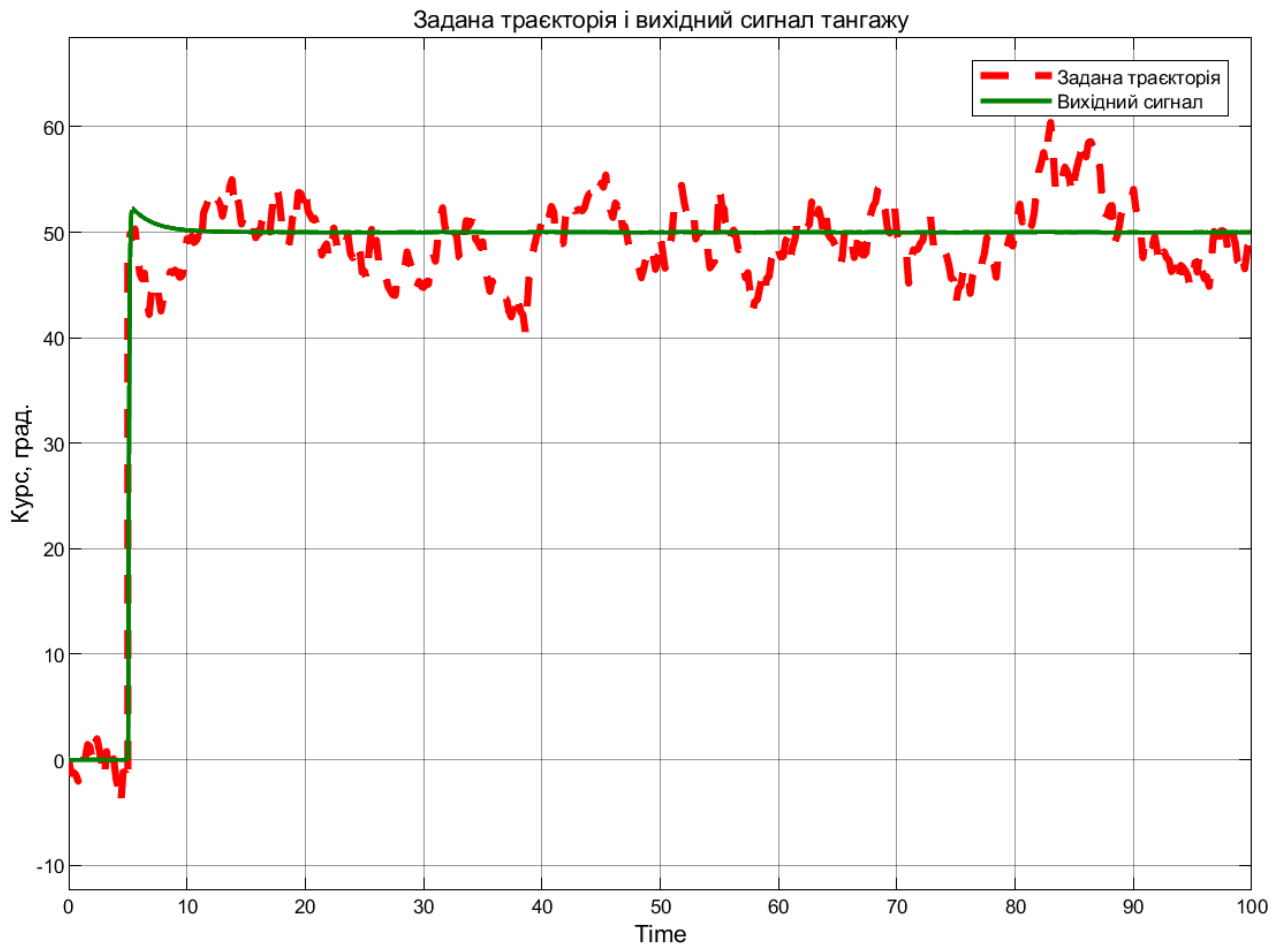


Рис. 3.16. Реакція системи стабілізації тангажу на крокове перенаведення підвісу і збуренні при часі моделювання 100 с

Незважаючи на стохастичний характер та значну амплітуду сигналу збурення, система ефективно фільтрує зовнішні впливи, забезпечуючи стабільність положення та відсутність автоколивальних режимів протягом усього інтервалу моделювання.

Проведене моделювання для обох координат двовісного підвісу показало, що сформована структура стабілізаційних контурів забезпечує надійне утримання орієнтації як у короткочасних, так і в довготривалих режимах дії зовнішніх збурень. Аналіз графіка стабілізації рискання демонструє, що система зберігає стійкий вихід навіть за наявності інтенсивних випадкових коливань

амплітудою до 10° , причому жодних ознак дрейфу або накопичення помилки протягом часового інтервалу 100 с не спостерігається. Це свідчить про достатній запас стійкості та здатність регулятора ефективно компенсувати механічні впливи, характерні для руху платформи по нерівній поверхні.

Аналогічні результати отримано для осі тангажу: система коректно відпрацьовує як крокові зміни командного кута, так і стохастичні збурення, що накладаються на задану траєкторію. Після стрибкоподібного перенаведення підвісу перехідний процес завершується в межах 1–1,5 с, а подальше відхилення вихідного сигналу від заданого значення не перевищує кількох градусів. У тривалому режимі система демонструє стабільну роботу та відсутність автоколивань, утримуючи орієнтацію під впливом випадкових збурень, амплітуда яких сягає приблизно $\pm 5^\circ$.

Отримані результати підтверджують, що розроблені моделі та підібрані параметри регуляторів забезпечують необхідну швидкодію та точність у задачах стабілізації, а також гарантують стійкість системи. Таким чином, сформований стабілізаційний контур є придатним для практичного застосування в умовах реальної експлуатації мобільної платформи та може слугувати основою для подальшої оптимізації або адаптації під конкретні сценарії руху.

Висновки до розділу 3

У третьому розділі було виконано комплексне дослідження, що включає підбір електроприводів, побудову математичної моделі двовісного підвісу, формування структурної схеми з передатними функціями та моделювання стабілізаційного контуру у середовищі Simulink. Першим етапом став аналіз можливих варіантів електродвигунів, серед яких розглядалися моделі T Motor GL100 KV10, Maxon EC45 Flat, Faulhaber 3274 та KDE8218XF 120. Оцінювання проводилося за параметрами, що визначають динаміку стабілізатора, а саме за постійною крутного моменту, моментом інерції ротора, електричною та електромеханічною сталими часу, а також за опором і індуктивністю обмоток.

Двигун T Motor GL100 KV10 показав найкращу відповідність вимогам завдяки великій постійній крутного моменту, що становить 1.03 Нм на ампер, номінальному моменту до трьох ньютон метрів, малій електричній сталій часу, яка дорівнює 8.87×10^{-4} секунди, та електромеханічній сталій часу 5.77×10^{-4} секунди. Таке поєднання характеристик забезпечує високу швидкодію і мінімальні фазові затримки, що позитивно впливає на стійкість та точність системи. Інші двигуни поступалися за ключовими параметрами, зокрема за величиною крутного моменту та значеннями постійних часу, тому їх використання не дозволяло б досягти необхідної ефективності.

Подальший етап дослідження полягав у формуванні математичної моделі підвісу. На основі рівняння моментів і кінематичних залежностей було описано динаміку по осях тангажу і ристання з урахуванням крутного моменту приводу, демпфування та моменту інерції рухомої частини. У модель включено властивості вибраного електродвигуна, а також підсилювальний каскад. Таке представлення дозволило отримати передатні функції окремих елементів системи і сформувавши розімкнену та замкнену структуру контуру. Стійкість замкненого контуру була перевірена за критерієм Гурвіца, що підтвердило можливість забезпечення асимптотичної стійкості при використуваних значеннях інерції та демпфування, а також відповідність динамічних характеристик вимогам до точності стабілізації.

Побудовано повну структурну схему системи стабілізації. Вона включає ПД-регулятор, електродвигун та інерційну ланку платформи. Врахування зворотного зв'язку за положенням та кутовою швидкістю дозволило забезпечити необхідний рівень демпфування і запобігти виникненню автоколивань у системі.

Виконано моделювання підвісу у середовищі Simulink. Проведено аналіз реакцій системи на стрибкоподібні зміни задавального кута, випадкові збурення та неперіодичні зміни положення платформи. За результатами моделювання система стабілізувала кут після стрибкоподібного впливу приблизно за 1–1,5 с, а величина перерегулювання становила 2–3°. За дії випадкових збурень амплітудою до 10° система не демонструвала накопичення помилки або дрейфу

навіть протягом 100 с моделювання. Аналіз часу стабілізації і коливальних режимів підтвердив ефективність функціонування регулятора і правильність вибору характеристик двигуна та параметрів математичної моделі. За обома осями система продемонструвала стабільну роботу у режимах, що відповідають реальним експлуатаційним умовам рухомих платформ.

Проведений вибір двигуна, побудова математичної моделі, синтез структурної схеми та виконання імітаційних досліджень продемонстрували відповідність розробленої системи вимогам до точності та стійкості двовісного підвісу. Модель підтвердила свою працездатність як у режимах короткочасних, так і у режимах тривалих збурень, що створює основу для подальшої оптимізації, апаратної реалізації та проведення експериментальних випробувань.

РОЗДІЛ 4

РОЗРОБКА СТАРТАП ПРОЕКТУ «Двовісний стабілізований підвіс»

4.1 Опис та технологічний аудит ідеї стартап-проєкту

Розробка двовісного стабілізованого підвісу для безпілотних платформ спрямована на вирішення проблеми незадовільної якості зображення при відеоспостереженні і фотозйомці з наземних мобільних платформ, не витрачаючи купу ресурсів. У сучасних умовах застосування безпілотних платформ у цивільних та промислових сферах виникає необхідність забезпечення високої стабільності відеопотоку та зображень в умовах руху платформи. Наприклад, при виконанні розвідувальних місій у небезпечних зонах критичною умовою успіху є стабільна передача зображення і телеметрії. Тому ідея проєкту полягає у створенні двовісного гіростабілізованого підвісу, який забезпечує надійну компенсацію вібрацій та рухів корпусу платформи, тим самим розширюючи можливості дистанційного моніторингу.

Перед аналізом ідеї сформуємо інформаційну карту проєкту. В ній вкажемо основні параметри і ресурсні потреби для реалізації стартапу.

В інформаційній карті в табл. 4.1 відображено назву проєкту, авторів, короткий опис ідейної концепції, необхідні ресурси та строки реалізації. Зокрема, вказані ролі учасників і ключові технічні засоби для прототипування. Карта демонструє, що проєкт має чітко сформульовану мету - створити стабілізований підвіс для мобільних платформ, а також забезпечені ресурси для розробки.

У табл. 4.2 наведено узагальнений опис ідеї: суть проєкту, можливі напрями її застосування та вигоди для користувачів. Показано, що проєкт передбачає створення високоточного стабілізованого підвісу, що забезпечує

плавність відеозйомки та точність спостереження на ходу. Можливі сфери застосування охоплюють кінозйомку автомобільних гоночних треків, телевізійні трансляції, охоронні та рятувальні операції, індустріальні інспекції та інші завдання. Користувачі отримують покращену якість зображення без вібрацій при русі, що знижує похибку вимірювань і підвищує безпеку оператора.

Таблиця 4.1. Інформаційна карта проекту

Назва проекту	Двовісний стабілізований підвіс
Автори проекту	Томчук Богдан Миколайович (розробник)
Коротка анотація	Розробка механічного та електронного рішення для двохосової стабілізації камер, що забезпечує якісне відео та фото у рухомих умовах.
Необхідні ресурси	Інженер-механік (1), програміст-робототехнік (1), маркетолог (1); комп'ютери для CAD, датчики гіроскопи/акселерометри, електродвигуни, 3D-принтер, плата мікроконтролера.
Термін реалізації	1 рік (від проектування до виходу на ринок)
Опис проблеми	Відеозображення з платформ має значні коливання через рух, що знижує корисність даних у застосуваннях моніторингу та зйомки.
Цілі та завдання проекту	Забезпечити кінцевого користувача (операторів платформ, відеооператорів, служб безпеки) інструментом для стабілізації відео/зображень. Ціль – створити ефективний двовісний стабілізатор та вивести його на ринок.

Таблиця 4.2. Опис ідеї стартап-проекту

Зміст ідеї проекту	Напрямки застосування	Вигоди для користувача
Розробка двохосового стабілізованого підвісу для камер і датчиків, що кріпляться на рухомі наземні платформи.	<ul style="list-style-type: none"> - Кіно- та телеіндустрія: зйомка автомобільних перегонів, спортивних подій, документальних сюжетів. - Сили безпеки: мобільні системи відеоспостереження для поліції. - Промисловість та інфраструктура: інспекція об'єктів (газопроводи, лінії електропередач, будівельні майданчики) з автономних чи пілотованих транспортних засобів. 	<ul style="list-style-type: none"> - Плавне стабілізоване зображення: усуває ефект тремтіння камери при пересуванні. - Підвищення точності спостереження: знижує спотворення, покращує якість відео/зображень для аналізу. - Безпека оператора: дистанційне керування без фізичної небезпеки під час руху платформи. - Універсальність: можливість швидкої адаптації до різних типів рухомих платформ.

Як видно з табл. 4.2, запропонована технологія має чітку цільову нішу і конкурентні переваги. Зокрема, використання двохосьового електронного гімблун дозволяє досягти значно кращої стабілізації, ніж у простих аналогів (напр., механічних стабілізаторів). За результатами аналізу ринку, подібні прилади застосовуються у галузях автомобільної зйомки, охоронних систем і автономного керування. Таким чином, реалізація цієї ідеї є затребуваною, оскільки глобальний ринок стабілізованих платформ вже оцінюється в \$600 млн (2023 р.) і продовжує зростати щонайменше на 6% щорічно [55].

У таблиці 4.3 узагальнено порівняння ключових техніко-економічних характеристик нашого рішення з аналогами, де визначено, які з них є сильними (S), слабкими (W) або нейтральними (N) для проєкту. Для цього порівняння було виділено такі показники: точність стабілізації, адаптивність до різних платформ, вартість виробництва, складність обслуговування та інноваційність рішення.

Таблиця 4.3. Визначення сильних, слабких та нейтральних характеристик ідеї проєкту

№	Техніко-економічна характеристика	Наша розробка (потенційні значення)	Існуючі аналоги	Оцінка проєкту
1	Точність стабілізації зображення	Дуже висока (використовує сучасні ІМУ)	Середня (старі гімбли)	S (сильна)
2	Модульність (адаптивність до різних платформ)	Висока (універсальне кріплення під будь-які камери і датчики)	Обмежена (спеціалізовані рішення)	S (сильна)
3	Вартість виробництва	Нижча	Вища	S (сильна)
4	Складність обслуговування	Досить складне (потрібне калібрування)	Менша (глибоко відпрацьовані)	W (слабка)
5	Інноваційність та привабливість на ринку	Висока (новий продукт для місцевого ринку)	Низька (відсутність конкурентів)	S (сильна)

З табл. 4.3 випливає, що проєкт має суттєві конкурентні переваги за точністю стабілізації та універсальністю конструкції - саме ці характеристики будуть сильними сторонами. Слабкими виявилось обслуговування. Загалом, ідея є високотехнологічною і може зайняти нішу із меншим рівнем конкуренції.

Зазначимо, що навіть при обмеженому бюджеті такі інноваційні рішення є перспективними: глобальний ринок стабілізаторів росте і тому виправдовує інвестиції в якість та новизну продукту.

У табл. 4.4 проведено технологічний аудит проекту: перелічено ключові технології, необхідні для реалізації ідеї, і оцінено їх наявність та доступність команді. Аналіз показує, що всі необхідні компоненти широко представлені на ринку. Водночас певні програмні алгоритми компенсації коливань можуть вимагати доопрацювання.

Таблиця 4.4. Технологічна здійсненність ідеї проекту

№	Ідея проекту	Технологія її реалізації	Наявність технологій	Доступність для команди
1	Двохосьовий стабілізований підвіс для камер	Електродвигуни з беззворотним зв'язком, IMU-датчики, контролери руху	Існуючі комерційні модулі	Можна придбати у постачальників, є конструкторські набори
2		Високочастотні бездротові канали передачі даних	Є на ринку (модулі Wi-Fi/5G)	Використання стандартних компонентів
3		Легкий металевий каркас зі стабілізатором	Матеріали та конструкції відомі	Легкодоступні, конструкція розробляється командою
4		Алгоритми DSP/AI для компенсації нерівностей місцевості	Базові алгоритми є, потрібна адаптація	Розробка силами команди із залученням IT-фахівців

Технологічний аналіз показує, що всі необхідні складові проекту переважно доступні на ринку. Зокрема, у виробництві стабілізованих платформ використовуються елементи, які випускаються серійно (моторизовані гімбли, IMU-сенсори, контролери). Лише деякі програмні компоненти (підгонка алгоритмів під конкретні умови роботи) вимагають доопрацювання. Таким чином, з технічного боку реалізація проекту цілком можлива, оскільки існуючі технології забезпечують потрібні функції. Підсумовуючи, можна зазначити: ідея є здійсненною з точки зору технічної бази, і компанія здатна отримати всі необхідні компоненти для створення прототипу.

4.2 Аналіз ринкових можливостей запуску стартап-проекту

За даними аналітичних звітів, глобальний ринок стабілізаторів (гімблів) наразі оцінюється приблизно в \$600 млн і продовжує стрімко зростати [55]. Зростання зумовлюють популярність відеоконтенту та впровадження систем зйомки високої чіткості. Крім розважальних застосувань, стабілізатори активно використовуються і в автоматизованих системах – зокрема, автомобільна та оборонна галузі впроваджують їх у допоміжні системи навігації й спостереження [55].

В українському контексті ринок робототехніки також демонструє зростання. За даними українських досліджень, рівень автономного водіння та зв'язку автомобілів зростає, а перевага надається інноваційним і високотехнологічним рішенням [56]. Особливий попит очікується в сегментах кіно- та відеозйомки, безпекових систем та промислових інспекцій. Наприклад, навіть у сферах фільммейкінгу та телетрансляцій, на думку експертів, все частіше використовуються стабілізовані камери на рухомих платформах. Також видно тенденцію підвищення інтересу до дронів та мобільних роботів у мирних цілях, як логістика та агросфера [57], що додатково підсилює інтерес до стабілізованих сенсорів.

Ключові тренди та ризики ринку:

- Глобальний ріст: як зазначено вище, глобальний підвісний ринок збільшується і відкриває можливості для нових гравців. Зокрема, індустрії кіно та телебачення активно інвестують у стабілізацію зображення, а авіаційні та наземні робототехнічні платформи потребують таких рішень.
- Місцеві ініціативи: в Україні зростає державна та приватна підтримка технологічних стартапів у галузі безпеки та робототехніки. Наявні програми фінансування подібних технологій та розвитку інновацій можуть стимулювати попит на наш продукт.
- Сегментація ринку: потенційні споживачі діляться на декілька груп з різними потребами (кінооператори, силові структури, промислові компанії).

Кожна з них вимагає стабільності зображення, але зосереджена на різних аспектах: мобільність, автономність, довговічність. Це створює кілька «ніш» для комерціалізації.

- Технологічні ризики: швидка зміна технологій може призвести до морального старіння розробок. Конкуренти (наприклад, DJI, Zhiyun та інші світові бренди) мають можливість випускати удосконалені моделі стабілізаторів [6], тому потрібно постійно інвестувати в постійну розробку.

З огляду на вищевикладене, ринок виглядає привабливим. Він характеризується значним обсягом в сотні мільйонів доларів, помірним порогом входження та низькою локальною конкуренцією, так як в Україні доволі мало власного виробництва таких систем. Однак слід враховувати глобальну конкуренцію з боку лідерів галузі і швидкість технологічних змін [58].

Потенційні цільові сегменти та попит. В результаті аналізу виокремлено такі основні групи потенційних споживачів проєкту в табл. 4.5.

Таблиця 4.5. Характеристика потенційних груп клієнтів стартап-проєкту

№	Потреба, що формує ринок	Цільова аудиторія	Характер відмінностей та вимог	Базова потреба, яку задовольняє товар
1	Плавна та якісна відеозйомка під час руху	Кінокомпанії, телебачення, відеоблогери	Потреба в високій якості кадру, без шейків при динамічних зйомках; часто використовують різне обладнання (кіно- або екшн-камери)	Забезпечення стабільного зображення при зйомці на рухомих об'єктах
2	Надійне спостереження та моніторинг у реальному часі	Поліція, рятувальні служби	Сильна потреба в автономності (тривала робота без підзарядки); акцент на надійності і захищеності обладнання в екстремальних умовах.	Надання точних та чітких зображень за будь-яких умов пересування
3	Інспекція та обстеження важкодоступних об'єктів	Енергокомпанії, промисловість, будівництво	Потреба в міцних конструкціях та стійкості до вібрацій; вимоги до довговічності та точності вимірювань	Забезпечення ефективного огляду і зменшення часу роботи інспекторів

Кіно- та телеоператори, відеоблогери: шукають ефективні стабілізатори для зйомки динамічних сцен на автомобілях чи мотоциклах. Для них важливі якість зображення, можливість інтеграції з різними камерами, компактність та зручність використання. Сили безпеки: національні поліції, рятувальні служби. Потребують надійних систем спостереження у реальному часі при переміщенні, з акцентом на міцність конструкції, автономність живлення, захищеність від зовнішніх впливів. Індустріальні підприємства: енергетичні компанії, інженерні служби (перевірка газопроводів, ЛЕП, ліній зв'язку). Вони цінують довговічність, стійкість до вібрацій та поганих погодних умов, а також оперативне надання результатів моніторингу без участі людини на небезпечних ділянках.

Потенційні фактори загроз, що зображені в табл.4.6, включають: сильна конкуренція з боку глобальних виробників: на ринку є кілька великих гравців, які диктують ціни та встановлюють технічні стандарти [58]. Це створює тиск на наш продукт щодо ціни та якості; швидке моральне старіння технологій: інновації в сфері сенсорів та алгоритмів змушують постійно оновлювати продукт, інакше він втрачає конкурентоспроможність; фінансові бар'єри: високі початкові інвестиції у розробку і виробництво, а також можливі валютні ризики можуть утруднювати вхід на ринок; нестабільність попиту: економічні кризи або зміни пріоритетів державного фінансування можуть призвести до коливань у замовленнях; необхідність сертифікації: для використання в оборонній сфері та авіасистемах можуть вимагатися дорогі сертифікати і випробування, що ускладнює вихід на такі сегменти.

Згідно з аналізом, головними загрозами є сильні конкуренти та швидкі технологічні зміни [58]. Для протидії їм, стартап має реалізувати захищені ноу-хау та продемонструвати довгострокову підтримку продукту.

Таблиця 4.6. Фактори загроз

№	Фактор	Зміст загрози	Можлива реакція компанії
1	Глобальна конкуренція	Основні гравці (DJI, Zhiyun) мають широку дистрибуцію та розвинуті продукти. Їх присутність тисне на ціни і стандарти якості [58].	Фокус на нішеві сегменти, удосконалення унікальних характеристик (спеціалізовані функції, надійність).
2	Швидке моральне старіння	Постійний розвиток нових технологій (сенсорів, П-алгоритмів) робить рішення застарілими.	Інвестиції в R&D, швидка адаптація нових компонентів, модульна конструкція для оновлень.
3	Фінансові/економічні ризики	Економічна нестабільність, девальвація валют, коливання курсу імпорту компонентів.	Хеджування валютних ризиків, партнерство з локальними постачальниками, пошук інвестицій.
4	Регуляторні бар'єри	Необхідність сертифікації та відповідності стандартам (наприклад, у військовому секторі) підвищує витрати.	Активна робота над сертифікацією, партнерство з організаціями, які володіють необхідними допусками.
5	Обмежений бюджет стартапу	Недостатність фінансування може стримувати розробку і маркетинг.	Залучення інвестицій, участь у грантових програмах, ефективне планування витрат.

Прямо протилежно, можливості, що зображені в табл. 4.7, полягають у зростанні інтересу до стабілізованих платформ в усьому світі. Зокрема, стрімкий розвиток відеоконтенту, впровадження систем дистанційного спостереження та військові програми розвитку робототехніки створюють нові ринки збуту. Українському сектору особливо сприяє державна та приватна підтримка інновацій: приплив коштів для закупівлі роботизованих комплексів [59] формує високий попит на передові технології. Також посилюється тенденція інтеграції стійких платформ із технологіями 3D та 5G, що дає змогу створювати розумні системи стабілізації.

Таблиця 4.7. Фактори можливостей

№	Фактор	Зміст можливості	Можлива реакція компанії
1	Зростання ринку відеозйомки	Популяризація контенту високої якості (стріми, соціальні мережі) збільшує попит на стабілізатори.	Розробка рішення під потреби медіа-сфери; активна онлайн-реклама продукту.
2	Державна підтримка технологій	Збільшення бюджету на нові роботизовані комплекси;	Просування продукту в рамках державних програм, участь у тендерах.
3	Інновації у технологіях	Прискорення розробки нових сенсорів, алгоритмів комп'ютерного зору, що розширює функціонал продукту.	Інтеграція передових технологій (AI, дрони як джерело даних) для підвищення цінності.
4	Нікшева конкурентна позиція	На внутрішньому ринку відсутні аналоги, можливість зайняти нішу як лідер.	Швидке виведення MVP, побудова локальної репутації; активна PR-кампанія.
5	Партнерство зі світовими брендами	Можливість співпраці з виробниками камер або робототехніки для виходу на міжнародні ринки.	Розробка сумісних рішень з OEM-партнерами, ліцензування технології за кордоном.

В результаті узагальнення сильних і слабких сторін проекту (табл. 4.3) та зовнішніх можливостей і загроз (табл. 4.6–4.7) складено SWOT-аналіз стартапу. До ключових сильних сторін проекту належать високотехнологічність рішення та якість стабілізації, що відповідає критичним потребам ринку. Слабкими сторонами є складність розробки та потреба у значних інвестиціях для виведення продукту на ринок. Серед зовнішніх чинників, можливості включають швидке зростання попиту на стабілізовані відеосистеми у різних секторах (медіа, безпека, промисловість) та наявність державної і приватної підтримки інновацій. Натомість основні загрози пов'язані з конкуренцією з боку відомих міжнародних брендів і високою динамікою технологій, що вимагає гнучкої стратегії поведінки на ринку. Загалом, попри наявні ризики, ринкові перспективи є сприятливими для реалізації проекту: стартап працюватиме у зростаючих сегментах і може розраховувати на підтримку з боку державних програм та зацікавлених інвесторів.

4.3 Розроблення ринкової стратегії та маркетингової програми проекту

Далі сформуємо стратегію виходу на ринок та маркетингова програма продукту. Враховуючи проведений аналіз, пропонується розглянути кілька альтернатив виходу, що зображено в табл. 4.8.

Таблиця 4.8. Альтернативи виходу на ринок

№	Альтернатива (комплекс заходів) ринкової поведінки
1	Диференційований маркетинг – орієнтація на преміум-сегмент: спеціалізовані презентації на галузевих виставках, активна PR-підтримка бренду, індивідуальне налаштування продукту під клієнта.
2	Масове охоплення ринку – акцент на зниження витрат: оптимізація виробництва та використання відкритих стандартів, агресивне ціноутворення, масова онлайн-продаж через цифрові канали.
3	Нішеве позиціонування – фокус на спеціалізованих сегментах (напр., безпека, промислові системи): формування співпраці з державними структурами й інтеграторами, створення довгострокових контрактів.

Наступним кроком є визначення цільових груп споживачів, що зображено в табл. 4.9, для кожної з яких формується портрет та профіль. Це дасть змогу персоніфікувати маркетингові зусилля і налаштувати комунікації.

Таблиця 4.9. Вибір цільових груп потенційних споживачів

№	Цільова група	Короткий опис профілю
1	Кінематографічні та телевізійні виробники	Профі – оператори камер та режисери; потребують стабілізацію для зйомки динамічних сцен. Орієнтовані на технологічний прогрес і готові інвестувати в якість.
2	Сили безпеки	Включає поліцію, рятувальні підрозділи; важливі надійність та простота інтеграції з існуючими системами; діють через тендери й держзакупівлі.
3	Промислові та інженерні компанії	Фахівці з обстеження інфраструктури (енергетика, нафта/газ, будівництво); орієнтовані на довговічність обладнання та економію часу інспекцій.

На основі виявлених альтернатив та потреб цільових груп сформульовано можливі базові стратегії розвитку, що зображено в табл. 4.10. Кожна альтернатива передбачає свою комбінацію ринкових заходів, ключові

конкурентні позиції та підсумкову базову стратегію.

Таблиця 4.10. Визначення базової стратегії розвитку проекту

№	Обрана альтернатива розвитку проекту	Стратегія охоплення ринку	Ключові конкурентні позиції	Базова стратегія розвитку
1	Диференційований маркетинг	Преміум-сегмент (високий ціновий рівень)	Висока якість стабілізації, інноваційні функції	Диференціація
2	Масове охоплення ринку (витратна стратегія)	Широкий масовий сегмент	Низька ціна, ефективне виробництво	Лідерство за витратами
3	Нішеве позиціонування	Фокус на спеціалізованих сегментах (безпека, промисловість)	Партнерство з держструктурами, адаптивність під специфічні задачі	Фокусування

Для кожного з описаних підходів були визначені цільові групи споживачів та проаналізовано, як саме слід позиціювати продукт під їх потреби. На основі зіставлення альтернатив зроблено вибір оптимальної ринкової стратегії розвитку проекту. Беручи до уваги інноваційність та сильні сторони нашого продукту, найбільш доцільною виявилась нішева стратегія з елементами диференціації. Тобто стартап фокусується на спеціалізованих сегментах (силові структури, промислові підприємства), пропонуючи їм унікальні переваги якості та надійності, замість прямої конкуренції за ціною на масовому ринку. Такий підхід дозволить зайняти стійку позицію у своєму сегменті та будувати репутацію високотехнологічного рішення.

З точки зору базових стратегій конкурентоспроможності за М. Портером, наш проект орієнтується на стратегію диференціації. Ми плануємо конкурувати, відрізняючись від інших продуктів унікальними характеристиками (точність стабілізації, адаптивність, інтеграція AI), а не найнижчою ціною. Водночас елементи фокусування на окремих сегментах ринку дозволять максимально врахувати специфіку вимог цих сегментів та мінімізувати пряме зіткнення з масовими конкурентами.

Враховуючи позицію нашого продукту, визначимо базову стратегію

конкурентної поведінки, що зображено в табл. 4.11. Цей пункт уточнює, чи використовується стратегія першопрохідця і які заходи плануються щодо основних гравців та потенційних заміників.

Таблиця 4.11. Визначення базової стратегії конкурентної поведінки

№	Чи є проект «першопрохідцем»	Обрана стратегія конкуренції
1	Так (новий вид продукту на ринку)	Використання стратегії першопрохідця – зосередження на швидкому охопленні ніші та створенні бренду. Акцент на диференціації та формуванні лояльності через інновації та якість. При взаємодії з великими конкурентами – спроба знайти партнерів, а не повністю змагатися на ціні.

Варто зауважити, що на українському ринку наш продукт фактично не має прямих аналогів, тож стартап виступає “першопрохідцем” у ніші стабілізованих підвісів для наземних платформ. Це дозволяє реалізувати переваги стратегії піонера: швидко зайняти вільну нішу, сформувати впізнаваний бренд та завоювати лояльність перших клієнтів ще до появи можливих місцевих конкурентів. Наша конкурентна поведінка будуватиметься на партнерстві та інноваціях: замість цінових воєн із глобальними гігантами ми сфокусуємося на співпраці (наприклад, інтеграції нашої технології у складі більших робототехнічних комплексів) і на постійному удосконаленні продукту. Таким чином, буде використано переваги першого гравця на ринку, а ризики швидкого копіювання мінімізуються за рахунок технологічної складності рішення.

Наступним кроком стане розробка стратегії позиціонування для кожного сегмента. У табл. 4.12 показано вимоги цільової аудиторії до товару, обрані базові стратегії, ключові конкурентні переваги проекту для цього сегмента та асоціації, які слід сформувати у споживачів.

Для успішного виходу на цільові сегменти заплановано поєднання прямих B2B-продажів та просування через демонстрації можливостей продукту. Зокрема, для сегмента кіновиробництва передбачається активна присутність на виставках кілотехніки, співпраця з продакшн-студіями і лідерами думок

(операторами, блогерами) з метою демонстрації переваг стабілізатора. Для сегментів безпеки та промисловості акцент буде зроблено на пілотних проєктах спільно з державними установами: запропоновано тестове впровадження системи у підрозділах поліції чи в енергетичних компаніях для доведення ефективності. Маркетингова комунікація орієнтуватиметься на ключові потреби кожного сегмента: якість та інноваційність – для кіновиробників, надійність та захищеність – для сектору безпеки, ефективність та професійність – для промислових клієнтів. Таким чином, буде сформовано чітке позиціонування продукту відповідно до очікувань різних груп споживачів. Глобальні тенденції підтверджують дієвість такого підходу: сучасні стабілізовані платформи завойовують лояльність користувачів саме завдяки високій стабільності роботи та якості зображення [6]. Узгодженість маркетингових повідомлень із реальними перевагами продукту забезпечить ефективне просування стартапу на ринку. [60].

Таблиця 4.12. Визначення стратегії позиціонування

№	Вимоги цільової аудиторії	Базова стратегія	Ключові конкурентні позиції стартапу	Асоціації (3 ключові)
1	Оператори кіно/ТБ: плавність кадру, сумісність з різними камерами	Диференціація (преміум)	Висока якість зображення, гнучкість налаштувань, професійний рівень	Якість, Інновації, Надійність
2	Правоохоронці, рятувальники: надійність, простота інтеграції, автономність	Фокусування (безпечний сегмент)	Швидке розгортання, захищеність конструкції, стабільність роботи	Безпека, Довіра, Технологічність
3	Інспектори/індустріальники: міцність, довговічність, точність	Фокусування (промисловий сегмент)	Підвищена міцність, адаптація до суворих умов, економія ресурсів	Ефективність, Надійність, Професіоналізм

У табл. 4.13 сформуємо ключові конкурентні переваги нашої концепції у

форматі «потреба - вигода - конкурентна перевага». Це допоможе конкретизувати маркетингові повідомлення і покращити комунікацію з клієнтами.

Таблиця 4.13. Визначення ключових переваг концепції потенційного товару

№	Потреба	Вигода, яку пропонує товар	Ключові переваги перед конкурентами
1	Якісне відеоспостереження під час руху	Різкість зображення без тремтіння	Найвища точність стабілізації (мінімальні вібрації), навіть на високій швидкості
2	Безпечне наглядове спостереження в реальному часі	Чітка картинка при пересуванні	Швидке реагування на зміни курсу та безперервна стабілізація, що відповідає потребам служби безпеки
3	Ефективне інспектування інфраструктури	Скорочення часу огляду об'єктів	Зменшення людських помилок і ризику (оператор не присутній на місці), можливість довготривалої автономної роботи

Представлені пункти ілюструють, що наш товар задовольняє базові потреби клієнтів - від забезпечення чіткого зображення до підвищення ефективності робіт. Це підсилює ідею про створення комплексного рішення: клієнт отримує значну цінність - найстабільніше зображення в русі - і при цьому може скористатися підтримкою стартапу. Такі переваги роблять продукт привабливим у порівнянні з існуючими аналогами.

Наступний етап - розглянемо «трьох рівнів» моделі товару: базової концепції, реального продукту та розширеного. Табл. 4.14 демонструє сутність кожного рівня в контексті нашого продукту.

Три рівні моделі товару демонструють, що крім самого стабілізатора, ми пропонуємо повний комплекс послуг. Наприклад, базова потреба «якісне відеоспостереження» реалізується через конкретний продукт, а розширена пропозиція додає підтримку та навчання як невід'ємні складові. Такий підхід співпадає з рекомендаціями маркетингу продукту: сучасні клієнти цінують не тільки пристрій, але й сервісні послуги.

Таблиця 4.14. Опис трьох рівнів моделі товару

Рівень товару	Сутність та складові
I. Товар за задумом (концепція)	Базова потреба споживача – плавне зображення під час руху. Це концептуальна функція гімбл: усунення трясіння, забезпечення чіткості відео чи вимірювань.
II. Товар у реальному виконанні	Основні властивості: триосьова система стабілізації з безщітковими двигунами; інтегровані IMU-датчики та алгоритми обробки даних; автономне живлення (акумулятор); міцний алюмінієвий корпус. Це – фактичний продукт, готовий до використання.
III. Розширений товар	Додаткові компоненти: технічна підтримка та сервіс (гарантія, оновлення ПЗ); навчання персоналу; можливість кастомізації під конкретні потреби клієнта; інтеграція з іншими системами (наприклад, GPS-навігацією). Ці елементи підвищують загальну цінність проекту.

Для ціноутворення розроблена модель «цінових меж». Нижня межа ціни ґрунтується на собівартості та очікуваній маржі, а верхня – на цінах порівнянних рішень на ринку. Табл. 4.15 ілюструє орієнтовні межі цінового діапазону товару.

Таблиця 4.15. Визначення меж встановлення ціни

№	Рівень цін	Характеристика
1	Нижня межа	Орієнтовно ~100 000 грн – покриває собівартість виробництва та мінімальну маржу для підтримки витрат.
2	Середня	Орієнтовно 300 000–400 000 грн – конкурентний рівень з урахуванням аналогічних пропозицій (вища за прості механічні стабілізатори, але нижча за імпортні преміум-рішення).
3	Вища межа	До ~700 000 грн – передбачена для версії преміум-класу з розширеними функціями та додатковим пакетом сервісів (навіть вище, якщо врахувати державні замовлення з великою маржею).

Таким чином, продукт планується запропонувати в кількох цінових категоріях залежно від комплектації: від базового рішення до розширених комплектацій із гарантіями і інтеграцією. Це дозволяє гнучко реагувати на різний рівень платоспроможності і потреб клієнтів.

Далі сформуємо система збуту: визначено основні канали продажів для кожної групи клієнтів, виходячи з характеру їх закупівель і комунікаційних уподобань. Враховуємо, що частина аудиторії купує через тендери та B2B, а інша – через цифрові платформи. Сформовану систему збуту зображено у табл. 4.16.

Таблиця 4.16. Формування системи збуту

№	Цільова група	Особливості закупівель	Канали комунікацій та збуту
1	Кінематографічні та телеоператори	Закупівля через спеціалізовані дилерські мережі або безпосередньо від виробника. Активне онлайн-поширення інформації.	Офіційні дилери кінообладнання, інтернет-магазини техніки, профільні виставки і конференції (IBC, NAB). Партнерські програми з кіновиробниками.
2	Сили безпеки	Державні тендери та сертифікації; довірчі відносини з інтеграторами.	Участь у державних тендерних закупівлях, презентації на виставках технологій, прямі комерційні переговори з відомствами та іншими.
3	Промислові та інженерні компанії	Проектні закупівлі через великих підрядників (EPC); фокус на безпеку і сертифікацію.	Участь у галузевих виставках (енергетика, будівництво), прямий продаж через корпоративні відділи продажів, B2B-платформи (LinkedIn), технічні семінари.

Вибір каналів збуту відповідає профілям клієнтів: медіакомпанії найчастіше купують через дилерів та онлайн-канали, держструктури – через тендери та інтеграторів, промисловість – через B2B-партнерства. Забезпечення доступності та впізнаваності продукту передбачає комбінований підхід.

Завершальним елементом маркетингової програми буде концепція комунікацій – набір повідомлень та каналів просування. Табл. 4.17 узагальнює ключові аспекти рекламних кампаній для кожної групи клієнтів, включаючи специфіку їхньої поведінки, вибір каналів зв'язку, основні позиції при позиціонуванні та центральні послання рекламних звернень.

Концепція комунікації фокусується на потребах кожного сегмента. Наприклад, відеографів ми заохочуємо через демонстрацію кінематографічної стабілізації, а силовим структурам комунікуємо надійність та безпеку. Такі повідомлення узгоджуються з ключовими перевагами, описаними раніше, і підкріплюють позиціонування проекту на ринку [60].

Таблиця 4.17. Концепція маркетингових комунікацій

№	Специфіка поведінки цільових клієнтів	Канали комунікацій	Ключові позиції для позиціонування	Завдання рекламного повідомлення	Концепція рекламного звернення
1	Профі-відеографи: активні у соціальних мережах, переглядають демо-ролики, відвідують індустриальні виставки.	YouTube-канали, профільні форуми, Instagram, галузеві виставки (кіно і ТБ).	Професійна якість зображення, надійність, простота інтеграції з камерою	Показати переваги плавного кадру для високоякісної зйомки.	«Кіно-стабільність у кожному кадрі» - акцент на кінематографічному результаті.
2	Сили безпеки: шукають технічні огляди й оголошення на спецсайтах, відвідують виставки оборонних технологій.	Галузеві конференції (DefenceTech, Security), технічні журнали, тендерні портали.	Стійкість до екстремальних умов, гарантія безпеки, довготривала підтримка	Підкреслити надійність і безпеку системи в найскладніших умовах.	«Надійний партнер у забезпеченні безпеки» - спокій та довіра через технологію.
3	Промислові інспектори: цікавляться новими технологіями на технічних семінарах і галузевих ЗМІ.	Галузеві портали, LinkedIn, виставки енергетики/будівництва.	Ефективність та безпека робіт, довговічність обладнання	Показати економію часу та ресурсів при інспекціях.	«Максимальна ефективність інспекції» - технологія, що підвищує продуктивність.

4.4 Бізнес-модель реалізації стартап-проекту та оцінювання економічної ефективності

Далі подамо бізнес-модель проекту та оцінка його економічної ефективності. Модель включає опис команди, графік реалізації, організацію

виробництва та фінансові параметри.

Команда проекту. Для успішної реалізації стартап-проекту сформовано невелику міждисциплінарну команду. Ядро команди становлять: керівник проекту (СЕО, він же автор ідеї) – відповідає за загальну координацію, стратегію і залучення ресурсів; інженер-механік – займається конструюванням підвісу, вибором матеріалів, розрахунками міцності та виготовленням прототипів; інженер-програміст (embedded-розробник) – розробляє програмне забезпечення для мікроконтролерів, алгоритми стабілізації та обробки сенсорних даних; фахівець з електроніки – відповідає за інтеграцію сенсорів, двигунів, схем живлення, а також тестування електронних компонентів; менеджер з маркетингу та продажу – займається аналізом ринку, пошуком клієнтів, комунікацією і просуванням продукту. На етапі становлення стартапу кілька ролей можуть поєднуватися одними людьми (наприклад, маркетингом спершу займається сам засновник, а інженер-програміст бере на себе функції електронщика). Крім основної команди, планується залучати консультантів та сторонніх спеціалістів за потреби: експерта з робототехніки для оцінки дизайну, військового консультанта (щоб продукт відповідав вимогам оборонних застосувань), юриста (для питань інтелектуальної власності та контрактів) тощо. Командна структура гнучка і буде розширюватися зі збільшенням масштабу проекту – зокрема, після виходу на ринок виникне потреба в окремих позиціях для підтримки клієнтів (сервісний інженер) та виробничого менеджера. Загалом, успіх стартапу значною мірою залежить від компетенцій команди, тому учасники мають доповнювати одне одного: технічні спеціалісти забезпечують інноваційність і якість продукту, а бізнес-спеціаліст – його просування і комерціалізацію.

Календарний графік реалізації. Проект реалізується поетапно згідно з розробленим планом, який охоплює приблизно 24 місяці від початку НДДКР до виходу на ринок. Основні етапи та віхи представлені нижче:

1. Дослідження та планування (0–2 міс.): уточнення технічних вимог до системи, опрацювання деталей концепції. На цьому етапі проводяться початкові випробування окремих компонентів (наприклад, тестування обраного ІМУ на

чутливість, випробування двигуна на швидкість реакції), щоб знизити технічні ризики. Паралельно команда займається пошуком партнерів і консультантів, налагодженням контактів з потенційними першими клієнтами (з метою врахувати їх вимоги наперед) і підготовкою бази для наступних етапів (закупівля необхідного обладнання для лабораторії, інструментів). Результатом етапу є детальний технічний проект та робочий план.

2. Розробка прототипу (3–8 міс.): безпосереднє конструювання та складання прототипу двовісного підвісу. Виконується 3D-проекткування конструкції (в САD-системі), виготовлення механічних компонентів каркасу (шляхом фрезерування, 3D-друку або інших методів), монтаж електронних компонентів. Паралельно розробляється програмне забезпечення: алгоритми стабілізації, калібрування сенсорів, системи керування приводами. На 6–8 місяць планується отримати перший працюючий дослідний зразок, здатний продемонструвати основну функціональність.

3. Тестування і удосконалення (9–12 міс.): проведення комплексних випробувань прототипу. Спочатку – лабораторні тести (на вібростенді або моделювання руху платформи в контрольованих умовах), потім – польові випробування на реальній рухомій платформі (наприклад, встановлення підвісу на дистанційно керований гусеничний шасі і тестування на пересіченій місцевості). Мета – виявити недоліки конструкції та програмного забезпечення. За результатами випробувань проводиться доопрацювання: можливе посилення механічної конструкції, поліпшення ізоляції від ударів, оптимізація коду (фільтрація, регулятори) для покращення швидкодії та точності. До кінця цього етапу прототип доводиться до готовності для обмеженого використання. Також на цьому етапі готується необхідна документація для наступних фаз – креслення, специфікації, керівництво користувача. Паралельно починається підготовка до виробництва: пошук підрядників, визначення процесу складання, закупівля компонентів для першої партії.

4. Початок виробництва і маркетинг (13–18 міс.): запуск малої серії – виготовлення початкової партії продукту (наприклад, 5–10 одиниць) для

випробувань у реальних умовах експлуатації та для демонстрацій клієнтам. Цей етап фактично є випуском MVP у “бою”: підвіс передається кільком обраним клієнтам/партнерам для апробації. Одночасно розгортається активна маркетингова діяльність: стартап бере участь у профільних виставках, проводить презентації для потенційних замовників, публікує промоційні матеріали. Зворотній зв'язок від перших користувачів використовується для остаточного шліфування продукту і виправлення дрібних недоліків, які могли виявитися при експлуатації (наприклад, покращення зручності інтерфейсу керування чи зміна компонування для легшого обслуговування). До кінця 18-го місяця планується отримати перші підтвержені замовлення та контракти.

5. Розширення виробництва та вихід на ринок (19–24 міс.): масштабування виробництва відповідно до отриманих замовлень. Налагоджується серійне виготовлення стабілізованих підвісів (обсяг залежатиме від попиту, орієнтовно 50–100 одиниць на рік). Паралельно стартап офіційно виходить на ринок: виконує укладені контракти, здійснює продажі першим клієнтам. Якщо попит перевищує наявні ресурси, на цьому етапі критично залучити додаткові інвестиції для розширення виробництва (закупівля обладнання, найм персоналу). Очікується, що до 24-го місяця проект досягне точки операційної готовності для стабільного комерційного функціонування. Надалі стартап переходить у фазу росту, де цикл розробки змінюється циклом вдосконалення і випуску нових версій продукту та розширення лінійки (можливо, розробка інших типів стабілізованих платформ чи аксесуарів).

Виробництво та постачальники. Стратегія виробництва нашого продукту передбачає оптимальне поєднання власних робіт та аутсорсингу. Критичні компоненти, від яких залежить унікальність і ноу-хау стартапу (наприклад, алгоритми та прошивки, збірка і калібрування системи), залишаються під повним контролем команди. Натомість виготовлення стандартних деталей та закупівля компонентів здійснюється через надійних постачальників. Зокрема: електронні компоненти – мікроконтролери, гіродатчики, силова електроніка, прецизійні мотор-редуктори –

закуповуватимуться у зарубіжних виробників. Планується співпраця з постачальниками з США, ЄС та Азії, які спеціалізуються на компонентах для робототехніки. Наприклад, для IMU можливим постачальником є компанія Analog Devices або STMicroelectronics (через офіційних дистриб'юторів), для електродвигунів – Maxon або Faulhaber (Швейцарія/Німеччина) чи їхні аналоги. Ризиком тут є залежність від імпорту, особливо з огляду на можливі логістичні труднощі або експортні обмеження. Щоб мінімізувати цей ризик, ми передбачаємо диверсифікацію постачання: укладення домовленостей з кількома альтернативними постачальниками на випадок, якщо основний не зможе виконати замовлення.

Виготовлення механічних частин (корпус підвісу, рами, кронштейни кріплення) доцільно здійснювати локально – у співпраці з українськими машинобудівними майстернями або цехами дрібносерійного виробництва. Це дозволить скоротити час і витрати на виробництво, а також швидко вносити конструктивні зміни при необхідності. Матеріали (алюмінієві сплави, сталь, композити) можна закуповувати у локальних дистриб'юторів металопрокату, а виготовлення – на підприємствах, обладнаних ЧПУ-верстатами. Наприклад, виготовлення корпусних деталей з алюмінію можна замовити на заводі або приватній майстерні в Києві чи іншому місті, де є відповідне обладнання.

Один із ключових виробничих ризиків – залежність від імпортних електронних компонентів (мікрочипів) [62]. З огляду на глобальний стан ринку електроніки (дефіцит чипів, можливі затримки), існує загроза зриву термінів через відсутність потрібних модулів. Для зменшення цього ризику в проекті прийнято рішення використовувати масово доступні модулі та компоненти, які легко придбати: наприклад, типові модулі IMU (MPU-9250 або аналогічні), поширені контролери Arduino/STM32 для прототипів, тощо. Хоча зрештою, в комерційному продукті можуть застосовуватися спеціалізовані чипи, на етапі розробки і малого виробництва ми плануємо використовувати ті, що є у вільному продажу, навіть якщо вони споживають трохи більше енергії чи мають більші габарити. Це пришвидшить розробку і дозволить уникнути простоїв.

Логістика постачання буде організована таким чином, щоб підтримувати безперервність виробництва: критичні компоненти замовлятимуться з випередженням (буферний запас на 2–3 партії виробництва). Також розглядається можливість контрактного виробництва друкованих плат: замість ручного монтажу електроніки, замовити виготовлення і монтаж плат у спеціалізованої фірми (в Україні чи Польщі) за нашими схемами – це підвищить якість і масштабованість.

Бізнес-модель і фінансова ефективність. Бізнес-модель проекту заснована на прямому продажу готового продукту і наданні супровідних сервісів. Джерелами доходу будуть продажі продукту (одноразові доходи від продажу обладнання кінцевим клієнтам та підприємствам), сервісне обслуговування (контракти на підтримку та оновлення програмного забезпечення), а також ліцензування технологій (за потреби з боку партнерів-виробників).

Як видно з наведеної бізнес-моделі, стартап матиме диверсифіковані джерела доходів (продаж обладнання і послуг) та добре продуману структуру створення цінності. Основний фокус – на наданні клієнту комплексного рішення (продукт + сервіс), що стимулюватиме як первинні продажі, так і повторні надходження від сервісного обслуговування. Витратна структура характерна для виробничого стартапу: значні інвестиції потрібні на етапі розробки, проте із зростанням обсягів виробництва собівартість одиниці знижуватиметься, покращуючи фінансові показники. Ключові партнери і ресурси відображають ставку на співпрацю (щоб не витратити надмірні кошти на створення всього з нуля) та на інтелектуальні активи (кадри, технології), які власне і формують конкурентну перевагу. В цілому, бізнес-модель орієнтована на стійкий розвиток: вона враховує як можливості масштабування (через партнерства, ліцензування), так і створює бар'єри для конкурентів (завдяки накопиченню ноу-хау та побудові довгострокових стосунків з клієнтами через сервіс).

Таблиця 4.18. Бізнес-модель стартап-проєкту

<p>Ключові партнери - Закордонні постачальники електроніки (контролери, гіроскопи, електродвигуни), а також місцеві машинобудівні цехи для виготовлення корпусних деталей.</p>	<p>Ключові види діяльності - Дослідження і проектування стабілізованого підвісу; розробка алгоритмів компенсації рухів. - Прототипування та тестування системи на платформі. - Налагодження виробництва та маркетинг: виставки, продажі через дилерів та тендерні закупівлі. - Підтримка і сервіс для клієнтів.</p>	<p>Ціннісна пропозиція - Якісна двовісна стабілізація відеокадру для рухомих платформ, що забезпечує підвищену точність зображення та надійну роботу в умовах вібрацій і зовнішніх збурень. - Висока адаптивність системи до різних типів наземної техніки і конкурентна собівартість у порівнянні з імпортними аналогами. - Проста інтеграція з існуючими оптичними системами та можливість локального обслуговування.</p>	<p>Відносини з клієнтами - Особисті B2B-перемовини і довготривалі угоди (особливо для сил безпеки та промислових замовників). - Технічна підтримка та сервісні контракти для підвищення лояльності і повторних замовлень. - Демонстрації і навчальні програми для операторів відеообладнання.</p>	<p>Споживний сегмент - Оператори рухомих платформ та роботів у кінематографії і телебаченні (відеооператори автозйомок, спортивних подій, документальних сюжетів). - Сили безпеки (поліція, приватні охоронні компанії) для мобільного відеоспостереження. - Промислові та інженерні підприємства (енергетика, будівництво, рятувальні служби) для моніторингу та інспекцій.</p>
	<p>Ключові ресурси - Проектна команда: інженери (конструктор-електронік, програміст-робототехнік, механік-конструктор гімбл) та менеджмент (маркетолог, менеджер проєкту, зовнішні консультанти). - Технічне обладнання: САД-комп'ютери, 3D-принтер для прототипів, випробувальне устаткування. - Інтелектуальні ресурси: стабілізаційні алгоритми, патент на технологію.</p>		<p>Канали збуту - Спеціалізовані дилери кіно/відеообладнання та онлайн-магазини техніки. - Галузеві виставки та конференції (IBC, NAB) для операторів відеозйомок. - Участь у державних тендерах і технічних виставках для сил безпеки; прямі переговори з державними та корпоративними замовниками. - Корпоративні відділи продажів і B2B-платформи (LinkedIn, семінари) для інженерних та промислових компаній.</p>	

Структура витрат	Потоки доходів
<ul style="list-style-type: none"> - Розробка і дослідження: зарплати інженерам, закупівля компонентів і створення прототипів. - Операційні витрати: оренда офісу/лабораторії, маркетинг, участь у виставках. - Виробничі витрати (перші партії): матеріали, виготовлення корпусів, збірка. 	<ul style="list-style-type: none"> - Продаж обладнання (одноразовий дохід від продажу підвісів кінцевим замовникам і компаніям). - Сервісне обслуговування і технічна підтримка (угоди на обслуговування, оновлення ПЗ). - Ліцензування технології (надання прав виробництва партнерам або іншим ринкам).

Для оцінки ефективності проведено попередній фінансовий аналіз. Основні витрати включають розробку (зарплати команди, закупівля компонентів, створення дослідних зразків) та операційні витрати (оренда, маркетинг). Припускаємо, що розробка MVP потребує ~\$50 тис. (собівартість прототипу та підготовка початкової документації), а перший рік виробництва (обсяг ~100 одиниць) потребуватиме ще ~\$200–300 тис. Інвестиції будуть залучені поетапно: спочатку на R&D, потім – на розгортання виробництва.

Очікувані фінансові показники:

- Необхідні інвестиції: близько 300–400 тис. дол. США (еквівалент ~12–16 млн грн) на реалізацію першої фази та вихід на ринок.
- Точка беззбитковості: досягається при виробництві і продажі ~150 одиниць (при ціні середнього сегмента ~350 тис. грн), що можна планувати до кінця 2-го року.
- Окупність інвестицій: прогнозовано 3–4 роки за умови щорічного зростання продажів на 20–30%.

Економічний ефект стартап-проекту представлено у табл. 4.19 та вона демонструє детальний розрахунок ключових фінансово-економічних показників проекту. Вихідні дані взято на основі реальних середньоринкових умов (вартість компонентів, оплата праці, оренда тощо). У таблиці представлено прогнозні річні обсяги виробництва і реалізації, собівартість та ціну одиниці продукції, загальні витрати і доходи, річний прибуток, рівень рентабельності, а також строк окупності і дисконтовані грошові потоки на горизонті 3 років.

За таких умов строк окупності проекту становить ~1,7 року, а чиста приведена вартість (NPV) за три роки є додатною (~11,6 млн грн), що

підтверджує інвестиційну привабливість стартапу.

Згідно з даними держстатистики, середня рентабельність у сфері промислового обладнання становить 15–25% [61]. Навіть у консервативному сценарії з маржею ~20% проект залишається економічно привабливим за оцінками. Окрім того, можливий доступ до грантів і державних програм може значно знизити фінансове навантаження на стартап у перші роки.

Таблиця 4.19. Економічний ефект

Показник	Рік 0	Рік 1	Рік 2	Рік 3
Обсяг виробництва і реалізації, од.	–	100	150	200
Собівартість виготовлення 1 од., грн	–	280 000	280 000	280 000
Ціна продажу 1 од., грн	–	350 000	350 000	350 000
Загальні витрати, грн	–	28 000 000	42 000 000	56 000 000
Загальний дохід (виручка), грн	–	35 000 000	52 500 000	70 000 000
Річний прибуток, грн	–	7 000 000	10 500 000	14 000 000
Рентабельність, %	–	25%	25%	25%
Початкові інвестиції (капітальні витрати), грн	14 000 000	–	–	–
Строк окупності, роки	–	–	–	~1,7
Дисконтовані грошові потоки (при $r = 10\%$), грн	-14 000 000	6 363 636	8 677 686	10 518 407
NPV за 3 роки, грн	–	–	–	~11 560 000

Юридичне супроводження. Стартап приділяє увагу правовому захисту та відповідності нормативним вимогам, аби мінімізувати юридичні ризики. Перш за все, опрацьовується питання інтелектуальної власності: у разі наявності унікальних технічних рішень у конструкції підвісу або алгоритмах стабілізації буде подана заявка на патент (або корисну модель). Захист власних розробок є важливим для запобігання копіюванню конкурентами, особливо при виході на міжнародні ринки. Паралельно стартап дотримується ліцензійних вимог щодо використання сторонніх компонентів і ПЗ (застосовуються лише ліцензовані чи open-source компоненти, щоб уникнути претензій).

При співпраці з клієнтами та постачальниками забезпечуватиметься належне договorne оформлення. Усі угоди (контракти на поставку компонентів, договори з першими замовниками) укладатимуться у письмовій формі і міститимуть стандартні положення про гарантії якості, умови сервісного обслуговування, конфіденційність тощо. Для цього залучається юридичний консультант, який допоможе скласти типові шаблони договорів. Особлива увага – гарантійним зобов'язанням: планується надавати гарантію ~1 рік на обладнання та брати на себе зобов'язання з ремонту/заміни у разі виходу з ладу не з вини користувача. Це буде прописано в договорі з клієнтом.

Дотримання стандартів якості та безпеки – ще один принцип. Продукт розробляється відповідно до вимог стандартів для електронного обладнання (зокрема, вимоги ЄС для маркування CE: електробезпека, EMC – електромагнітна сумісність, екологічні норми RoHS) [63]. На етапі серійного виробництва буде проведено необхідні сертифікаційні випробування в акредитованих лабораторіях, щоб отримати сертифікати відповідності. Це не лише юридична необхідність для продажу, а й фактор довіри клієнтів. Також враховуються вимоги щодо захисту даних: якщо система збиратиме відео/фото, треба забезпечити відповідність законам про приватність (особливо при потенційному використанні у публічних місцях) [64]. Для цього в програмному забезпеченні можуть бути передбачені механізми шифрування даних, а в угодах з користувачами – пункти про відповідальне використання отриманої інформації [65].

Щодо експортного контролю: оскільки продукт може мати подвійне призначення (цивільне і військове), при плануванні експорту стартап проконсультується з державними органами, аби отримати всі необхідні ліцензії на експорт технології, якщо такі знадобляться. Наразі стабілізований підвіс не містить заборонених компонентів і сам по собі не є зброєю, але у разі продажу за кордон, особливо в країни з санкційного списку, потрібно буде дотримуватися процедури державного експортного контролю України.

Таким чином, юридичний супровід проекту зосереджений на трьох

аспектах: захист інтелектуальної власності, належне оформлення ділових відносин та відповідність нормам/стандартам. Ці заходи знизять правові ризики і створять основу для довгострокового стабільного розвитку стартапу.

Висновки до розділу 4

У межах цього розділу було здійснено комплексне опрацювання стартап-проекту, спрямованого на створення стабілізованого двовісного підвісу для наземних мобільних платформ. Проведений аналіз світових та національних тенденцій підтвердив зростання попиту на високоточні системи стабілізації у сфері роботизованих комплексів, систем спостереження та цивільних рішень для мобільного моніторингу. Встановлено, що ринок демонструє сталу динаміку зростання, а сегмент наземних платформ посідає одну з ключових позицій завдяки активному впровадженню автономних систем керування та широкому спектру сфер застосування.

У роботі сформовано ціннісну пропозицію продукту, що включає підвищену точність стабілізації, високу адаптивність до різних категорій наземної техніки, можливість роботи в умовах вібрацій та зовнішніх збурень, а також конкурентну собівартість у порівнянні з імпортними аналогами. Було детально досліджено цільові сегменти споживачів, визначено ключові групи потенційних замовників і сформовано їх основні потреби, на які орієнтується запропонований технічний продукт.

Виконано аналіз конкурентного середовища, що показав перспективність виходу на ринок завдяки відсутності локальних виробників у даній ніші та наявності попиту з боку цивільних структур. Опрацьовано бізнес-модель за підходом «канви», визначено канали збуту, взаємодії з клієнтами, необхідні ресурси та структуру витрат. Розроблена економічна частина підтвердила комерційний потенціал стартапу та реалістичність його подальшого масштабування.

Загалом проведене дослідження дозволило сформулювати цілісне бачення стартап-проекту: від визначення ринкових потреб і концепції продукту до фінансових показників та перспектив розвитку. Отримані результати демонструють обґрунтованість та доцільність реалізації проекту.

ВИСНОВКИ

1. Сукупність отриманих науково-технічних результатів дозволяє зробити висновок, що поставлену в роботі мету досягнуто повністю. Розроблена система двовісної стабілізації забезпечує необхідні показники точності, жорсткості та швидкодії, а також має потенціал до подальшої оптимізації й масштабування. Представлені результати можуть бути використані як основа для створення промислових зразків стабілізованих оптичних модулів та інтеграції їх у роботизовані комплекси спеціального призначення.

2. Було виконано повний цикл розроблення та дослідження двовісного гіростабілізованого підвісу для відеоспостереження роботизованих наземних платформ, що працюють у небезпечних умовах. На основі проведеного аналітичного огляду визначено основні фактори, які впливають на якість стабілізації, зокрема вібрації платформи, нерівності рельєфу та температурні деформації конструкції, що обумовлює жорсткі вимоги до точності та швидкодії системи.

3. На етапі механічного проєктування створено параметричну просторову модель двовісного підвісу в CAD-середовищі. Вибір матеріалів та конструктивних рішень здійснювався з урахуванням масових обмежень і необхідного запасу міцності. Проведений статичний аналіз показав надзвичайно високий конструктивний запас: фактор безпеки FoS суттєво перевищує типовий діапазон 1,5–3, що свідчить про консервативність конструкції та потенціал до масо-оптимізації. Максимальне зміщення несучої пластини під навантаженням 20 кг становило лише $1,62 \cdot 10^{-2}$ мм, що відповідає кутовим помилкам наведення в межах часток градуса й підтверджує високу жорсткість системи.

4. Моделювання теплових впливів при нагріванні конструкції до 50 °C показало закономірне лінійне розширення, яке приводить до кутових похибок наведення на рівні часток градуса. Це потребує врахування температурної компенсації як у механічному проєктуванні, так і у програмному забезпеченні системи керування.

5. У роботі проведено підбір виконавчих механізмів. Серед розглянутих моторів обрано T-Motor GL100 KV10, що забезпечує достатній крутний момент та необхідний динамічний запас для задач стабілізації. Створена математична модель дозволила побудувати структурну схему системи керування та реалізувати контур стабілізації у середовищі Simulink.

6. Моделювання контурів стабілізації показало, що сформована система забезпечує необхідні динамічні характеристики. Перехідний процес після стрибкоподібної зміни задавальної дії завершується протягом 1–1,5 с, що задовольняє вимоги реального часу для роботизованих платформ. Відхилення у сталому режимі не перевищують декількох градусів навіть за наявності випадкових збурень амплітудою до $\pm 5^\circ$. Система не демонструє автоколивань, що підтверджує коректність вибору параметрів регуляторів та структурної схеми.

7. Отримані результати підтверджують коректність обраної стратегії поєднання механічної жорсткості конструкції з алгоритмічною стабілізацією. Висока жорсткість механічної частини забезпечує точність платформи на низьких частотах, тоді як активний контур стабілізації компенсує динамічні збурення середовища.

8. У рамках стартап-компонента роботи проведено оцінку ринкових можливостей комерціалізації розробленого технічного рішення. Визначено ключові сегменти застосування: роботи для розмінування, платформи для роботи в зонах техногенного забруднення, протипожежні наземні роботи, охоронні системи. Обґрунтовано стратегію спеціалізації на високоточних стабілізованих відеокomплексах, що дозволяє зайняти унікальну нішу на ринку. Розроблено бізнес-модель та маркетингову стратегію, які демонструють економічну життєздатність концепції.

ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ

1. Gabrlik P., Plesek J., Saska M. Multi-Robot Radiation Reconnaissance in the Chernobyl NPP Exclusion Zone [Електронний ресурс] / P. Gabrlik, J. Plesek, M. Saska – arXiv, 2020. – Режим доступу: <https://arxiv.org/abs/2006.16066> (дата звернення: 05.07.2025).
2. Görmüş M. T., Adın B. F., Yayla P. Passive Isolator Design and Vibration Damping of EO/IR Gimbal Used in UAVs / Mehmet Taha Görmüş, Bilal Faruk Adın, Paşa Yayla // International Journal of Applied Science and Technology. 2023. Vol. 4, Iss. 1.
3. Chakraborty S., Basu S. Design of a Smart Unmanned Ground Vehicle for Hazardous Environments [Електронний ресурс] / S. Chakraborty, S. Basu – arXiv, 2010. – Режим доступу: <https://arxiv.org/abs/1002.4180> (дата звернення: 05.07.2025).
4. Quenzel, J., Saska, M., Stumpf, A., & Behnke, S. Autonomous Firefighting with a UAV – Towards Integration of Perception, Navigation and Planning [Електронний ресурс] / J. Quenzel, M. Saska, A. Stumpf, S. Behnke. – arXiv, 2021. – Режим доступу: <https://arxiv.org/abs/2106.06444> (дата звернення: 05.07.2025).
5. National Research Council. Technology Development for Army Unmanned Ground Vehicles (Appendix D: Historical Perspective), 2002, National Academies Press (NAP), Washington, DC – <https://nap.nationalacademies.org/read/10592/chapter/15> (дата звернення: 12.09.2025).
6. Швачко В. В. Спеціалізований транспортний робот STR-1, 2012, FOR Швачко В.В. – <http://shvachko.net/?p=836&lang=en> (дата звернення: 12.09.2025).
7. What exactly is UGV? DefenseBridge.com, 2023 – <https://defensebridge.com/article/what-exactly-is-ugv.html> (дата звернення: 12.09.2025).

8. Guizzo E. Fukushima Robot Operator Writes Tell-All Blog, 2011, IEEE Spectrum – <https://spectrum.ieee.org/fukushima-robot-operator-diaries> (дата звернення: 12.09.2025).
9. Pierzchała M., Astrup R., Giguère P. Mapping forests using an unmanned ground vehicle with 3D LiDAR and graph-SLAM, 2018, Computers and Electronics in Agriculture, Vol.145 – <https://doi.org/10.1016/j.compag.2017.12.034> (дата звернення: 12.09.2025).
10. Ball M. AVT Develops Gyro-Stabilized Imaging Gimbals for Unmanned Systems & CUAS, 2019, Unmanned Systems Technology – <https://www.unmannedsystemstechnology.com/2019/07/avt-develops-gyro-stabilized-imaging-gimbals-for-unmanned-systems-cuas/> (дата звернення: 12.09.2025).
11. HandWiki. Gyro-Stabilized Camera Systems, 2022 – <https://encyclopedia.pub/entry/28807> (дата звернення: 12.09.2025).
12. Khattak, S., Fernandez, J., Camurri, M., & Hudjakov, A. CERBERUS: Autonomous Legged and Aerial Robotic Exploration in Subterranean Environments [Електронний ресурс] / S. Khattak, J. Fernandez, M. Camurri, A. Hudjakov та ін. – arXiv, 2022. – Режим доступу: <https://arxiv.org/abs/2201.07067> (дата звернення: 05.07.2025).
13. Munasinghe, I., Perera, A., & Deo, R. C. A Comprehensive Review of UAV-UGV Collaboration: Advancements and Challenges // J. Sens. Actuator Netw. 2024. Vol. 13, Iss. 6, Art. 81.
14. Gašparović M., Jurjević L. Gimbal Influence on the Stability of Exterior Orientation Parameters of Action Cameras for UAV Photogrammetry / M. Gašparović, L. Jurjević // Sensors. – 2017. – Vol. 17, Iss. 2. – Режим доступу: <https://www.mdpi.com/1424-8220/17/2/401> (дата звернення: 05.07.2025).
15. Zhu J., Zhang T., Shi M. ADRC-Based Line-of-Sight Stabilization for Two-Axis Gimbal System Using Neural Network Estimation / J. Zhu, T. Zhang, M. Shi // arXiv, 2021. – Режим доступу: <https://arxiv.org/abs/2112.02130> (дата звернення: 05.07.2025).

16. Agasti A., Mahapatra A., Rath A.K. Control Design for Trajectory Tracking and Stabilization of Sensor LOS on a Two-Axis Gimbal / A. Agasti, A. Mahapatra, A.K. Rath // arXiv, 2023. – Режим доступу: <https://arxiv.org/abs/2311.01859> (дата звернення: 05.07.2025).
17. Lin C.-F., Tsai C.-C., Lin C.-J. The Stabilization Loop Design for a Two-Axis Gimbal System Using LQG/LTR Controller [Електронний ресурс] / C.-F. Lin, C.-C. Tsai, C.-J. Lin // *ResearchGate*. – 2007. – Режим доступу: https://www.researchgate.net/publication/224058985_The_Stabilization_Loop_Design_for_a_Two-Axis_Gimbal_System_Using_LQGLTR_Controller (дата звернення: 06.07.2025).
18. Liu Y., Zhou M., Zhu Z. Torque Ripple Minimization of Low-Speed Gimbal Servo System Using Parameter-Optimized ESO [Електронний ресурс] / Y. Liu, M. Zhou, Z. Zhu // *ResearchGate*. – 2022. – Режим доступу: https://www.researchgate.net/publication/365147431_Torque_Ripple_Minimization_of_Low_Speed_Gimbal_Servo_System_Using_Parameter-Optimized_ESO (дата звернення: 06.07.2025).
19. Perception and sensing for autonomous vehicles under adverse weather conditions // *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*. – 2022. – Vol. 185. – P. 12–25. – Режим доступу: <https://doi.org/10.1016/j.isprsjprs.2021.12.016> (дата звернення: 12.09.2025).
20. Бурау Г. К., Вознюк О. О., Осовцев С. О., Шаблій В. В. Оцінка впливу рельєфу дороги на похибку стабілізації відеокамери мобільної робототехнічної платформи / Г. К. Бурау, О. О. Вознюк, С. О. Осовцев, В. В. Шаблій // *Вісник Інженерної академії України*. – 2017. – № 1. – С. 148–153.
21. Бурау Н. І., Осовцев А. В. Аналіз впливу середовища на роботу систем стабілізації мобільних платформ // *Автоматика*. – 2023. – № 1(42). – С. 39–47.
22. Thermal expansion: How it affects motion system components // *Power Motion Tech*. – [Електронний ресурс]. – Режим доступу:

<https://www.powermotiontech.com/technologies/system-design/article/55294222/how-thermal-expansion-data-improves-motion-system-component-design> – Назва з екрана.

23. Kędzierski, M., Fryskowska, A., Walicka, A. Influence of lower atmosphere on UAV imagery in remote sensing missions // Remote Sensing. – 2019. – Vol. 11(10). – Art. 1214. – DOI: <https://doi.org/10.3390/rs11101214>

24. Environmental effects on motion components in robots // Motion Control Tips. – [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://www.motioncontroltips.com/motion-components-and-environmental-effects-on-robot-performance-and-life> – Назва з екрана.

25. Grepow UAV Systems. EO IR Imaging Gimbal for UAV with 2-axis Stabilised Platform and HD+IR Dual Sensor [Електронний ресурс] / Grepow UAV Systems. – Режим доступу: <https://www.grepowuav.com/product/2-axis-eo-ir-gimbal.html> (дата звернення: 06.01.2025).

26. Dassault Systèmes. SOLIDWORKS. Simulation Capabilities Overview [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://www.solidworks.com/product/solidworks-simulation> (дата звернення: 11.10.2025).

27. Temperature compensated IMU stabilization // SACA Europe. – 2023. – [Електронний ресурс]. – Режим доступу: https://www.saca-europe.com/wp-content/uploads/2023/06/SACA_Europe_Stabilization.pdf – Назва з екрана.

28. MatWeb. Aluminum 6061-T6; 6061-T651. – Режим доступу: <https://matweb.com/search/DataSheet.aspx?MatGUID=ff8c3743793a4daaa6b3a7e3c06c12fd> (дата звернення: 11.09.2025).

29. MatWeb. Aluminum 6063-T6. – Режим доступу: <https://matweb.com/search/DataSheet.aspx?MatGUID=f706b21efda14a42bcb4743e2ff1a8ef> (дата звернення: 11.09.2025).

30. MatWeb. Aluminum 2024-T3. – Режим доступу: <https://matweb.com/search/DataSheet.aspx?MatGUID=b04db0f944fa440eb92e7c72b7d8fc1c> (дата звернення: 11.09.2025).

31. MatWeb. Aluminum 7075-T6. – Режим доступа: <https://matweb.com/search/DataSheet.aspx?MatGUID=2947a1bee66540a99e145ca7f2f26688> (дата звернення: 11.09.2025).
32. AZoM. Magnesium Alloy AZ91D. – Режим доступа: <https://www.azom.com/article.aspx?ArticleID=12233> (дата звернення: 11.09.2025).
33. AZoM. Titanium Alloy Ti-6Al-4V (Grade 5). – Режим доступа: <https://www.azom.com/properties.aspx?ArticleID=1547> (дата звернення: 11.09.2025).
34. Polymaker. PolyLite™ ASA. Product Information Sheet (TDS) [Електронний ресурс] / Polymaker. – Режим доступа: https://polymaker.com/wp-content/tech-docs/PolyLite_ASA_PIS_EN_V1.3.pdf (дата звернення: 12.09.2025).
35. Polymaker. PolyLite™ ABS. Technical Data Sheet (TDS) [Електронний ресурс] / Polymaker. – Режим доступа: https://polymaker.com/wp-content/uploads/lana-downloads/PolyLite-ABS_TDS_EN_V5.5.pdf (дата звернення: 12.09.2025).
36. Ultimaker. Ultimaker PETG - Technical Data Sheet v1.00 [Електронний ресурс] / Ultimaker. – Режим доступа: <https://um-support-files.ultimaker.com/materials/2.85mm/tds/PETG/Ultimaker-PETG-TDS-v1.00.pdf> (дата звернення: 12.09.2025).
37. MatWeb. Polyram PlusTek PB142 Nylon 6 for Injection Molding - Technical Data (MatWeb) [Електронний ресурс] / MatWeb. – Режим доступа: <https://www.matweb.com/search/datasheet.aspx?MatGUID=7007dbc9e4bd4c938e1d1a5ee533252d> (дата звернення: 12.09.2025).
38. MatWeb. Chi Mei Wonderlite® PC-175 Polycarbonate - Data Sheet (MatWeb) [Електронний ресурс] / MatWeb. – Режим доступа: <https://matweb.com/search/datasheet.aspx?MatGUID=45b1b75a2aba474b9c2c4f1d68b31dee> (дата звернення: 12.09.2025).

39. 3DXTECH. ThermaX™ PEI (Ultem) - product & TOM information [Електронний ресурс] / 3DXTECH. – Режим доступу: <https://www.3dxtech.com/products/thermax-pei-1010> (дата звернення: 12.09.2025).
40. Budynas R. G., Nisbett J. K. *Shigley's Mechanical Engineering Design*. 10th ed. New York: McGraw-Hill Education, 2015. 1144 p.
41. Meriam J. L., Kraige L. G., Bolton J. N. *Engineering Mechanics: Dynamics*. 9th ed. Hoboken: Wiley, 2018. 792 p.
42. Budynas R. G., Nisbett J. K. *Shigley's Mechanical Engineering Design*. – 10th ed. – McGraw-Hill Education, 2015. – 1104 p.
43. SolidWorks Help. Thermal and Thermal–Structural Studies in SolidWorks Simulation [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://help.solidworks.com/> (дата звернення: 17.09.2025).
44. CubeMars. Brushless Gimbal Motor GL100 KV10: Datasheet [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://store.tmotor.com> (дата звернення: 18.09.2025).
45. Maxon Motor AG. EC 45 flat – 50 W, 12/24 V, Datasheet [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://www.maxongroup.com/maxon/view/product/motor/ecmotor/ecflat/EC45flat> (дата звернення: 18.09.2025).
46. DR. Fritz Faulhaber GmbH & Co. KG. Series 3274 BP4, Datasheet [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://www.faulhaber.com> (дата звернення: 18.09.2025).
47. KDE Direct. KDE8218XF-120 Brushless Motor: Product Data [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://www.kdedirect.com> (дата звернення: 18.09.2025).
48. Хейфец Л.С. Електромеханічні системи: підручник. – К.: Вища школа, 2018. – 328 с.
49. *Keysight Technologies*. The Art of Calculating Time Constants in RC and RL Circuits [Електронний ресурс]. – Режим доступу:

<https://www.keysight.com/used/us/en/knowledge/formulas/time-constant-formula> (дата звернення: 18.09.2025).

50. Нестеренко О. І., Рижков Л. М., Осокін В. С. Математичні моделі гіростабілізатора за різних режимів його роботи – Режим доступу: <https://doi.org/10.20535/0203-3771402020248656> (дата звернення: 04.11.2025).

51. H. Qixuan, J. Jiaying, X. Xiang, Y. Youxin, Y. Yuhao, W. Wei, R. Runjing & Z. Zhisheng, „Modeling and Control of a Two-Axis Stabilized Gimbal Based on Kane Method“, *Sensors*, vol. 24, no. 11, art. 3615, 2024. DOI: 10.3390/s24113615.

52. S. Boonto, *Lecture 8: Transfer Functions – Mechanical Systems*, Dept. of Control Systems & Instrumentation Engineering, King Mongkut’s University of Technology Thonburi, Thailand, 2025. [Online]. DOI: https://inc.kmutt.ac.th/~sudchai.boo/Teaching/inc341s/lecture8_2025_tf_mech.pdf (accessed Nov 10 2025).

53. Н.І. Бурау, Д.О. Півторак. Теорія автоматичного управління : навч. посіб. Київ : КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2021. 57 с.

54. Halim S., Yunus H. M., Abdullah N. A. Design and Implementation of a Gimbal System for UAV Laser Targeting Application // *Journal of Physics: Conference Series*. – 2022. – Vol. 2616, No. 1. – P. 012030. – DOI: 10.1088/1742-6596/2616/1/012030.

55. Dataintel. Gimbal Stabilization System Market Research Report 2033 [Електронний ресурс] - Режим доступу: <https://dataintel.com/report/gimbal-stabilization-system-market#:~:text=Vehicle,range%20of%20vehicle%20platforms%20and> - (дата звернення: 18.11.2025)

56. “Ukraine’s defense industry increased production of ground drones by 15 times,” *Military.com*, 2025. [Online]. DOI: <https://military.com/en/news/ukraine-s-defense-industry-increased-production-of-ground-drones-by-15-times/> (accessed 18 Nov. 2025).

57. Grand View Research. Security Robots Market Size, Share & Trends Report, 2030 [Электронный ресурс] / Grand View Research. - Режим доступа: <https://www.grandviewresearch.com/industry-analysis/security-robots-market-report> (дата звернения: 18.11.2025).
58. GMI Insights. *Gimbal Market Size & Share, Growth Analysis Report 2032* [Электронный ресурс] / GMI Insights. - Режим доступа: <https://www.gminsights.com/industry-analysis/gimbal-market> (дата звернения: 18.11.2025).
59. OpenPR. Military Robotics Market 2025 Growth Outlook – Ukraine Combat Robots, Ukraine Plans to Deploy ... [Электронный ресурс] / OpenPR. - Режим доступа: <https://www.openpr.com/news/4145829/military-robotics-market-2025-growth-outlook-ukraine-combat#:~:text=%E2%80%A2%20Ukraine%20Plans%20to%20Deploy,procurement%20compared%20to%20previous%20years> (дата звернения: 18.11.2025).
60. Dataintel. *Gimbal Stabilization System Market Research Report 2033* [Электронный ресурс] / Dataintel. - Режим доступа: <https://dataintel.com/report/gimbal-stabilization-system-market> (дата звернения: 18.11.2025).
61. Boston Consulting Group. *Aftermarket Services Drive Growth and Higher Margins for Industrial Manufacturers* [Электронный ресурс] / Boston Consulting Group. – Режим доступа: <https://www.bcg.com/publications/2025/aftermarket-services-drive-growth-for-industrial-manufacturers> (дата звернения: 06.12.2025).
62. SEMICONDUCTOR INDUSTRY ASSOCIATION (SIA). *State of the U.S. Semiconductor Industry: 2021* [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://www.semiconductors.org/wp-content/uploads/2021/09/2021-SIA-State-of-the-Industry-Report.pdf> (дата звернения: 12.09.2025).
63. European Commission. *CE marking* [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://single-market-economy.ec.europa.eu/single-market/goods/ce->

marking_en (дата звернення: 12.09.2025).

64. Regulation (EU) 2016/679 of the European Parliament and of the Council of 27 April 2016 [Електронний ресурс] (General Data Protection Regulation). – OJ L119, 04.05.2016. – Режим доступу: <https://gdpr-info.eu> (дата звернення: 12.09.2025).

65. Оцоколіч В. Чим є GDPR і яке його значення для українського бізнесу? [Електронний ресурс] // Бізнес. – 2025. – Режим доступу: https://biz.ligazakon.net/analytics/234501_chim--gdpr--yake-yogo-znachennya-dlya-ukranskogo-bznesu (дата звернення: 12.09.2025).

ДОДАТОК А

СПИСОК НАУКОВИХ ПРАЦЬ Томчука Б.М.
(Прізвище, ім'я, по батькові)

№ з/п	Найменування праць	Назва видавництва, журналу (номер, рік) або номер авторського свідоцтва, номер диплома на винахід	Кількість друківаних аркушів або сторінок разом	Прізвища співавторів праць
1	2	3	4	5
1	СИСТЕМИ СТАБІЛІЗАЦІЇ ОБЛАДНАННЯ РОБОТИЗОВАНИХ НАЗЕМНИХ ПЛАТФОРМ: СТАН І ТЕНДЕНЦІЇ РОЗВИТКУ	Наукові праці ДонНТУ. Серія «Проблеми моделювання та автоматизації проектування». 2025. № 2(22).	8	Бурау Н.І.
2	ПОРІВНЯЛЬНИЙ АНАЛІЗ ВИКОНАВЧИХ ЕЛЕМЕНТІВ СИСТЕМ СТАБІЛІЗАЦІЇ	Збірник праць 6-та Міжнародної науково-практичної конференції «Evolving Science: Theories, Discoveries and Practical Outcomes», 15-17 грудня 2025	5	

Автор _____
(Підпис)

Томчук Б.М.
(Прізвище, ім'я, по батькові)

Зав. Каф. КІОНС _____
(Підпис)

Надія БУРАУ