

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
Сумський державний університет
Факультет електроніки та інформаційних технологій
Кафедра комп'ютеризованих систем управління

«До захисту допущено»

Завідувач кафедри КСУ

_____ Петро ЛЕОНТЬЄВ

_____ 2023 р.

КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА
на здобуття освітнього ступеня магістр

зі спеціальності 151 – Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології
освітньо-професійної програми

«Комп'ютеризовані системи управління та робототехніка»

на тему: «Автоматизована система керування бойового модулю на рухомій
платформі»

Здобувача групи СУ.м-21

Машенцов Максим Олександрович

Кваліфікаційна робота містить результати власних досліджень. Використання ідей, результатів і текстів інших авторів мають посилання на відповідне джерело.

Максим МАШЕНЦОВ

(підпис)

Керівник: завідувач кафедри КСУ, к. т. н. Петро ЛЕОНТЬЄВ _____

(підпис)

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
СУМСЬКИЙ ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
Кафедра комп'ютеризованих систем управління

ЗАТВЕРДЖУЮ:

Зав. кафедри КСУ

_____ Петро ЛЕОНТЬЄВ
_____ 2023 р.

ЗАВДАННЯ

на кваліфікаційну роботу магістра здобувачу вищої освіти

Машенцову Максиму Олександровичу

(Прізвище, ім'я, по-батькові повністю)

1. Тема кваліфікаційної роботи: автоматизована система керування бойового модулю на рухомій платформі

затверджена наказом ректора СумДУ № 1097-VI від " 09 " жовтня 2023 р.

2. Термін здачі студентом закінченої роботи: 15 грудня 2023 р.

3. Вихідні дані до кваліфікаційної роботи:

звіт з переддипломної практики, наукові публікації, статті, технічна документація та перелік літературних джерел з матеріалом про подібні системи

4. Зміст кваліфікаційної роботи (питання, що підлягають розробленню):

підбір та аналіз літератури і першоджерел за темою кваліфікаційної роботи, аналіз сучасних систем керування для роботизованих платформ, визначення ключових завдань для побудови системи стабілізації та точності позиціонування обладнання на роботизованій платформі, визначення та підбір засобів автоматизації для ефективної роботи системи керування роботизованої платформи, впровадження алгоритмів керування на реальному об'єкті.

5. Перелік графічних матеріалів:

38 рисунків, 4 таблиці, 4 додатки.

6. Календарний план виконання роботи

Номер етапу	Зміст етапу виконання роботи	Термін виконання
1	Підбір та аналіз літератури і першоджерел за темою кваліфікаційної роботи	01.09.2023-28.09.2023
2	Аналіз сучасних систем керування для роботизованих платформ	29.09.2023-10.10.2023
3	Визначення ключових завдань для побудови системи стабілізації та точності позиціонування обладнання на роботизованій платформі	11.10.2023-21.10.2023
4	Визначення та підбір засобів автоматизації для ефективної роботи системи керування роботизованої платформи	22.10.2023-29.10.2023
5	Розробка програмно-апаратного комплексу для бойового модулю	30.10.2023-27.11.2023
6	Впровадження алгоритмів керування на реальному об'єкті	28.11.2023-11.12.2023
7	Оформлення дипломного проекту та технічної документації.	12.12.2023-15.12.2023

7. Дата видачі завдання " 01 " вересня 2023 р.

Керівник проекту:
К. т. н., зав. каф КСУ

Петро ЛЕОНТЬЄВ

(підпис)

Здобувач:
студент гр. СУ.м-21

Максим МАШЕНЦОВ

(підпис)

АНОТАЦІЯ

Тема роботи: Автоматизована система керування бойового модулю на рухомій платформі.

Автор: Машенцов Максим Олександрович; Сумський державний університет; Кваліфікаційна робота магістра; Суми 2023.

Науковий керівник: Леонт'єв Петро Володимирович; кандидат технічних наук, завідувач кафедри КСУ.

Робота містить вступ, п'ять розділів та висновок в основному тексті, загальним обсягом 48 сторінок, 38 рисунків, 27 джерел.

В першому розділі виконується підбір та аналіз літератури, першоджерел за темою кваліфікаційної роботи. В другому розділі проводиться аналіз сучасних, подібних систем автоматизації, розглядаються переваги та недоліки, було створено структурну схему системи стабілізації. В третьому розділі визначаються ключові завдання для побудови системи стабілізації та точності позиціонування роботизованої платформи. В четвертому розділі виконується підбір засобів автоматизації згідно сформованим критеріям. В п'ятому розділі виконується створення програмного забезпечення, алгоритмів керування, впровадження їх на реальному об'єкті.

Реалізовано програмне забезпечення, алгоритми, блок - схеми, створено протокол комунікації для забезпечення надійного зв'язку між системою автоматизації та пультом керування.

Розроблена система автоматизації може широко використовуватись у військовій та цивільній сферах через те що система має якісну стабілізацію, точність позиціонування роботизованої платформи та моніторинг цілі.

Ключові слова: ROS, робот, роботизована платформа, турель, основний блок, блок керування, блок руху, структурна схема, PMSM, двигун постійного струму, обчислювальний елемент, давач орієнтації у просторі, акселерометр, гіроскоп, COBS, протокол, регулятор, програмне забезпечення.

ЗМІСТ

СКОРОЧЕННЯ І УМОВНІ ПОЗНАЧЕННЯ	6
ВСТУП	7
1 ПІДБІР ТА АНАЛІЗ ЛІТЕРАТУРИ І ПЕРШОДЖЕРЕЛ ЗА ТЕМОЮ КВАЛІФІКАЦІЙНОЇ РОБОТИ	8
2 АНАЛІЗ СУЧАСНИХ СИСТЕМ КЕРУВАННЯ ДЛЯ РОБОТИЗОВАНИХ ПЛАТФОРМ	16
2.1 Програмні комплекси для створення роботизованих платформ	16
2.1.1 ROS (Robot Operating System)	16
2.1.2 MATLAB Robotics System Toolbox	17
2.2 Сучасні роботизовані платформи у військовій сфері	18
2.3 Структурна схема системи стабілізації роботизованої платформи	22
3 ВИЗНАЧЕННЯ КЛЮЧОВИХ ЗАВДАНЬ ДЛЯ ПОБУДОВИ СИСТЕМИ СТАБІЛІЗАЦІЇ ТА ТОЧНОСТІ ПОЗИЦІОНУВАННЯ ОБЛАДНАННЯ НА РОБОТИЗОВАНИЙ ПЛАТФОРМІ	24
4 ВИЗНАЧЕННЯ ТА ПІДБІР ЗАСОБІВ АВТОМАТИЗАЦІЇ ДЛЯ ЕФЕКТИВНОЇ РОБОТИ СИСТЕМИ КЕРУВАННЯ РОБОТИЗОВАНОЇ ПЛАТФОРМИ	25
4.1 Підбір приводів для системи стабілізації та моніторингу	27
4.2 Підбір давача орієнтації у просторі	32
4.3 Підбір обчислювальної складової системи	41
5 ВПРОВАДЖЕННЯ АЛГОРИТМІВ КЕРУВАННЯ НА РЕАЛЬНОМУ ОБ'ЄКТІ	43
5.1 Структурний синтез системи керування	43
5.2 Параметричний синтез системи керування	47
5.3 Реалізація алгоритмів	52
ВИСНОВОК	56
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ	57
Додаток А	60
Додаток Б	61
Додаток В	62
Додаток Г	63

СКОРОЧЕННЯ І УМОВНІ ПОЗНАЧЕННЯ

АПЗ – апаратно-програмні засоби

СС – система стабілізації

МК – мікроконтролер

ПЗ – програмне забезпечення

ПУ – пристрої управління

МР – мобільний робот

ВП - виконуючий пристрій

ГС – гіроскопічний стабілізатор

АТ – автоматична турель

ДПС – двигун постійного струму

ЧП – черв'ячна передача

НМ – ньютон на метр

RPM - rotate per minutes

PMSM – Permanent Magnet Synchronous Motor

DMIPS – dhrystone million operations per seconds

MPIS – million operations per seconds

DSP – digital signal processor

FPU – floating point unit

COBS – Consistent Overhead Byte Stuffing

ВСТУП

На сьогоднішній день швидкий прогрес нанотехнологій і загальний розвиток технологій взагалі веде до впровадження автоматизованих систем у життя людини. Механізми, які раніше не зустрічалися, тепер активно впроваджуються у різних галузях, таких як обслуговування, управління та інші. Промисловість та військовий сектор також не залишаються осторонь цього розвитку. Швидко роботизована техніка замінює важку та небезпечну ручну працю, що призводить до підвищення продуктивності, покращення якості роботи і зменшення нещасних випадків на виробництві.

Автономні інтелектуальні машини стають невід'ємною частиною військової техніки, надаючи значні переваги в автономності, безпеці особового складу і результативності. Таким чином, стабілізація або фіксація озброєння на цілі стає одним з головних завдань мобільних військових платформ, щоб забезпечити точне поразіння цілей або здійснення розвідки.

Дипломний проект спрямований на аналіз алгоритмів стабілізації положення озброєння роботизованої платформи з метою виявлення можливих проблем та обґрунтування ефективності алгоритмів. Перший крок - огляд наявних літературних джерел для визначення недоліків існуючих алгоритмів стабілізації.

Детальний аналіз сучасних систем керування для роботизованих платформ є наступним етапом. Після визначення основних принципів метою є виявлення можливих проблем системи та прийняття тактичних рішень для їх вирішення. В результаті генерації моделі системи та розв'язання можливих проблем обирається відповідне апаратне забезпечення для реалізації проекту відповідно до технічного завдання.

Метою дипломного проекту є визначення якісного програмно-апаратного комплексу та алгоритмів для забезпечення високої якості стабілізації.

1 ПІДБІР ТА АНАЛІЗ ЛІТЕРАТУРИ І ПЕРШОДЖЕРЕЛ ЗА ТЕМОЮ КВАЛІФІКАЦІЙНОЇ РОБОТИ

Для кращого розуміння поставленої задачі магістерської роботи, було знайдено та проаналізовано літературу та джерела які пов'язані зі стабілізацією роботизованої платформи.

В патенті [9] описано роботизовану гусиничну платформу. Основна функція цього робота - детектування пострілів і розрахунок поправки для стабілізації під час пострілу. Ця характеристика має велике значення для поліпшення якості стабілізації. Відповідно до патенту, гусинична роботизована платформа представляє собою інноваційний дизайн з баштовим виглядом турелі.

Цей дизайн забезпечує високу маневреність та стабільність руху робота на різних типах поверхні. Гусинична система має додаткові переваги, такі як здатність подолати важкі перешкоди та працювати в різних кліматичних умовах. Однак, основною властивістю цієї роботизованої платформи є її здатність детектувати постріли та розраховувати поправку для стабілізації під час пострілу. Це значно підвищує точність та ефективність стрільби, а також забезпечує швидку реакцію на загрози. Завдяки цій властивості, гусинична роботизована платформа може використовуватися в різних сферах, включаючи військовий та безпековий сектори.

Висновок, роботизована гусинична платформа з баштовим видом турелі, описана в патенті, представляє собою інноваційну розробку, що має великий потенціал у військових, безпекових та інших галузях. Здатність детектувати постріли та розраховувати поправку для стабілізації під час пострілу значно покращує точність та ефективність стрільби, роблячи робота важливим інструментом для забезпечення безпеки та ефективності завдань, пов'язаних зі стрільбою. Завдяки інноваційному дизайну та здатності подолати перешкоди, ця платформа також може успішно функціонувати в різних умовах. Загалом, дана розробка є кроком вперед у розвитку робототехніки та внесе вагомий внесок у сферу автоматизації та безпеки.

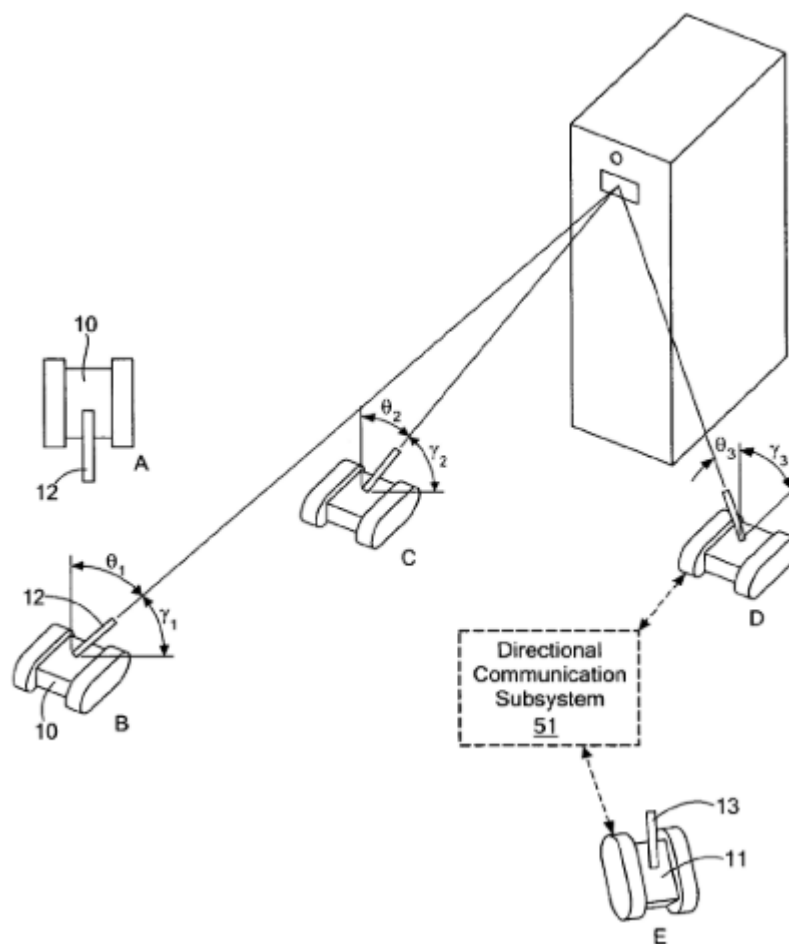


Рисунок 1.1 - Загальний вигляд з патенту [9]

У даному патенті [7] розглядається роботизована платформа туреллю незвичної форми, яка має потенціал для забезпечення високого ступеня прохідності по складно-рельєфній місцевості. Описано цікавий алгоритм роботи пристрою під час розгортання та згортання робота, що дозволяє досягти стабілізації. Також розглянуто альтернативний спосіб використання турелі на роботизованій платформі. Ця інформація може бути корисною для аналізу існуючих баз для використання турелі. У результаті аналізу цієї роботизованої платформи з туреллю незвичної форми можна виділити наступні переваги.

Переваги:

- Високий ступінь прохідності: Роботизована платформа з туреллю незвичної форми може забезпечити високий ступінь проходження по складно-рельєфній місцевості, що робить її цінним рішенням для діяльності в умовах змінного терену.
- Стабілізація: Застосування цікавого алгоритму роботи девайсу під час розгортання та згортання робота дозволяє досягти стабілізації платформи. Це є важливим фактором для забезпечення точності і надійності роботи.
- Альтернативний спосіб використання: Платформа з туреллю може бути використана у різних цілях, що розширює її потенціал застосування.

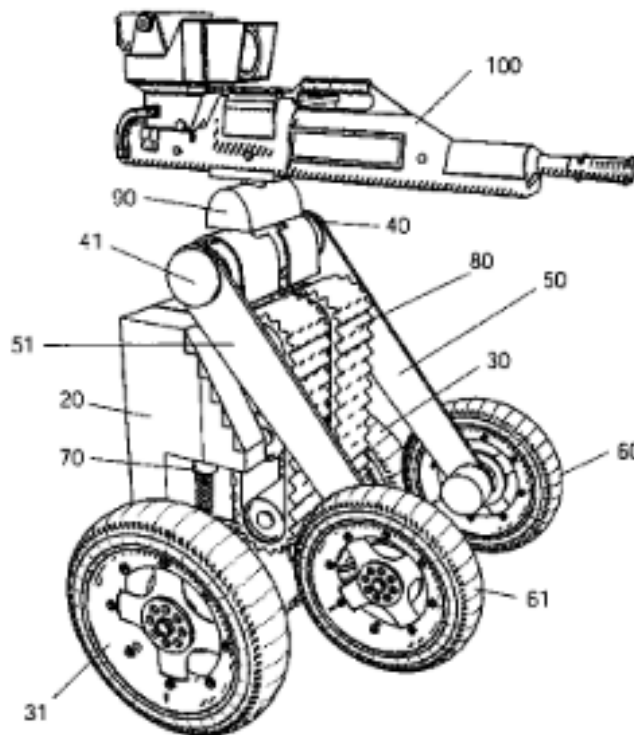


Рисунок 1.2 - Загальний вигляд установки з патенту [7]

Двоетапну стабілізацію представлено в патенті [2], яка базується на використанні низько- та високодинамічних об'єктів, що дозволяє досягти високої якості стабілізації. Ця інформація є цінним ресурсом для майбутніх досліджень у цій області. Після аналізу цього патенту можна виокремити переваги та характеристики двоетапної стабілізації.

Переваги:

- Висока якість стабілізації: Застосування двоетапної стабілізації, що побудована на основі низько- та високодинамічних об'єктів, дозволяє досягти високої якості стабілізації. Це забезпечує точність та стабільність роботи пристрою в різних умовах.
- Ефективність роботи: Двоетапна стабілізація дозволяє досягти ефективної роботи пристрою, забезпечуючи надійну стабілізацію навіть при значних зовнішніх впливах.
- Структурні схеми: У патенті наведені структурні схеми блоків, необхідних для організації даного типу стабілізації. Це надає додаткову корисну інформацію для подальшого розвитку та вдосконалення стабілізаційних систем.

Недоліки:

- Вимоги до обладнання: Двоетапна стабілізація може вимагати використання спеціалізованого обладнання та складних структурних схем. Це може становити виклик для реалізації системи в практичних умовах.

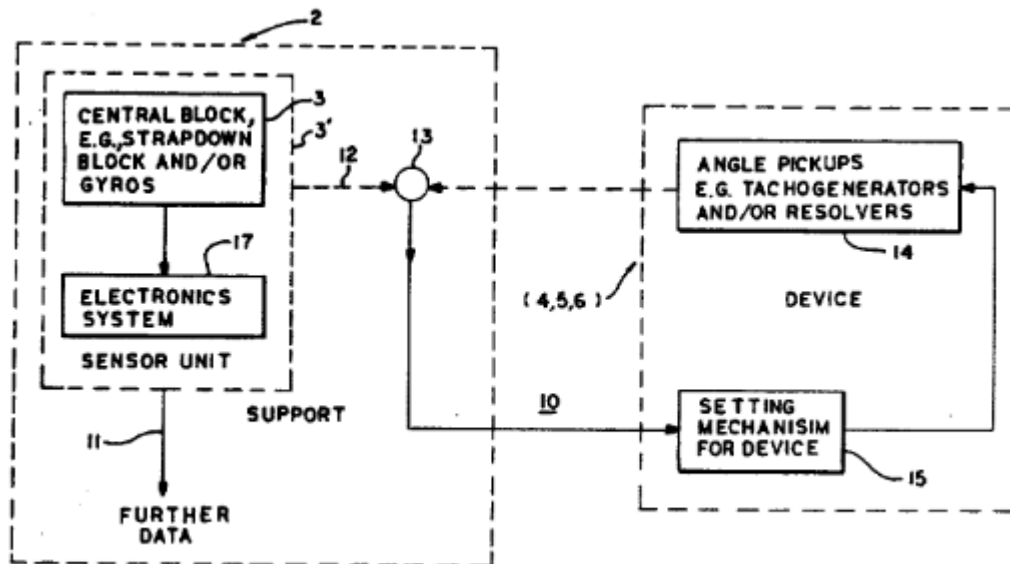


Рисунок 1.3 - Структурна схема взята з патенту [2]

Патент [10] розглядає систему стабілізації турелі, зокрема для відеозйомки. Описана структура системи, конструкція та потенційні рішення для проблем стабілізації. Також розглянуто цікаве рішення використання ізоляторів для контролю лінійного прискорення. У даному патенті представлена цінна інформація, яка може бути використана для подальшої кваліфікаційної роботи з системами стабілізації турелі. Детальний опис структури, конструкції та потенційних рішень дає змогу розуміти принципи їх роботи та можливості впровадження.

Переваги:

- Інформація про структуру системи: Патент надає детальний опис структури системи стабілізації турелі, що дозволяє зрозуміти її компоненти та їх взаємодію. Це корисна вихідна точка для розробки власних рішень та адаптації до конкретних потреб.
- Цікаве рішення з ізоляторами: Патент пропонує цікаве рішення з використанням ізоляторів для контролю лінійного прискорення. Це може допомогти забезпечити більш точну та стабільну роботу системи.

Недоліки:

- Обмежене застосування: Описана система стабілізації призначена переважно для відеозйомки, що може обмежувати її використання в інших сферах. Потребує додаткової адаптації для конкретних завдань та потреб користувача.
- Залежність від ізоляторів: Використання ізоляторів може вимагати спеціального обладнання та технологічних вимог. Це може підвищити складність впровадження та вартість системи стабілізації.

В кваліфікаційній роботі магістра [11] зображено інноваційний підхід до створення системи стабілізації кулеметної турелі. Використання давача відстані який знаходиться знизу рухомої платформи, та надає інформації про зміну рел'єфу може суттєво збільшити точність системи стабілізації. Також перевагою даної роботи є наявність структурних схема, та добре описано створений регулятор з використанням давача відстані для стабілізації.

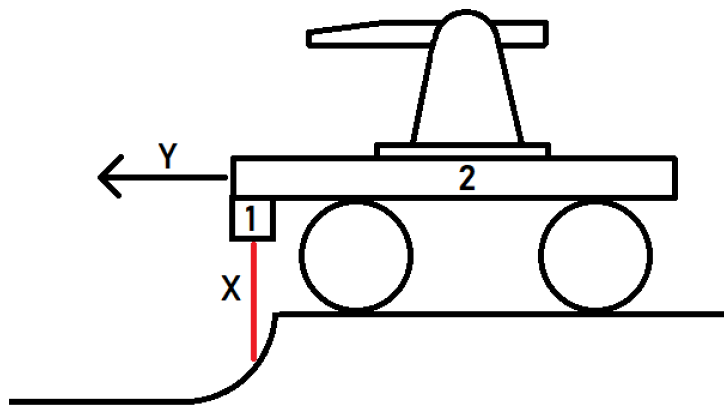


Рисунок 1.4 - Схематичне відображення роботи системи [11]

На (рис. 1.4) розглядається основний принцип функціонування системи. На схемі видно два основні компоненти: (1) - лазерний датчик відстані та (2) - рухома платформа з колісною базою. У схемі представлені дві ключові величини, які є необхідними для вивчення нового коефіцієнта впливу на систему управління. Перша величина - це швидкість (Y), з якою рухається платформа, а друга - це відстань (X) від датчика до поверхні ґрунту.

Додатково можна врахувати другорядні величини, які можуть впливати на математичний розрахунок системи, такі як радіус колеса для створення траєкторії руху платформи та тип ґрунту, по якому вона рухається.

Суть цього принципу полягає в визначенні залежності глибини перешкоди від швидкості руху платформи та діаметру колеса. Це дозволяє ввести новий коефіцієнт прогнозування відхилень системи та прискорити реакцію системи, оскільки датчик розташований спереду.

Якщо застосувати цей принцип управління для стабілізації роботизованої платформи на прикладі людини, то під час руху людина користується зором, відчуттям простору та тактильними відчуттями, щоб ефективно утримувати баланс. Класичні методи стабілізації базуються лише на орієнтації сенсорів відчуття простору і не враховують оточуючого середовища, в якому знаходиться об'єкт управління. Знову звертаючись до прикладу з людиною, це можна порівняти зі стабілізацією при закритих очах, орієнтуючись лише на тактильні сенсори.

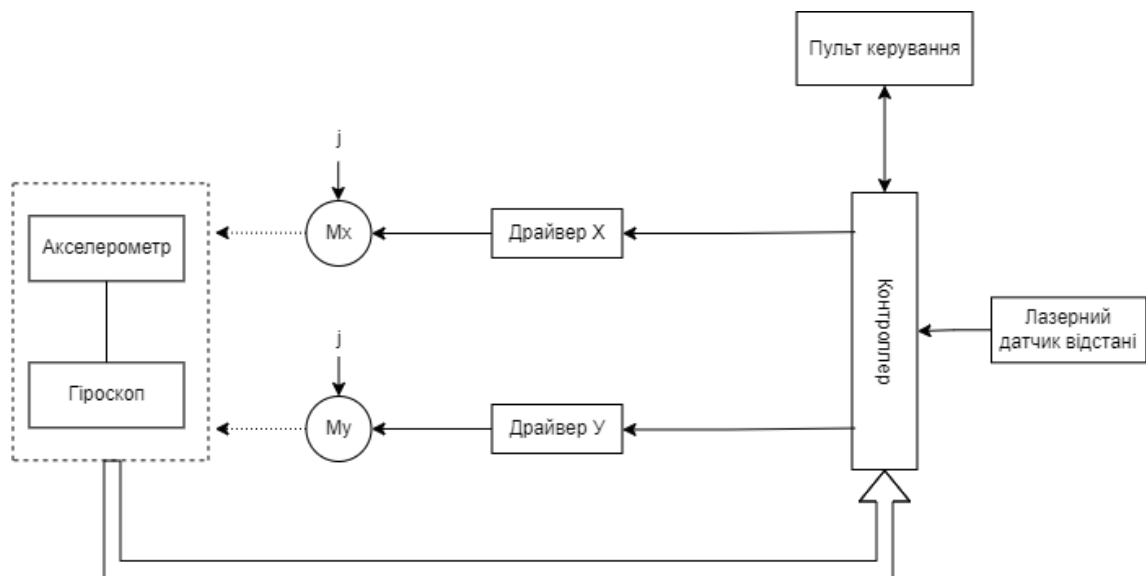


Рисунок 1.5 – Структурна схема системи стабілізації з роботи [11]

В роботі [12] досліджуються складові, що констатують систему, і наводиться короткий опис цієї системи. Визначаються критерії для системи та проводиться аналіз факторів, які впливатимуть на систему управління. Детально описано режими роботи системи та функції пульта управління, а також розглядає

наявні контури керування та їх склад. Проведений відбір засобів автоматизації відповідно до сформованих критеріїв та виконано моделювання системи, синтез регулятора. В роботі описано алгоритми роботи та інтерфейси зв'язку між блоками, також створено математичну модель системи керування та розроблено алгоритми для автоматичного слідування за ціллю. Використання даного джерела є доцільним, та допоможе в створенні системи стабілізації та моніторингу.

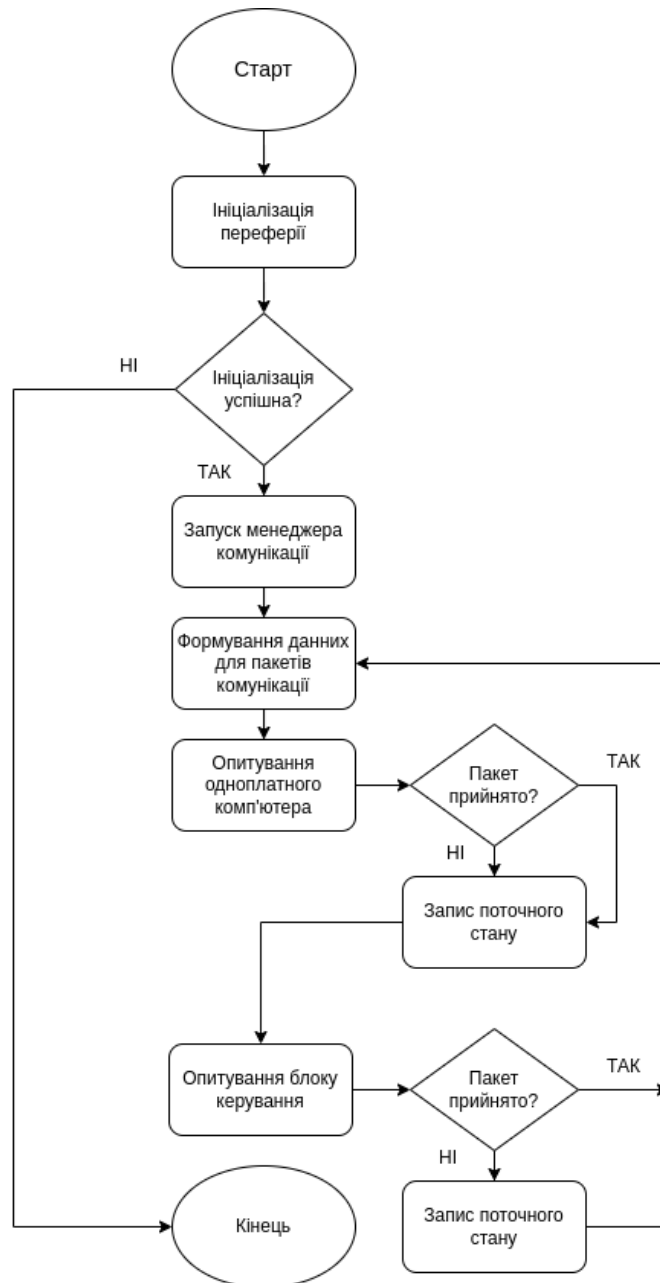


Рисунок 1.6 - Алгоритм роботи програмного забезпечення панелі керування з роботи [12]

2 АНАЛІЗ СУЧАСНИХ СИСТЕМ КЕРУВАННЯ ДЛЯ РОБОТИЗОВАНИХ ПЛАТФОРМ

На тлі стрімкого розвитку робототехніки та автоматизації, сучасні системи керування для роботизованих платформ виявляються ключовим елементом для досягнення високої ефективності та гнучкості в різноманітних сферах застосування. В цьому розділі наведено огляд та характеристики деяких сучасних систем керування, що визначають найновіші тенденції в цьому напрямку.

2.1 Програмні комплекси для створення роботизованих платформ

Для полегшення створення систем керування роботизованих платформ існують багато різних програмних фреймворків, які застосовуються для побудови систем для різного застосування та у різних сферах:

- Сфера логістики;
- Сфера лікування
- Сфера оборони

Нижче наведено декілька основних потужних програмних комплексів для розробки систем керування роботизованих платформ.

2.1.1 ROS (Robot Operating System)



Рисунок 2.1.1 – Логотип операційної системи ROS

ROS є однією з найпоширеніших та відкритих платформ для робототехніки. Вона надає зручний фреймворк для розробки, тестування та впровадження роботів. ROS дозволяє легко інтегрувати різноманітні сенсори та актуатори, забезпечуючи гнучкість та швидкість розробки.

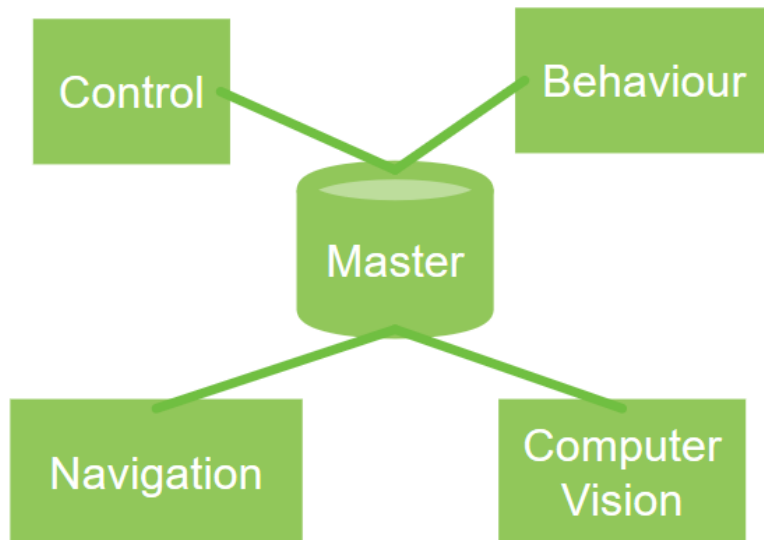


Рисунок 2.2 – Приклад підсистем робота з використанням ROS

2.1.2 MATLAB Robotics System Toolbox

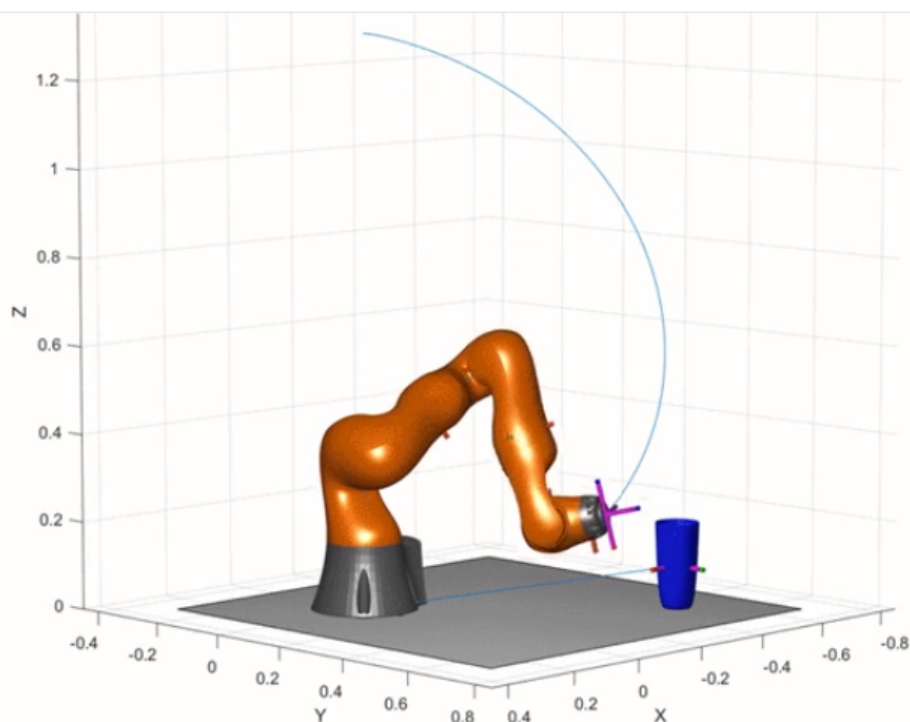


Рисунок 2.2.1 – Скріншот з фреймворку MATLAB Robotics System Toolbox

Відома своєю потужною математичною підтримкою, система MATLAB Robotics System Toolbox дозволяє розробникам використовувати високорівневі команди для керування та моделювання роботів. Зручний інтерфейс дозволяє швидко налаштовувати та тестувати алгоритми керування.

Наведені сучасні системи керування роботизованими платформами в основному, мають вже попередньо створенні алгоритми керування, стабілізації та позиціонування та не дозволяють або обмежено дозволяють вносити певні зміни в алгоритми та собою являють програмні фреймворки для створення роботизованих платформ.

2.2 Сучасні роботизовані платформи у військовій сфері

Враховуючи тематику даної роботи, є необхідність розглянути не тільки програмні комплекси для розробки роботизованих систем а і роботизовані платформи у різних сферах де потрібно використовувати стабілізацію та точне позиціонування робота. Розглянемо існуючі системи роботизованих платформ із застосуванням алгоритмів стабілізації у військових цілях.

Багатоцільовий військовий робот RoBattle від Ізраїльської компанії IAI (Рис. 2.3.1) [15]. Ця наземна платформа розроблена для використання в області місцевості та може виконувати завдання з охорони, забезпечуючи відволікаючі маневри та проведення розвідки. Побудована за модульним принципом, вона відповідає загальній концепції більшості сучасних наземних військових роботів.



Рисунок 2.3.1 – Загальний вигляд RoBattle модифікації LR3

Уперше представлений на виставці Eurosatory 2016, робот LR-3 розроблений для активних бойових операцій, розвідки, засідок і патрулювання периметру. Він оснащений колісною платформою та дизельною силовою установкою, яку можна модернізувати на гусеничну для підвищення мобільності в умовах бездоріжжя. Найбільш вразливі частини RoBattle захищені, робот озброєний легким бойовим модулем Pitbull з дистанційним управлінням, створеним компанією General Robotics. Pitbull, вагою 50 кг, обладнаний набором сенсорів, які дозволяють вести вогонь в різних умовах освітлення, забезпечуючи високий рівень ситуаційної обізнаності. Це дозволяє роботу ефективно реагувати на потенційні загрози усередині кількох секунд, виконуючи маневри, приймаючи контрзаходи або придушуючи вогонь.

Натхненні успіхами українського «Фантома» – мініБТРу, створеного Укроборонпром, інженери запорізького підприємства «Інфоком ЛТД» представили нового бойового робота на чотирьох колесах [16].



Рисунок 2.3.1 – Загальний вигляд роботу Ласка 2.0

«Ласка» створена насамперед із орієнтацій на майбутні продажі на зовнішньому оборонному ринку. Машина багатофункціональна, може виконувати бойові завдання, розвідку та завдання з охорони довіреної їй території. Завдяки плоскому даху апарат може доставляти продовольство і боєприпаси, а також

вивозити поранених із зони вогню. Машина оснащена двигуном внутрішнього згоряння та електронікою, яка дозволяє дистанційно керувати безпілотником на відстані до 2-х кілометрів.

Одна з провідних компаній у галузі автоматизації - General Dynamics [1], заснована у 1952 році, у 2021 році на виставці оборонних технологій "AUSA 2021" General Dynamics представила сімейство бойових роботів. Основна характеристика цих машин полягає в їхній здатності автономно визначати маршрут і атакувати цілі противника без прямого втручання операторів роботизованих систем.



Рисунок 2.3.2 – Робот від компанії General Dynamic

Роботизована платформа вітчизняного виробництва “Лють” [18], успішно пройшла польові випробування на початку літа 2023 року. Цей робот оснащений колісною базою, туреллю з кулеметом та декількома камерами з тепловізійним прицілюванням. Управління виконується за допомогою радіоканалу, стійкого до засобів РЕБ. Відео транслюється оператору, що дуже зручно під час виконання бойового завдання з оборони або проведення штурмів. Недоліком системи являється відсутність стабілізації, проте це компенсується низькою собівартістю комплексу.



Рисунок 2.3.2 –Роботизована платформа “Лють”

Один з прикладів турелей з автоматичним керуванням - це українська бойова роботизована турель "СТРАЖ". Її призначенням є патрулювання периметру за допомогою роботизованих вогневих точок з метою контролю території та запобігання несанкціонованому доступу [23]. Хоча ця система поки що є лише концепцією, вона відрізняється високими технічними характеристиками, включаючи:

- Спостереження по горизонталі: 360°;
- Спостереження по вертикалі: від -25° до $+60^{\circ}$;
- Дальність виявлення цілі до 1000 метрів;
- Дальність ураження цілі до 1000 метрів;
- Можливість автоматичного слідкування за ціллю.

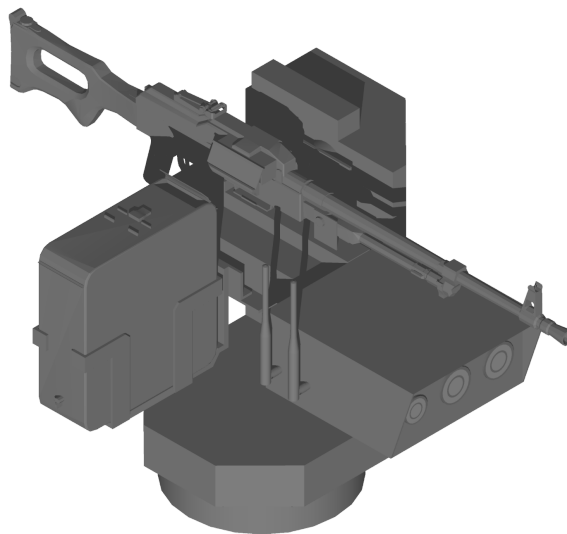


Рисунок 2.3.3 – роботизована бойова турель «СТРАЖ»

2.3 Структурна схема системи стабілізації роботизованої платформи

Провівши аналіз сучасних систем автоматизації можна створити узагальнену структурну схему системи стабілізації:

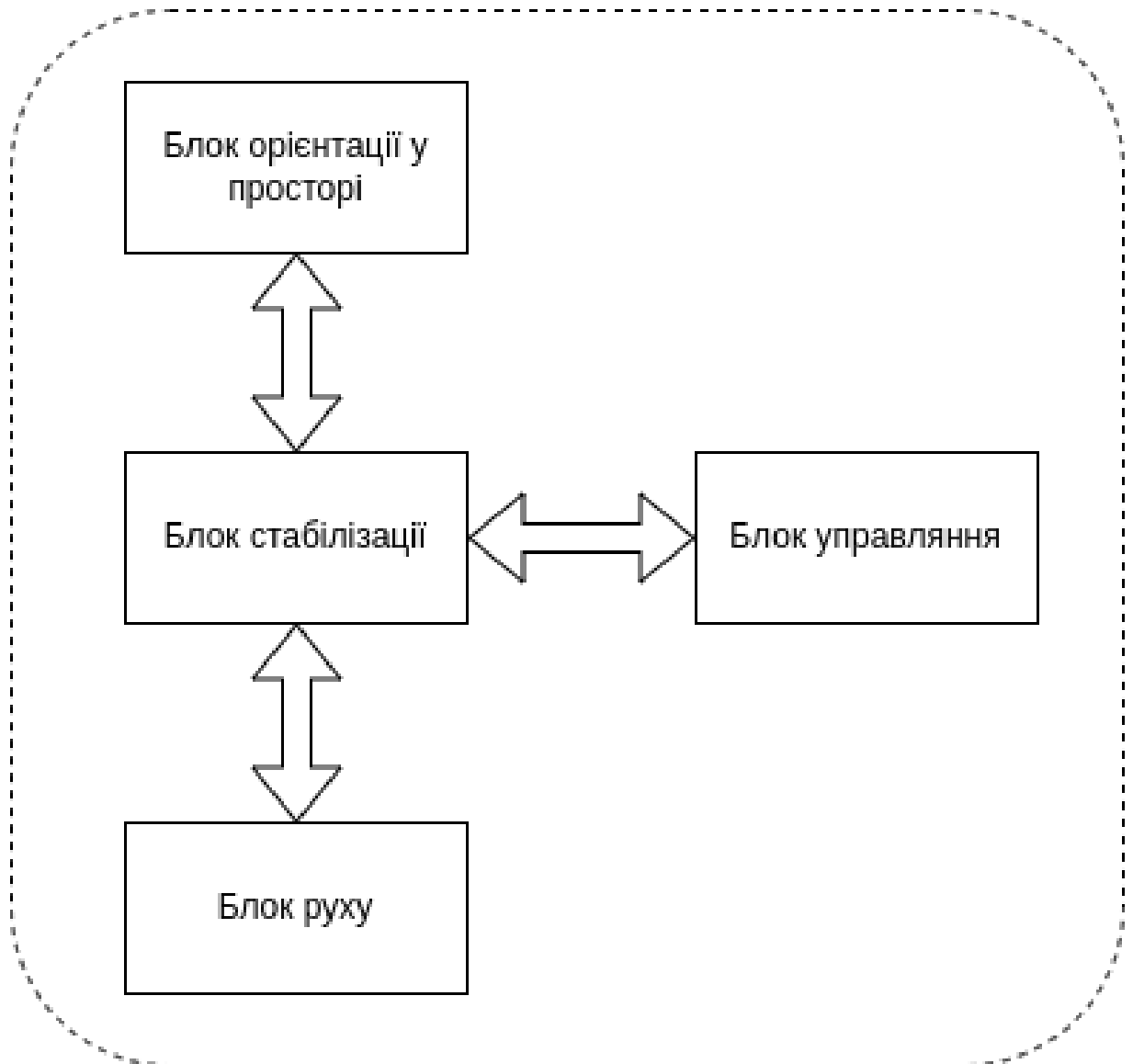


Рисунок 2.3.2 – Структурна схема системи стабілізації

Дана структурна схема включає в собі наступні основні структурні блоки:

- Блок Орієнтації у просторі;
- Блок Стабілізації
- Блок управління
- Блок руху

Блок орієнтації у просторі повинен містити як мінімум 2 основних датчика, це акселерометр та гіроскоп, також для більш точної орієнтації, можуть бути

додаткові давачі, все залежить від призначення системи та вимог по якості та швидкості стабілізації та позиціонування.

Блок стабілізації складається з високопродуктивного МК, до цього блоку підключається блок орієнтації у просторі, дані давачів сприймаються МК та беруть участь у створенні сигналу для блоку руху. Цей блок є основою стабілізації, так як МК містить ПЗ на основі алгоритмів які забезпечують якість та точність стабілізації та позиціонування.

Блок руху має технічні засоби автоматизації для підключення різних виконавчих механізмів, для забезпечення стабілізації та позиціонування роботизованої платформи. Даний блок повинен включати в себе давачі для забезпечення зворотного зв'язку для розрахунку точного позиціонування.

Зв'язок між описаними блоками вище, повинен забезпечувати високу швидкість передачі для забезпечення швидкодії.

Блок управління дозволяє створювати керуючий вплив, або в автоматичному режимі де виконується стабілізація та моніторинг позиції. Конструкція блоку може мати різні варіації з використанням як МК так і міні комп'ютерів. Забезпечення зв'язку між даним блоком та блоком стабілізації може забезпечуватись швидкісним дистанційним або провідним з'єднанням.

3 ВИЗНАЧЕННЯ КЛЮЧОВИХ ЗАВДАНЬ ДЛЯ ПОБУДОВИ СИСТЕМИ СТАБІЛІЗАЦІЇ ТА ТОЧНОСТІ ПОЗИЦІОНУВАННЯ ОБЛАДНАННЯ НА РОБОТИЗОВАНІЙ ПЛАТФОРМІ

У сучасному світі роботизовані платформи виявляються невід'ємною частиною багатьох сфер, зокрема промисловості, військових операцій, а також обслуговування та управління. Однак для максимізації їхнього потенціалу та забезпечення ефективності використання, виникає необхідність у вдосконаленні алгоритмів стабілізації. В цьому розділі розглянуто ключові завдання, які визначають напрямок роботи.

Основним завданням кваліфікаційної роботи є створення алгоритмів системи стабілізації та моніторингу цілі бойової роботизованої платформи, в основі яких буде враховано основні проблеми пов'язані із стабілізацією та моніторингу, а саме:

- Нелінійні складові механіки роботизованої платформи
- Швидкодія платформи бойової турелі
- Накопичення похибки вимірювання датчика орієнтації у просторі
- Зовнішні збурення
- Точність позиціонування

Проаналізувавши основні проблеми, можна виокремити ключові завдання для забезпечення виконання стабілізації та моніторингу роботизованої платформи:

- 1. Визначення та підбір засобів автоматизації:** якісний підбір засобів автоматизації наряду впливає на якість роботи стабілізації та точність позиціонування роботизованої платформи.
- 2. Розробка алгоритмів стабілізації та моніторингу цілі:** Створення алгоритмів, які забезпечують стабільність платформи під час різних рухів, враховуючи динаміку та вимоги до точності позиціонування обладнання.
- 3. Розробка алгоритмів автоматичної компенсації помилок:** створення алгоритмів, які автоматично виявляють та компенсують можливі помилки у вимірах, що дозволяє поліпшити точність роботи системи.

4 ВИЗНАЧЕННЯ ТА ПІДБІР ЗАСОБІВ АВТОМАТИЗАЦІЇ ДЛЯ ЕФЕКТИВНОЇ РОБОТИ СИСТЕМИ КЕРУВАННЯ РОБОТИЗОВАНОЇ ПЛАТФОРМИ

Для визначення та підбору засобів автоматизації було проведено дослід, в якому було визначено основні параметри та вимоги до технічних засобів автоматизації. Дослід проводився на реальному об'єкті, роботизована платформа рухалась в декількох основних режимах руху, на рисунку 4.1 та 4.2 приведено графік отриманих значень після проведення дослід з давача орієнтації у просторі.

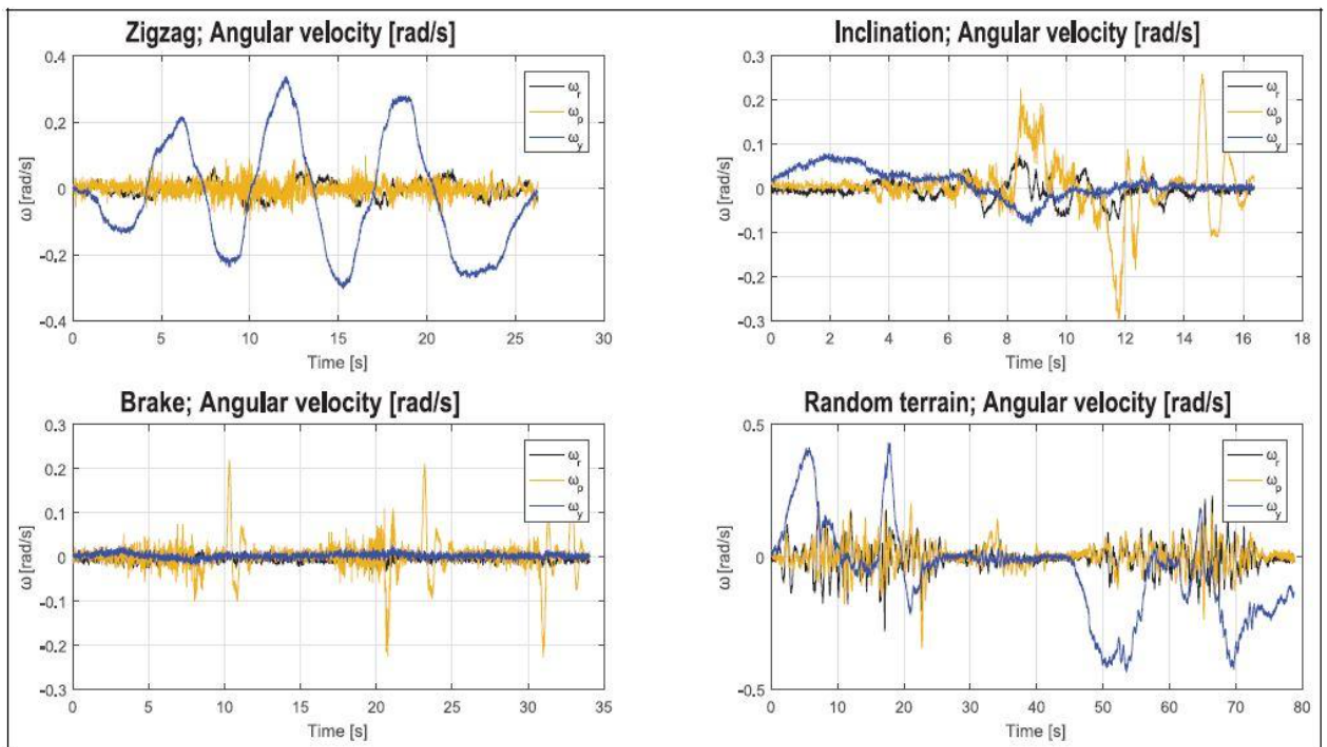


Рисунок 4.1 - Графік отриманих значень з гіроскопу дослід руху роботизованої платформи

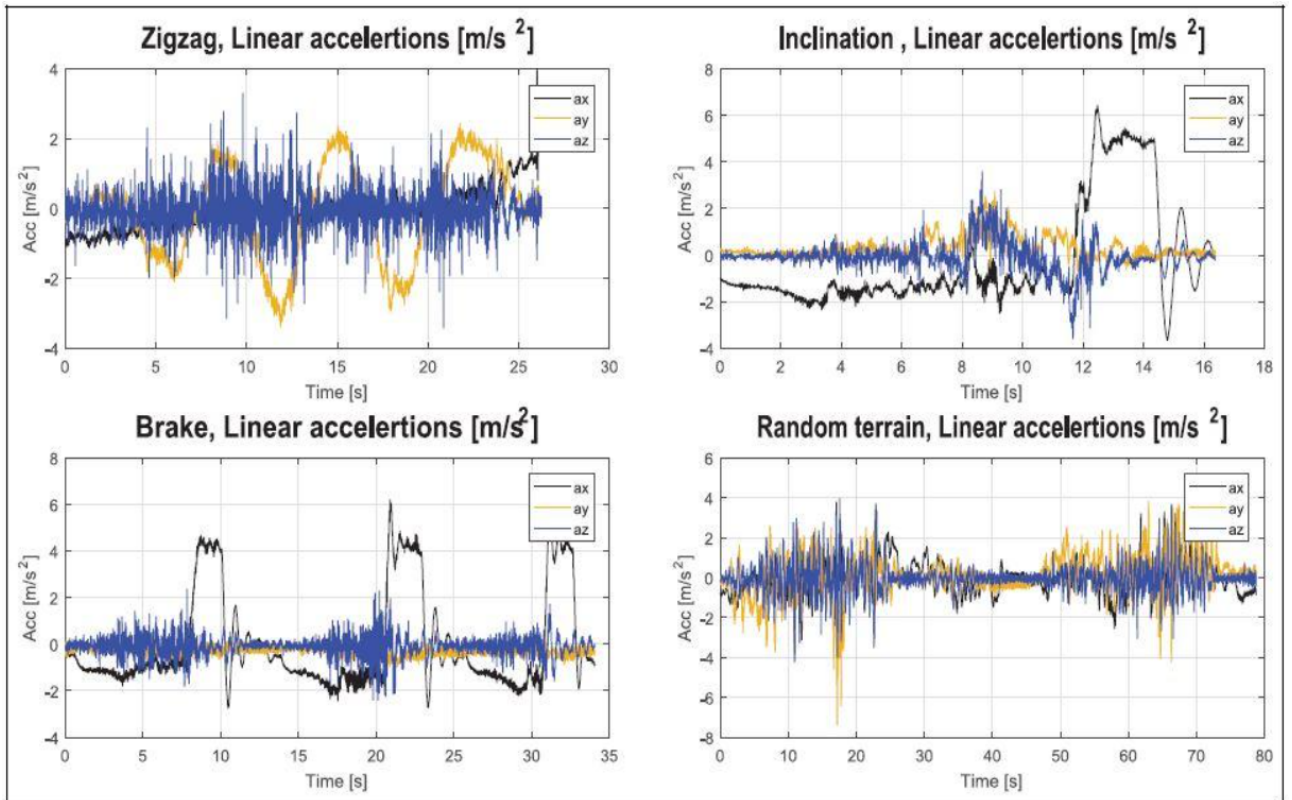


Рисунок 4.2 - Графік отриманих значень з акселерометру дослідження руху роботизованої платформи

Враховуючи отримані результати з дослідження та структурної схеми системи стабілізації та моніторингу можна виокремити основні технічні засоби та вимоги до них, які необхідно підібрати для виконання основного завдання:

- Приводи для забезпечення руху бойової турелі (крутним момент повинен складати не менше 30Нм а максимальна швидкість валу не менше 20 RPM)
- Давач орієнтації у просторі (діапазон вимірювання кутової швидкості не менше 250 DPS та не менше 2G лінійного прискорення)
- Обчислювальна складова у вигляді високошвидкісного мікроконтролера (1.25 DMIPS/MHz або 125 MIPS та частотою процесора не менше 64 МГц)

4.1 Підбір приводів для системи стабілізації та моніторингу

Можна сказати, що привода являються однією з головних складових системи, адже від цього залежить саме швидкодія, якість та точність відпрацювання алгоритмів стабілізації та моніторингу. Аналізуючи основні вимоги системи, можна виділити основні вимоги до приводів:

- Бажано наявність вмонтованого редуктора який буде забезпечувати гарний крутний момент та швидкість вихідного валу, він повинен мати мінімальне нелінійне відхилення, тобто простими словами - мінімальний люфт.
- Володіти малою сталою часу, забезпечувати швидку реакцію вихідного валу на задане завдання швидкості та зміни напрямку.

Аналізуючи пропозиції на ринку промисловості, та враховуючи вище описані вимоги, було обрано мотор-редуктор M8025BE25B50L типу PMSM фірми TINSMITH [19].

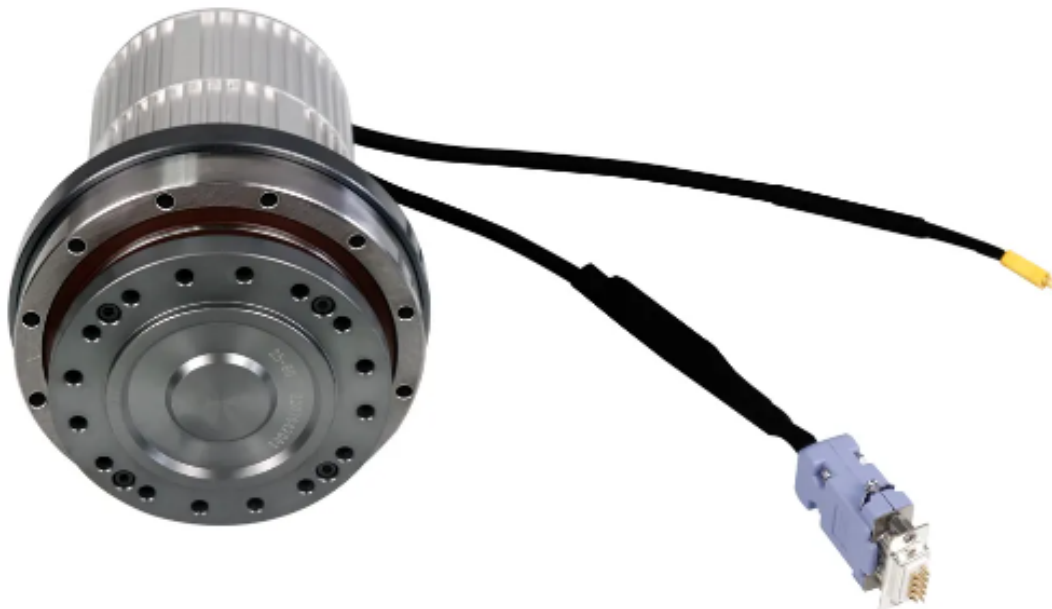


Рисунок 4.1.1 - Загальний вигляд приводу M8025BE25B50L

Даний мотор має гармонійний редуктор [24] який являється безлюфтовим, що забезпечує основну вимогу до приводів системи стабілізації та моніторингу.

Володіє гарним крутним моментом, близько 51 НМ в штатному режимі та до 127 НМ в піковому режимі старт-стоп. Вихідна швидкість валу становить близько 30 обертів на хвилину що в переводі на кутову швидкість складає 180 градусів на секунду, що задовольняє вимоги системи цілком. Здійснювати керування можна в кількох режимах, або за допомогою цифрових протоколів (RS485, CAN), або за допомогою подачі сигналів STEP/DIR.



Рисунок 4.1.2 - Загальний вигляд гармонійного редуктора

Даний привід широко використовується в промислових роботах маніпуляторах та інших роботизованих модулях. Перевага в розповсюдженості є дуже вагомою, бо в режимі масштабування виробництва системи стабілізації та моніторингу бойової турелі, важливо мати доступність до технічних засобів автоматизації.

Напруга живлення	36В постійного струму $\pm 10\%$
Струм	7А
Крутним момент	51НМ
Піковий крутний момент	127НМ
Швидкість вихідного валу	0~30RPM

Таблиця 4.1.1 - Загальні характеристики приводу M8025BE25B50L

Даний привід є високофункціональним, розширені характеристики приводу:

- Ізольовани зв'язок CANopen відповідно до специфікації CiA301 V4.2.0. Підтримка SDO, TPDO, RPDO. Підтримка швидкісного режиму, режиму позиції (режим контуру, режим інтерполяції). Підтримка виробництва та споживання серцевого ритму
- 15-бітний абсолютний енкодер, імпульс одного кола до 32768.
- Багатоступенева структура двигуна DD, великий вихідний крутний момент.
- Гармонічний редуктор, двигун, драйвер і кодер інтегровані.
- Низький рівень шуму, низька вібрація, висока швидкість позиціонування, висока надійність.
- ВОК, орієнтоване на поле векторне керування, опорне положення/швидкість замкнутий цикл.

- Може працювати при нульовому гістерезисі заданого стану імпульсу після нульового гістерезису.
- 16-розрядні функції електронної передачі.
- Підтримка комунікації CANopen, за допомогою якої можна контролювати стан двигуна та змінювати параметри.
- Режим позиціонування, підтримка імпульсу + сигнал напрямку, кодер для слідування.
- Режим швидкості, підтримка регулювання швидкості сигналом ШІМ
- Привід має функцію блокування обертання, захисту від перевантаження по струму та захисту від перенапруги.
- Абсолютне значення низького енергоспоживання і багатооборотності
- Коли двигун включено, всередині є ланцюг зарядки для заряджання акумулятора.
- При вимкненому двигуні струм споживання акумулятора становить лише 0,07 мА.
- Діапазон багатооборотної пам'яті -60000 ~ 60000 кіл.
- Просте налаштування початку координат, його можна встановити як початок у будь-якій позиції.
- Кілька методів повернення на нуль: повернення на нуль зв'язку, автоматичне повернення на нуль після ввімкнення живлення та вихід сигналу нульової точки.
- Захист від помилок: сигналізація про збій живлення акумулятора.

Одним із важливих критеріїв вибору даного серводвигуна, використання технології двигуна PMSM.

PMSM - це синхронний електродвигун, в якого індуктор складається з постійних магнітів. Основна основна відмінність двигуна PMSM (синхронного двигуна з постійними магнітами) від асинхронного двигуна полягає в роторі. В дослідженнях [20] очевидно, що PMSM має ефективність приблизно на 2% більшу, ніж високоефективний (IE3) асинхронний електродвигун, за умови, що статор має таку саму конструкцію, а для керування використовується той самий

частотний привод. При цьому синхронні електродвигуни з постійними магнітами, якщо порівнювати з іншими електродвигунами мають більш кращі показники.

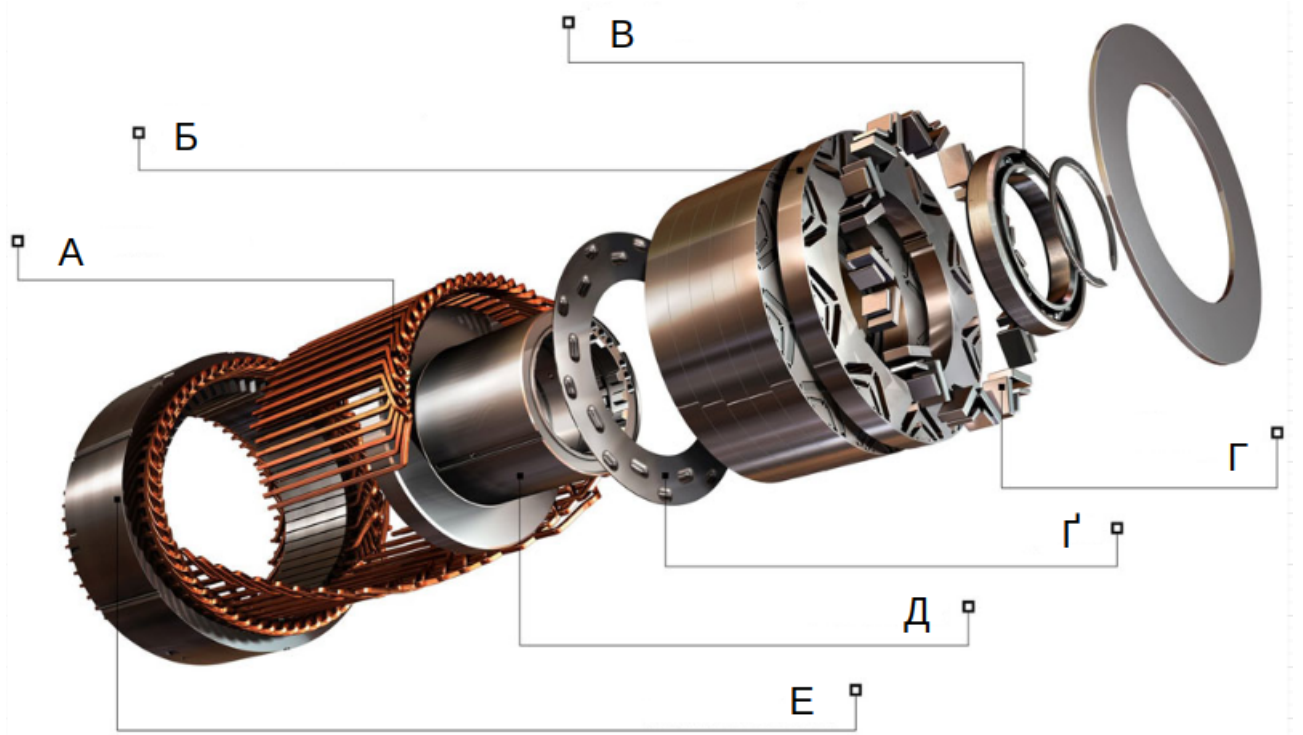


Рисунок 4.1.3 - Загальна конструкція двигуна PMSM: А - прутковий дріт; Б - ротор із ламінованої сталі; В - вузол опорного підшипника; Г - магніти; Г' - стальна плита; Д - хаб ротору; Е - статор із ламінованої сталі;

4.2 Підбір давача орієнтації у просторі

Чи не найважливішою складовою системи стабілізації та моніторингу роботизованої платформи є давач орієнтації у просторі. В основному даний давач містить в одному комплексі давач лінійного прискорення відносно землі (акселерометр), та давач кутової швидкості (гіроскоп). Існує широкий асортимент даних давачів, різних як по розміру, характеристиках так і по цінній складовій.

Для того щоб обрати потрібний давач для системи стабілізації та моніторингу роботизованої платформи, було проведено дослідження по виявленню найбільше оптимального давача для даної системи.

Давач орієнтації у просторі який містить в одному комплексі акселерометр, гіроскоп, магнітометр та вбудований давач температури MPU9255 [25].

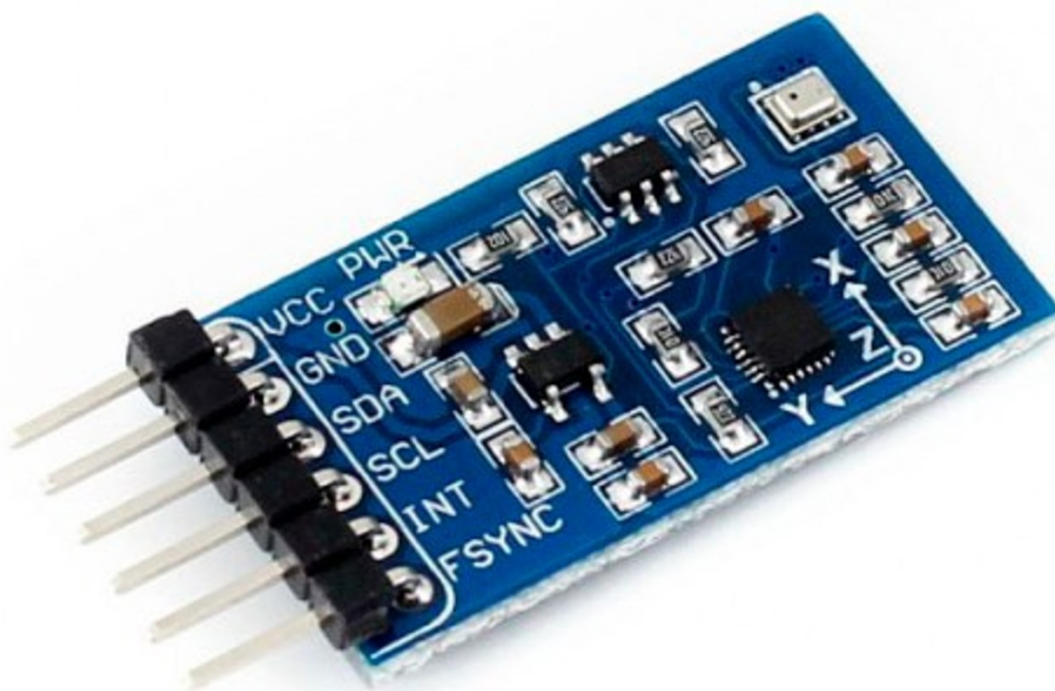


Рисунок 4.2.1 - Давач орієнтації у просторі 10DOF MPU9255[25]

Характеристики MPU9255:

1. Гіроскоп:

- 1.1. Датчики кутової швидкості осі X, Y і Z з цифровим виходом (гіроскопи) із програмованим користувачем діапазоном повної шкали ± 250 , ± 500 , ± 1000 і $\pm 2000^\circ/\text{с}$ і вбудованими 16-розрядними АЦП.
 - 1.2. Цифровий програмований фільтр низьких частот.
 - 1.3. Робочий струм гіроскопа: 3,2 мА.
 - 1.4. Струм в режимі сну: 8 мкА.
 - 1.5. Відкалібрований на заводі масштабний коефіцієнт чутливості.
 - 1.6. Самоперевірка.
2. Акселерометр:
- 2.1. Трьохосьовий акселерометр із цифровим виходом із програмованим діапазоном повної шкали $\pm 2g$, $\pm 4g$, $\pm 8g$ та $\pm 16g$ та вбудованими 16-розрядними АЦП.
 - 2.2. Нормальний робочий струм акселерометра: 450 мкА.
 - 2.3. Струм у режимі акселерометра низької потужності: 8,4 мкА при 0,98 Гц, 19,8 мкА при 31,25 Гц.
 - 2.4. Струм в режимі сну: 8 мкА.
 - 2.5. Програмовані користувачем переривання.
 - 2.6. Переривання Wake-on-motion для роботи процесора програм із низьким енергоспоживанням.
 - 2.7. Самоперевірка
3. Магнітометр:
- 3.1. 3-осьовий кремнієвий монолітний магнітний датчик Холла з магнітним концентратором.
 - 3.2. Широкий динамічний діапазон вимірювань і висока роздільна здатність з меншим споживанням струму.
 - 3.3. Роздільна здатність вихідних даних 14 біт (0,6 мкТ/LSB) або 16 біт (15 мкТ/LSB).
 - 3.4. Повномасштабний діапазон вимірювань ± 4800 мкТл.
 - 3.5. Нормальний робочий струм магнітометра: 280 мкА з частотою повторення 8 Гц.

3.6. Функція самоперевірки з внутрішнім магнітним джерелом для підтвердження роботи магнітного датчика на кінці.

Наступний давач який було підбрано для дослідження має велику популярність. Він застосовується в широкому спектрі розумних девайсів та навіть в промисловості. MPU6050[26] - має вбудований гіроскоп та акселерометр.

Характеристики MPU6050:

1. Гіроскоп:

- 1.1. Датчики кутової швидкості X-, Y- та Z-осі з цифровим виходом (гіроскопи) із програмованим користувачем діапазоном повної шкали ± 250 , ± 500 , ± 1000 та $\pm 2000^\circ/\text{с}$
- 1.2. Зовнішній сигнал синхронізації, підключений до контакту FSYNC, підтримує синхронізацію зображення, відео та GPS
- 1.3. Вбудовані 16-розрядні АЦП дозволяють одночасну дискретизацію гіроскопів
- 1.4. Покращена температурна стабільність зміщення та чутливості зменшує потребу в калібруванні користувачем
- 1.5. Покращена продуктивність низькочастотного шуму
- 1.6. Цифрово програмований фільтр низьких частот
- 1.7. Робочий струм гіроскопа: 3,6 мА
- 1.8. Струм у режимі очікування: 5 мкА
- 1.9. Відкалібрований на заводі масштабний коефіцієнт чутливості
- 1.10. Самоперевірка користувача

2. Акселерометр

- 2.1. Трьохосьовий акселерометр із цифровим виходом і програмованим повним діапазоном шкали $\pm 2g$, $\pm 4g$, $\pm 8g$ та
- 2.2. $\pm 16g$
- 2.3. Інтегровані 16-розрядні АЦП дозволяють одночасну вибірку акселерометрів, не вимагаючи зовнішнього
- 2.4. мультиплексор
- 2.5. Нормальний робочий струм акселерометра: 500 мкА

- 2.6. Струм у режимі акселерометра низької потужності: 10 мкА при 1,25 Гц, 20 мкА при 5 Гц, 60 мкА при 20 Гц, 110 мкА при
- 2.7. 40 Гц
- 2.8. Виявлення орієнтації та сигналізація
- 2.9. Виявлення натискання
- 2.10. Програмовані користувачем переривання
- 2.11. Переривання вільного падіння
- 2.12. Переривання High-G
- 2.13. Нульовий рух/переривання руху
- 2.14. Самоперевірка користувача

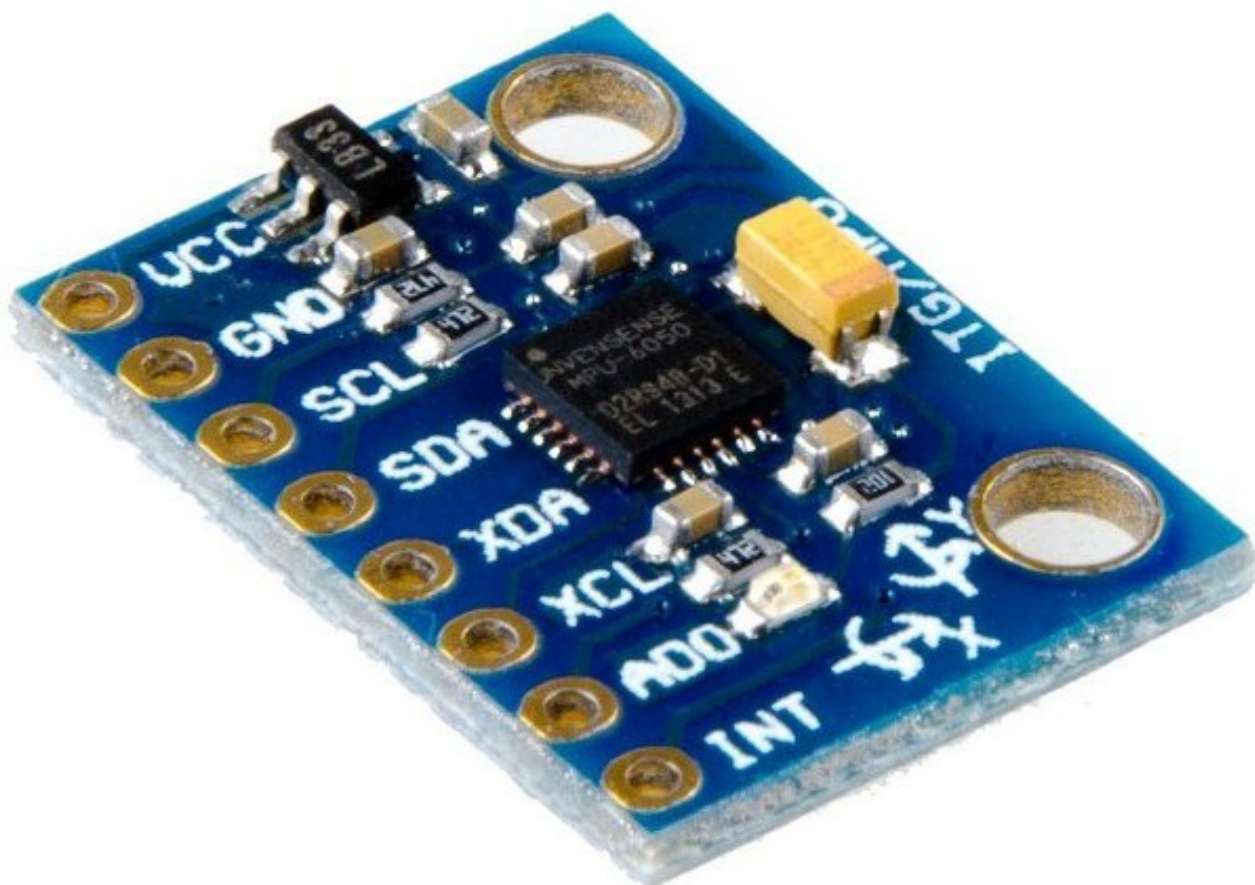


Рисунок 4.2.2 - Давач орієнтації у просторі 6DOF MPU6050[26]

Останній давач орієнтації в просторі який буде брати участь в дослідженнях це LSM6D33 з вбудованим акселерометром та гіроскопом.

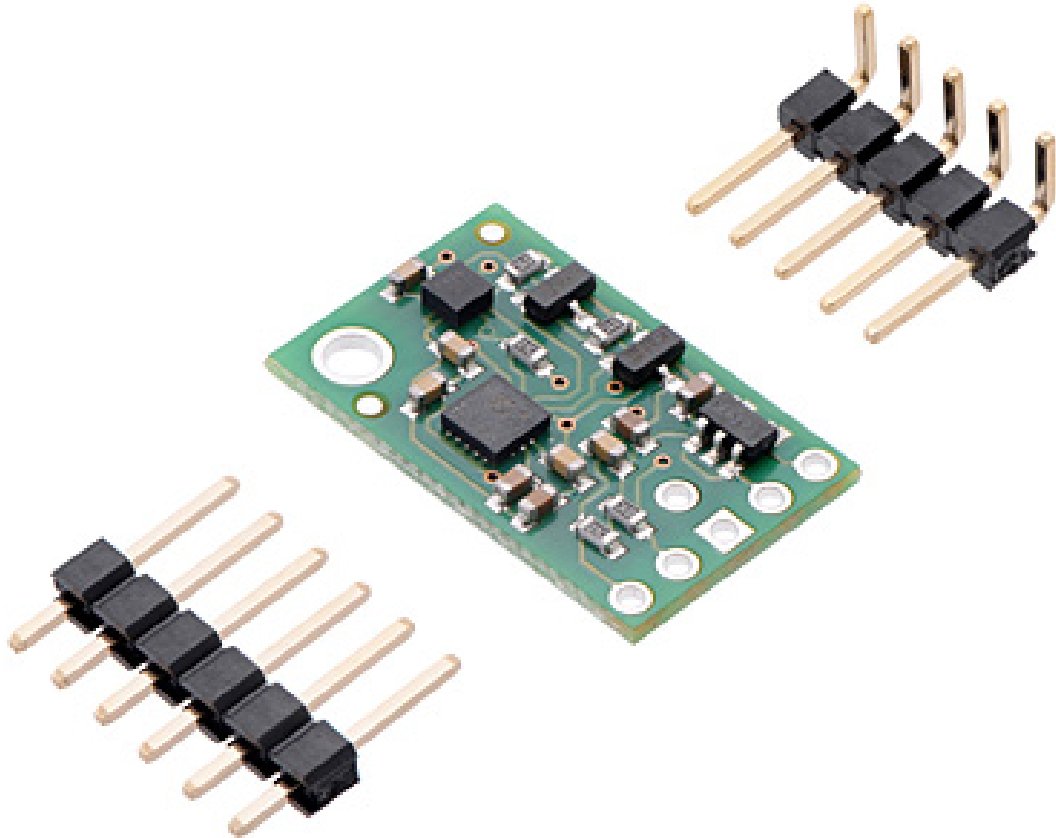


Рисунок 4.2.3 - Давач орієнтації у просторі 6DOF LSM6D33[27]

Основні характеристики:

- Споживана потужність: 0,9 мА в комбінованому нормальному режимі та 1,25 мА в комбінованому високопродуктивному режимі до 1,6 кГц.
- «Завжди ввімкнено» з низьким енергоспоживанням як для акселерометра, так і для гіроскопа.
- Smart FIFO до 8 кбайт на основі набору функцій.
- Сумісний з Android K і L
- Акселерометр налаштовується на чутливість $\pm 2/\pm 4/\pm 8/\pm 16$ G
- Гіроскоп налаштовується на чутливість $\pm 125/\pm 245/\pm 500/\pm 1000/\pm 2000$ DPS
- Напруга аналогового живлення: від 1,71 В до 3,6 В
- Незалежне живлення ІО (1,62 В)
- Компактний розмір, 3 мм x 3 мм x 0,86 мм
- Вбудований датчик температури
- ECOMPACT®, RoHS і “Green” сумісний

Для проведення досліду було створено стенд до якого підключено всі 3 датчики за допомогою інтерфейсу I2C з частотою шини 400 KHz. Основою стенду являється мікропроцесорна плата WROOM32 на основі мікроконтролера ESP32. Так як в даному контролері є вбудований модуль WIFI, дані будуть забиратись за допомогою точки доступу та відкриття TCP з'єднання. Дані надсилаються по протоколу TCP з частотою 100Гц. Для зручності, живлення стенду зроблено за допомогою акумулятору. Всі датчики були налаштовані на однакові межі вимірювання. Для стабілізації більш важливі показання гіроскопу, особливо горизонтальної вісі, в якості якої було обрано вісь Y.

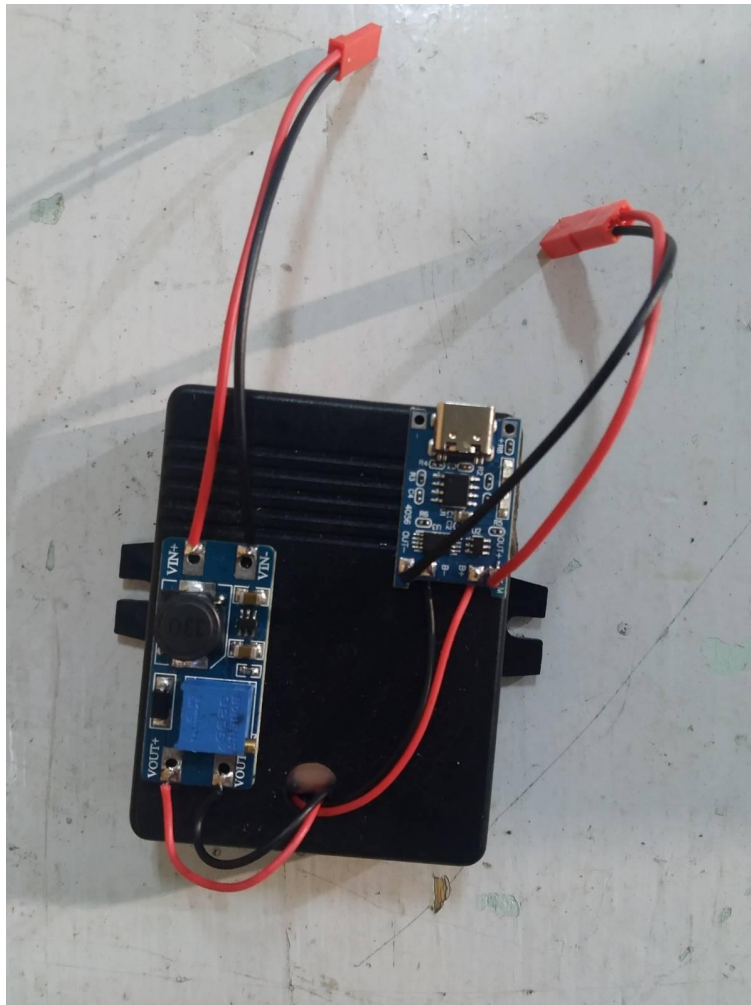


Рисунок 4.2.4 - Загальний вигляд стенду

Дослід проводився на реальній бойовій платформі, стенд було закріплено на горизонтальній осі бойової турелі.



Рисунок 4.2.5 - Загальний вигляд стенду на роботизовані платформи

Щоб краще зрозуміти, який саме з датчиків підходить для реалізація стабілізації та точності позиціонування рухомої платформи, дані збирались під час стрільби з кулемету, адже саме під час стрільби виникає різке навантаження на рухому платформу та різке прискорення по осям, а саме по горизонтальній осі. Стрільба виконувалась в кількох режимах: одиночний постріл, коротка черга, довга черга.



Рисунок 4.2.6 - Графік зчитування коливань при одиночному пострілі

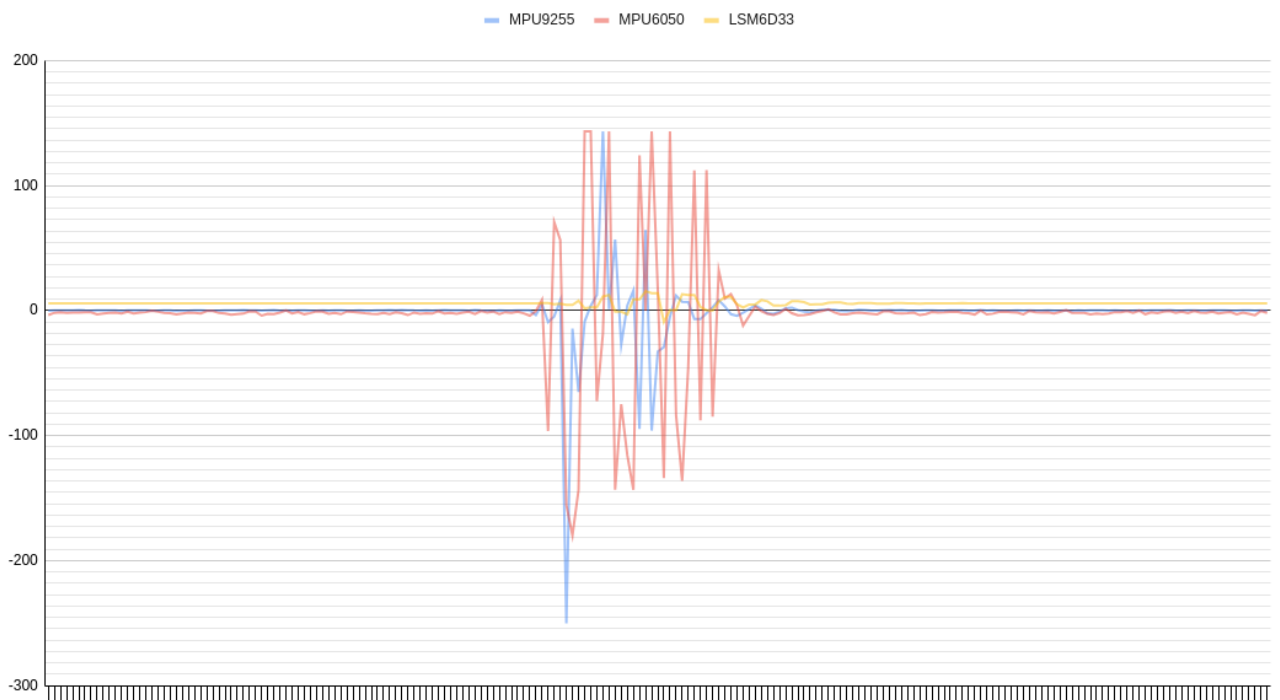


Рисунок 4.2.7 - Графік зчитування коливань при короткій черзі

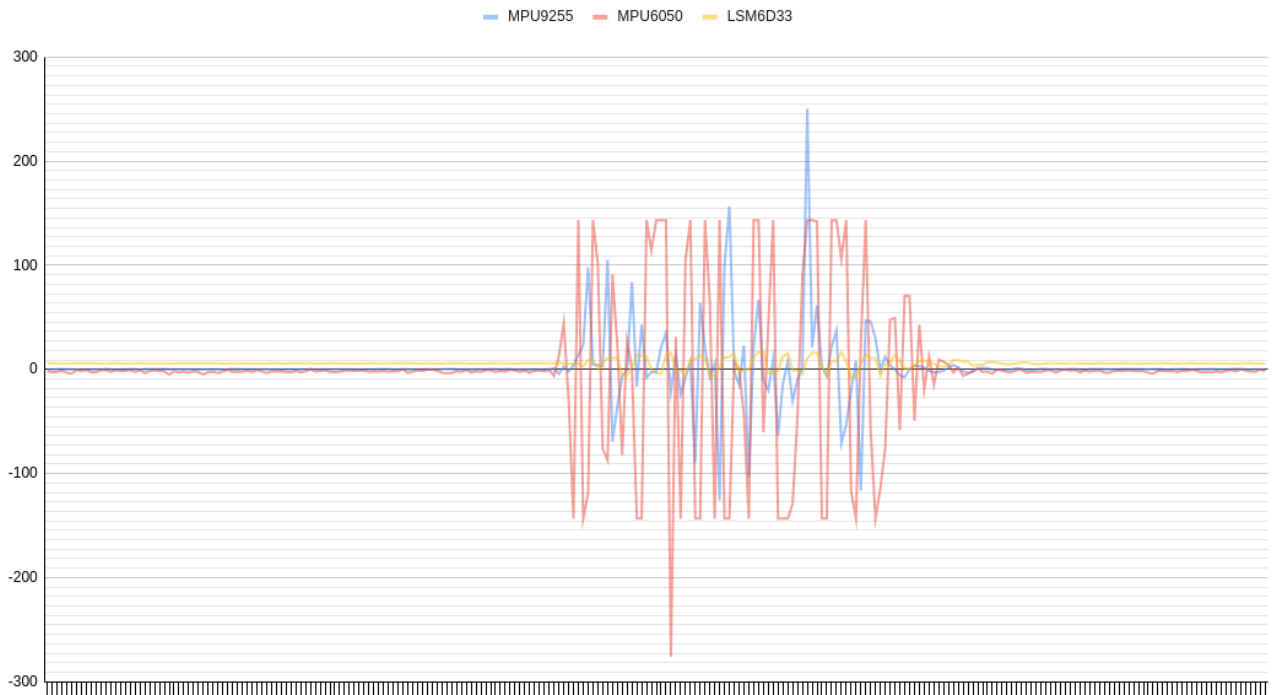


Рисунок 4.2.8 - Графік зчитування коливань при довгій черзі

Аналізуючи графік, можна одразу побачити неозброєним оком, що показання з давача орієнтації у просторі MPU9255 є більш чистими та відчутно відрізняються від показань інших давачів. В холостому режимі роботи, показання MPU9255 є більш наближеними до нуля, що є великою перевагою над іншими давачам, та дасть змогу в подальшому реалізувати більш якісну стабілізацію, якщо придивитись до графіків, можна прослідкувати скільки куль було випущено, що в свою чергу показує на скільки даний давач чутливий, та має гарну частоту оновлення. На відміну від цього давача, MPU6050 є зашумленим, в холостому ході постійно коливається та переходить через нуль. Здивуванням були показання з давача LSM6D33, по яким видно, що даний тип давача не виконує вимог для монтування в систему стабілізації.

Провівши аналіз графіків, та порівнявши показання давачі, було остаточно обрано давач MPU9255 в якості давача орієнтації у просторі системи стабілізації, так як він задовольняє вимоги системи, а саме: шумність, проміжок вимірювання, точність.

4.3 Підбір обчислювальної складової системи

Під час вибору високопродуктивного обчислювального елементу системи, значну увагу було приділено підтримці апаратним чином інтерфейсів зв'язку для забезпечення швидкодії виконання алгоритмів. Також вагомим аргументом є Flash пам'ять та оперативна пам'ять, адже розмір повинен бути достатнім для того щоб вмістити основну програму, та допоміжні бібліотеки для безперебійної роботи системи. Вибір впав на сімейство мікроконтролерів від STmicroelectronics тому що, мікроконтролери даного виробника широко використовуються в робототехніці, промисловості, розумних пристроях тощо, через свою низьку собівартість та забезпечення високопродуктивних ядер які мають безліч лінійок під різні задачі, а різноманітність апаратного забезпечення дає змогу контролерам працювати у широкій сфері застосування.

Під описом вимог, було звернено увагу на серію F4[21] 32-бітних мікроконтролерів. Контролери даної серії мають високопродуктивне ядро Cortex M4. А можливість виконання інструкцій DSP та FPU розширює можливості роботи з різним апаратним забезпеченням.

Для виконання всіх поставлених завдань, та забезпечення вимог до обчислювальної складової системи стабілізації та моніторингу було обрано мікроконтролер STM32F446RE [22].

Тактова частота	до 180 МГц
Flash пам'ять	512 КБ з можливістю розширення зовнішнім модулем пам'яті
Оперативна пам'ять (RAM)	128 КБ з можливістю розширення зовнішнім модулем пам'яті
DMIPS	1.25 DMIPS/МГц
Порти входів/виходів	більше 50
Апаратне забезпечення	DMA, високоточні таймери, PWM, CAN, UART/USART, I2C, SPI, Quad SPI, SWD, JTAG, USB 2.0 FS,

Таблиця 4.3.1 - Загальні характеристики мікроконтролера STM32F446RE

Для проведення досліджень та перевірки роботи алгоритмів роботи стабілізації та моніторингу роботизованої платформи буде використовуватись плата розробника NUCLEO- F446RE на базі обраного мікроконтролеру STM32F446RE.

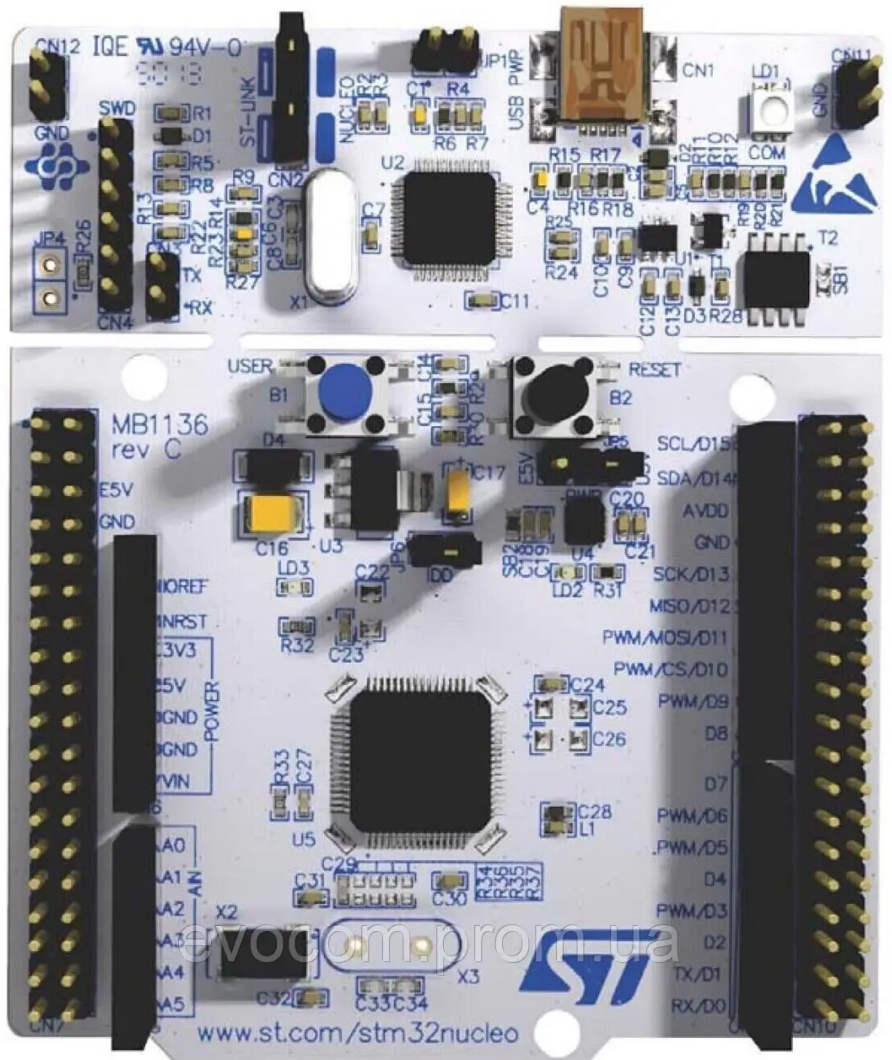


Рисунок 4.3.1 - Загальний вигляд плати розробника NUCLEO- F446RE

Перевагою у використанні готової плати розробника є те, що не потрібно займатись створенням та виготовленням плати на якій знаходиться мікроконтролер, а всього лише плату- перехідник, в яку буде вмонтовано NUCLEO- F446RE та будуть задіяні потрібні піни загального призначення входу/виходу та інтерфейси.

На основі підібраних технічних засобів автоматизації, було розроблено структурну схему, яка наведена в додатку В.

5 ВПРОВАДЖЕННЯ АЛГОРИТМІВ КЕРУВАННЯ НА РЕАЛЬНОМУ ОБ'ЄКТІ

5.1 Структурний синтез системи керування

Виконавши аналіз існуючих систем та підібравши потрібні технічні засоби автоматизації можна створити структурну схему системи керування яка буде включати регулятори та послідовність їх підключення, для забезпечення стабілізації, точності позиціонування та моніторингу цілі бойової роботизованої платформи.

Так як в основі бойової платформи лежить дві осі керування, вертикальна та горизонтальна, для кращого розуміння, структурну схему було розділено на дві частини, відповідно для вертикальної та горизонтальної осей. Структурні схеми містять подібні елементи, проте через особливості кожної з осей, було додано відповідні додаткові елементи, для забезпечення якості та швидкості.

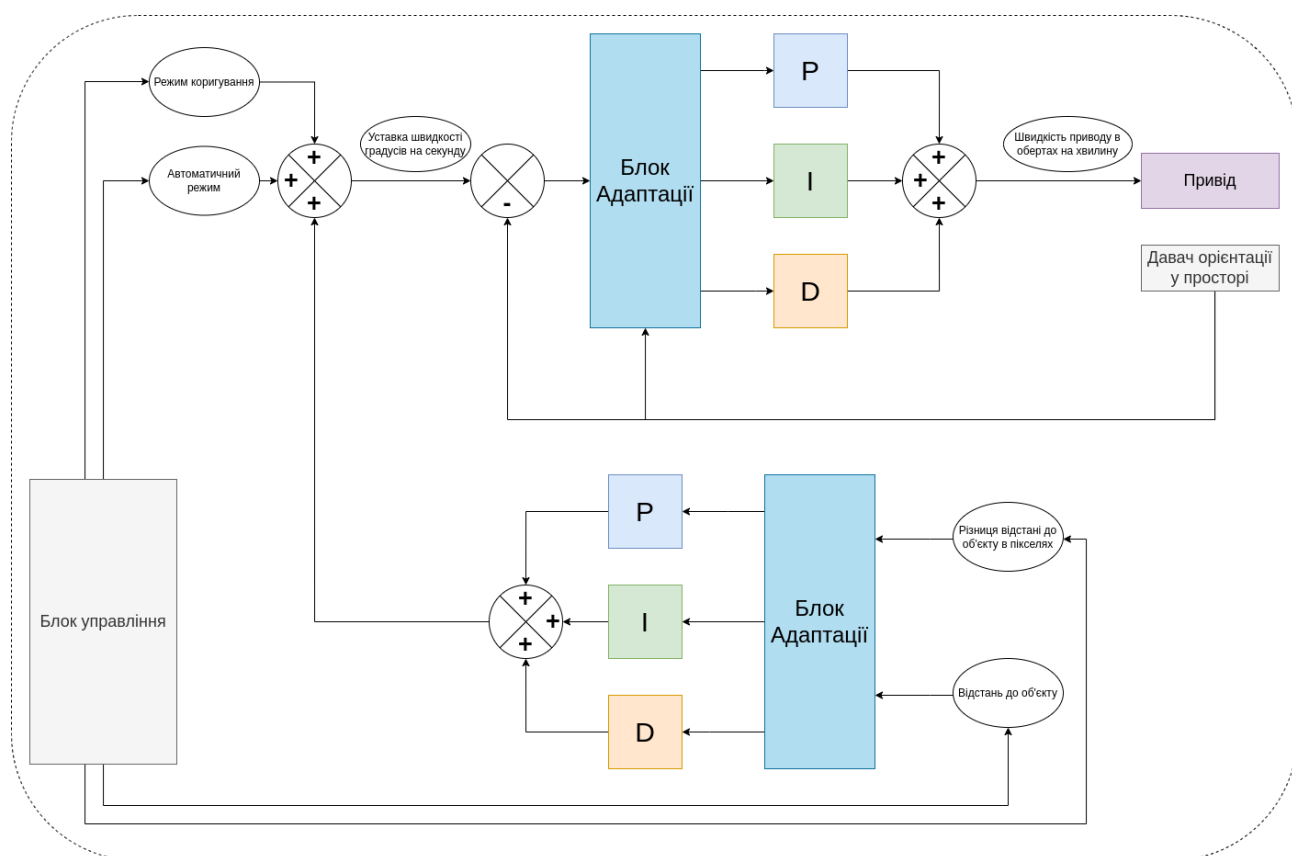


Рисунок 5.1.1 - Структурна схема системи керування вертикальної осі

На рисунку 5.1.1 зображено структурну схему для вертикальної осі, яка складається з наступних контурів:

- Внутрішній контур (стабілізація)
- Зовнішній контур (моніторинг)

Внутрішній контур складається із класичної системи керування на основі ПІД регулятора, з додаванням блоку адаптації, що в сукупності складає адаптивний регулятор на основі ПІД регулятора. На вході задається уставка по швидкості градусів на секунду вертикальної осі рухомої платформи, а на виході отримується значення швидкості обертів приводу на хвилину. За допомогою блоку адаптації вдається компенсувати різку зміну швидкості градусів на секунду по вертикальній осі, так як об'єкт керування є нелінійним, то даний блок буде виступати в ролі компенсатора, що в свою чергу забезпечуватиме якість та швидкість позиціонування. Відповідно вхідним сигналом для блоку адаптації є значення з давача орієнтації, а саме гіроскопу вертикальної осі.

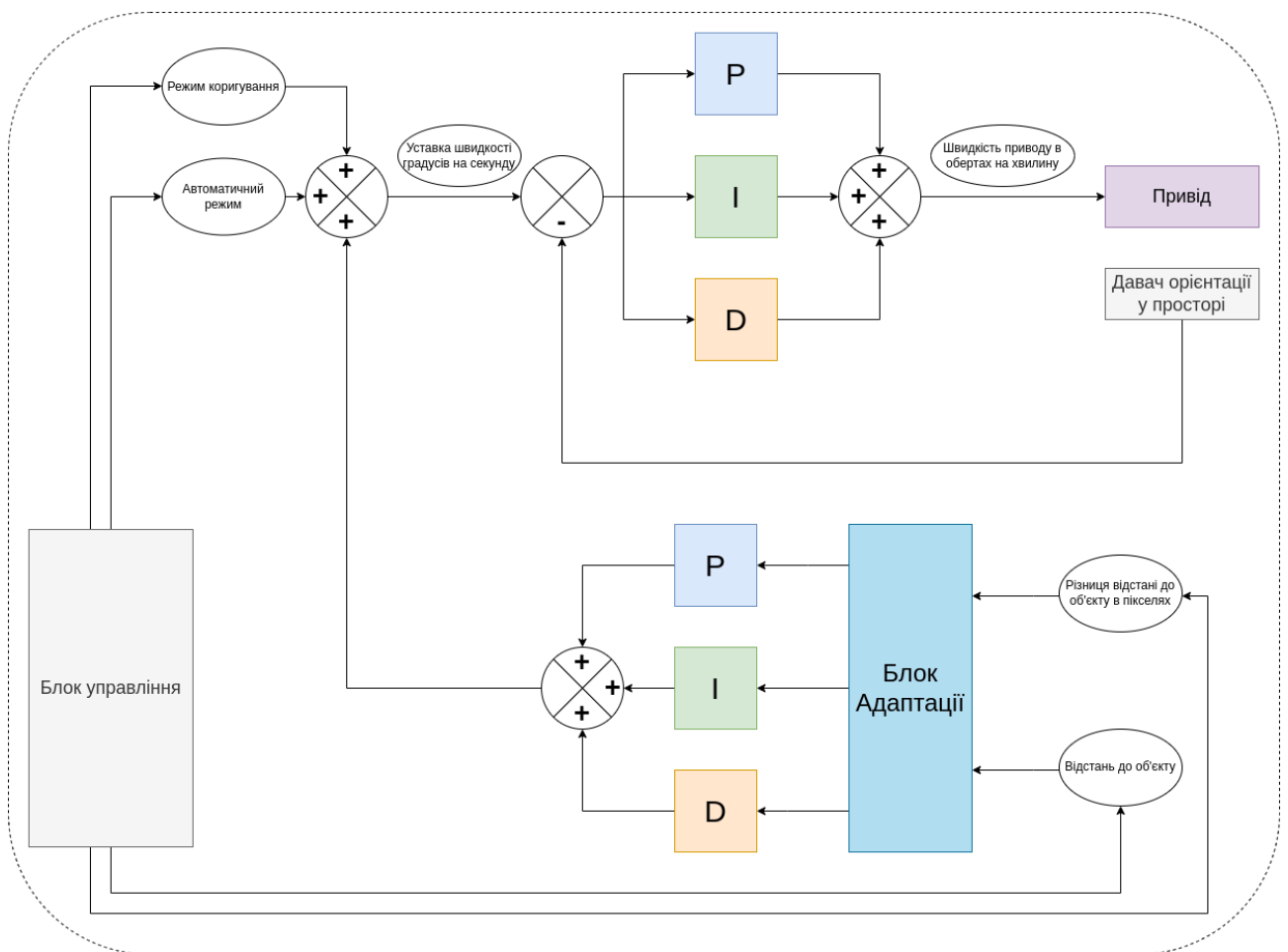


Рисунок 5.1.2 - Структурна схема системи керування горизонтальної осі

На рисунку 5.1.2 зображено структурну схему керування горизонтальної осі, різницею між схемами є блок адаптації внутрішнього контуру, в наведеній схемі він відсутній, по причині значно менших коливань на горизонтальну вісь, тому класичної схеми з ПД регулятором повинно вистачити для забезпечення якості та швидкості стабілізації та позиціонування рухомої платформи.

Зовнішні контури для обох осей керування є ідентичними. Вхідним значенням є різниця відстані в пікселях між об'єктом та бойовою туреллю, яке надходить з блоку управління, також в якості вхідного значення для блоку адаптації контуру моніторингу є значення відстані до об'єкту з дальноміру, який безпосередньо підключений до блоку управління.

Для порівняння ефективності адаптивного регулювання з класичним, було створено графіки перехідних процесів з блоком адаптації та без нього.

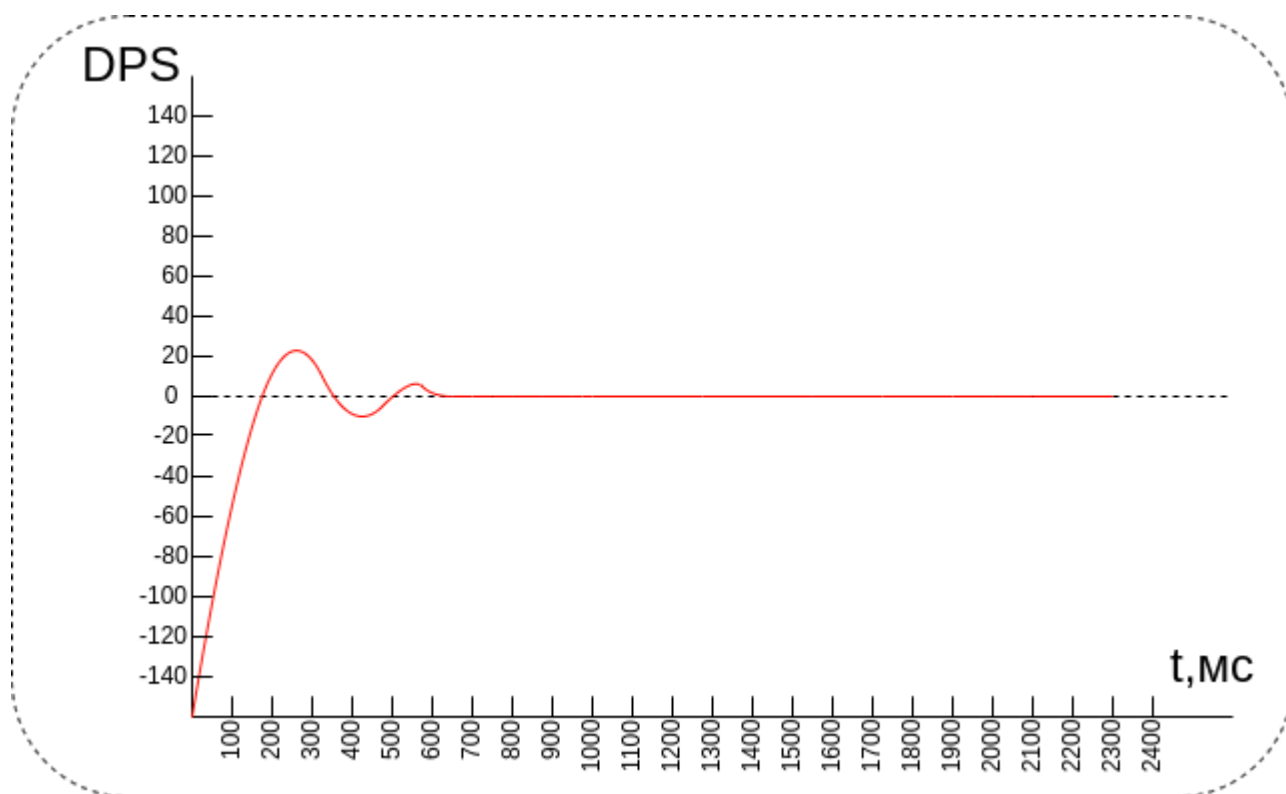


Рисунок 5.1.3 - Перехідний процес з використанням адаптивного блоку

На рисунку 5.1.3 зображено перехідний процес, який характеризує реакцію системи на різку зміну швидкості рухомої платформи. За допомогою адаптивного блоку, коефіцієнти ПД регулятора змінюються пропорційно збільшенню розгласування входу та виходу, що забезпечує максимальну віддачу, водночас,

сигнал швидко затухає і виходить на задану уставку, що відіграє важливу роль в якості системи стабілізації та точності позиціонування.

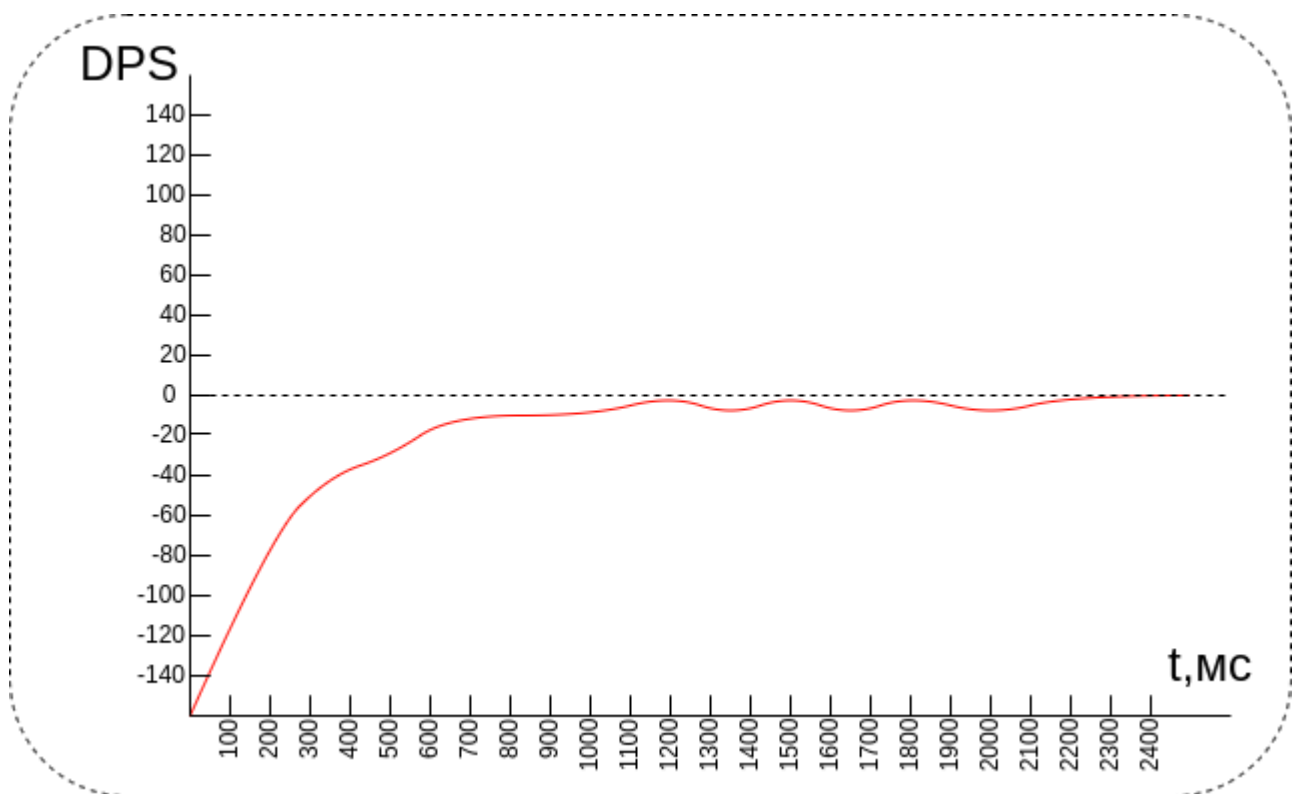


Рисунок 5.1.3 - Перехідний процес без використання адаптивного блоку

Було проведено вимірювання переходного процесу без використання блоку адаптації для ПД регулятора, результатом чого є великий час виходу на встановлену уставку, через що якість стабілізації та позиціонування значно погіршується, що не відповідає вимогам системи керування.

Створивши структурні схеми системи керування для забезпечення стабілізації, точності позиціонування та моніторингу для вертикальної та горизонтальної осей бойової турелі, та провівши порівняння переходних характеристик контурів з, та без блоку адаптації, можна стверджувати, що підхід з використанням алгоритмів які містять блок адаптації безперечно підходять для забезпечення якості стабілізації та точності позиціонування роботизованої платформи. Повна структурна схема системи керування наведена в додатку Б.

5.2 Параметричний синтез системи керування

Від обраних коефіцієнтів ПІД регуляторів напряду залежить якість стабілізації та точність позиціонування бойової платформи. Враховуючи інноваційний підхід з використання блоку адаптації для забезпечення компенсації нелінійних складових рухомої платформи, таких як значні коливання вертикальної осі під час руху, вистрілу або інших зовнішніх збурювачів, було розроблено експериментальну методику вибору коефіцієнтів для налаштування системи керування. Так як основою є ПІД регулятор, розглянемо його основні частини, та коефіцієнти які потрібно буде знаходити.

ПІД (пропорційно-інтегрально-диференційний) регулятор є одним із типів контролерів, які використовуються в системах автоматичного керування для підтримання заданого значення величини (наприклад, температури, швидкості, рівня тощо). Давайте розглянемо його основні компоненти та принципи дії:

- Пропорційна (П) складова: ця складова пропорційно реагує на поточне значення відхилення системи від заданого. Змінна П складова визначає величину виходу пропорційно до відхилення. Чим більше відхилення, тим більший вихідний сигнал.
- Інтегральна (І) складова: ця складова враховує накопичену історію відхилення системи. Вона допомагає усунути залишкове відхилення, яке може виникнути через неповну ефективність П-регулятора. Інтеграл враховує часовий аспект відхилення.
- Диференційна (Д) складова: ця складова прогнозує майбутнє відхилення системи, враховуючи швидкість зміни відхилення. Допомагає уникнути перевищення значення та зменшує коливання системи.

Робота ПІД регулятора полягає в сумі складових ($P + I + D$), де кожна складова має свій коефіцієнт, який налаштовується для досягнення оптимальної продуктивності системи.

Контролер ПД широко використовується в промислових процесах, системах автоматичного керування та робототехніці для досягнення точного та стабільного регулювання. У правильно налаштованому контролері ПД важливо забезпечити збалансовану реакцію на входні зміни, уникати перевищень та гарантувати стабільність системи. Відповідно до опису, ПД регулятор можна описати наступною формулою:

$$u(t) = П + I + Д = K_p e(t) + K_i \int_0^t e(\tau) d\tau + K_d \frac{de}{dt} \quad (5.2.1)$$

де K_p - це коефіцієнт пропорційної складової, K_i - це коефіцієнт інтегральної складової, та K_d - це коефіцієнт диференційної складової.

Суть експериментального методу підбору параметрів регулятора складається із оптимізованого методу підбору коефіцієнтів за методом Циглера - Нікольса та розділення діапазону можливих значень вимірювання швидкості зміни рухомої платформи в градусах за секунду для внутрішнього контуру стабілізації, та значення відстані до об'єкта для зовнішнього контуру моніторингу. Розберемо детальніше метод налаштування Циглера - Нікольса.

Метод Циглера-Нікольса є одним з класичних методів налаштування ПД регулятора. Цей метод базується на визначенні критичного підсилення та часу коливаний для створення початкових значень коефіцієнтів ПД регулятора.

Основні етапи методу Циглера-Нікольсона:

1. Вимкнення диференційної складової: вимикаємо диференційну складову, встановивши коефіцієнт диференціації (Д) на мінімальне значення (0).
2. Збільшення пропорційної складової: виконати збільшення коефіцієнту пропорційної складової (П) до того моменту, поки система не почне коливатись або виводити початкові ознаки перевищення.
3. Визначення критичного підсилення (K_p): критичне підсилення (K_p) - це значення коефіцієнта пропорційної складової, при якому система перейде в стан коливаний без перевищення.

4. Визначення періоду коливань (T_c): виконати вимірювання періоду коливань (T_c) - час між двома послідовними піками або впадинами коливань.
5. Встановлення коефіцієнтів ПД: використовуючи визначені значення K_c і T_c , встановити коефіцієнти ПД за правилом:
 - a. $P = 0.6 * K_p$
 - b. $I = 2 * P / T_c$
 - c. $D = P * T_c / 8$
6. Налаштування: відредагувати коефіцієнти за необхідності для оптимізації продуктивності та стабільності системи.

Метод Циглера-Нікольсона є емпіричним і може вимагати коригування в залежності від конкретної системи. Зазвичай він використовується для швидкого наближення до оптимальних значень коефіцієнтів. Необхідно враховувати, що налаштування ПД регулятора - це ітеративний процес, і ретельне спостереження за відповіддю системи допоможе досягти найкращих результатів.

В залежності від контуру, потрібно розділити максимальну вимірювальну межу на частини, чим більше частин, тим якісніше буде відпрацьовувати система, далі провести налаштування коефіцієнтів регулятора для кожної частини, отримані значення будуть інтерпретуватися блоком адаптації, де пропорційно між певними значеннями коефіцієнтів декількох проміжків буде розраховуватись певне значення коефіцієнтів, яке буде залежати напряду від вхідного сигналу адаптації, для внутрішнього контуру стабілізації це зміна швидкості бойового модулю в градусах на секунду, для зовнішнього контуру, це визначення відстані до об'єкту моніторингу із далекоміра.

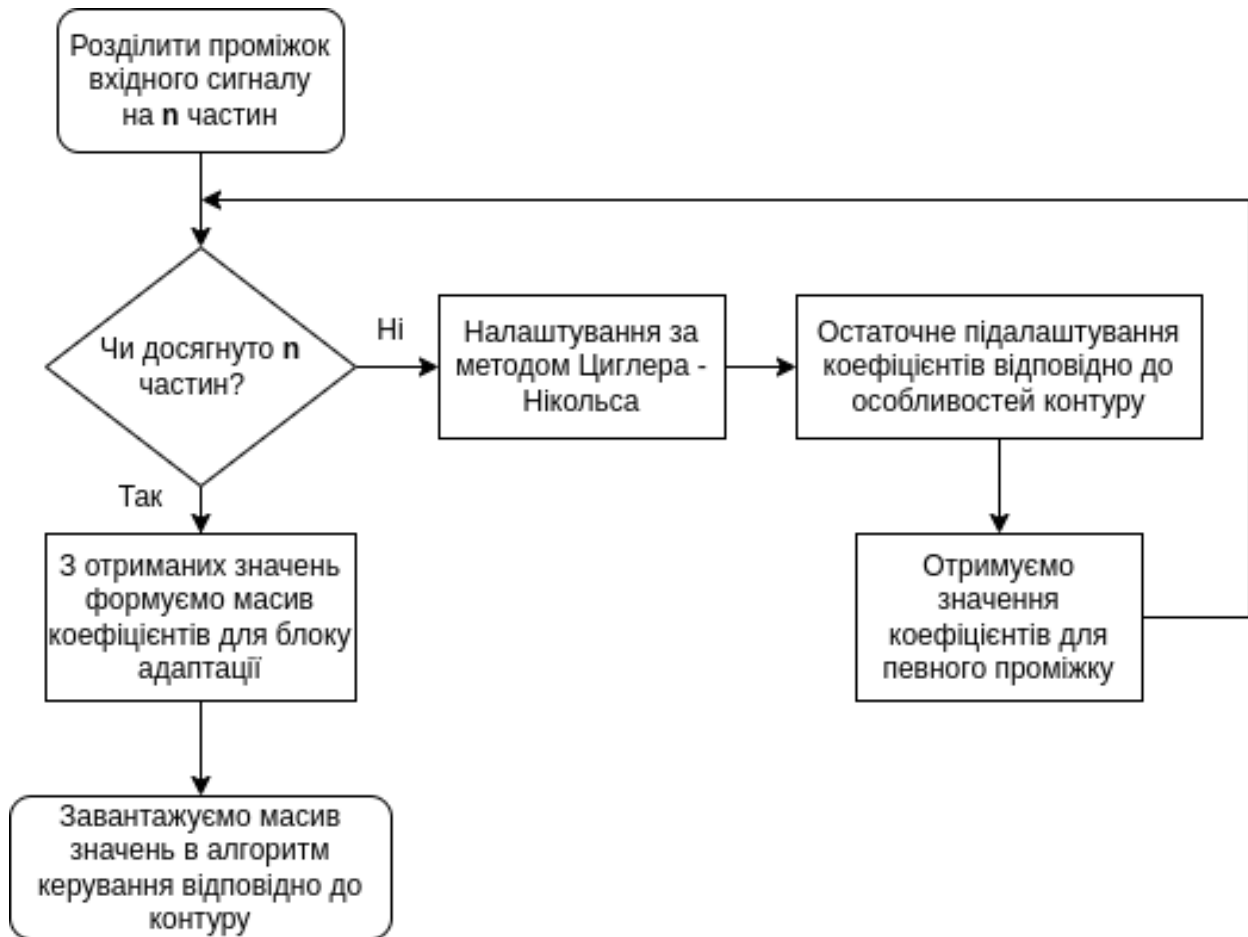


Рисунок 5.2.2 - Алгоритм параметричного синтезу відповідно до контуру керування

На рисунку 5.2.2 зображено загальний вигляд алгоритму синтезування коефіцієнтів для ПІД регулятора, в залежності від контуру, вхідне значення проміжку змінюватиметься, проте сам алгоритм та його кроки є однаковими, та не залежать від внутрішнього контуру стабілізації або зовнішнього контуру моніторингу. Після виконання ітерацій налаштування коефіцієнтів за методом Циглера - Нікольса, в залежності від остаточного результату перехідного процесу, необхідно провести коригування для забезпечення більш якісної стабілізації або моніторингу в залежності від контуру керування.

Дані коефіцієнтів регулятора після синтезу для проміжків вхідного сигналу в залежності від контуру наведені в таблиці 5.2.1 та 5.2.2.

Контур	Проміжок	Кп	Кі	Кд
Внутрішній (Стабілізація)	0 - 45 DPS	0.200	0.150	0.010
	45 - 90 DPS	0.251	0.232	0.010
	90 - 135 DPS	0.346	0.301	0.020
	135 - 180 DPS	0.451	0.352	0.035
Моніторинг	0 - 250 метрів	0.335	0.231	0.020
	250 - 500 метрів	0.278	0.211	0.015
	500 - 750 метрів	0.200	0.152	0.010
	750 - 1000 метрів	0.115	0.110	0.005

Таблиця 5.2.1 - Вихідні дані коефіцієнтів після алгоритму параметричного синтезу для вертикальної осі

Контур	Проміжок	Кп	Кі	Кд
Внутрішній (Стабілізація)	0 - 45 DPS	0.150	0.110	0.010
	45 - 90 DPS	0.178	0.167	0.011
	90 - 135 DPS	0.195	0.195	0.013
	135 - 180 DPS	0.217	0.200	0.018
Моніторинг	0 - 250 метрів	0.232	0.167	0.014
	250 - 500 метрів	0.187	0.131	0.011
	500 - 750 метрів	0.141	0.126	0.009
	750 - 1000 метрів	0.115	0.110	0.002

Таблиця 5.2.1 - Вихідні дані коефіцієнтів після алгоритму параметричного синтезу для горизонтальної осі

Проміжні значення коефіцієнтів в залежності від контурів розраховуються пропорційно від приведених в таблиці 5.2.1 та 5.2.2.

5.3 Реалізація алгоритмів

Враховуючи всі фактори, особливості та вимоги, структурну схему системи керування, було створено алгоритми та програмний комплекс для обраного мікроконтролерного пристрою, для забезпечення стабілізації, точності позиціонування та моніторингу бойового модулю рухомої роботизованої платформи.

Програмне забезпечення (далі ПЗ) складається з декількох частин:

- Модуль зв'язку (зв'язок з блоком управління, або пультом керування)
- Модуль керування виконавчими механізмами (приводи)
- Модуль збору даних з датчиків (датчик орієнтації у просторі)
- Модуль обчислення алгоритмів (стабілізація, позиціонування, моніторинг)
- Модуль бізнес логіки (основної)

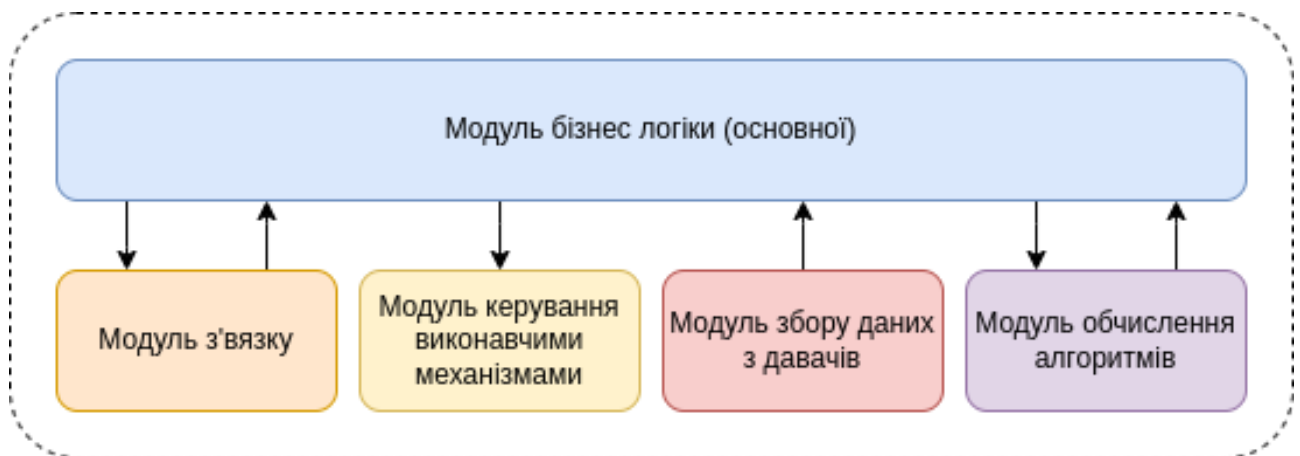


Рисунок 5.3.1 - Структурна схема ПЗ

Враховуючи всі особливості обраної обчислювальної складової, для написання ПЗ було обрано мову програмування C, через особливості сумісності з вбудованими системами на мікроконтролерах, так як ПЗ написано на даній мові є оптимізованим, швидко виконується ядром мікроконтролера через модульний принцип мови програмування.

На рисунку 5.3.1 зображено загальну структурну схему ПЗ та зв'язок між програмними модулями ПЗ.

Для забезпечення безперебійного зв'язку було розроблено пакетний протокол комунікації. Протокол має стартовий та стоповий байти, контрольну суму CRC16XMODEM та кодується за допомогою COBS для чіткого визначення меж окремих пакетів, оскільки використовується для комунікації інтерфейс RS-485, який не має вбудованих можливостей для роботи у пакетному режимі.

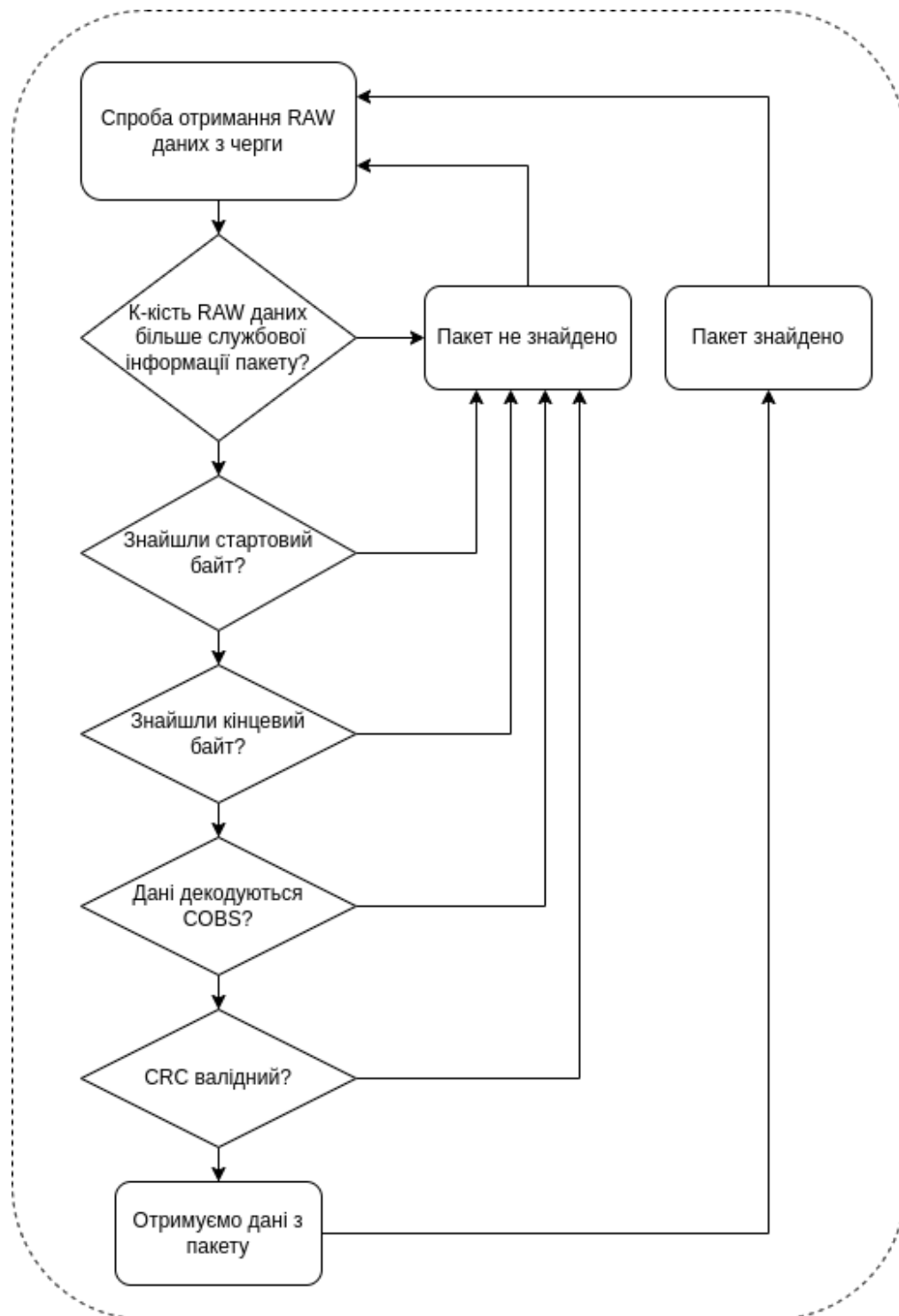


Рисунок 5.3.2 - Алгоритм пакетного протоколу

На рисунку 5.3.2 зображено загальний алгоритм роботи протоколу, він складається з декількох основних дій, а саме пошук стартового та стопових байтів, декодування COBS, розрахунок та перевірка CRC та отримання даних пакету.

COBS - це метод кодування, призначений для передачі байтових даних, де важливо уникнути включення спеціальних байтів в дані, які можуть призвести до помилок у визначенні границь даних. COBS найчастіше використовується в ситуаціях, де важливо мати зрозумілу інформацію про довжину пакетів даних.

Основний принцип COBS - замінити послідовні байти, що мають значення 0, одним байтом, що вказує на кількість замінених байтів. Таким чином, можна уникнути включення нульових байтів в дані, і можливо визначити границі даних.

Основні кроки алгоритму COBS:

1. Початок пакета: початок пакета встановлюється як перший байт даних, який не є 0.
2. Заміна послідовних 0: послідовні групи нульових байтів замінюються одним байтом, що вказує на кількість замінених нульових байтів (кодується як "n-1").
3. Завершення пакета: пакет завершується, коли досягається максимальна довжина або коли зустрічається нульовий байт (за винятком останнього байта пакета).

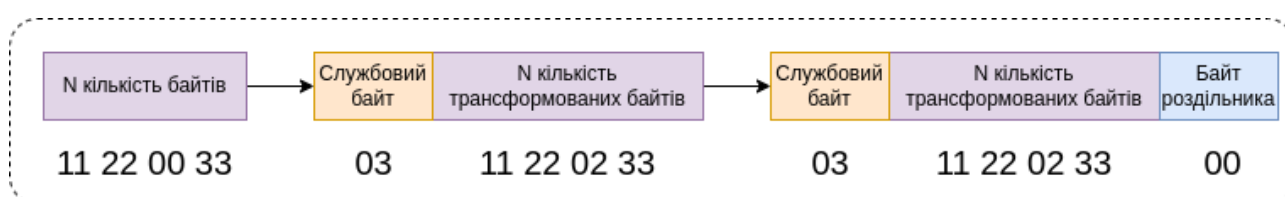


Рисунок 5.3.3 - Приклад та послідовність кодування COBS

Завдяки кодуванню COBS вдалось досягти максимальну надійність, та позбавитись втрати пакетів, адже пакет можна чітко розпарсити через нульовий байт який завжди присутній в кінці пакету кодованого з COBS.



Рисунок 5.3.4 - Загальний алгоритм програми модуля обчислення

На рисунку 5.3.4 зображено загальний алгоритм виконання обчислень керуючого впливу на привода з контурів стабілізації та моніторингу. Програмне забезпечення даного блоку має важливе значення в якості виконання головного завдання по стабілізації точності позиціонування роботизованої платформи та моніторингу. Вхідні сигнали разом із завданням заходять в блок попередньої обробки, де дані обробляються, при необхідності конвертуються в потрібні величини для подальшого розрахунку керуючого впливу регуляторами, після цього дані обробляються блоком адаптації, відбувається процесинг ПІД регулятора та вивід керуючого впливу на виконавчі механізми.

ВИСНОВОК

В даній магістерській роботі була створена автоматизована система керування бойового модулю на рухомій платформі, яка має систему стабілізації, точне позиціонування та моніторинг цілі. Було проведено підбір та аналіз літературних джерел, аналіз сучасних систем та визначено ключові завдання, проблеми систем стабілізації та позиціонування роботизованих платформ, на основі цього створено структурну схему, визначено головні складові системи.

Було визначено та виконано підбір засобів автоматизації для забезпечення якісної стабілізації та позиціонування роботизованої платформи.

Виконано структурний та параметричний синтез системи керування, результатом чого є створена структурна схема керування та алгоритм параметричного синтезу для налаштування адаптивного керування.

Реалізовано програмне забезпечення, алгоритми, блок - схеми, створено протокол комунікації для забезпечення надійного зв'язку між системою автоматизації та пультом керування.

Розроблена система автоматизації може широко використовуватись у військовій та цивільній сферах через те що система має якісну стабілізацію, точність позиціонування роботизованої платформи та моніторинг цілі.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Alston S. C. [и др.]. Automatic turret tracking apparatus for a light air defense system 1987.
2. Beyer O., Kirst ; Bertold Method and apparatus for stabilizing high-dynamics devices 1987.
3. Coleman Method and system for automatic pointing stabilization and aiming control device 2006.
4. Mareschal M. C., Fallon O. ' Operational control logic for harmonized turret with gimbaled sub-systems 2015.
5. Sullivan Stabilized weapon platform with active sense and adaptive motion control 2014. (89). С. 205.
6. Szarek Tilt-ball turret with gimbal lock avoidance 2015.
7. Reconfigurable balancing robot and method for dynamically transitioning between statically stable mode and dynamically balanced mode 2006.
8. Device for the remote control of a fire arm 2006.
9. Gunshot detection stabilized turret robot 2009.
10. Platform stabilization system 2016.
11. Лелюх, О.М. Автоматизована система стабілізації кулеметної турелі [Текст]: кваліфікаційна робота на здобуття освітнього рівня магістр; спец.: 151 – автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології / О.М. Лелюх; наук. кер. П.В. Леонт'єв. – Суми: СумДУ, 2022. – 60 с.
12. Стриженок, Д.О. Автоматизована система керування для дистанційного управління кулеметною туреллю [Текст]: кваліфікаційна робота на здобуття освітнього рівня бакалавр; спец.: 151 – автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології / Стриженок, Д.О; наук. кер. П.В. Леонт'єв. – Суми: СумДУ, 2023. – 60 с.

13. Стриженок Д.О.; Левковський О.В.; Леонтєв П.В.; Завдання до розробки системи керування модуля спостереження на рухомій платформі; ІМА-2023; Суми.
14. Леонтєв П. В., Левковський О. В., Лелюх О. М., Машенцов М. О Ідентифікація моделі координатного позиціонування модуля спостереження; АКІТ-2023; Київ.
15. IAI Autonomous Combat System [Електронний ресурс]. Режим доступу до ресурсу: <https://www.iai.co.il/p/robattle>
16. Ласка 2.0 новий роботизований комплекс від українських розробників. [Електронний ресурс] Режим доступу до ресурсу: https://rc-hobby.com.ua/infocenter/novosti-i-sobytiya/laska-2_0_-novyy-boe-voy-robot-ot-ukrainskikh-razrobotchikov/
17. ГО «Український мілітарний центр». General Dynamics представила новий тип бойових роботів [Електронний ресурс]. Режим доступу до ресурсу: <https://mil.in.ua/uk/news/general-dynamics-predstavyla-novyj-typ-bojovyh-robotiv/>
18. Бойовий робот “Лють”. Укрінформ [Електронний ресурс]. Режим доступу до ресурсу: <https://www.ukrinform.ua/rubric-ato/3768260-glava-mincifri-pokazav-ak-vigladae-ukrainskij-bojovij-robot-lut.html>
19. Mini robot joint module [Електронний ресурс]. Режим доступу до ресурсу: <https://metonec.com/product/mini-Robot-Joint-Module/>
20. Markus Lindegger. Economic viability, applications and limits of efficient permanent magnet motors.- Switzerland: Swiss Federal Office of Energy, 2009
21. STM32F4 Series. Режим доступу до ресурсу: <https://www.st.com/en/microcontrollers-microprocessors/stm32f4-series.html>
22. High-performance foundation line, Arm Cortex-M4 core with DSP and FPU, 512 Kbytes of Flash memory, 180 MHz CPU, ART Accelerator, Dual QSPI [Електронний ресурс]. Режим доступу до ресурсу: <https://www.st.com/en/microcontrollers-microprocessors/stm32f446re.html>

23. Роботизована турель СТРАЖ [Электронный ресурс]. – 2021. – Режим доступа до ресурсу: <https://temerland.com/rishennya/robotizovana-turel-strazh/>.
24. Strain wave gearing [Электронный ресурс]. Режим доступа до ресурсу: https://en.wikipedia.org/wiki/Strain_wave_gearing
25. MPU9255 [Электронный ресурс]. Режим доступа до ресурсу: <https://www.utmel.com/components/mpu9255-multi-chip-module-datasheet-pinout-and-applications?id=352>
26. MPU6050 Datasheet [Электронный ресурс]. Режим доступа до ресурсу: <https://arduino.ua/docs/PS-MPU-6000A.pdf>
27. LSM6D33 Datasheet [Электронный ресурс]. Режим доступа до ресурсу: <https://www.pololu.com/file/0J1087/LSM6DS33.pdf>