НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ УКРАЇНИ
«КИЇВСЬКИЙ ПОЛІТЕХНІЧНИЙ ІНСТИТУТ імені ІГОРЯ СІКОРСЬКОГО»
Приладобудівний факультет
Кафедра комп'ютерно-інтегрованих оптичних та навігаційних систем

«На правах рукопису»
УДК ____

«До захисту допущено»
Завідувач кафедри
_____ Надія БУРАУ
(підпис)
«___»_____2025 р.

Магістерська дисертація

на здобуття ступеня магістра
за освітньо-професійною програмою
«Комп'ютерно-інтегровані технології та системи в приладобудуванні»
зі спеціальності 174 «Автоматизація, комп'ютерно-інтегровані технології та робототехніка»
на тему: «_____»

Виконав:
студент ІІ курсу, групи ПГ-41мп
Олійник Роман Романович _____
(підпис)

Науковий керівник:
доцент. к.т.н. Мураховський Сергій Анатолійович _____
(підпис)

Консультант з розроблення стартап-проекту:
д.е.н., проф., завідувач кафедри економічної кібернетики
Бояринова Катерина Олександрівна _____
(підпис)

Рецензент:
старший науковий співробітник, кандидат наук
Клочко Тетяна Реджинальдівна _____
(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»

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

«___»_____2025 р.

ЗАВДАННЯ
на магістерську дисертацію студента

Олійника Романа Романовича

1. Тема дисертації «Автоматизована система стабілізації», науковий керівник дисертації Мураховський Сергій Анатолійович, к.т.н. затверджені наказом по університету від «___»_____ 2025 р. №_____

2. Термін подання студентом дисертації «15» грудня 2025 р.

3. Об’єкт дослідження процес керування системою стабілізації.

4. Вихідні дані. Момент інерції платформи - до 1,5 Нмс^2, Момент інерції, приведений до вала двигуна - 0,5·10^{-5} Нмс^2, передатне число редуктора - не більше 800, коефіцієнт демпфування двигуна - 10^{-3}...10^{-4} Нмс, момент сили сухого тертя по осі платформи - до 0,5 Нм. Параметри хитавиці: частота регулярної хитавиці від 1 до 20 с$^{-1}$, амплітуда регулярної хитавиці не більше 5º, переважна частота випадкової хитавиці 4 с$^{-1}$, СКВ не більше 2º. Час перехідного режиму - до 2 с, перерегулювання - не більше 20%.

5. Перелік завдань, які потрібно розробити
Вступ. 1. Огляд систем гіроскопічних систем стабілізації. 2. Вибір та обґрунтування конструктивної схеми. Розробка кінематичної схеми. 3. Розробка математичної моделі автоматизованої системи гіроскопічної стабілізації 4. Розробка програмної моделі системи, моделювання та аналіз результатів. Висновки

6. Орієнтовний перелік ілюстративного матеріалу презентація _____

7. Орієнтовний перелік публікацій 1 матеріали науково-технічних конференцій у наукових збірниках _____

8. Консультанти розділів дисертації*

Розділ	Прізвище, ініціали та посада консультанта	Підпис, дата	
		завдання видав	завдання прийняв
Стартап	Бояринова К.О., д.е.н., проф. завідувач кафедри економічної кібернетики		

9. Дата видачі завдання _____

Календарний план

№ з/п	Назва етапів виконання магістерської дисертації	Термін виконання етапів магістерської дисертації	Примітка
1	Огляд систем гіроскопічних систем стабілізації непрямої дії.	01.11.2025	
2	Вибір та обґрунтування конструктивної схеми. Розробка кінематичної схеми.	10.11.2025	
3	Розробка математичної моделі автоматизованої системи стабілізації	15.11.2025	
4	Розробка програмної моделі системи, моделювання та аналіз результатів	30.11.2025	
5			
6			
7			

Студент _____ _____
(підпис) (ініціали, прізвище)

Науковий керівник дисертації _____ _____
(підпис) (ініціали, прізвище)

* Консультантом не може бути зазначено наукового керівника магістерської дисертації.

Анотація

пояснювальна записка містить 126 сторінок, 29 рисунків, 29 таблиць, 21 джерел літератури.

Метою роботи є підвищення ефективності стабілізації кутового положення платформи в умовах динамічних збурень шляхом розробки автоматизованої системи керування на базі сучасних MEMS-сенсорів.

У ході виконання роботи вирішено наступні задачі: проведено аналіз існуючих методів стабілізації та обґрунтовано доцільність використання індикаторної схеми з векторним керуванням двигунами, розроблено математичну модель системи стабілізації, яка враховує кінематичні зв'язки та моменти інерції об'єкта, синтезовано алгоритм керування (ПІД-регулятор) та проведено комп’ютерне моделювання роботи системи, яке підтвердило її стійкість та відповідність заданим показникам якості.

Результати роботи: розроблено програмно-апаратний комплекс, що забезпечує стабілізацію платформи з заданою точністю. Результати можуть бути використані при проектуванні систем відеоспостереження, безпілотних апаратів та робототехнічних комплексів.

Ключові слова: СИСТЕМА СТАБІЛІЗАЦІЇ, ГІРОСКОП, MEMS, АКСЕЛЕРОМЕТР, ПІД-РЕГУЛЯТОР, АВТОМАТИЧНЕ КЕРУВАННЯ, МАТЕМАТИЧНА МОДЕЛЬ.

ABSTRACT

Volume: the explanatory note contains 126 pages, 29 figures, 29 tables, 21 references.

The aim of the thesis is to improve the efficiency of platform angular position stabilization under dynamic disturbances by developing an automated control system based on modern MEMS sensors.

The following tasks were solved during the work: existing stabilization methods were analyzed, and the feasibility of using an indicator scheme with vector motor control was substantiated, A mathematical model of the stabilization system was developed, taking into account kinematic constraints and moments of inertia of the object, a control algorithm (PID controller) was synthesized, and computer simulation of the system operation was performed, confirming its stability and compliance with the specified quality indicators.

Results: a hardware-software complex ensuring platform stabilization with specified accuracy was developed. The results can be used in the design of video surveillance systems, unmanned aerial vehicles (UAVs), and robotic complexes.

Keywords: STABILIZATION SYSTEM, GYROSCOPE, MEMS, ACCELEROMETER, PID CONTROLLER, AUTOMATIC CONTROL, MATHEMATICAL MODEL.

ЗМІСТ

ВСТУП.....7
РОЗДІЛ 1. Загальний огляд систем гіростабілізації.....9
1.1. Загальна характеристика, принцип дії та місце систем стабілізації в теорії керування.....9
1.2. Класифікація систем стабілізації та аналіз методів керування.....10
1.3. Принципи функціонування та особливості побудови безпосередніх гіростабілізаторів.....14
1.4. Принципи побудови та функціонування індикаторних гіроскопічних систем стабілізації.....16
1.5. Принципи побудови та функціонування гіроскопічних стабілізаторів непрямої дії.....19
1.6. Принципи побудови та особливості комбінованих систем стабілізації.....21
1.7. Сучасні тенденції розвитку та технічні засоби реалізації систем стабілізації.....22
1.8. Перспективні та спеціалізовані напрямки розвитку систем стабілізації.....25
РОЗДІЛ 2. Загальний огляд систем гіростабілізації.....28
2.1. Розробка розрахункової схеми та опис принципів функціонування.....28
2.2 Помилки при хитавиці за відсутності тертя на осі стабілізації.....34
2.3 Помилки стабілізації, зумовлені моментом сухого тертя.....37
2.4 Визначення параметрів системи стабілізації при заданій точності.....42
РОЗДІЛ 3. Комп'ютерне моделювання систем стабілізації.....47
3.1 Попередній розрахунок параметрів динамічної моделі.....47
3.2 Результати моделювання при відсутності хитавиці та моменту сухого тертя.....49
3.3 Порівняльний аналіз перехідної характеристики та динамічної похибки системи.....56
3.4 Результати моделювання при синусоїдної хитавиці.....64
3.5 Результати моделювання випадкової хитавиці.....71
3.6 Результат моделювання системи стабілізації при моменті сухого тертя.....75
РОЗДІЛ 4. Розробка стартап проекту.....81
4.1 Опис та технологічний аудит ідеї стартап-проекту.....81
4.2 Аналіз ринкових можливостей запуску стартап-проекту.....85
4.3 Розроблення ринкової стратегії та маркетингової програми проекту.....101
4.4. Розроблення маркетингової програми стартап-проекту.....106
4.5 Бізнес-модель реалізації стартап-проекту та оцінювання його економічної ефективності.....115
ВИСНОВОК ДО РОЗДІЛУ.....120
ВИСНОВОК.....123
СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ.....125

ВСТУП

Сучасний етап розвитку робототехніки, авіабудування та приладобудування характеризується неухильним зростанням вимог до точності та надійності функціонування технічних систем в умовах динамічних навантажень. Особливої гостроти набуває проблема стабілізації положення об'єктів у просторі, оскільки зовнішні збурення, вібрації та кутові коливання носія суттєво знижують ефективність роботи навігаційного обладнання, якість оптичної зйомки та точність наведення виконавчих механізмів.

Існуючі методи стабілізації, що базуються на класичних механічних принципах, часто не задовольняють сучасним вимогам щодо масогабаритних показників та енергоефективності. Водночас, стрімкий розвиток мікроелектромеханічних систем (MEMS) та обчислювальних засобів відкриває нові можливості для створення компактних, швидкодіючих та відносно недорогих систем індикаторного типу. Проте, реалізація потенціалу цих компонентів вимагає розробки вдосконалених алгоритмів керування та обробки сигналів, здатних ефективно працювати в умовах невизначеності та шумів. У зв'язку з цим, розробка автоматизованої системи стабілізації, яка поєднує в собі сучасну елементну базу та ефективні закони керування, є актуальною науково-технічною задачею.

Мета і задачі дослідження. Метою роботи є підвищення точності та швидкодії процесу стабілізації платформи шляхом розробки автоматизованої системи керування з використанням сучасних методів цифрової обробки інформації.

Для досягнення поставленої мети необхідно вирішити такі задачі:

1. Провести аналіз існуючих методів та засобів стабілізації, обґрунтувати вибір структурної схеми системи.
2. Розробити математичну модель системи стабілізації, що враховує динаміку виконавчих механізмів та вплив зовнішніх збурень.
3. Провести експериментальне дослідження (або комп'ютерне моделювання) розробленої системи та оцінити її ефективність.

Об’єкт дослідження — процес стабілізації кутового положення платформи в умовах дії зовнішніх збурень.

Предмет дослідження — методи, алгоритми керування та апаратні засоби побудови автоматизованої системи стабілізації на базі MEMS-датчиків.

Методи дослідження. У роботі використано методи теорії автоматичного керування (для синтезу регулятора та аналізу стійкості), методи математичного моделювання (для опису динаміки системи), методи комп'ютерного моделювання в середовищі MATLAB/Simulink та експериментальні методи дослідження.

Практичне значення отриманих результатів полягає у розробці програмної моделі системи стабілізації непрямої дії, яка дозволяє провести кількісну та якісну оцінку процесу стабілізації об'єкта керування за умови дії зовнішніх збурень детермінованого та стохастичного типу.

Наукова новизна одержаних результатів полягає в удосконаленні математичної моделі системи стабілізації за рахунок врахування нелінійностей виконавчого механізму.

Апробація досліджень, які виконанні у магістерський дисертації проводилася в рамках XXI Всеукраїнської науково-практичної конференції студентів, аспірантів та молодих вчених «Ефективність та Автоматизація інженерних рішень у приладобудуванні», 10-11 грудня 2025 р. м. Київ

РОЗДІЛ 1. Загальний огляд систем гіростабілізації

1.1. Загальна характеристика, принцип дії та місце систем стабілізації в теорії керування

Стрімкий розвиток сучасної техніки, що характеризується підвищенням вимог до швидкодії, надійності та точності функціонування складних механізмів, неможливий без впровадження високоефективних систем автоматичного керування (САК). Серед широкого класу таких систем особливе та фундаментальне місце посідають системи автоматичної стабілізації. Їх основне функціональне призначення полягає у підтримці вихідних координат об'єкта керування на заданому, незмінному в часі рівні, або ж у їх зміні за певним законом, який забезпечує стійкість об'єкта відносно зовнішнього середовища. Проблема стабілізації є актуальною для найрізноманітніших галузей: від прецизійної оптики та робототехнічних комплексів до енергетичних установок та авіакосмічної техніки.

В основі функціонування будь-якої системи стабілізації лежить фундаментальний принцип компенсації збурень. У реальних умовах експлуатації на будь-який технічний об'єкт діє низка дестабілізуючих факторів: механічні вібрації, зміни температурних режимів, електромагнітні завади, зміни навантаження тощо. Без застосування спеціальних засобів керування ці фактори призводять до відхилення параметрів об'єкта від номінальних значень, що може спричинити порушення технологічного процесу, зниження якості продукції або навіть аварійні ситуації. Автоматизована система стабілізації покликана нівелювати вплив цих збурень, забезпечуючи інваріантність вихідної величини.

З погляду кібернетики та теорії інформації, процес стабілізації можна розглядати як процес боротьби з ентропією системи. Ключовим елементом, що забезпечує цю боротьбу, є негативний зворотний зв'язок. Структурно така система складається з об'єкта керування, вимірювальних перетворювачів (датчиків), порівнювального пристрою та виконавчого механізму. Датчики безперервно

фіксують поточний стан системи, перетворюючи фізичні величини в електричні сигнали. Порівнювальний пристрій визначає сигнал розузгодження (помилку) як різницю між поточним та заданим значенням. На основі цього сигналу регулятор формує керуючий вплив, який через виконавчий механізм прикладається до об'єкта з метою зменшення помилки до нуля. Ефективність роботи такої системи визначається трьома основними критеріями: стійкістю (здатністю повертатися до рівноваги), точністю (величиною статичної помилки) та якістю перехідного процесу (часом регулювання та величиною перерегулювання).

1.2. Класифікація систем стабілізації та аналіз методів керування

Різноманітність фізичних процесів, що підлягають стабілізації, зумовила існування широкого спектру технічних рішень, які можна класифікувати за кількома визначальними ознаками. Системний підхід до класифікації дозволяє обґрунтовано підійти до вибору структури проектованої системи.

Першою важливою ознакою класифікації є вид енергії, що використовується у виконавчих механізмах. Гідравлічні та пневматичні системи стабілізації, незважаючи на їх громіздкість, залишаються незамінними у випадках, коли необхідно керувати об'єктами великої маси з високою швидкодією, наприклад, в авіації чи важкому машинобудуванні. Проте в сучасній робототехніці та приладобудуванні домінуюче положення займають електромеханічні системи. Використання сучасних безколекторних двигунів, крокових приводів та п'єзоелектричних актуаторів дозволяє досягти мікронної точності позиціонування при відносно невеликих габаритах та енергоспоживанні, що є критично важливим для мобільних та автономних пристроїв.

За характером обробки інформації системи поділяються на аналогові та цифрові (дискретні). Аналогові системи, побудовані на операційних підсилювачах, забезпечують миттєву реакцію на збурення, оскільки працюють у безперервному часі. Однак вони страждають від дрейфу параметрів, температурної нестабільності та складності реалізації складних законів керування. Сучасний етап розвитку техніки характеризується масовим переходом до цифрових систем стабілізації на базі

мікроконтролерів, сигнальних процесорів (DSP) та програмованих логічних інтегральних схем (FPGA). Цифрова реалізація дозволяє застосовувати складні алгоритми фільтрації шумів (наприклад, фільтр Калмана), легко змінювати параметри регулятора програмним шляхом та реалізовувати адаптивні закони керування без зміни апаратної частини.

Ключовим аспектом, що визначає динаміку системи, є закон керування. У промисловій практиці найбільш поширеним залишається пропорційно-інтегрально-диференціальний (ПІД) закон регулювання. Пропорційна складова забезпечує швидкодію, реагуючи на миттєве значення помилки; інтегральна складова дозволяє усунути статичну помилку, накопичуючи історію відхилень; диференціальна складова прогнозує майбутню поведінку системи, реагуючи на швидкість зміни помилки, що ефективно гасить коливання. Водночас для складних нелінійних об'єктів зі змінними параметрами класичного ПІД-регулювання може бути недостатньо. У таких випадках застосовуються методи сучасної теорії керування: робастне керування, що гарантує стійкість при невизначеності моделі об'єкта, та інтелектуальне керування з використанням нейронних мереж та нечіткої логіки, які здатні навчатися та адаптуватися до змін умов функціонування.

Окремим і вкрай важливим критерієм класифікації систем просторової стабілізації є кількість ступенів вільності, за якими здійснюється активне керування положенням об'єкта. Під ступенем вільності у даному контексті розуміється можливість незалежного обертання об'єкта навколо однієї з трьох взаємно перпендикулярних осей декартової системи координат, пов'язаної з платформою-носієм. У теорії навігації та керування ці осі традиційно позначаються як крен (Roll, вісь X), тангаж (Pitch, вісь Y) та рискання (Yaw, вісь Z). Залежно від кількості задіяних приводів розрізняють одно-, дво- та трьохосьові системи стабілізації[1].

Одноосьові системи стабілізації є найпростішим класом пристроїв, що забезпечують компенсацію кутових збурень виключно за однією узагальненою координатою. Найчастіше такі системи застосовуються для утримання обрію (стабілізація за креном) або для утримання заданого кута нахилу (стабілізація за

тангажем). Кінематична схема одноосьового стабілізатора включає одну рамку підвісу та один виконавчий механізм (Рис 1.1).

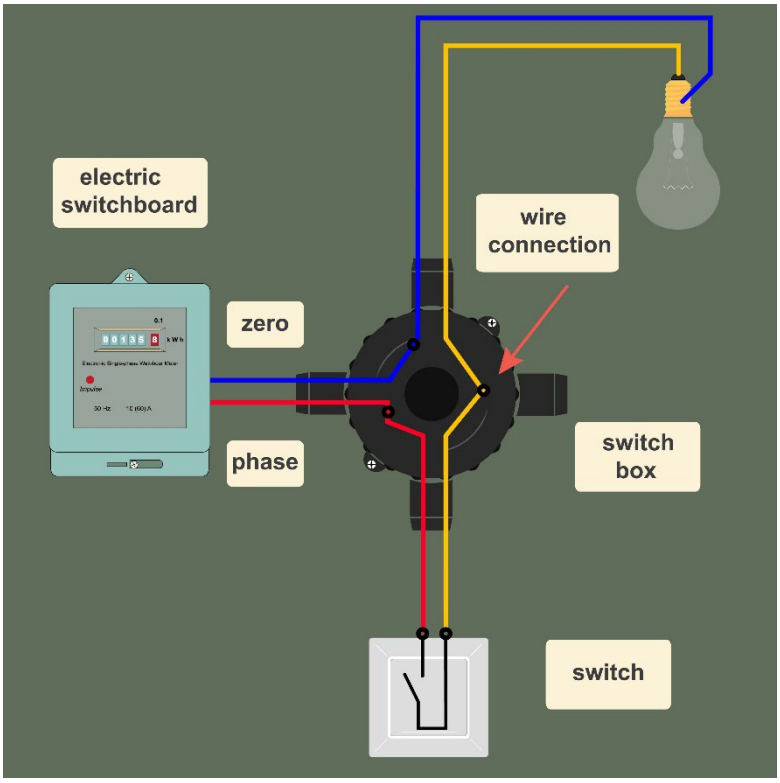


Рис. 1.1 Приклад одноосьової системи

Перевагою таких систем є конструктивна простота, висока надійність та мінімальні масогабаритні показники. Проте, їх функціональні можливості суттєво обмежені: будь-які коливання носія навколо інших осей передаються на корисне навантаження без змін, що робить одноосьові системи малоефективними в умовах складної динаміки руху носія [1].

Двоосьові системи стабілізації являють собою більш досконале технічне рішення, що дозволяє ізолювати об'єкт від збурень за двома координатами. Як правило, це стабілізація за кутами тангажу (θ та крену γ). Така конфігурація набула широкого поширення в системах спостереження та аерофотозйомки з безпілотних літальних апаратів. Конструктивно це реалізується шляхом послідовного з'єднання двох рам карданного підвісу. Двоосьовий стабілізатор ефективно компенсує нахили носія, забезпечуючи стабільність лінії візування відносно горизонту. Однак суттєвим недоліком такої схеми є нездатність компенсувати коливання за курсом (вісь рискання). Це призводить до того, що при поворотах носія або під дією бічного вітру

зображення або положення об'єкта зміщується в горизонтальній площині, що може бути неприпустимим для високоточних задач[2].

Трьохосьові системи стабілізації забезпечують повну просторову стабілізацію об'єкта, компенсуючи обертальні рухи носія за всіма трьома кутами Ейлера: креном, тангажем та рисканням. Така система містить три ортогонально розташовані виконавчі механізми та відповідні датчики положення (гіроскопи та акселерометри) для кожної осі. Рис. 2.1

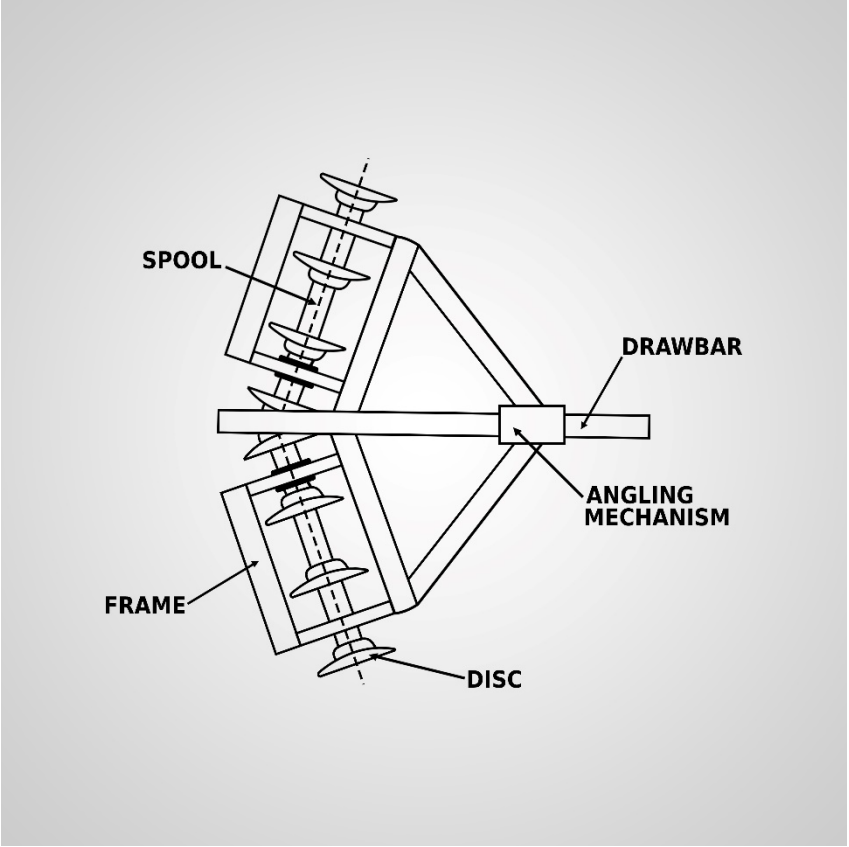


Рис.1.2 Приклад трьохосьової стабілізації

Алгоритми керування трьохосьовими системами є найбільш складними, оскільки вони повинні враховувати кінематичні зв'язки між рамками підвісу та здійснювати перетворення координат у реальному часі. Використання третьої осі дозволяє не лише гасити паразитні коливання, але й реалізовувати складні режими керування, такі як плавне слідування за об'єктом (Follow mode) або фіксацію абсолютної орієнтації незалежно від маневрів носія (Lock mode). Незважаючи на підвищену конструктивну складність, більшу вагу та енергоспоживання, саме

трьохосьові системи є стандартом для професійного обладнання, оскільки забезпечують максимальну якість стабілізації[2].

Варто зазначити, що зі збільшенням кількості осей зростає порядок диференціальних рівнянь, що описують динаміку системи, а також виникають специфічні проблеми, такі як явище «складання рамок» (gimbal lock), коли при певному положенні осей система втрачає один ступінь вільності. Вирішення цих проблем вимагає застосування спеціальних математичних методів, зокрема використання кватерніонів замість кутів Ейлера при синтезі алгоритмів орієнтації [2].

1.3. Принципи функціонування та особливості побудови безпосередніх гіростабілізаторів

Особливе місце в класифікації систем стабілізації посідають безпосередні (силові) гіростабілізатори. Їх фундаментальна відмінність від індикаторних систем полягає в тому, що стабілізуючий момент, який протидіє зовнішнім збуренням, створюється безпосередньо гіроскопічним агрегатом за рахунок динамічних властивостей ротора, що швидко обертається. У таких системах гіроскоп виступає одночасно і чутливим елементом, і виконавчим органом, беручи на себе повне силове навантаження[3].

Фізичною основою роботи безпосереднього гіростабілізатора є властивість вільного гіроскопа зберігати незмінним напрямок вектора кінетичного моменту H у інерціальному просторі. Згідно з теоремою про кінетичний момент, для зміни напрямку осі обертання масивного ротора до нього необхідно прикласти зовнішній момент сил. Відповідно, сам гіроскоп реагує на зовнішній вплив виникненням гіроскопічного моменту M_g, який визначається векторним добутком[9]:

$$M_g = H \times \omega_p$$

де H — вектор кінетичного моменту ротора (добуток моменту інерції на кутову швидкість власного обертання), а ω_p — кутова швидкість прецесії. Цей момент спрямований протилежно до моменту зовнішніх сил, що діють на об'єкт, і намагається

компенсувати його вплив. Ефективність стабілізації у таких системах прямо пропорційна величині кінетичного моменту, що вимагає використання масивних роторів та високих швидкостей обертання (від десятків тисяч обертів на хвилину)[5].

Конструктивно безпосередній гіростабілізатор являє собою гіроскоп у карданному підвісі, зовнішня рамка якого жорстко пов'язана з об'єктом стабілізації. Залежно від способу керування прецесійним рухом, такі системи поділяються на пасивні та активні[5].

У пасивних безпосередніх стабілізаторах відсутні спеціальні приводи, що прикладають моменти до рамок підвісу. Стабілізація здійснюється виключно за рахунок природної гіроскопічної жорсткості. Такі системи ефективно гасять високочастотні коливання та короткочасні удари, працюючи як своєрідний «динамічний демпфер». Проте, через наявність тертя в осях підвісу та незбалансованість мас, пасивні системи схильні до накопичення помилки (дрейфу) з часом, що обмежує їх застосування задачами короткочасної стабілізації або демпфування вібрацій[4].

Значно більші функціональні можливості мають активні безпосередні гіростабілізатори. У їх конструкцію введено спеціальний розвантажувальний двигун (або систему корекції), який прикладає керуючий момент до осі прецесії гіроскопа. Згідно з законом прецесії, прикладання моменту до однієї осі викликає рух гіроскопа навколо перпендикулярної осі. Таким чином, примусово викликаючи прецесію гіроскопа, можна отримати потужний гіроскопічний момент по осі стабілізації, який значно перевищує момент двигуна корекції. Це дозволяє розглядати активний гіростабілізатор як підсилювач моменту, де вхідна енергія витрачається на керування прецесією, а вихідна протидія формується кінетичною енергією ротора[6].

Перевагою безпосередніх гіростабілізаторів є відсутність запізнення в контурі керування, оскільки реакція на збурення виникає миттєво на фізичному рівні, а не в результаті обробки сигналу контролером. Це забезпечує високу стійкість та надійність системи. Окрім того, вони не потребують складних обчислювальних алгоритмів для базового функціонування.

Проте аналіз показує суттєві недоліки, що обмежують поширення даного типу систем у сучасній компактній техніці. По-перше, для створення достатнього стабілізуючого моменту необхідні значні маса та габарити гіроскопа (вага агрегату може досягати 5-10% від ваги об'єкта стабілізації). По-друге, такі системи є енергоємними, оскільки вимагають постійної підтримки високої швидкості обертання важкого ротора. По-третє, наявність масивних рухомих частин створює вібраційний фон і гіроскопічні перехресні зв'язки, які можуть впливати на керованість носія[4].

На сьогоднішній день сфера застосування безпосередніх гіростабілізаторів змістилася в бік специфічних задач, де масогабаритні обмеження не є критичними, а пріоритетом є надійність та потужність. Найбільш яскравим прикладом є судові заспокоювачі хитавиці (гіроскопічні стабілізатори суден), стабілізатори монорейкового транспорту та спеціалізовані системи стабілізації для великогабаритної аерофотознімальної апаратури. У сфері малої робототехніки та високоточної електроніки вони були витіснені індикаторними системами, де гіроскоп використовується лише як датчик кутової швидкості.

1.4. Принципи побудови та функціонування індикаторних гіроскопічних систем стабілізації

На сучасному етапі розвитку автоматики домінуюче положення серед систем просторової стабілізації займають індикаторні гіростабілізатори. На відміну від систем безпосередньої стабілізації, де гіроскоп виконує подвійну функцію датчика та силового вузла, в індикаторних системах реалізовано принцип функціонального розділення: вимірювання параметрів руху та створення стабілізуючих моментів здійснюються різними, незалежними елементами. Гіроскопічний пристрій у такій архітектурі працює в «розвантаженому» режимі, виконуючи роль виключно чутливого елемента (датчика), що фіксує відхилення об'єкта від заданого положення або вимірює кутову швидкість його обертання[7].

Структурно індикаторний стабілізатор являє собою замкнену систему автоматичного регулювання (слідкувальну систему). Рис. 1.3

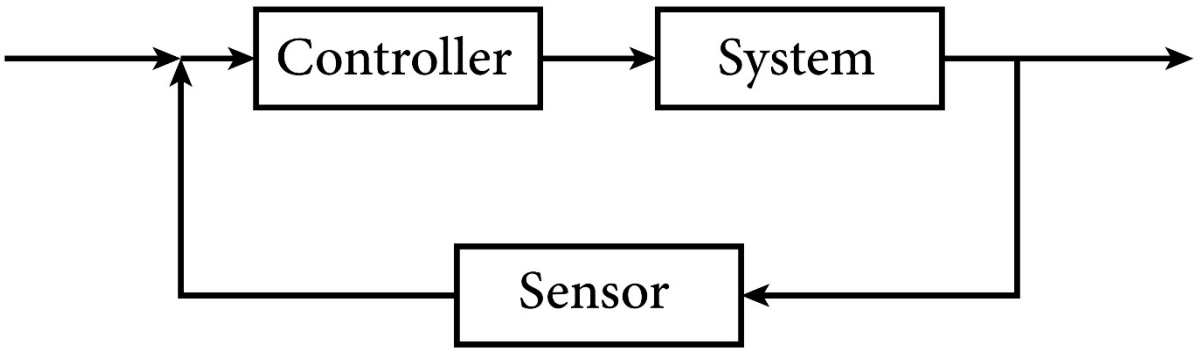


Рис.1.3 Структурна схема індикаторного стабілізатора

Принцип її дії полягає в наступному: при виникненні збурюючого моменту, що діє на об'єкт стабілізації, відбувається його кутове відхилення. Чутливий елемент (гіроскоп або блок інерціальних датчиків) миттєво реагує на це відхилення, формуючи електричний сигнал, пропорційний куту розузгодження або його похідній. Цей сигнал надходить до електронного блоку керування, де відбувається його підсилення, частотна фільтрація та перетворення відповідно до обраного закону керування (наприклад, ПІД-регулювання). Сформований керуючий сигнал подається на виконавчий механізм — спеціалізований розвантажувальний двигун, вал якого кінематично пов'язаний з віссю підвісу платформи. Двигун розвиває крутний момент, який за величиною дорівнює, а за напрямком протилежний збурюючому моменту, повертаючи об'єкт у вихідне положення або утримуючи його нерухомим у інерціальному просторі[7].

Ключовою особливістю та перевагою індикаторних систем є відсутність жорсткого механічного зв'язку між параметрами гіроскопа та масою об'єкта стабілізації. Це дозволяє використовувати мініатюрні чутливі елементи для стабілізації платформ вагою від кількох грамів до десятків тонн. Якщо в класичних електромеханічних системах використовувалися прецизійні поплавкові або

динамічно налаштовані гіроскопи, то в сучасних розробках відбувся масовий перехід на мікроелектромеханічні системи (MEMS). MEMS-датчикі являють собою чіпи, що поєднують механічні вібруючі мікроструктури з електронними схемами обробки сигналу. Використання MEMS-технологій дозволило кардинально зменшити вартість, габарити та енергоспоживання систем стабілізації, що стало поштовхом до їх повсюдного впровадження у безпілотних апаратах та мобільній електроніці[8].

Важливим аспектом проектування індикаторних стабілізаторів є вибір типу виконавчого привода. У сучасних високоточних системах перевага надається безколекторним двигунам постійного струму (BLDC) з прямим приводом (Direct Drive). Відсутність редуктора усуває люфти та механічну пружність передачі, що дозволяє значно розширити смугу пропускання системи та підвищити точність стабілізації. Керування такими двигунами здійснюється за допомогою методів векторного керування (FOC — Field Oriented Control), що забезпечує плавність ходу та високий момент навіть на нульових швидкостях[10].

Завдяки розділенню вимірювальної та силової частин, індикаторні системи надають широкі можливості для реалізації складних алгоритмів керування. Сучасні контролери здатні виконувати сенсорну фузію (Sensor Fusion), комплексуючи дані від гіроскопів, акселерометрів та магнітометрів за допомогою фільтра Калмана або комплементарних фільтрів. Це дозволяє компенсувати властивий MEMS-датчикам дрейф нуля та забезпечити точну прив'язку до горизонту. Крім того, програмне керування дозволяє реалізовувати різні режими роботи, такі як відстеження кутового положення носія зі згладжуванням (режим слідування) або програмне наведення на ціль за зовнішніми координатами.

Однак, індикаторні системи мають і певні особливості, що ускладнюють їх розробку. Оскільки стабілізація здійснюється через контур зворотного зв'язку, система має обмежену швидкодію, яка залежить від частоти опитування датчиків та інерційності двигунів. Некоректне налаштування коефіцієнтів регулятора може призвести до виникнення автоколивань або втрати стійкості. Також, на відміну від безпосередніх стабілізаторів, індикаторна система потребує постійного джерела

електроживлення для роботи двигунів: при зникненні живлення стабілізуючий ефект повністю зникає.

Незважаючи на зазначені особливості, саме архітектура індикаторного гіростабілізатора забезпечує найкраще співвідношення точності, масогабаритних показників та функціональності, що робить її безальтернативним вибором для вирішення поставленої в дипломній роботі задачі.

1.5. Принципи побудови та функціонування гіроскопічних стабілізаторів непрямої дії

Кардинальним кроком у розвитку техніки стабілізації, що дозволив зняти обмеження щодо маси та габаритів стабілізованих об'єктів, стала поява гіроскопічних стабілізаторів непрямої дії. Якщо у системах безпосередньої стабілізації компенсація збурень здійснюється за рахунок внутрішньої енергії обертання ротора, то у стабілізаторах непрямої дії реалізовано принцип зовнішнього силового розвантаження. Сутність цього методу полягає у використанні стороннього джерела енергії для створення стабілізуючого моменту, в той час як гіроскопічний вузол виконує функції чутливого елемента, що керує цим потоком енергії. Така архітектура дозволяє розглядати стабілізатор як електромеханічний підсилювач потужності, де слабкий сигнал від гіроскопа перетворюється у значний крутний момент виконавчого привода.

Ключовим елементом конструкції стабілізатора непрямої дії є розвантажувальний двигун (або двигун стабілізації), який встановлюється на осі підвісу платформи. Кінематична схема побудована таким чином, що гіроскоп, встановлений у рамі, реагує на кутову швидкість або кут відхилення об'єкта. Під дією зовнішнього збурюючого моменту виникає прецесійний рух гіроскопа. Цей рух фіксується спеціальними датчиками (потенціометрами, індукційними датчиками кута або оптичними енкодерами), сигнал з яких надходить до підсилювально-перетворювального пристрою. Після обробки та підсилення сигнал подається на розвантажувальний двигун. Двигун створює момент, спрямований назустріч

зовнішньому збуренню, і тим самим розвантажує гіроскоп від необхідності силової протидії, повертаючи або утримуючи платформу в заданому положенні.

Важливою характеристикою систем непрямої дії є наявність глибокого зворотного зв'язку. Процес регулювання відбувається наступним чином: як тільки двигун розвиває достатній момент для компенсації збурення, прецесія гіроскопа припиняється, і сигнал розузгодження зменшується. Така схема дозволяє стабілізувати об'єкти практично необмеженої маси — від оптичних прицілів до корабельних артилерійських башт і антен радіолокаційних станцій, використовуючи при цьому відносно невеликі гіроскопічні датчики. Коефіцієнт підсилення за моментом у таких системах може досягати значень 10^5 і вище, що є недосяжним для безпосередніх гіростабілізаторів.

Залежно від типу використовуваного привода та характеру обробки сигналу, стабілізатори непрямої дії класифікують на електромашинні, електрогідравлічні та релейні. У системах великої потужності (наприклад, в авіації або морському флоті) часто застосовують електрогідравлічні приводи, де сигнал від гіроскопа керує золотниковим механізмом, що перерозподіляє тиск робочої рідини в гідроциліндрах. Це забезпечує виняткову швидкодію та питому потужність. У системах меншої потужності застосовуються електричні сервоприводи. Окремим історичним етапом розвитку були релейні системи, де керування двигуном здійснювалося за принципом «увімкнено-вимкнено» при досягненні гіроскопом певного кута прецесії, проте через виникнення автоколивань у сучасному прецизійному обладнанні вони використовуються рідко.

Варто зазначити, що поняття «гіростабілізатор непрямої дії» є узагальнюючим для широкого класу систем. У сучасній термінології найбільш досконалою реалізацією цього принципу є індикаторні системи (описані вище), де зв'язок між гіроскопом та двигуном є чисто електричним (інформаційним). Проте класичні стабілізатори непрямої дії можуть містити і механічні зворотні зв'язки або використовувати гіроскопічний момент як допоміжний демпфуючий фактор. Головною перевагою такої схеми залишається можливість роздільного проектування

чутливого елемента (на точність) і виконавчого механізму (на потужність), що дозволяє досягти оптимального балансу характеристик для будь-якої технічної задачі.

1.6. Принципи побудови та особливості комбінованих систем стабілізації

Окремий і найбільш досконалий клас систем автоматичного керування становлять комбіновані системи стабілізації. Їх поява зумовлена необхідністю подолання фундаментальних суперечностей, властивих як замкненим системам (які реагують лише після появи помилки), так і розімкненим системам (які не контролюють точність виконання команди). У контексті гіроскопічної стабілізації термін «комбінована система» може трактуватися у двох аспектах: як поєднання різних принципів керування (за відхиленням та за збуренням) або як синтез силової та індикаторної схем стабілізації[11].

З точки зору теорії керування, класична комбінована система базується на одночасному використанні принципу регулювання за відхиленням (похибкою) та принципу компенсації збурень (інваріантності). У такій архітектурі, окрім основного контуру зворотного зв'язку, який мінімізує помилку стабілізації, вводиться додатковий канал керування за збуренням. Цей канал містить датчики, які вимірюють параметри зовнішнього впливу (наприклад, кутову швидкість коливань корпусу носія) ще до того, як вони призведуть до помітного відхилення платформи. Сигнал з цих датчиків, проходячи через спеціальні компенсуючі ланки, подається на виконавчий привід, формуючи «випереджаючий» момент. Таким чином, система працює на випередження, компенсуючи основну частину збурення розімкненим каналом, тоді як замкнений контур (ПІД-регулятор) усуває залишкові похибки, спричинені неточностями моделі або невідомими факторами. Такий підхід дозволяє теоретично досягти абсолютної інваріантності, коли помилка системи дорівнює нулю незалежно від амплітуди збурень.

У технічній реалізації гіроскопічних пристроїв комбінований принцип часто втілюється у вигляді так званих активно-пасивних систем або активних гіростабілізаторів. У таких конструкціях використовується масивний гіроскоп (як у

системах безпосередньої дії), який забезпечує миттєву пасивну стабілізацію за рахунок своєї гіроскопічної жорсткості, ефективно гасячи високочастотні вібрації та різкі удари, на які звичайна слідкувальна система не встигла б зреагувати через інерційність та запізнення сигналів. Одночасно з цим, до осей прецесії гіроскопа прикладаються моменти від двигунів корекції, керованих сигналами від датчиків кута або зовнішньої системи навігації[11]. Це дозволяє активно керувати положенням гіроскопа, усуваючи його власний дрейф та забезпечуючи точне відстеження цільового положення.

Така гібридна архітектура забезпечує системі унікальні динамічні характеристики. По-перше, значно розширюється смуга пропускання частот: високочастотний спектр збурень пригнічується пасивною масою ротора, а низькочастотний — активною роботою приводів. По-друге, підвищується енергоефективність при роботі в режимі утримання, оскільки основне навантаження бере на себе гіроскопічний момент, а двигуни вмикаються лише для корекції.

Проте, широке впровадження комбінованих систем стримується високою складністю їх проектування та налаштування. Реалізація принципу інваріантності вимагає точного знання математичної моделі об'єкта та характеристик збурень, що в реальних умовах експлуатації часто змінюються. Крім того, наявність додаткових вимірювальних каналів та складних алгоритмів обробки інформації підвищує вартість системи. Тому комбіновані стабілізатори знаходять застосування переважно у високоточній військовій техніці (системи наведення озброєння танків, корабельні артилерійські комплекси) та космічній галузі (силові гіроскопи-гіродини для орієнтації орбітальних станцій), де вимоги до точності та швидкодії є пріоритетними над вартістю та габаритами.

1.7. Сучасні тенденції розвитку та технічні засоби реалізації систем стабілізації

Сучасний етап розвитку автоматизованих систем стабілізації характеризується докорінною зміною технологічної парадигми: переходом від електромеханічних

пристроїв з обертовими масами до твердотільних сенсорів та повністю цифрових контурів керування. Ця трансформація зумовлена необхідністю мінімізації масогабаритних показників при одночасному підвищенні надійності та функціональності систем. Аналіз ринку та науково-технічної літератури дозволяє виділити три ключові напрямки, що визначають вигляд сучасних систем стабілізації: впровадження мікроелектромеханічних систем (MEMS), використання оптичних квантових технологій та перехід до інтелектуальних алгоритмів керування прямим приводом.

Найбільш масовим класом сучасних датчиків для систем стабілізації стали мікроелектромеханічні гіроскопи (MEMS). Технологія їх виробництва базується на методах фотолітографії та травлення кремнію, що дозволяє створювати мікроскопічні вібруючі структури на одному кристалі з електронними схемами обробки сигналу. Принцип дії MEMS-гіроскопів заснований на використанні сили Коріоліса: при обертанні основи вібруюча маса зазнає зміщення у перпендикулярному напрямку, що фіксується ємнісними датчиками. Перевагами таких систем є їх надзвичайна мініатюрність (розміри корпусу до кількох міліметрів), низьке енергоспоживання та вартість, що дозволило інтегрувати системи стабілізації навіть у мобільні телефони та мініатюрні дрони. Хоча точність окремого MEMS-датчика поступається класичним механічним гіроскопам через високий рівень шумів та температурний дрейф, цей недолік ефективно компенсується алгоритмічними методами та об'єднанням датчиків у масиви[13].

У сегменті високоточних професійних та військових систем (навігація суден, авіація, стратегічні платформи) стандартом стали оптичні гіроскопи: волоконно-оптичні (FOG) та кільцеві лазерні (RLG). Їх робота базується на ефекті Саньяка — зміщенні інтерференційної смуги зустрічних світлових потоків у замкненому контурі при його обертанні. Рис. 1.4

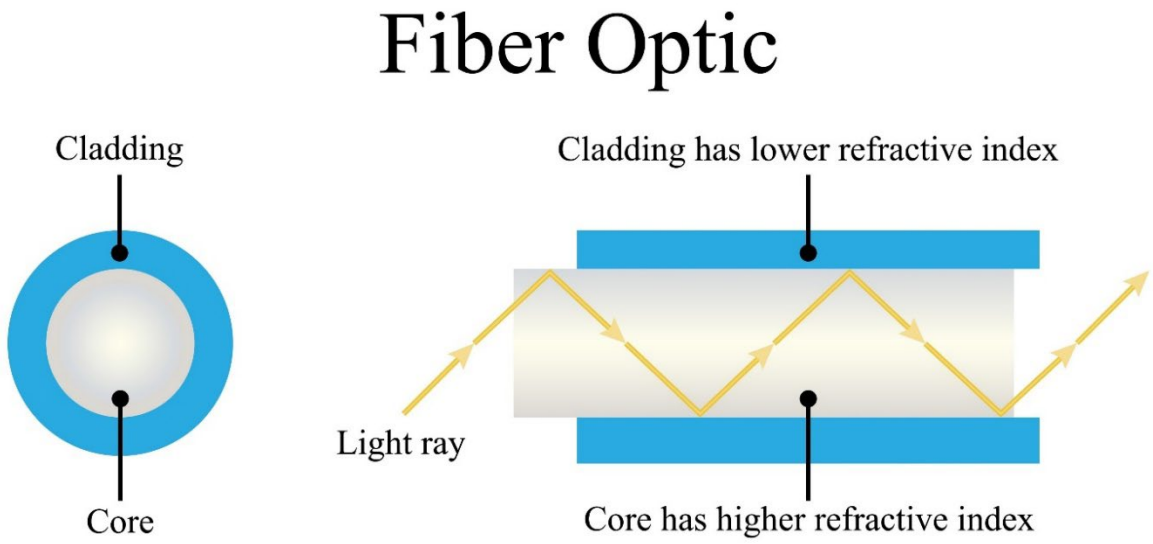


Рис. 1.4. Принцип дії волоконнооптичних гіроскопів

Такі системи не містять рухомих механічних частин, що забезпечує їм практично необмежений ресурс роботи, стійкість до перевантажень (до сотень g) та унікальну стабільність нульового рівня (дрейф менше 0.01 градуса за годину). Волоконно-оптичні гіроскопи забезпечують найвищу якість стабілізації на великих відстанях та при тривалих місіях, де накопичення помилки є критичним фактором{]14.

Революційні зміни відбулися і в частині виконавчих механізмів. Сучасні системи стабілізації малого та середнього класу (стедіками, підвіси камер, робототехнічні суглоби) майже повністю відмовилися від колекторних двигунів та редукторів на користь безколекторних двигунів змінного струму (PMSM/BLDC) з прямим приводом (Direct Drive). Відсутність механічної передачі усуває люфти, тертя та пружні деформації, що дозволяє системі миттєво реагувати на команди керування. Для керування такими двигунами застосовується векторна модуляція (FOC — Field Oriented Control), яка дозволяє керувати вектором магнітного поля статора перпендикулярно до магнітного поля ротора. Це забезпечує максимальний крутний момент на всьому діапазоні швидкостей, плавність руху без ривків (cogging effect) та високу енергоефективність.

Окремим трендом є розвиток алгоритмічного забезпечення. Сучасна система стабілізації — це насамперед обчислювальний комплекс. Оскільки «сирі» дані з

MEMS-датчиків є зашумленими, ключову роль відіграють методи сенсорної фузії (Sensor Fusion). Алгоритми, такі як розширений фільтр Калмана (EKF) або фільтр Маджвіка, об'єднують дані від гіроскопа (швидка реакція), акселерометра (корекція горизонту) та магнітометра (корекція курсу) для отримання точного кватерніона орієнтації. Останні розробки в цій галузі включають використання нейронних мереж для передбачення характеру руху носія та адаптації коефіцієнтів PID-регулятора в реальному часі, що дозволяє системі «вчитися» під час роботи, підлаштовуючись під зміну маси камери або погодні умови.

Таким чином, сучасна система стабілізації є складним програмно-апаратним комплексом, в якому фізичні обмеження дешевих сенсорів долаються за рахунок обчислювальної потужності мікроконтролерів та інтелектуальних алгоритмів керування, а механічна частина спрощується до надійних безредукторних схем прямого приводу.

1.8. Перспективні та спеціалізовані напрямки розвитку систем стабілізації

Окрім загальнопоширених індикаторних та оптичних систем, сучасна інженерія активно розвиває спеціалізовані класи гіроскопічних пристроїв, орієнтованих на роботу в екстремальних умовах космосу та високоточної навігації. До найбільш значущих інновацій у цій сфері належать твердотільні хвильові гіроскопи, силові гіроскопічні комплекси (гіродини) та перспективні квантові сенсори.

Твердотільні хвильові гіроскопи (HRG — Hemispherical Resonator Gyroscope) Ця технологія на сьогодні вважається «золотим стандартом» для космічних апаратів з тривалим терміном експлуатації (супутники зв'язку, телескоп Hubble, марсоходи). Принцип дії HRG базується на інертності стоячої хвилі пружних коливань у осесиметричному резонаторі, який найчастіше має форму кварцового келиха або півсфери.

Коли резонатор обертається, стояча хвиля, збуджена на його кромці, відстає від обертання корпусу через силу Коріоліса. Це кутове зміщення хвилі фіксується електродами. Ключовою перевагою HRG є повна відсутність тертьових частин,

підшипників чи мастила. Ресурс таких гіроскопів обчислюється мільйонами годин безперервної роботи, вони нечутливі до радіації та вакууму. У контексті систем стабілізації HRG забезпечують унікальне поєднання низького шуму, властивого масивним гіроскопам, з надійністю твердотільної електроніки.

Силові гіроскопічні комплекси (CMG — Control Moment Gyros) Якщо у звичайних системах стабілізації гіроскоп є лише датчиком, а керування здійснюють реактивні двигуни або маховики, то в сучасній важкій космонавтиці (МКС, орбітальні станції) використовуються гіродини — системи, що поєднують функції силового привода та акумулятора кінетичного моменту. Гіродин складається з ротора, що обертається з постійною високою швидкістю, встановленого в карданному підвісі. Керуючий момент створюється не зміною швидкості ротора (як у реактивних маховиках), а зміною орієнтації його осі обертання. Це дозволяє отримати ефект «гіроскопічного підсилення»: невеликий момент двигуна підвісу трансформується у величезний гіроскопічний момент, що повертає весь космічний апарат. Такі системи є найбільш енергоефективним способом стабілізації великогабаритних об'єктів у безповітряному просторі.

Атомні (квантові) гіроскопи (Atom Interferometry Gyroscopes) Це найбільш перспективний напрямок, що знаходиться на стадії лабораторних досліджень та перших прототипів. Технологія базується на хвильових властивостях матерії (двоїстість корпускулярно-хвильової природи атомів). Замість світлових променів, як у волоконно-оптичних гіроскопах, тут використовуються пучки холодних атомів (наприклад, рубідію), що рухаються у вакуумі. Завдяки тому, що маса атома значно більша за масу фотона, чутливість таких систем до обертання (ефект Саньяка для хвиль матерії) теоретично в 10^{10} разів вища, ніж у оптичних аналогів. Впровадження атомних гіроскопів у майбутньому дозволить створювати абсолютно автономні системи інерціальної навігації та стабілізації, які не потребуватимуть сигналу GPS для корекції положення протягом тижнів або місяців руху під водою чи під землею.

Електронна стабілізація зображення (EIS) на основі гіроскопічних даних В окремий клас варто виділити гібридні програмно-апаратні рішення, що набули поширення в екшн-камерах та безпілотниках. Тут фізична стабілізація платформи

відсутня або мінімальна. Натомість високочастотні дані з MEMS-гіроскопа записуються синхронно з відеопотоком. Стабілізація відбувається постфактум (або в реальному часі) шляхом цифрової трансформації кожного кадру: процесор зсуває та повертає зображення в протилежний бік від зафіксованого ривка камери. Хоча цей метод призводить до незначної втрати поля зору (кроп-фактор), він дозволяє створювати системи стабілізації з нульовою вагою та абсолютною механічною надійністю.

РОЗДІЛ 2. Загальний огляд систем гіростабілізації

2.1. Розробка розрахункової схеми та опис принципів функціонування

Для побудови математичної моделі розглянемо одноосну систему непрямої стабілізації, яка є базовою ланкою для побудови складніших дво- та трьохосьових систем. Принципова схема такої системи наведена на основі класичних рішень теорії гіроскопічних систем.

У системах непрямої стабілізації збурювальні моменти, що діють на об’єкт, компенсуються виключно за рахунок моментів виконавчих двигунів. Гіроскопи при цьому не беруть участі у компенсації зовнішніх збурень: їхня функція зводиться до формування нерухомої системи координат на рухомій платформі (кораблі, літаку тощо) та генерації сигналів керування для підсилювачів стабілізуючих приводів[11].

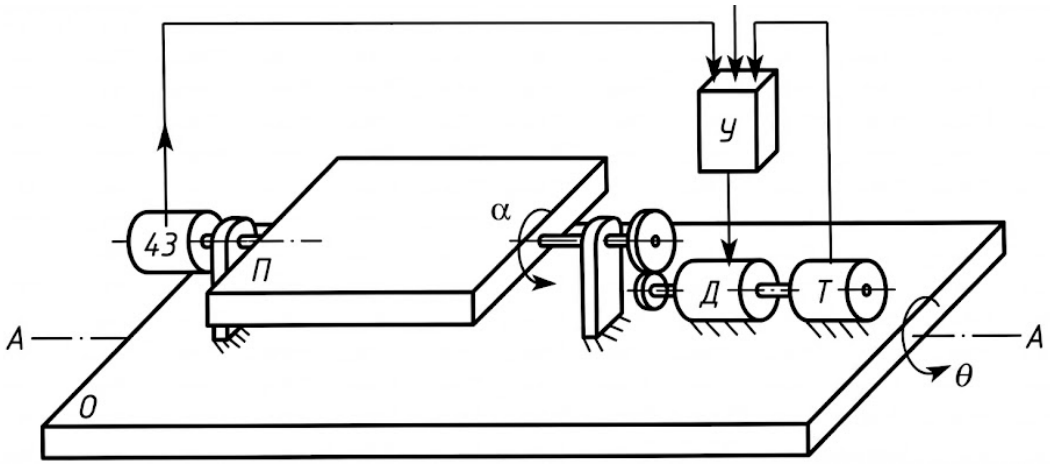


Рис. 2.1 Схема системи стабілізації платформи

Дослідження проводиться стосовно одновісних систем непрямої стабілізації з подальшим урахуванням взаємного впливу поворотів кілець підвісу.

Принципова схема одновісної системи непрямої стабілізації може мати, наприклад, вигляд, показаний на рис. 2.1, де:

- П — платформа, що стабілізується, встановлена на об'єкті *О*, що хитається;
- ЧЭ (на схемі позначено як блок 43) — чутливий елемент, що виявляє помилку стабілізації, тобто абсолютний кут повороту платформи;

- У — підсилювач (пристрій керування);
- Д — стабілізуючий двигун;
- Т — жорстко зв'язаний з ним тахогенератор;
- θ — кут хитавиці об'єкта навколо осі *А-А;*

На підсилювач, що керує стабілізуючим двигуном, можуть надходити не лише сигнали від чутливого елемента ЧЕ та тахогенератора Т, як показано на рис. 2.1, але й інші сигнали, наприклад сигнал, пропорційний швидкості хитавиці, що отримується від гіротахометра, встановленого на об'єкті, що хитається.

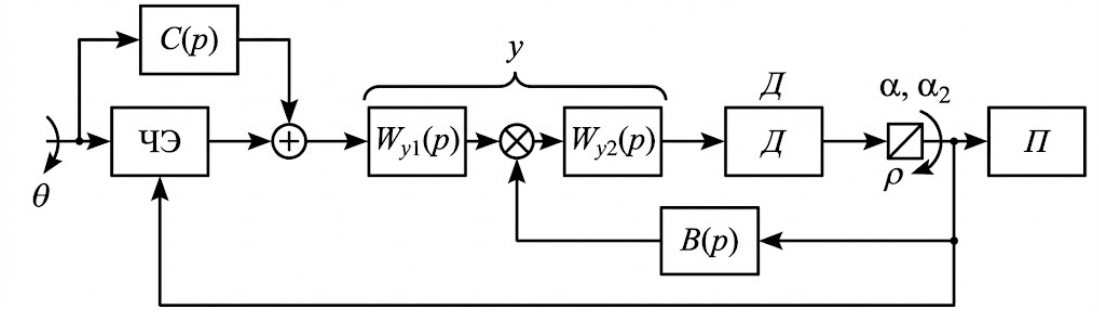


Рис.2.2 Блок схема системи

Блок-схема системи непрямої стабілізації наведена на рис. 2.2, де:

- ЧЕ — чутливий елемент;
- У — підсилювач;
- Д — двигун;
- Р — редуктор;
- П — платформа;
- $W_{y1}(p)$ та $W_{y2}(p)$ — передатні функції блоків підсилювача разом із коригувальними засобами8;
- $B(p)$ — передатна функція кола сигналу за похідними кута повороту α_2 платформи відносно об'єкта, що хитається, причому $\lim_{p} \to 0\ B(p) = 0$;
- $C(p)$ — передатна функція кола сигналу за похідними кута хитавиці (цей сигнал може бути поданий не на вхід підсилювача, як показано на схемі, а в іншу точку підсилювального тракту, як і сигнал за похідними кута α_2, причому $\lim_{p} \to 0\ C(p) = 0$.

Диференціальні рівняння системи стабілізації, блок-схема якої наведена на рис. 2.2, у символічному записі мають наступний вигляд.

$$\begin{cases} J_0 p^2 \alpha + J_д n p^2 [(-1)^i \theta - n\alpha_2 = M_B - nM_д \\ M_д = k_д U - snp\alpha_2; \\ U = W_y(p)[k_{чє}\alpha - \dfrac{B(p)}{W_{y1}(p)}\alpha_2 + C(p)\theta \\ \alpha = \theta - \alpha_2 \end{cases} \quad (2.1)$$

Тут прийняті такі позначення13:

- J_0 — момент інерції платформи, зведений до осі стабілізації;
- $J_р$— момент інерції ротора двигуна з редуктором, зведений до осі двигуна;
- n — передатне число редуктора, що має *i* пар зубчастих передач.
- $M_в$ — сумарний збурювальний момент зовнішніх сил на осі стабілізації (момент сухого тертя, момент від небалансу тощо);
- $M_д$ — момент стабілізувального двигуна;
- U — напруга керування цього двигуна;
- $k_д$ та s — коефіцієнти, що характеризують двигун;
- $k_{ч,е}$ — коефіцієнт передачі чутливого елемента;

$$W_y(p) = W_{y1}(p)W_{y2}(p)$$

Звернемося до структурних схем систем стабілізації, що дозволяють зробити їх аналіз більш наочним. Системі рівнянь (2.1) відповідає структурна схема системи стабілізації, де $T_д = \frac{J_д}{s}$ — електромеханічна стала часу двигуна з урахуванням моменту інерції редуктора. Штриховою лінією зі стрілками показано зв'язок, який при $n \gg 1$ може не враховуватися. Частина схеми, обмежена прямокутником, відповідає стабілізувальному двигуну та редуктору.

Структурна схема системи може бути подана також у вигляді, показаному на рис. 2.4

$$T_c = \frac{J_0 + n^2 J_p}{sn^2} = \frac{J_c}{sn^2}$$

є сталою часу системи стабілізації, де $J_c = J_0 + n^2 J_p$. Частина схеми, обведена штриховою лінією, відповідає стабілізувальному двигуну, взятому спільно з редуктором та платформою, що стабілізується[19].

Як збурювальний момент зовнішніх сил враховано лише момент сухого тертя на осі стабілізації:

$$M_{\text{в}} = M_T sign p\alpha_2; p = \frac{d}{dt} \tag{2.2}$$

У цьому випадку помилка стабілізації:

$$\alpha = \frac{\begin{gathered}\left[p\left\{1 + \left[1 - (-1)^i \frac{1}{n}\right] T_{\text{д}} p\right\} + \right. \\ \left. + \frac{k_{\text{д}}}{sn} W_y(p) \left[\frac{B(p)}{W_{y1}(p)} - C(p)\right] \theta + \right. \\ \left. + \frac{1}{sn^2} M_T sign \pi p \alpha_2 \right.\end{gathered}}{p(1 + T_c p) + \frac{k_{\text{ч,є}} k_{\text{д}} W_y(p)}{sn} \left[1 + \frac{B(p)}{k_{\text{ч,є}} W_{y1}(p)}\right]} \tag{2.3}$$

Використовуючи правила перетворення структурних схем, перейдемо від рис. 2.4 до нової структурної схеми (рис. 2.5).

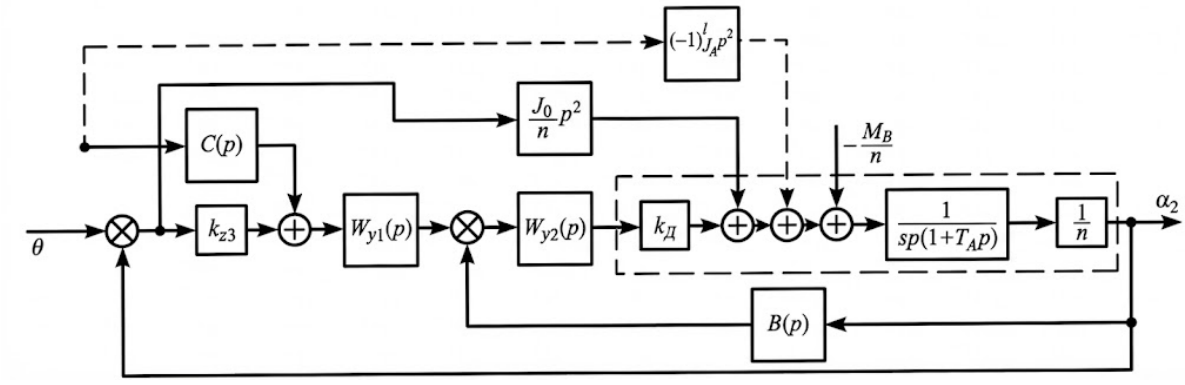


Рис. 2.3 Структурна схема 1

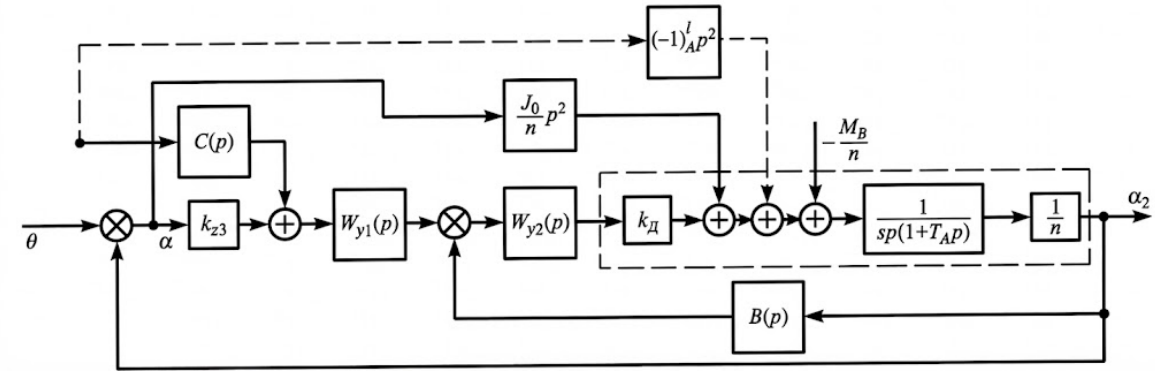


Рис. 2.4 Структурна схема 2

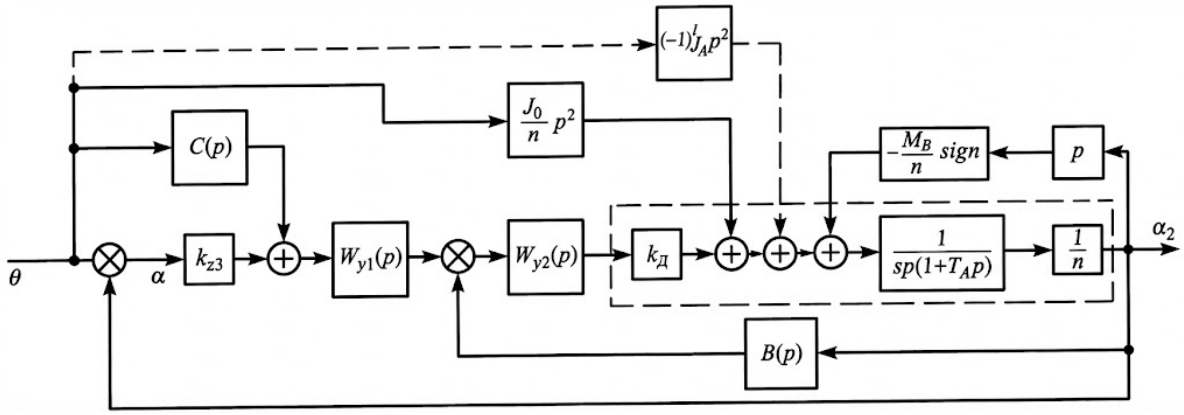


Рис.2.5 Структурна схема 3

всі додаткові кола, за якими на структурній схемі здійснюється вплив на систему за кутом хитавиці θ, увімкнені безпосередньо після елемента порівняння кутів θта α_2, що виявляє помилку стабілізації α[19]. Ці кола обведені на рис. 2.5 штрих-пунктирною лінією, а їхня загальна передатна функція позначена:

$$P(p) = \frac{\frac{J_0}{n} + (-1)^i J_д}{k_{ч,є} k_д W_y(p)} p^2 + \frac{C(p)}{k_{ч,є}} \tag{2.4}$$

Передатна функція розімкненої системи стабілізації, структурна схема якої зображена на рис. 2.3–2.5, дорівнює:

$$W(p) = \frac{\frac{k_{ч,є} k_д}{sn} W_y(p)}{p(1 + T_c p) + \frac{k_д}{sn} W_{y2}(p) B(p)} \tag{2.5}$$

Помилка стабілізації (5.3) може бути записана у вигляді:

$$\alpha = \frac{1 - W(p)P(p)}{1 + W(p)} \theta + \frac{W_M(p)}{1 + W(p)} M_T sign p \alpha_2 \tag{2.6}$$

де

$$W_M(p) = \frac{\frac{1}{sn^2}}{p(1+T_c p) + \frac{k_д}{sn} W_{y2}(p) B(p)} \tag{2.7}$$

є передатною функцією системи за помилкою від збурювального моменту на осі стабілізації.

Перший доданок виразу (2.6) являє собою помилку від обкочування:

$$\alpha_0 = \frac{1 - W(p)P(p)}{1 + W(p)} \theta \tag{2.8}$$

а другий — моментну помилку.

Запишемо помилку від обкочування у вигляді:

$$\alpha_0 = \frac{1}{1 + W(p)} \rho(p)\theta = \frac{1}{1 + W(p)\theta_1} \tag{2.9}$$

де $\rho(p)$ — передатну функція перетворювальної ланки, за допомогою якої кут хитавиці θ замінюється кутом еквівалентної хитавиці:

$$\theta_1 = \rho(p)\theta \tag{2.10}$$

Передатна функція перетворювальної ланки згідно з виразами (2.8) і (2.9) дорівнює:

$$\rho(p) = 1 - W(p)P(p) \tag{2.11}$$

У нашому випадку, коли $W(p)$ і $P(p)$ визначаються виразами (2.4) і (2.5), знайдемо:

$$\rho(p) = \frac{\left[p\left\{1 + \left[1 - (-1)^i \frac{1}{n}\right] T_д p\right\} + \frac{k_д}{sn} W_y(p) \left[\frac{B(p)}{W_{y1}(p)} - C(p)\right]\right.}{p(1 + T_c p) + \frac{k_{ч,є} k_д W_y(p)}{sn} B(p)} \tag{2.12}$$

Помилку стабілізації (2.6) запишемо з урахуванням формул (2.9) і (2.11) у вигляді:

$$\alpha = \frac{1}{1 + W(p)} \rho(p)\theta + + \frac{W_M(p)}{1 + W(p)} M_T sign p \alpha_2$$

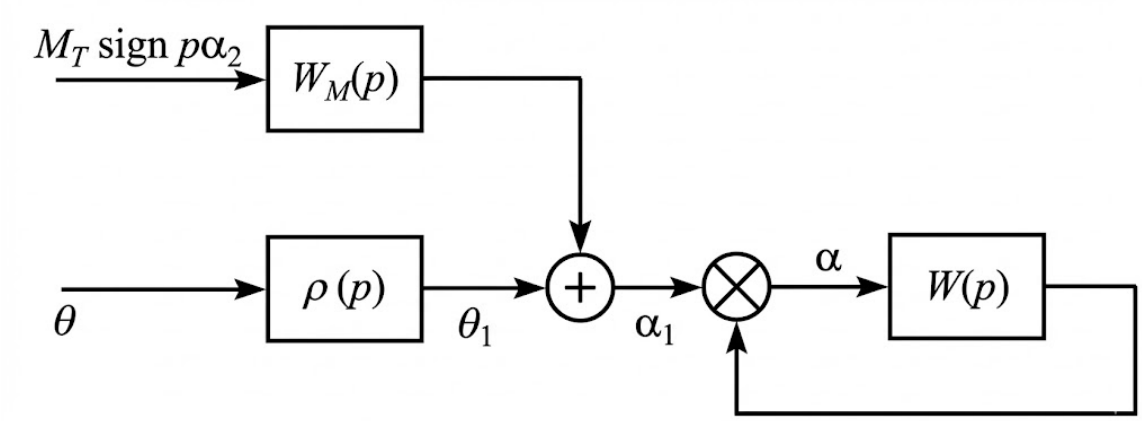


Рис. 2.6 Спрощена структурна схема

Цьому виразу відповідає перетворена структурна схема системи стабілізації (рис. 2.6). Помилка α зумовлена відпрацюванням деякого керуючого впливу α. Згідно з останнім виразом і схемою на рис. 2.6, помилка стабілізації α може розраховуватися як помилка слідкувальної системи відтворення кута при відпрацюванні нею керуючого впливу, якщо[6]:

$$\alpha_1 = \rho(p)\theta + W_M M_T sign\, p\alpha_2$$

а передатна функція розімкненої слідкуючої системи дорівнює $W(p)$. У загальному випадку замість моменту тертя $M_T sign\, p\alpha_2$ тут може бути записаний, як вже зазначено, сумарний збурювальний момент зовнішніх сил M_B, що діє на осі стабілізації[17].

Розглянута перетворена схема системи стабілізації, де остання замінена слідкуючої системою відтворення кута з такою ж передатною функцією, а збурювальні впливи замінені еквівалентним керуючим впливом, що діє на слідкуючу систему, використовується нижче з метою поширення на системи непрямої стабілізації методів синтезу, розвинених для систем відтворення кута.

2.2 Помилки при хитавиці за відсутності тертя на осі стабілізації

За відсутності тертя помилка стабілізації при хитавиці дорівнює помилці (5.9) від обкочування двигуна та пов'язаних з ним обертових частин системи, тобто

$$\alpha = \alpha_0 = \frac{1}{1 + W(p)}\rho(p)\theta$$

або

$$\alpha = \frac{1}{1 + W(p)}\theta_1 \qquad (2.13)$$

де θвизначається формулою (2.10).

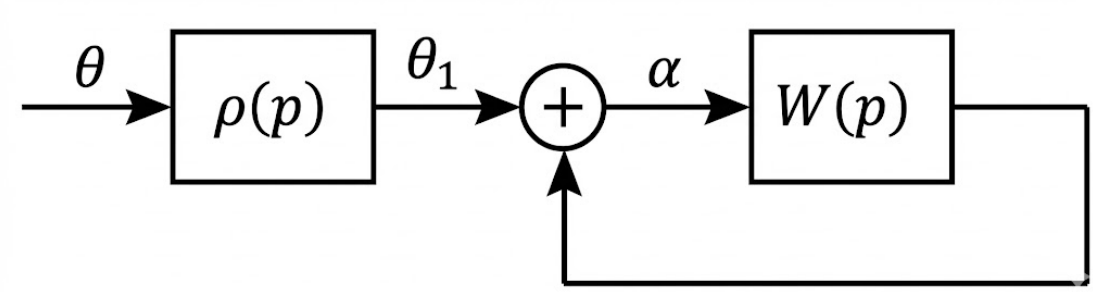


Рис.2.7 Перетворена структурна схема

Співвідношенням (2.13) відповідає перетворена структурна схема системи при $M_T = 0$, відтворена на рис. 2.7.

Другий вираз (5.13) збігається за формою з відомим співвідношенням для помилки α слідкуючої системи відтворення кута θ, яка має в розімкненому стані таку саму передатну функцію $W(p)$, як і система стабілізації. Використаємо співвідношення (2.13) для визначення бажаної передатної функції системи, при якій буде забезпечена задана точність стабілізації у разі гармонічної хитавиці[20]. При цьому застосуємо метод логарифмічних амплітудних-частотних характеристик (ЛАЧХ).

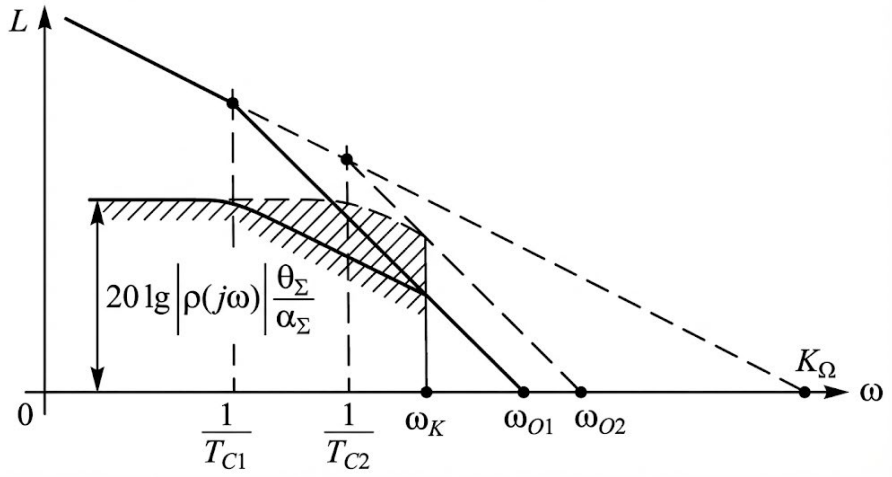


Рис.2.8 До визначення передатної функції системи за припустимою помилкою від обкатки

Згідно з формулою (2.15) та за зразком рис. 2.4 побудуємо межу забороненої області для низькочастотної частини ЛАЧХ, яка визначається виразом:

$$L(\omega) = 20\lg|\rho(j\omega)|\frac{\theta_{max}}{\alpha_{max}}, \omega \le \omega_k.$$

Тут ω_k — задана найбільша частота хитавиці, а α_{max} — допустима помилка від обкочування.

З виразу (2.12) випливає, що

$$|\rho(jw)| < 1$$

і що модуль частотної передатної функції перетворювальної ланки, який прямує до одиниці при $\omega \to 0$, спадає зі зростанням частоти[15]. Відповідно до цього межа забороненої області для л. а. х. системи матиме, наприклад, вигляд, показаний на рис. 2.8 кривою зі штрихуванням.

Уточнення вигляду забороненої області для низькочастотної частини ЛАЧХ. пов'язане зі структурою системи, що визначає вигляд передатної функції перетворювальної ланки.

Так, з виразу (2.12) випливає, що найпростішим для дослідження є випадок $B(p) = C(p) = 0$ відсутності гнучких зв'язків за кутами хитавиці θ та відпрацювання α_2 При цьому

$$\rho(p) = \frac{1 + \left[1 - (-1)^i \frac{1}{n}\right] T_д p}{1 + T_c p}$$

і помилка від обкочування може бути тим меншою, чим меншим є відношення

$$\alpha = \frac{T_д}{T_c} = \frac{J_д}{\frac{J_0}{n^2} + J_д} = \frac{J_д n^2}{J_0 + J_д n^3}$$

моменту інерції двигуна до сумарного моменту інерції двигуна та платформи.

За наявності в системі тахометричного зворотного зв'язку, тобто при $B(p) \neq 0$, вигляд передатній функції (2.12) перетворювальної ланки, а отже, і забороненої області на рис. 2.8, залежить від параметрів контуру зворотного зв'язку, тобто від величин, що входять у добуток $\frac{k_д}{sn} W_{y2}(p) B(p)$. При збільшенні коефіцієнта передачі

по контуру зворотного зв'язку можливо, як випливає з формули (2.12), $|\rho(j\omega)| \to 1$ (тахометричний зворотний зв'язок збільшує помилку стабілізації).

На передатну функцію (2.12) суттєво впливає також введення похідних за кутом хитавиці (випадок $C(p) \neq 0$).

Більш детальний розгляд питання про побудову забороненої області для низькочастотної частини вхідних даних системи непрямої стабілізації можливий для конкретних випадків.

Параметри системи, що визначають вигляд її частотної передатної функції або вхідних даних в області середніх і високих частот, встановлюються відповідно до вимог до системи щодо запасу стійкості та можуть бути знайдені за методикою.

2.3 Помилки стабілізації, зумовлені моментом сухого тертя

Помилка стабілізації, зумовлена моментом сухого тертя, визначається другим доданком у формулі (2.6). Будемо розглядати лише такі випадки, коли система стабілізації не має астатизму за моментом тертя. Тоді після закінчення перехідного процесу, що виникає внаслідок зміни знаку моменту тертя поблизу точки зміни знаку швидкості хитавиці, в системі є усталена моментна помилка. Передбачається, як зазвичай, що перехідний процес закінчується до наступної зміни знаку швидкості хитавиці.

Усталена моментна помилка дорівнює:

$$\alpha_{\text{м.у}} = \frac{M_T}{k_{\text{ч,є}} k_y k_{\text{д}} n} = \frac{M_T}{s n^2 K_\Omega} \tag{2.14}$$

де:

M_T — момент сухого тертя на осі стабілізації;

$k_y = k_{y1} k_{y2} = \lim\limits_{p} \to 0\ W_y(p)$ — коефіцієнт підсилення підсилювача;

K_Ω — добротність системи за швидкістю, що визначається як:

$$K_\Omega = \frac{k_{\text{ч,є}} k_{y1} k_{y2} k_{\text{д}}}{sn} = \frac{k_{\text{ч,є}} k_y k_{\text{д}}}{sn} \tag{2.15}$$

Вираз (2.14) може бути отриманий, наприклад, із формули (2.3) при $\theta = 0$ та $p \to 0$ (враховуючи, що $\lim\limits_{p} B(p) = 0$).

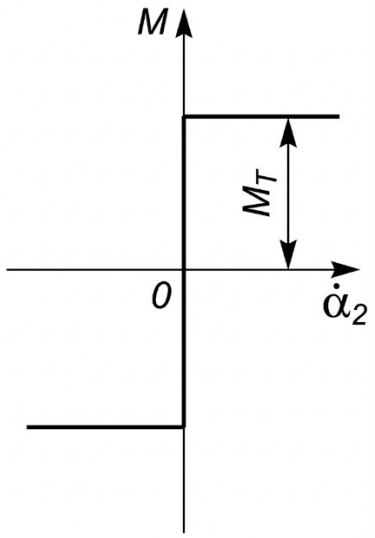


Рис.

Однак, незалежно від наявності астатизму системи за моментом тертя, у ній може мати місце короткочасний «сплеск» моментної помилки [3, 4] поблизу точки зміни знаку швидкості хитавиці.

Цей сплеск, що перевищує усталену моментну помилку, виникає внаслідок того, що при переході через нуль швидкості руху платформи відносно об'єкта, що хитається, момент тертя, який діє на платформу, змінюється стрибкоподібно.

Наближено можна вважати, що момент тертя під час руху дорівнює максимальному моменту тертя спокою. Тоді залежність моменту сухого тертя M від швидкості $\dot{\alpha}_2$ має вигляд, показаний на рис. 2.9 M_T — найбільше значення моменту тертя).

Безпосередньо перед моментом часу $t = 0$ (зміни знаку швидкості $\dot{\alpha}_2$момент стабілізувального двигуна врівноважує момент тертя, тобто $nM_{\text{д}} = M_T$. Оскільки момент двигуна не може змінитися миттєво, то при $t = 0$ до платформи прикладається сумарний збурювальний момент $nM_{\text{д}} + \text{M}_T = 2M_T$ що дорівнює подвоєному максимальному моменту тертя

При цьому платформі надається прискорення

$$\ddot{\alpha} = \frac{2M_T}{Jc}$$

де $J_c = J_0 + J_p n^2$ яке надалі зменшується в результаті дії системи стабілізації.

При хитавиці, близькій до гармонічної, її прискорення в точці переходу швидкості хитавиці через нуль є максимальним і змінюється поблизу цієї точки повільно. Якщо час загасання сплеску моментної помилки значно менший за інтервал t_k знакосталості швидкості хитавиці, то прискорення платформи зменшується швидше, ніж прискорення хитавиці[10]. Тоді при $0 < t < t_k$ знак швидкості не змінюється знак швидкості $p\alpha_2$ руху платформи відносно об'єкта, що хитається. Це враховано нижче при визначенні характеру зміни моментної помилки з рівнянь системи стабілізації, в які входить функція $sign\, p\alpha_2$[13].

Більш детальний аналіз показує, що зазначене подвоєння збурювального моменту має місце лише в тому випадку, коли прискорення хитавиці при $t = 0$ достатньо велике:

$$\ddot{\theta} = \ddot{\theta}_{max} > \frac{2M_T}{I_c}$$

Якщо ж прискорення хитавиці мале, тобто

$$\ddot{\theta}_{max} < \frac{2M_T}{I_c}$$

то картина ускладнюється. При $t = 0$ до платформи прикладається момент тертя, значення якого менше за максимальний M_T.

Це випливає з відомих властивостей сил сухого тертя і пояснюється тим, що при малому прискоренні хитавиці платформі при $t = 0$ надається прискорення $\ddot{\alpha} = \ddot{\theta}_{max}$ при дії на неї моменту $I_c\ddot{\theta}_{max} < 2M_T$[19]. З останнього співвідношення видно, що $(M)_{t=0} < M_T$\$, оскільки $I_c\ddot{\theta}_{max} = \left(nM_{\text{Д}}\right)_{t=0} + (M)_{t=0}$, а також, як і раніше, $nM_{\text{д}} = M_T$.

Оскільки при $t = 0$ до платформи прикладається момент тертя менший, ніж максимальний, сплеск помилки при малому прискоренні хитавиці зменшується. Не зупиняючись детальніше на цьому випадку, обмежимося надалі лише розглядом

випадку великого прискорення хитавиці, як найбільш важливого, при якому сплеск моментної помилки є максимальним.

$$\begin{cases} W_{y1}(p) = \dfrac{k_{y1}a'(p)}{a"(p)} = \dfrac{k_{y1}(a'_0p^m + \cdots + a'_{m-1}p + 1)}{a_0^{"}p^n + \cdots + a_{n-1}^{"}p + 1} \\ B(p) = \dfrac{k_b p b'(p)}{b"(p)} = \dfrac{k_b(b'_0p^u + \cdots + a'_{u-1}p + 1)}{b_0^{"}p^v + \cdots + b_{v-1}^{"}p + 1} \end{cases} \quad (2.16)$$

Тут k_{y1} і k_{y2} — коефіцієнти підсилення відповідних блоків підсилювача, а коефіцієнти a і b (поліномів) визначаються параметрами коригувальних кіл у прямому каналі підсилення і в колі зворотного зв'язку[8]. При цьому передатна функція (2.5) розімкненої системи матиме вигляд:

$$W(p) = \frac{Q(p)}{R(p)} = \frac{K_\Omega a'(p)b"(p)}{p\left[(1 + T_c p)a(\mathrm{p})\mathrm{b}(p) + \dfrac{K_\Omega k_b}{k_{\text{ч.,є}}k_{y1}}k_b p b'(p)\right]a"(p)} \quad (2.17)$$

де K_Ω— добротність системи за швидкістю.

Тепер визначимо характер зміни моментної помилки при $t \geq 0$, використовуючи рівняння, що отримуються відповідно до системи рівнянь (2.1) при $\theta = 0$, але записані з урахуванням початкових умов.

$$-\alpha_{m\,y} = -\frac{M_T}{k_{\text{ч є}}k_{y1}k_{y2}k_{\text{д}}n} \quad (2.18)$$

для випадку, коли позитивним прийнято напрямок моменту тертя, прикладеного до платформи при $t > 0$.

Інші незалежні початкові умови, записані через похідні помилки стабілізації, є нульовими, оскільки безпосередньо перед точкою $t = 0$ перехідний процес, зумовлений попередньою зміною знаку моменту тертя, вважається завершеним[12].

Тоді зображення моментної помилки при $t \geq 0$ може бути отримане у вигляді:

$$\alpha_M = -\frac{\alpha_{M,y}}{p} + \frac{\left(\dfrac{1}{sn^2}M_T + K_\Omega\alpha_{M,y}\right)a(\mathrm{p})\mathrm{b}(p)}{p\left[(1 + T_c p)a(\mathrm{p})\mathrm{b"(p)} + \dfrac{\mathrm{K_\Omega k_b}}{\mathrm{k_{ч.,є}k_{y1}}}\mathrm{b'(p)a"}(p)\right] + K_\Omega a'(\mathrm{p})\mathrm{b'}(p)} \quad (2.19)$$

З виразу (2.14) випливає, що $\frac{M_T}{sn^2} = K_\Omega\alpha_{M,y}$ тому:

$$\alpha_M = -\frac{\alpha_{M,y}}{p} + \frac{2K_\Omega \alpha_{M,y} a"(\mathrm{p})\mathrm{b}"(p)}{p\left[(1+T_c p)a(\mathrm{p})\mathrm{b}"(\mathrm{p}) + \frac{\mathrm{K}_\Omega \mathrm{k_b}}{\mathrm{k_{ч.,є}k_{y1}}}\mathrm{b}'(\mathrm{p})\mathrm{a}"(p)\right] + K_\Omega a'(\mathrm{p})\mathrm{b}'(p)} \quad (2.20)$$

Зіставляючи рівняння (2.20) і (2.17), знаходимо:

$$\alpha_M(p) = -\frac{\alpha_{M,y}}{p} + 2\alpha_{M,y}\frac{Q(p)}{R(p)+Q(p)} \quad (2.21)$$

Звідси при конкретних параметрах системи визначається крива зміни моментної помилки. Деякі результати можуть бути отримані і в загальному вигляді.

Розглянемо, наприклад, випадок $W_{y1}(p) = k_{y1}$ (тобто $a'(p) = a''(p) = 1$). При цьому з виразів (2.20) або (2.21), враховуючи (2.17), отримаємо:

$$\alpha_M = \alpha_{M.y} - 1 + \frac{2W(p)}{1+W(p)} \quad (2.22)$$

Цей випадок стосується безінерційного підсилювача, коли в прямому каналі підсилення відсутні коригувальні кола.

Наближено до цього випадку можна віднести і такий, коли в прямому каналі підсилення відсутні лише великі сталі часу. Останнє досить ймовірно, якщо ЛАЧХ. скоригованої системи, що відповідає передатній функції (2.17), близька до типової, зображеної на рис. 2.11, для системи з астатизмом першого порядку. Найбільша стала часу T_1 такої системи або являє собою електромеханічну сталу часу системи стабілізації T_c, або створюється за допомогою зворотного зв'язку.

Введення цієї сталої часу в прямий канал підсилення зазвичай менш доцільне.

Вираз у квадратних дужках у формулі (2.22) повністю визначається передатною функцією $W(p)$. Якщо остання відповідає типовій ЛАЧХ, то крива зміни у часі відношення $\frac{\alpha_M}{\alpha_{My}}$ моментної помилки до її усталеного значення може бути наближено побудована для кожного значення показника коливальності *M* (рис. 2.10).

Це побудова аналогічна виконаній на рис. 2.14 для східчастого вхідного впливу (ω_0— базова частота ЛАЧХ).

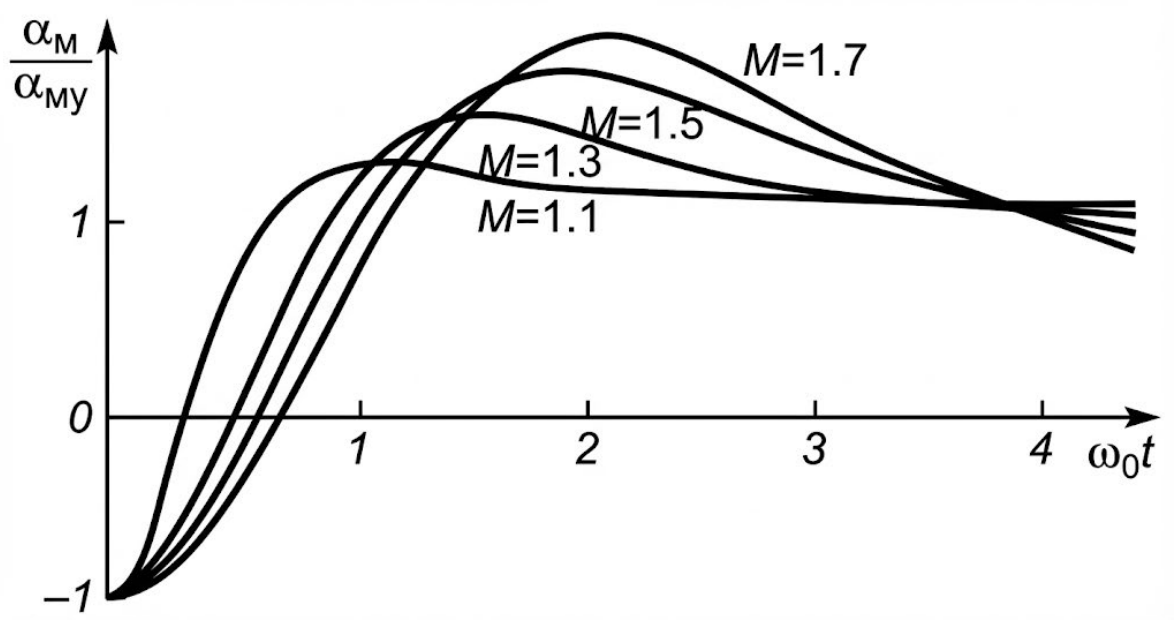


Рис. 2.10 Зміна моментної помилки відповідно до виразу (2.22)

Графік, зображений на рис. 2.10, може бути отриманий з графіка на рис. 2.14 подвоєнням ординат останнього з подальшим зміщенням осі абсцис на +1 вгору. З кривих на рис. 2.10 видно, що, наприклад, при $M = 1{,}7$ максимум моментної помилки близький до подвоєного значення усталеної помилки.

Аналогічним шляхом можна знайти сплеск моментної помилки і для інших окремих випадків. Однак часто сплеск помилки може не враховуватися, якщо він незначний або не чинить суттєвого впливу на роботу системи, оскільки є короткочасним.

2.4 Визначення параметрів системи стабілізації при заданій точності

При визначенні параметрів системи за заданою точністю стабілізації слід враховувати сумарну помилку, зумовлену як обкочуванням, так і дією моменту сухого тертя. Якщо відкинути сплеск моментної помилки, то найбільша сумарна помилка дорівнює сумі амплітуди помилки від обкочування та усталеної моментної помилки: $\alpha_\Sigma = \alpha_{max} + \alpha_{\text{м}.y}$

При гармонічній хитавиці з частотою ω_k максимум цієї помилки з урахуванням співвідношення (2.13) дорівнює:

$$\alpha_{\Sigma} = |\rho(j\omega_k)| \frac{1}{|1 + W(j\omega_k)|} \theta_{max} + \alpha_{M,y} \approx$$

$$\approx |\rho(j\omega_k)| \frac{1}{|W(j\omega_k)|} \theta_{max} + \alpha_{M,y} \quad (2.23)$$

Вираз для помилки стабілізації (2.23) відрізняється від виразу для помилки слідкуючої системи відтворення кута при гармонічному впливі тільки у випадку, коли:

$$|\rho(j\omega_k)| < 1 \quad (2.24)$$

При $|\rho(j\omega_k)| \approx 1$ цієї відмінності немає, і розрахунок системи стабілізації за точністю повинен проводитися методами, розробленими для слідкувальних систем відтворення кута.

Умова (2.24) може виконуватися, згідно з формулою (2.12), якщо електромеханічна стала часу системи порівняно велика, коли $T_c = \frac{I_o + I_д n^2}{s n^2} > \frac{1}{\omega_k}$, тобто коли момент інерції платформи порівняно великий (для електромеханічної сталої часу двигуна зазвичай $T_c = \frac{I_o + I_д n^2}{s n^2} > \frac{1}{\omega_k}$[20]

При цьому співвідношення (2.24) матиме місце, якщо $B(p) = 0$, тобто за відсутності зворотного зв'язку за похідними кута відпрацювання. У разі сильного зворотного зв'язку за похідними кута відпрацювання доданок, що містить $B(p)$, може виявитися переважаючим у знаменнику і чисельнику виразу (2.12) для $\rho(p)$. Тоді $\rho(p) \approx 1$, якщо $C(p) = 0$.

Якщо ж $C(p) \approx 0$, тобто використовується сигнал за похідними кута хитавиці, то, як випливає з формули (2.12), умова (2.24) може виконуватися і при $B(p) \approx$.

Сказане про умови виконання співвідношення (2.24) випливає і безпосередньо з фізичних міркувань.

Розглянемо більш детально кілька найважливіших випадків, у яких виконується співвідношення (2.24) і розрахунок системи стабілізації за точністю відмінний від розрахунку слідкувальної системи відтворення кута.

$T_c > \frac{1}{\omega_k} B(p) = C(p) = 0$ (блоки сигналів за похідними кутів відпрацювання та хитавиці відсутні). При $n \gg 1$ з виразу (2.12) отримаємо:

$$\rho(p) = \frac{1 + T_д p}{1 + T_c p}$$

Оскільки зазвичай, як уже зазначено $T_д < \frac{1}{\omega_k}$, то

$$|\rho(j\omega)| \approx \frac{1}{\sqrt{1} + (\omega_k T_c)^2}$$

при $n = 1$, $i = 0$ (безредукторна система) цей вираз є точним.

Замість формули (2.23) запишемо:

$$\alpha_\Sigma = \left|\frac{\rho(j\omega_k)}{W(j\omega_k)}\right| \theta_k$$

де

$$\theta_\Sigma = \theta_{max} \left[1 + \left|\frac{W(j\omega_k)}{\rho(j\omega_k)}\right| \frac{M_T}{sn^2 K_\Omega \theta_{max}}\right]$$

тут враховано вираз (2.14) для усталеної моментної помилки; $K_\Omega = \frac{k_{ч,є} k_y k_д}{sn}$ — добротність за швидкістю.

У розглядуваному випадку частотна передатна функція розімкненої системи стабілізації, що отримується з рівняння (2.5), дорівнює при $\omega \le \omega_k$:

$$W(j\omega) \approx \left[1 + \frac{K_\Omega \sqrt{1 + (\omega_k T_c)^2}}{\omega_k \sqrt{1 + (\omega_k T_c) 2}} \cdot \frac{M_T}{sn^2 K_\Omega \theta_{max}}\right] =$$

$$= \theta_{max} \left[1 + \frac{M_T}{sn^2 \omega_k \theta_{max}}\right] \qquad (2.25)$$

Використовуючи вираз (2.25), легко побудувати на площині логарифмічних характеристик межу забороненої області $\frac{20\lg|\rho(j\omega)|\theta_\Sigma}{\alpha_\Sigma}$, нижче якої при $\omega \le \omega_k$ не повинна розташовуватися ЛАЧХ системи. Побудову низькочастотної частини ЛАЧХ показано на рис. 5.11 для двох значень сталої часу $T_c = T_{c1}$ (суцільні лінії) і $T_c = T_{c2}$ (штрихові); заборонену область виділено штрихуванням.

З виразів для α_Σ і θ_Σ випливає, що цій ЛАЧХ відповідає добротність за швидкістю:

$$K_\Omega = \frac{\omega_k \theta_\Sigma}{\alpha_\Sigma} \tag{2.26}$$

Ця величина, на відміну від випадку слідкуючої системи відтворення кута з такою ж передатною функцією, не залежить від сталої часу T_c.

Базова частота ЛАЧХ. дорівнює:

$$\omega_0 = \sqrt{\frac{K_\Omega}{T_c}}$$

З формули (2.26) видно, що необхідна за умовами точності добротність за швидкістю не залежить від сталої часу T_c системи стабілізації. Однак ця стала часу впливає на базову частоту ω_0. При збільшенні T_c базова частота зменшується, що викликає затягування перехідного процесу, зумовленого зміною знаку моменту тертя в точках реверсу хитавиці[11].

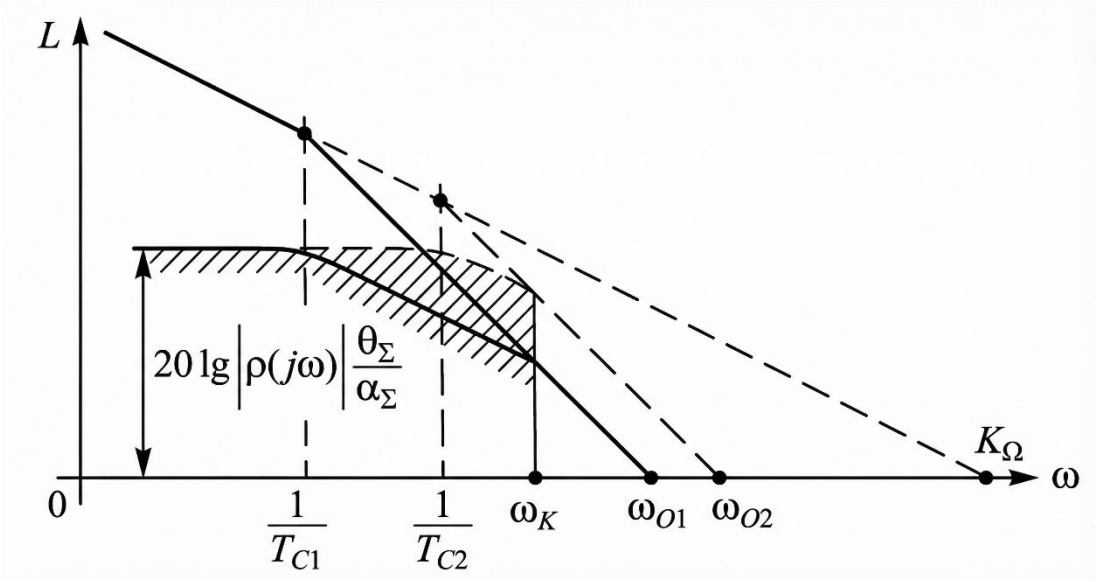


Рис.2.8 Графік ЛАЧХ

Наближена оцінка найменшої допустимої величини ω_0 можлива на підставі кривих перехідних процесів. Якщо використовується ЛАЧХ типу 1-2-1-2, то за даними на час перехідного процесу визначається співвідношенням $\omega_0 t_{уст} = 5 \div 7$.

Якщо потрібно, щоб перехідний процес загасав за час $t_{уст} < m\frac{\pi}{\omega_k}$ (де $m\frac{\pi}{\omega_k}$ — половина періоду хитавиці, а m — відносний час загасання перехідного процесу, який менший за одиницю), то отримаємо $\frac{5\div7}{\omega_0} < m\frac{\pi}{\omega_k}$$, звідки наближено[4]:

$$\frac{\omega_0}{\omega_k} > \frac{2}{m}$$

Таким чином, при прийнятій схемі розрахунку виявляється, що базова частота повинна перевищувати частоту хитавиці принаймні вдвічі.

Базову частоту можна збільшити, за необхідності вибираючи K_Ω більшою, ніж це випливає з виразу (2.26). Інші параметри системи визначаються на підставі вимог щодо запасу стійкості.

РОЗДІЛ 3. Комп'ютерне моделювання систем стабілізації

3.1 Попередній розрахунок параметрів динамічної моделі

Для проведення комплексного аналізу динамічних властивостей системи стабілізації скористаємося математичною моделлю, обґрунтованою у другому розділі, та базовими вхідними значеннями що наведені у таблиці вхідних даних Табл. 3.1

Табл. 3.1 Вхідних даних

Назва	Позначення	Значення, [од.вим.]
Момент платформи	I_o	1,5 [$Н$мс^2]
Момент двигуна	I_p	10^5 [$Н$мс^2]
Передатне число редуктора	n	200
Коефіцієнт двигуна	$k_{\text{дв}}$	1
Коефіцієнти демфування двигуна	S	$2 * 10^{-4}$
Момент сили сухого тертя по осі платформи	M_T	0,5 Нмс

Для аналізу системи стабілізації потрібно знайти додаткові значення для аналізу математичної моделі.

Скорочена структурна схема системи має наступний вигляд Рис.3.1

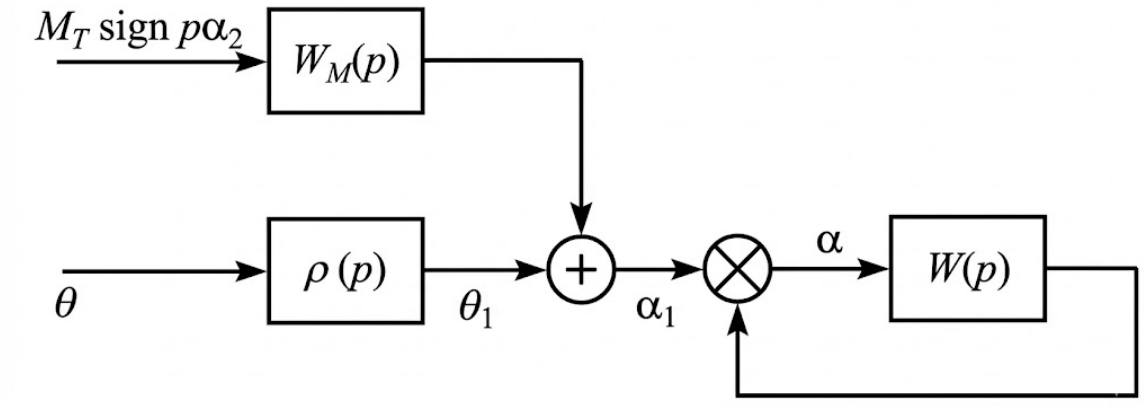


Рис. 3.1 Скорочена структурна схема

Для проведення повноцінного аналізу стійкості, точності та якості перехідних процесів синтезованої системи необхідно перейти від загального структурного представлення до конкретних математичних моделей її елементів.`

Динаміка кожної функціональної частини системи описується відповідною передатною функцією в операторній формі (де p — оператор Лапласа). Виходячи з фізичної природи компонентів системи та їх диференціальних рівнянь руху, визначимо аналітичні вирази для наступних ланок:

$W(p)$ — передатна функція розімкненої системи;

$W_M(p)$ — передатна функція каналу збурення за моментом;

$\rho(p)$ — передатна функція каналу вхідного впливу (кінематичного зв'язку).

Передатна функція розімкненої системи стабілізації дорівнює:

$$W(p) = \frac{\frac{k_{\text{ч,є}} k_{\text{д}}}{sn} W_y(p)}{p(1 + T_c p) + \frac{k_{\text{д}}}{sn} W_{y2}(p) B(p)}$$

Передатна функція каналу збурення за моментом

$$W_M(p) = \frac{\frac{1}{sn^2}}{p(1 + T_c p) + \frac{k_{\text{д}}}{sn} W_{y2}(p) B(p)}$$

Передатна функція вхідного впливу:

$$(p) = \frac{p\left\{1 + \left[1 - (-1)^i \frac{1}{n}\right] T_{\text{д}} p\right\}}{p(1 + T_c p)}$$

Для знаходження передатних функцій потрібно знайти невідомі значення. Для початку знайдемо сталу часу системи стабілізації T_c:

$$T_c = \frac{J_0 + n^2 J_p}{sn^2} = \frac{J_c}{sn^2}$$

Так, як

$$I_c = I_0 + n^2 I_p.$$

Підставимо наші значення з табл. 3.1

Отримуємо

$$I_c = I_0 + n^2 I_p = 1{,}5 + 200^2 * 10^{-5} = 1{,}9$$

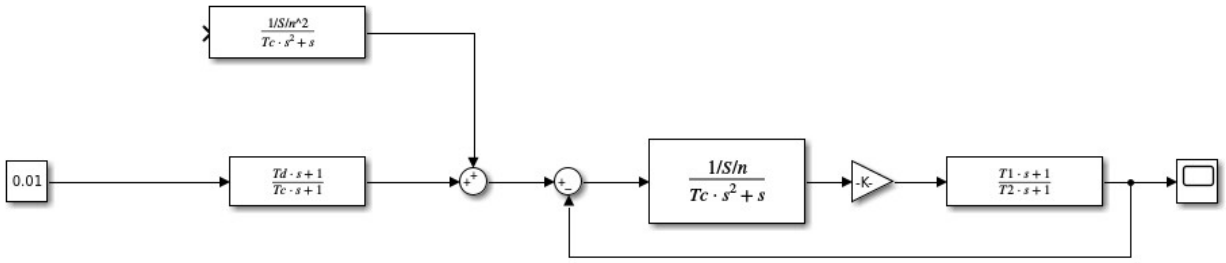
Підставимо найдене значення в нашу формулу для T_c:

$$T_c = \frac{1{,}9}{2 * 10^{-4} * 4 * 10^4} = \frac{1{,}9}{8} = 0{,}24\ c$$

Момент зовнішніх сил буде дорівнювати

$$M_в = M_T signp\alpha_2; p = \frac{d}{dt}$$

В результаті отримуємо таку Simulink модель рис.3.1



3.2 Результати моделювання при відсутності хитавиці та моменту сухого тертя

Припустимо, що наша модель знаходиться в ідеальних умовах, де відсутня хитавиця та момент сухого тертя, що дозволяє розглядати об’єкт керування як лінійну систему без діючих зовнішніх збурень. У такому режимі динаміка процесу стабілізації визначається виключно внутрішніми параметрами елементів контуру та налаштуваннями регулятора. Це дає змогу виокремити та дослідити граничні можливості системи щодо швидкодії та точності відпрацювання керуючого сигналу.

Для проведення аналізу стійкості та якості перехідних процесів було розроблено імітаційну модель у середовищі MATLAB/Simulink (рис.3.1). Вхідним впливом у даному експерименті слугує одиничний ступінчастий сигнал, що дозволяє оцінити реакцію системи на різку зміну задаючого впливу.

Ключовим параметром, що суттєво впливає на характер перехідного процесу та стійкість замкненої системи, є загальний коефіцієнт підсилення (у даній схемі

представлений як коефіцієнт $k_{\text{дв}}$, що характеризує крутизну статичної характеристики двигуна та підсилювального тракту).

На поданому графіку зображено реакцію автоматизованої системи стабілізації на вхідний ступінчастий вплив амплітудою $\theta = 5°$. Варто зазначити, що вісь ординат описується в радіанах. Вхідне значення $5°$ відповідає приблизно 0,087 рад ($5° * \frac{\pi}{180°} \approx 0{,}0873$ рад).

Графік демонструє, що перехідний процес носить аперіодичний характер. Це означає, що вихідна величина (кут відхилення α) плавно наближається до заданого значення без виражених коливань навколо точки рівноваги.

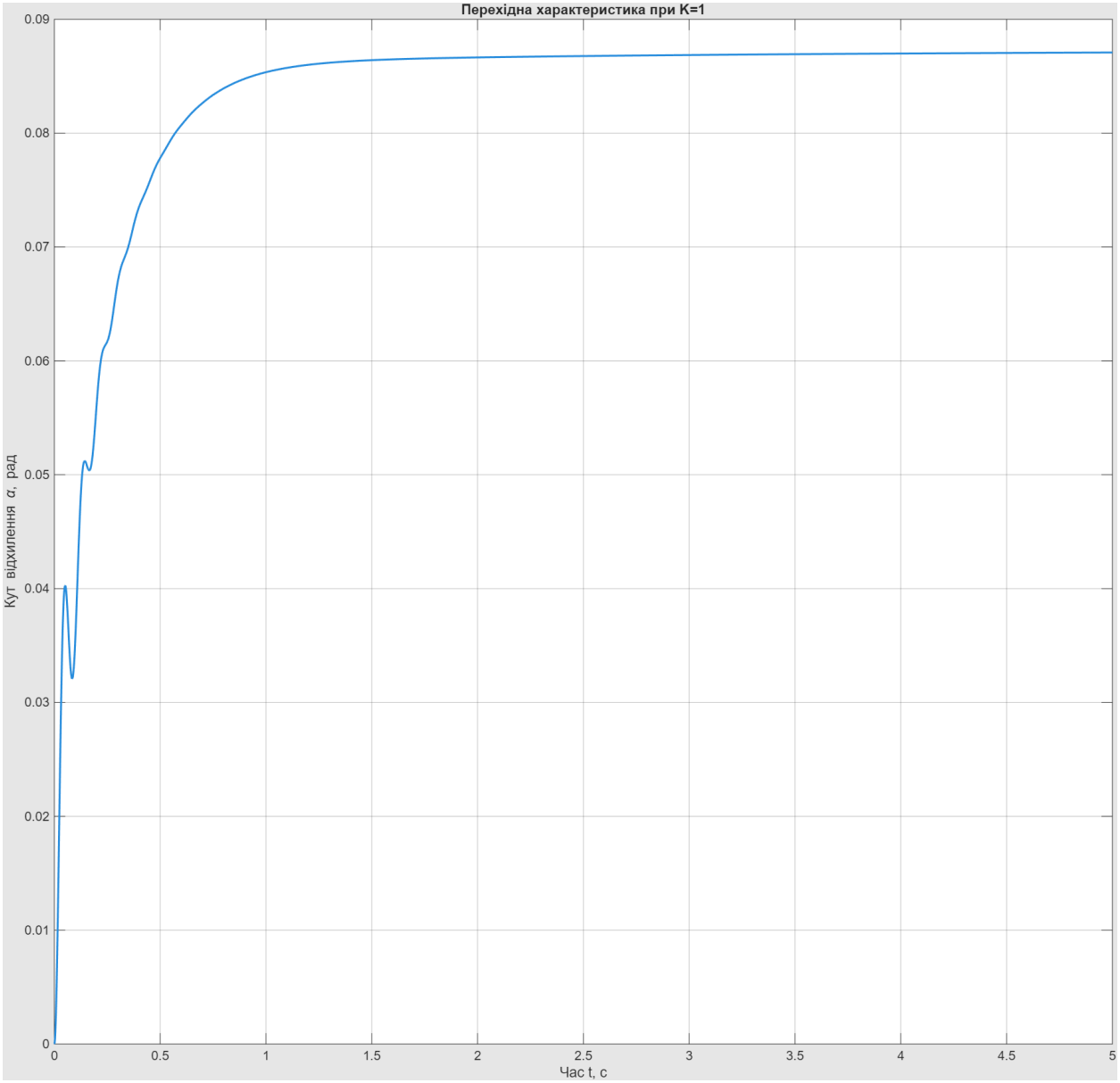


Рис.3.2 перехідна характеристика системи при $k_{\text{дв}} = 1$

Аналізуючи графік, можна зробити наступні висновки щодо динамічних властивостей системи при даному налаштуванні. Початкова ділянка (0 - 0,2 с): На самому початку перехідного процесу спостерігаються незначні високочастотні флуктуації (сплески). Це явище зумовлене наявністю диференціюючих ланок у структурі передатаних функцій системи або особливостями чисельного методу інтегрування в Simulink при різкій зміні вхідного сигналу. Ці «сплески» швидко затухають і не впливають на загальну динаміку стабілізації.

Ділянка наростання (0,2 - 1,5 с): Після початкових збурень система виходить на режим плавного монотонного зростання. Кут α зростає, прагнучи до заданого значення. Швидкість реакції системи при $k_{\text{дв}}$ є помірною.

Загальний характер процесу: Після завершення початкової фази ($t > 0.5\ c$) процес носить чітко виражений аперіодичний характер. Перерегулювання щодо усталеного значення (0.0873) відсутнє. Система поводиться стабільно, але час виходу на режим (близько 1.5 – 2 с) може бути недостатнім для завдань швидкої стабілізації.

Ключові показники якості регулювання (для $k_{\text{дв}} = 1$)

Перерегулювання (σ): Відсутнє (або ж знехтувано мале). Графік не перетинає лінію усталеного значення (0,087) і не має "горба" зверху. Це позитивна якість для систем, де важливо уникнути різких кидків, проте це може свідчити про надмірне демпфування.

Час регулювання (t_p): Час, за який система входить у 5%-ву зону від усталеного значення, становить приблизно 1,2 – 1,5 секунди. Це вказує на відносно повільну реакцію системи на збурення при одиничному коефіцієнті підсилення.

При значенні коефіцієнта підсилення двигуна $k_{\text{дв}} = 1$ система поводиться як аперіодична ланка. Процес стабілізації відбувається плавно, без перерегулювання та коливань, що забезпечує м'яку роботу виконавчих механізмів. Статична похибка відсутня. Однак, час виходу на усталений режим є порівняно великим, що може бути недостатнім для ефективної протидії швидкозмінним зовнішнім збуренням

Розглянемо графік рис. 3.3 зі збільшеним $k_{\text{дв}} = 10$. Всі інші значення залишаються без змін.

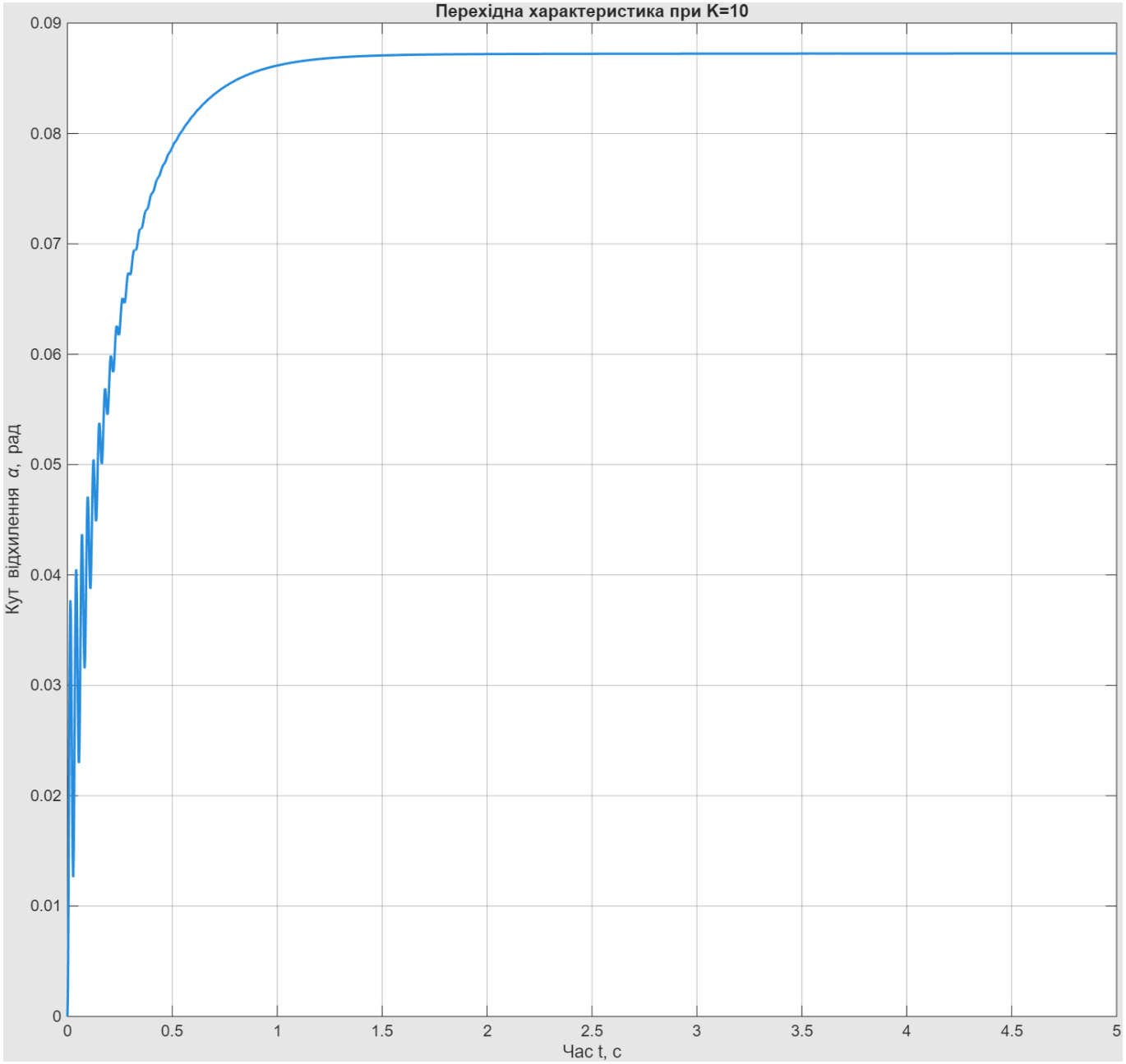


Рис.3.3 перехідна характеристика системи при $k_{\text{дв}} = 10$

Графік ілюструє реакцію системи на аналогічний вхідний вплив $\theta = 5°$ (0,087 рад) при збільшеному коефіцієнті підсилення контуру регулювання $k_{\text{дв}} = 10$.

Аналіз кривої показує, що характер перехідного процесу залишається монотонним (аперіодичним). Вихідна координата досягає усталеного значення без перерегулювання, тобто графік не перетинає лінію 0,087 рад і не здійснює коливальних рухів навколо положення рівноваги. Це вказує на те, що навіть при суттєвому підвищенні жорсткості системи (підсилення), вона зберігає стійкість.

Детальний аналіз динаміки:

Початкова фаза (0 - 0,1 с): Спостерігається крутий фронт наростання сигналу. Порівняно з попереднім дослідом ($k_{\text{дв}} = 1$), кут нахилу дотичної на початку процесу значно зріс. Це свідчить про те, що виконавчий механізм (двигун) розвиває більший момент на початковому етапі, намагаючись швидше компенсувати неузгодженість.

- Примітка: Високочастотні збурення в точці $t \approx 0$ також присутні (характерні для диференціюючих ланок моделі при ступінчастому вході), але на фоні швидкого зростання основного сигналу вони стають менш помітними в часовому масштабі.

Фаза стабілізації (0,1 - 0,8 с): Система дуже швидко виходить на заданий рівень. Вже на відмітці 0,5 с вихідна величина практично досягає значення 0,087 рад.

Усталений режим: Статична похибка, як і в попередньому випадку, відсутня. Система точно відпрацьовує завдання.

Ключові показники якості регулювання (для $k_{\text{дв}} = 10$)

Час регулювання (t_p): Це головна відмінність від попереднього графіка. Час входження в зону 5% похибки скоротився орієнтовно до 0,6 – 0,8 с (проти 1,5 с при $k_{\text{дв}} = 1$). Це свідчить про суттєве покращення швидкодії системи.

Перерегулювання (σ): Залишається рівним 0%. Це нетипово для простих систем при такому різкому збільшенні $k_{\text{дв}}$, але є дуже позитивним фактором для системи стабілізації, оскільки відсутність зайвих коливань зменшує механічне зношування конструкції.

Збільшення коефіцієнта підсилення до $k_{\text{дв}} = 10$ призвело до позитивного ефекту: суттєво зросла швидкодія системи (час перехідного процесу зменшився майже вдвічі) без погіршення показників демпфування. Система залишається в області аперіодичної стійкості, перерегулювання відсутнє. Це дозволяє рекомендувати підвищення коефіцієнта підсилення для більш ефективної роботи стабілізатора, оскільки це забезпечує швидшу компенсацію збурень без ризику виникнення автоколивань.

Розглянемо як буде вести себе модель при ще більшому $k_{\text{дв}}$. Припустимо, що $k_{\text{дв}} = 100$ та поглянемо на результат моделювання рис. 3.3

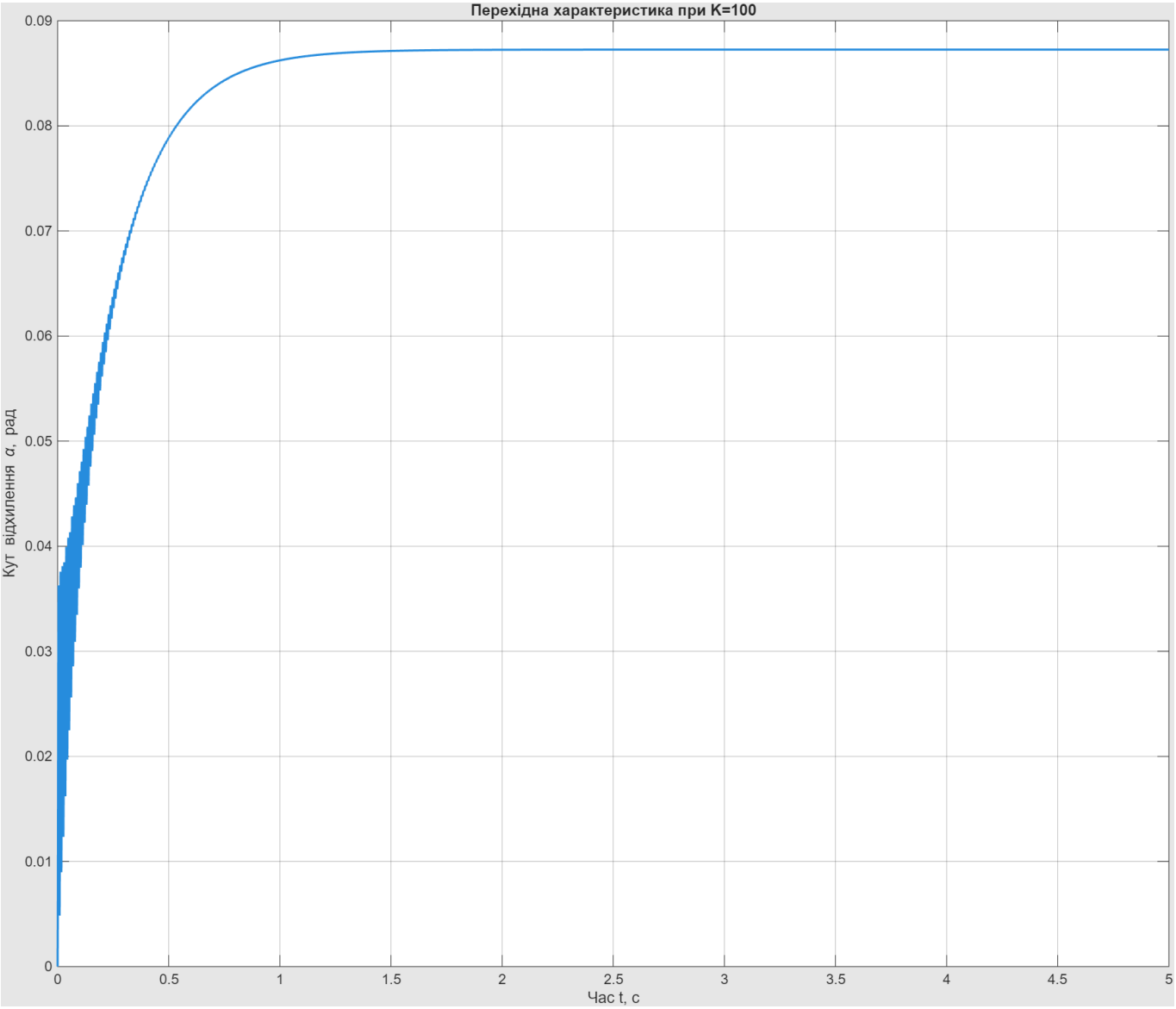


Рис. 3.3 перехідна характеристика системи при $k_{\text{дв}} = 100$

Графік відображає реакцію системи на вхідний стрибок $\theta = 5°$ (0,087 рад) при високому значенні коефіцієнта підсилення розімкненого контуру $k_{\text{дв}} = 100$.

Характер перехідного процесу залишається аперіодичним. Незважаючи на значне підсилення, система не втрачає стійкості і не переходить у коливальний режим. Це свідчить про домінування демпфуючих властивостей у динамічній структурі об'єкта керування над інерційними, що дозволяє гасити коливання навіть при дуже агресивному керуванні.

Детальний аналіз динаміки:

Початкова ділянка (Ефект "ударного" вмикання): На графіку в момент часу $t \approx 0$ спостерігається майже миттєвий стрибок вихідної величини. Лінія графіка на цій ділянці виглядає значно товстішою ("зашумленою"). Це явище пояснюється тим, що при $k_{\text{дв}} = 100$ будь-які мікрозміни сигналу або шуми дискретизації (особливо від диференціюючих ланок) підсилюються в 100 разів. Крутизна фронту наростання є екстремально високою — кут нахилу дотичної наближається до 90°. Це означає, що система намагається ліквідувати неузгодженість миттєво, прикладаючи теоретично величезний керуючий момент.

Вихід на режим (0,05 - 0,3 с): Система досягає усталеного значення $\approx 0{,}087$ рад за частки секунди. Крива перехідного процесу набуває вигляду, близького до ідеальної сходинки.

Усталений режим: Статична похибка повністю відсутня. Високий коефіцієнт підсилення гарантує "жорстку" прив'язку вихідної координати до заданого значення.

Ключові показники якості (для $k_{\text{дв}} = 100$):

Час регулювання (t_p): Є мінімальним серед усіх дослідів. Входження в 5% зону відбувається за 0,1 – 0,2 с. Це свідчить про граничну швидкодію системи.

Перерегулювання (σ): Залишається рівним 0%.

Стійкість: Система формально стійка, але наявність шумів на початку процесу вказує на наближення до межі, де можуть виникати високочастотні паразитні коливання.

Порівняємо усі отримані результати табл.3.2

Табл.3.2 Порівняльний аналіз

Параметр	K=1 (М'яке керування)	K=10 (Оптимальне)	K=100 (Гранично жорстке)
Час регулювання	~1.5 с	~0.7 с	~0.15 с
Характер руху	Плавний, повільний	Швидкий, впевнений	Миттєвий, агресивний
Точність	Висока	Висока	Максимальна
Навантаження на привід	Мінімальне	Помірне	Критичне (ризик насичення)

Дослідження впливу коефіцієнта підсилення $k_{\text{дв}}$ показало, що система автоматичної стабілізації володіє значним запасом стійкості по фазі та амплітуді. Збільшення $k_{\text{дв}}$ від 1 до 100 призводить до пропорційного зростання швидкодії без появи небажаного перерегулювання.

Проте, слід зазначити важливий практичний аспект: режим роботи при $k_{\text{дв}} = 100$, хоча і є ідеальним математично, у реальній фізичній системі може призвести до насичення виконавчих механізмів (обмеження по напрузі або струму двигуна). Тому для практичної реалізації рекомендується обрати компромісне значення (наприклад, $k_{\text{дв}} = 10 \dots 20$), яке забезпечує достатню швидкодію при помірних енергетичних витратах.

3.3 Порівняльний аналіз перехідної характеристики та динамічної похибки системи

Для повноти дослідження динаміки системи при коефіцієнті підсилення $k_{\text{дв}} = 1$ було проведено зіставлення графіка вихідної координати $\alpha(t)$ (перехідна характеристика) та графіка сигналу розузгодження $\Delta\alpha(t)$ (динамічна похибка). Модифікуємо нашу Simulink модель, для того, щоб побачити графік похибки рис. 3.4 та виведемо результат рис. 3.5

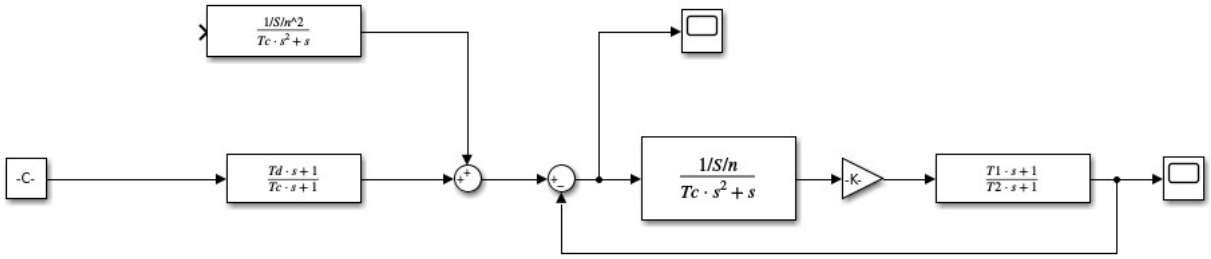


Рис. 3.4 Модифікована модель Simulink

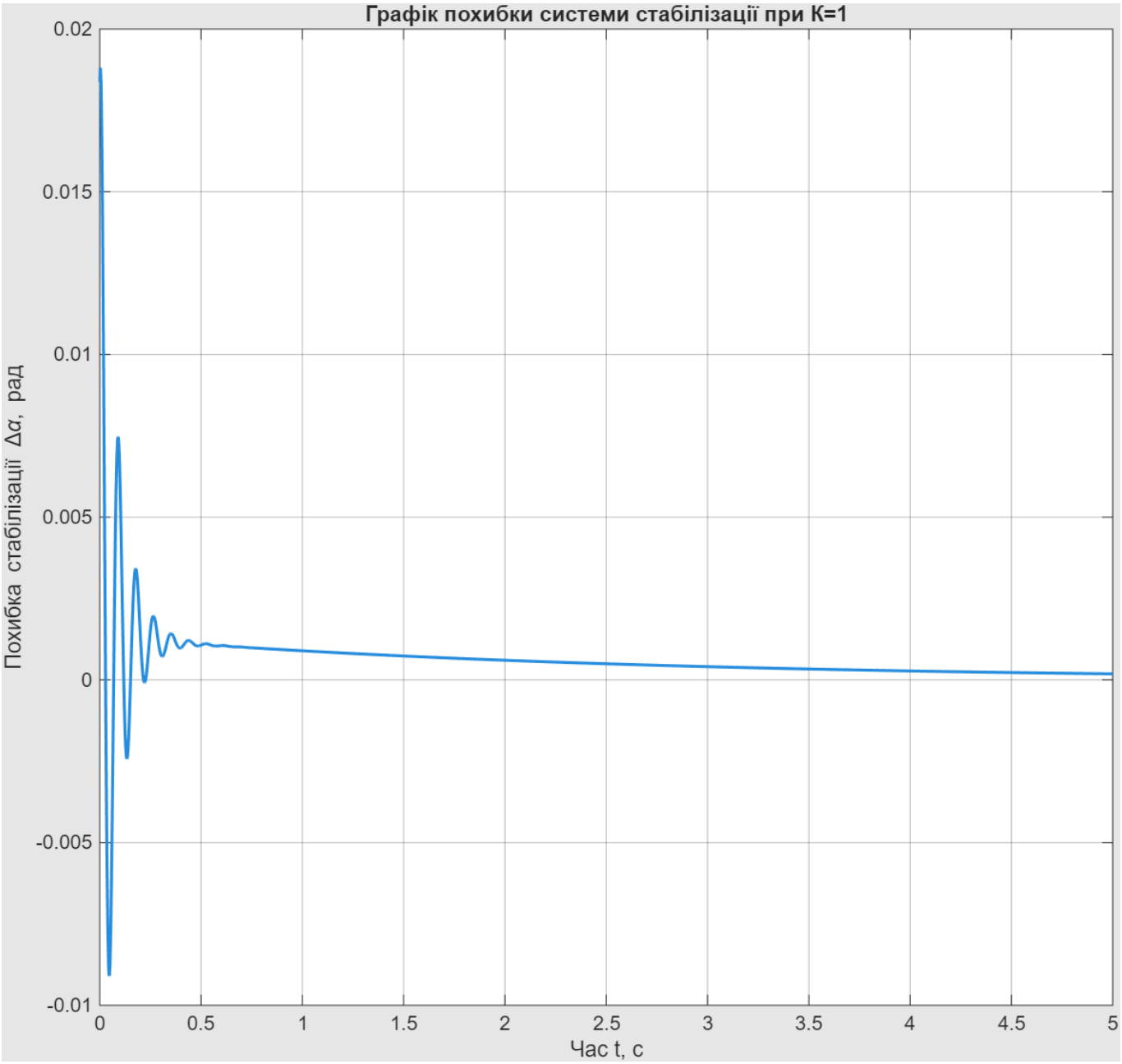


Рис. 3.5 Графік похибки системи стабілізації при $k_{\text{дв}} = 1$

Інверсний зв'язок процесів між графіками спостерігається чітка обернена кореляція, що випливає з фізичної сутності процесу регулювання.

На графіку перехідної характеристики: Вихідна величина α починає рух від 0 і плавно, аперіодично зростає, прагнучи до заданого значення (0,087 рад).

На графіку похибки: Сигнал $\Delta\alpha(t)$ починає з максимального значення (стрибка) і плавно спадає до нуля.

Швидкість наростання вихідного кута прямо пропорційна швидкості зменшення похибки. Повільний характер наростання α (зумовлений малим коефіцієнтом $k_{\text{дв}} = 1$) повністю відображається у "затягнутому" спаданні похибки

Порівняння дозволяє виявити деталі, які маскуються на загальному графіку перехідного процесу.

Перехідна характеристика (α): На початку (t < 0,5 с) графік виглядає майже гладким, з ледь помітним викривленням на старті.

Графік похибки ($\Delta\alpha(t)$): Чітко демонструє високочастотний коливальний процес у перші 0,3–0,5 с. Це свідчить про те, що навіть при "м'якому" регулюванні ($k_{\text{дв}} = 1$) у системі виникають короткочасні перехідні збурення, викликані наявністю диференціюючих ланок.

Наукове пояснення: Масштаб графіка похибки значно дрібніший (максимум $\approx 0{,}019$), що дозволяє побачити мікродинаміку ("дзвін" системи), яку не видно на основному графіку через великий масштаб шкали (до 0,09).

Аналіз точності та астатизму:

Обидва графіки підтверджують, що система є астатичною (не має статичної помилки). Графік α асимптотично наближається до горизонтальної лінії усталеного значення. Графік $\Delta\alpha(t)$ асимптотично наближається до нуля. При t=10 с похибка становить практично 0.

Енергетична оцінка за графіком похибки:

Графік похибки при $k_{\text{дв}} = 1$ показує, що максимальне пікове значення розузгодження ($\approx 0{,}019$) є відносно невеликим. Оскільки керуюча напруга на двигуні пропорційна помилці ($U \sim K \cdot \Delta\alpha$), то при малій помилці і малому $k_{\text{дв}} = 1$ двигун працює у легкому, недовантаженому режимі. Це пояснює повільну реакцію системи (повільне наростання α).

Зіставлення графіків перехідної функції та динамічної помилки при $k_{\text{дв}} = 1$ дозволяє зробити висновок про недостатню енергоозброєність системи при даному налаштуванні.

Хоча система демонструє високу точність у статиці (помилка прямує до нуля), динаміка усунення помилки є занадто повільною ("в'ялою"). Графік $\Delta\alpha(t)$ показує, що значна частина похибки зберігається протягом тривалого часу (понад 2-3 секунди), що корелює з великим часом регулювання на перехідній характеристиці.

Водночас, графік помилки дозволив виявити короткочасні пускові коливання, які були візуально приховані на графіку вихідної координати.

Розглянемо графік похибки при $k_{\text{дв}} = 10$ рис.3.5.

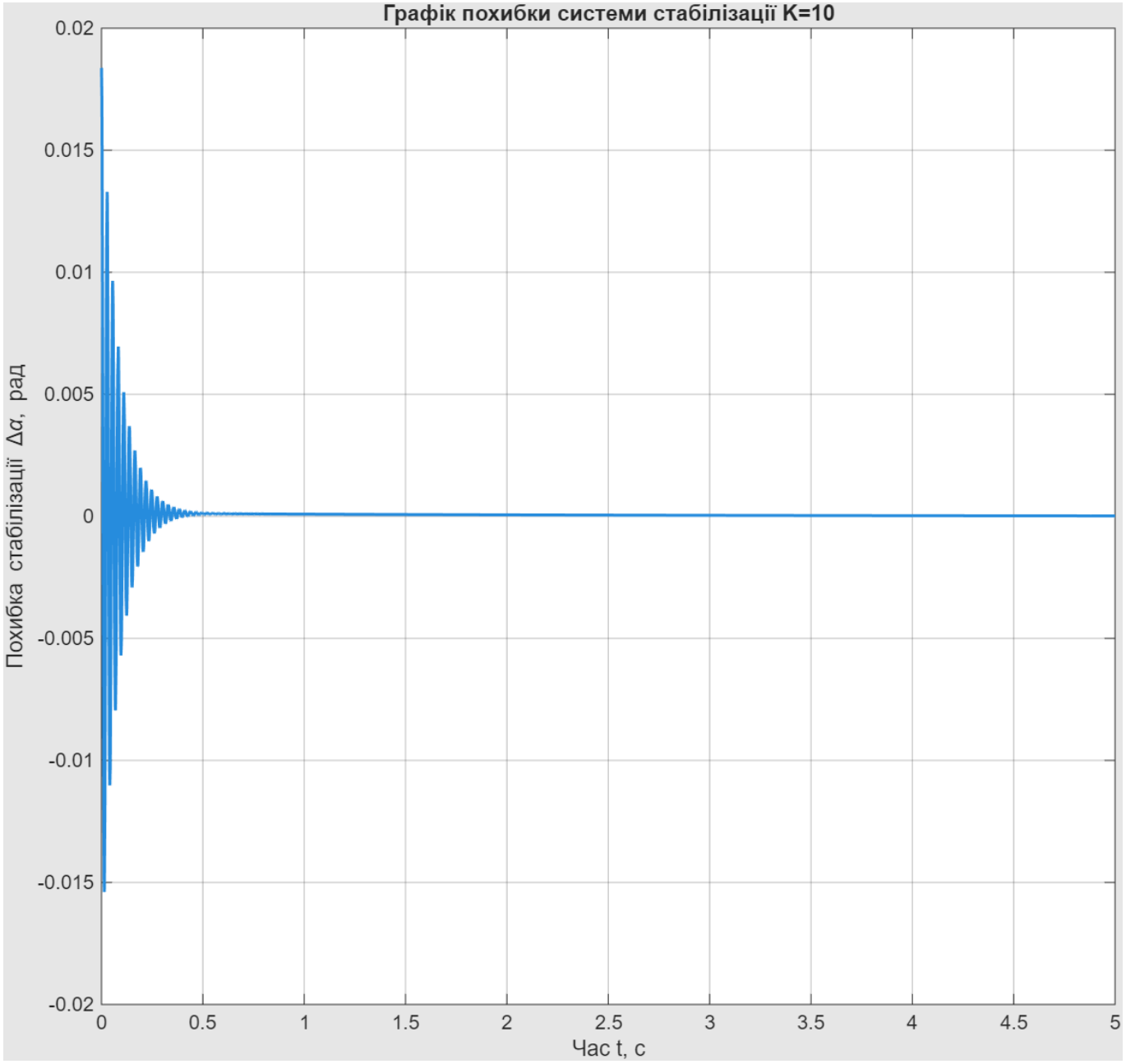


Рис.3.5 Графік похибки системи стабілізації при $k_{\text{дв}} = 10$

Графік відображає часову залежність сигналу розузгодження $\Delta\alpha(t)$ при збільшеному коефіцієнті підсилення $k_{\text{дв}} = 10$.

Порівняно з попереднім дослідом ($k_{\text{дв}} = 10$), амплітуда початкового стрибка похибки залишилася співмірною ($\approx 0{,}019$), оскільки вона визначається переважно параметрами вхідного фільтру та інерційністю об'єкта в перший момент часу. Проте характер згасання похибки змінився кардинально.

Детальний аналіз динаміки:

Початкова фаза (0 – 0,3 с): Спостерігається яскраво виражений коливальний перехідний процес. "Дзвін" (високочастотні коливання) на початку графіка став більш інтенсивним та щільним, ніж при $k_{\text{дв}} = 1$. Це свідчить про те, що система стала більш "жорсткою" і миттєво реагує на найменші зміни сигналу. Збільшення $k_{\text{дв}}$ призвело до зростання власної частоти контуру регулювання.

Фаза компенсації (0,3 – 1,0 с): Це ключова відмінність від режиму $k_{\text{дв}} = 1$. Графік похибки стрімко спадає до нуля. Крутизна спаду значно вища. Якщо при $k_{\text{дв}} = 1$ похибка розтягувалася на 5-8 секунд, то тут основна частина помилки ліквідується вже до 0,8 – 1,0 с. Це підтверджує, що при $k_{\text{дв}} = 10$ двигун розвиває більший момент, що дозволяє швидше подолати неузгодженість.

- Усталений режим: Після 1-ї секунди похибка фактично дорівнює нулю. Система знаходиться в режимі точного відстеження.

Аналіз графіка похибки при $k_{\text{дв}} = 10$ демонструє оптимальний компроміс між швидкодією та стійкістю.

Динамічна помилка ліквідується менш ніж за 1 секунду, що забезпечує високу якість стабілізації. Хоча на початковій ділянці спостерігається зростання частоти перехідних коливань, вони швидко затухають і не призводять до втрати стійкості.

Інтегральна квадратична оцінка похибки (площа під графіком) при $k_{\text{дв}} = 10$ є значно меншою, ніж при $k_{\text{дв}} = 1$, що свідчить про значно вищу точність керування в динамічних режимах.

Перейдемо до аналізу похибки при $k_{\text{дв}} = 100$ рис.3.6.

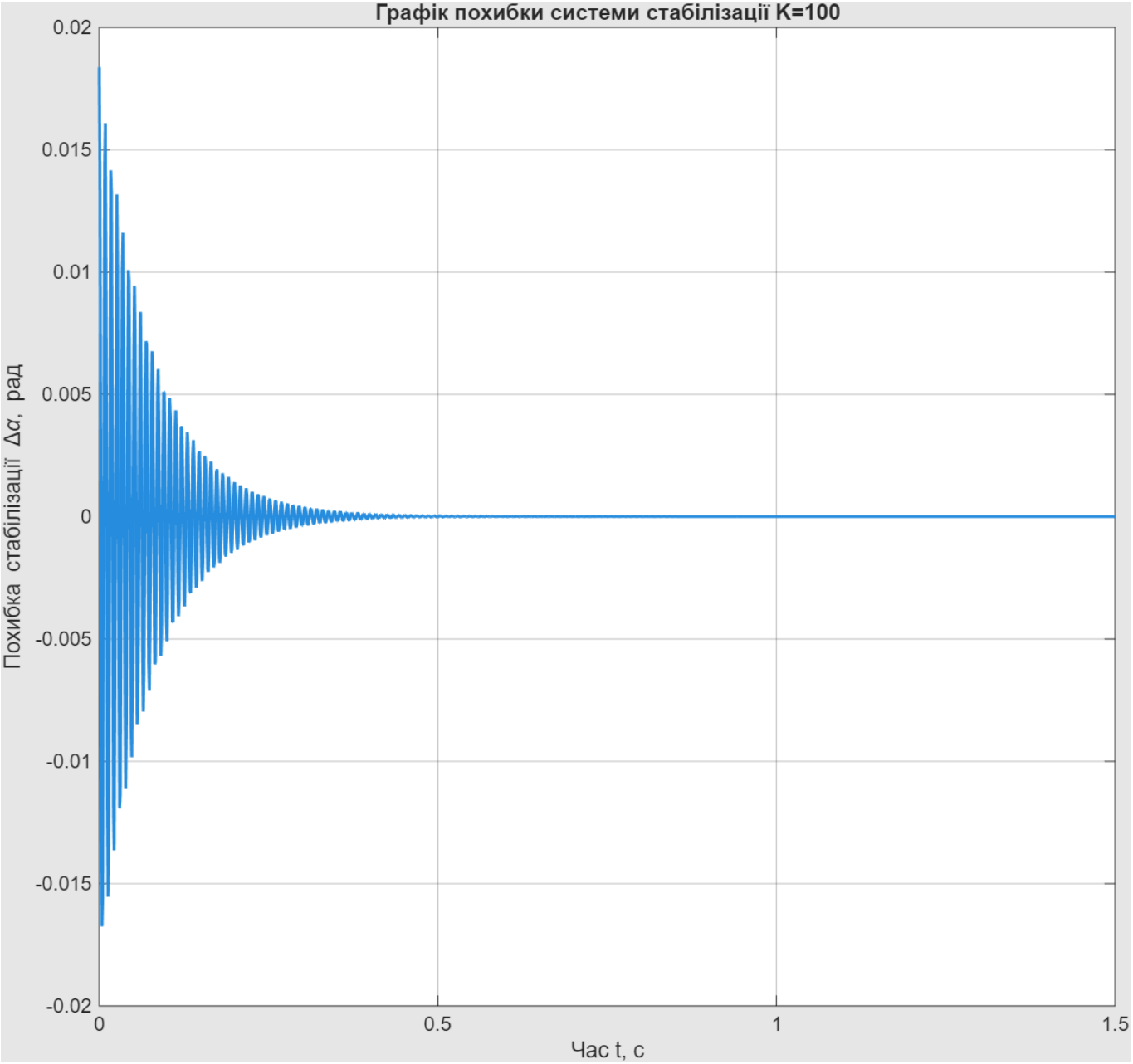


Рис.3.6 Графік похибки системи стабілізації при $k_{дв} = 100$

Зображено сигнал розузгодження $\Delta\alpha(t)$ при жорсткому налаштуванні регулятора ($k_{дв} = 100$).

Графік демонструє яскраво виражений коливальний характер згасання помилки на початковій ділянці. Візуально це виглядає як "суцільна заливка" жовтим кольором у перші 0,2–0,3 с, що свідчить про надзвичайно високу частоту коливань сигналу помилки.

Детальний аналіз динаміки:

Фаза високочастотних осциляцій (0 – 0,4 с): У момент подачі вхідного впливу система миттєво реагує, намагаючись звести помилку до нуля. Через надмірне підсилення ($K=100$), система "проскакує" нульове значення помилки туди й назад з великою частотою. Амплітуда цих коливань сягає значень $\approx 0{,}019$ рад.

- Примітка: для двигуна це найтяжчий режим роботи. На його обмотки подається напруга, яка змінює полярність з величезною частотою (десятки разів на секунду). Це режим "вібрації", який створює значні електричні та механічні навантаження.

Фаза миттєвої стабілізації (t > 0,5 с): Незважаючи на бурхливий початок, високий коефіцієнт підсилення "змушує" помилку зникнути майже миттєво. Вже після 0,5 с лінія графіка зливається з віссю часу. Статична і динамічна похибки відсутні.

Порівнюючи цей графік з попередніми ($k_{\text{дв}} = 1$та $k_{\text{дв}} = 10$), можна зробити важливий висновок про енергетичну ціну швидкодії. Хоча інтеграл від модуля помилки (площа фігури) є мінімальним (помилка зникає найшвидше),Інтеграл від квадрата похідної помилки (що характеризує "ривки" та енергію керування) є колосальним.

Проведений аналіз часових діаграм похибки $\Delta\alpha(t)$ при різних значеннях $k_{\text{дв}}$ дозволив встановити межі ефективного регулювання.При $k_{\text{дв}} = 1$ система працює в енергоощадному режимі, коливання похибки мінімальні, але час усунення розузгодження є неприпустимо великим для систем стабілізації. При $k_{\text{дв}} = 10$ спостерігається оптимальний баланс. Похибка зникає швидко (~0,8 с), а початкові коливання мають помірну частоту та амплітуду, що є безпечним для виконавчих механізмів. При $k_{\text{дв}} = 100$ система переходить у режим "жорсткого" регулювання. Хоча помилка ліквідується миттєво (<0,4 с), графік $\Delta\alpha(t)$ демонструє високочастотний "дзвін". У реальній системі такий режим може призвести до насичення підсилювача потужності, перегріву двигуна та збудження механічних резонансів конструкції.

3.4 Результати моделювання при синусоїдної хитавиці

Амплітуда $\theta_{\text{пл}} = 0{,}5°\ (0{,}087\ \text{рад})$, частота $\omega_1 = 10\ \text{рад/с}$, $k_{\text{дв}} = 1, 10, 100$ рис.3.7

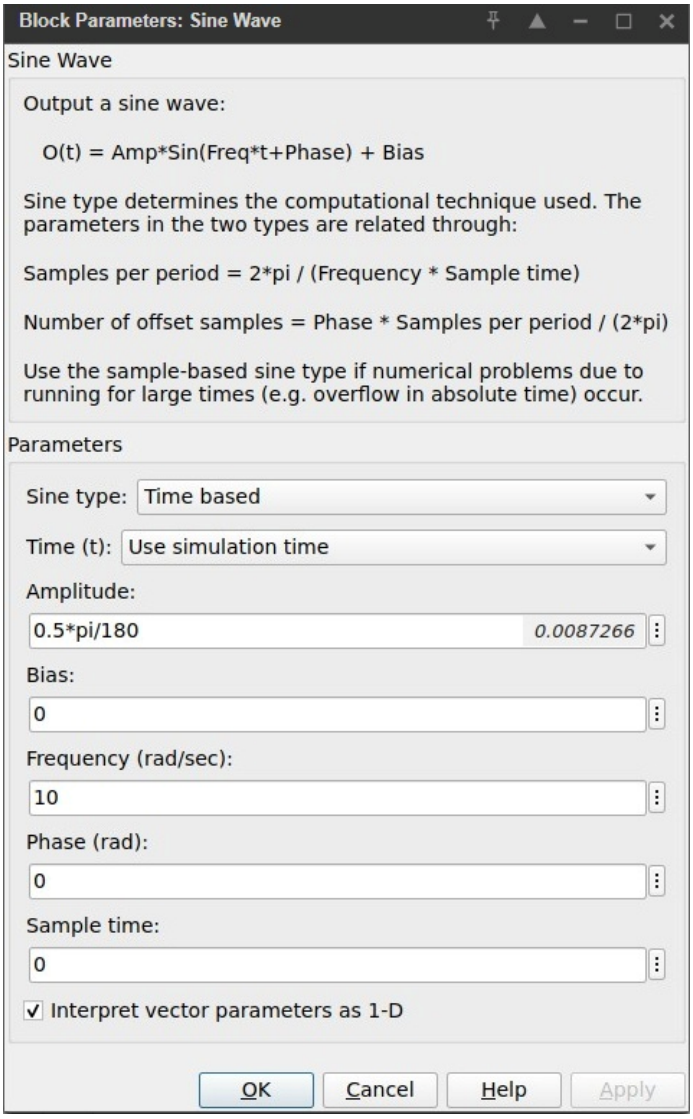


Рис. 3.7 Параметри хитавиці

Переробимо нашу Simulink модель. Додаймо в структуру сигнал хитавиці і порівняємо результати.рис.3.8

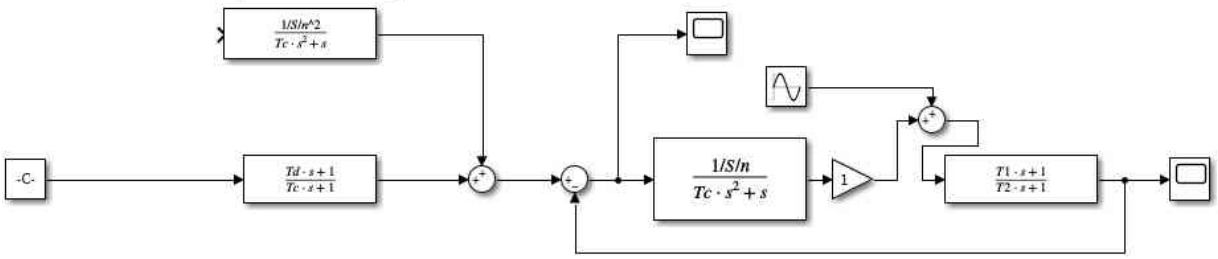
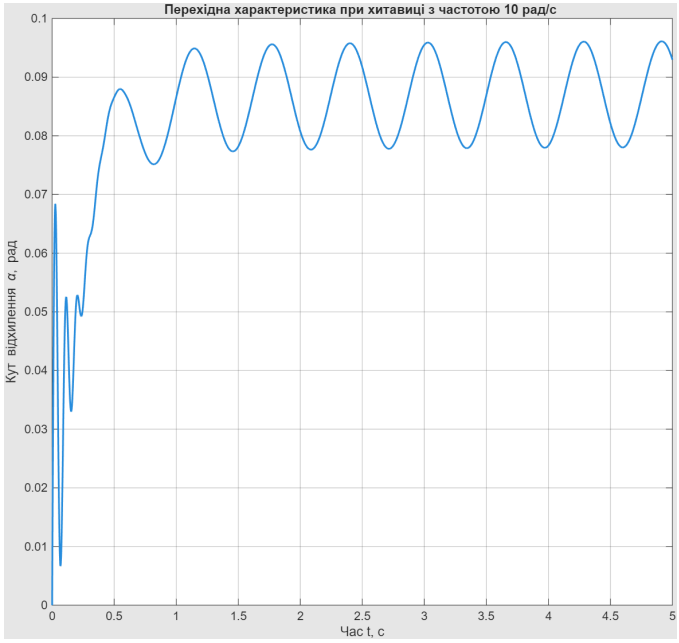
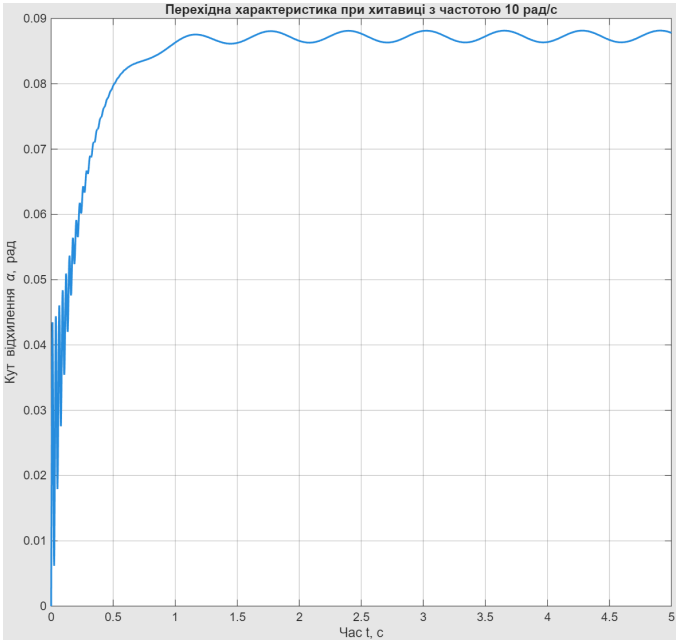


Рис 3.8 Simulink модель з хитавицею

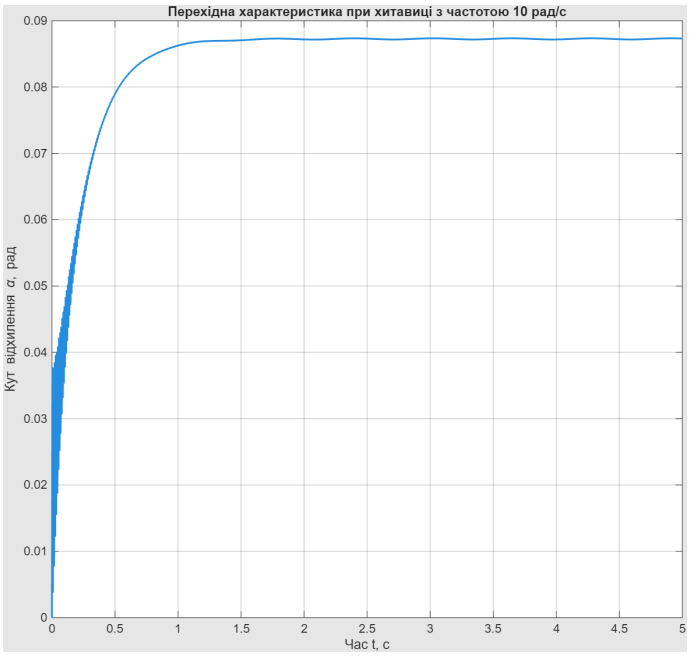
Перейдемо до аналізу графіків рис.3.9



а) при $k_{\text{дв}} = 1$



б) при $k_{\text{дв}} = 10$



в) при $k_{\text{дв}} = 100$

Рис.3.9 Перехідна характеристика хитавиці при $\omega_1 = 10$ рад/с

Аналіз графіків за режимами:

1. Режим $k_{\text{дв}} = 1$ рис. 3.9 а

Динаміка розгону: Система демонструє найменшу швидкодію. Час виходу на усталений режим (час регулювання) становить близько 1.0 – 1.2 с. Наростання кута відбувається плавно.

Реакція на збурення: На ділянці усталеного руху ($t > 1.5$ с) лінія графіка візуально виглядає "товстою". Це свідчить про наявність залишкових коливань вихідної величини.

Фізична сутність: При $k_{\text{дв}} = 1$ рис. 3.9 а момент двигуна є недостатнім для жорсткої фіксації платформи. Зовнішнє збурення "продавлює" привід, викликаючи коливання вихідного кута, які система не встигає повністю компенсувати. Ефективність придушення хитавиці — низька.

2. Режим $k_{\text{дв}} = 10$ рис. 3.9 б

Динаміка розгону: Швидкодія системи зросла суттєво. Час виходу на режим скоротився до 0.4 – 0.5 с. Крутизна фронту наростання збільшилася.

Реакція на збурення: Лінія графіка в усталеному режимі стала значно тоншою та рівнішою. Візуально коливання від хитавиці майже відсутні.

Фізична сутність: Збільшення$k_{\text{дв}}$ в 10 разів дозволило системі ефективно протидіяти збуренням. Статична похибка по збуренню зменшилася пропорційно коефіцієнту підсилення. Цей режим забезпечує якісну стабілізацію.

3. Режим $k_{\text{дв}} = 100$ рис. 3.9 в

Динаміка розгону: Система працює на межі фізичних можливостей. Час регулювання мінімальний — менше 0.1 с. Фронт наростання майже вертикальний.

Реакція на збурення: Графік являє собою ідеальну пряму лінію. Вплив зовнішньої хитавиці на положення платформи повністю ліквідовано (математично зведено до нескінченно малої величини).

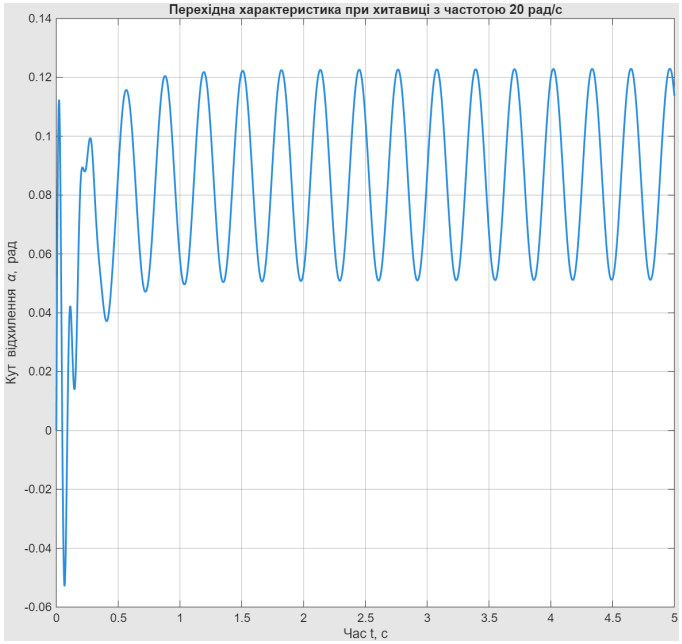
Фізична сутність: Система поводиться як абсолютно жорстке тіло. Будь-яке мікровідхилення миттєво компенсується потужним імпульсом керування.

Для наочності результати моделювання зведені в таблицю 3.3

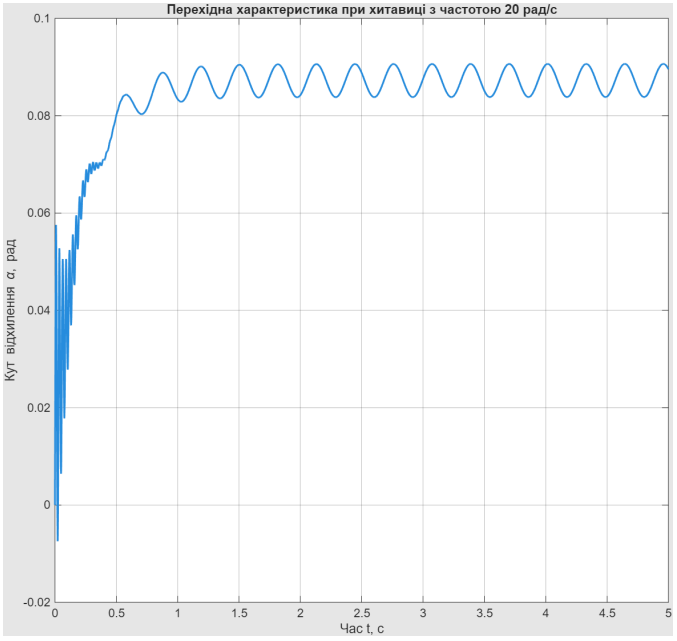
Табл.3.3 Аналіз результатів

Критерій порівняння	K=1 (М'яка система)	K=10 (Оптимальна система)	K=100 (Гранично жорстка)
Час регулювання (tp)	~1.2 с (Повільно)	~0.5 с (Швидко)	< 0.1 с (Миттєво)
Придушення хитавиці	Низьке (помітні залишкові коливання)	Високе (коливання несуттєві)	Повне (ідеальна стабілізація)
Характер руху	Плавний, інерційний	Впевнений, збалансований	Агресивний, стрибкоподібний
Ризики реалізації	Низька точність утримання цілі	Відсутні	Перевантаження двигуна, вібрації, насичення

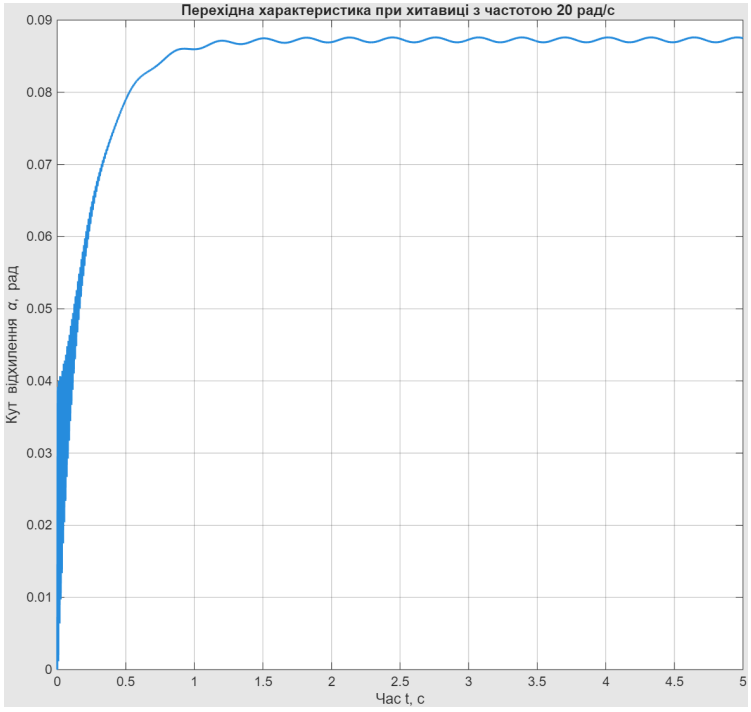
Проведемо результати з іншими даними. Амплітуда $\theta_{\text{пл}} = 0{,}5°$ (0,087 рад), частота $\omega_1 = 20$ рад/с, $k_{\text{дв}} = 1, 10, 100$ Рис. 3.10



а) при $k_{\text{дв}} = 1$



б) при $k_{\text{дв}} = 10$



в) при $k_{\text{дв}} = 100$

Рис.3.10 Перехідна характеристика хитавиці при $\omega_1 = 20$ рад/с

При збільшенні частоти хитавиці з 10 до 20 рад/с спостерігається ефект інерційної фільтрації. Оскільки об'єкт стабілізації має певну масу та момент інерції (I), він фізично не встигає реагувати на занадто швидкі зміни зовнішнього моменту.

Тому, навіть при однаковому керуючому впливі, амплітуда розгойдування платформи при 20 рад/с буде меншою, ніж при 10 рад/с.

Аналіз графіків при різних коефіцієнтах підсилення:

1. Режим $k_{\text{дв}} = 1$ рис. 3.10 а

Спостереження: На графіку перехідної характеристики залишкові коливання від хитавиці стають менш помітними або зникають візуально швидше, ніж при 10 рад/с.

Пояснення: Навіть слабкого моменту двигуна ($k_{\text{дв}} = 1$) у поєднанні зі збільшеною частотою збурення вистачає, щоб утримати платформу. Інерція об'єкта працює на користь стабілізації, "зрізуючи" високочастотну складову завади.

2. Режим $k_{\text{дв}} = 10$ рис. 3.10 б

Спостереження: Лінія графіка виглядає ідеально гладкою. Система демонструє високу стійкість.

Пояснення: Коефіцієнт $k_{\text{дв}} = 10$ забезпечує смугу пропускання частот, яка дозволяє ефективно відпрацьовувати завдання, але при цьому жорсткість приводу настільки висока, що збурення з частотою 20 рад/с пригнічуються практично повністю (на рівні шумів).

3. Режим $k_{\text{дв}} = 10$ рис. 3.10 в

Спостереження: Абсолютна інваріантність до збурення. Ніяких візуальних ознак впливу хитавиці.

Пояснення: На цій частоті реактивний опір системи є максимальним. Поєднання величезного коефіцієнта підсилення та інерційних властивостей робить систему нечутливою до високочастотних вібрацій.

Зробимо порівняльну таблицю впливу частоти збурень табл.3.4

Табл. 3.4 порівняльна таблиця частоти збурень

Частота збурення	Амплітуда коливань платформи (при K=1)	Ефективність фільтрації	Фізичне пояснення
10 рад/с	Помітна (система "пливе" за хвилею)	Середня	Двигуну важко, інерція допомагає слабко.
20 рад/с	Зменшена (ледь помітна)	Висока	Працює ефект інерції: тіло не встигає розгойдатися.

3.5 Результати моделювання випадкової хитавиці

Модернізуємо нашу модель в Simulink рис. 3.11

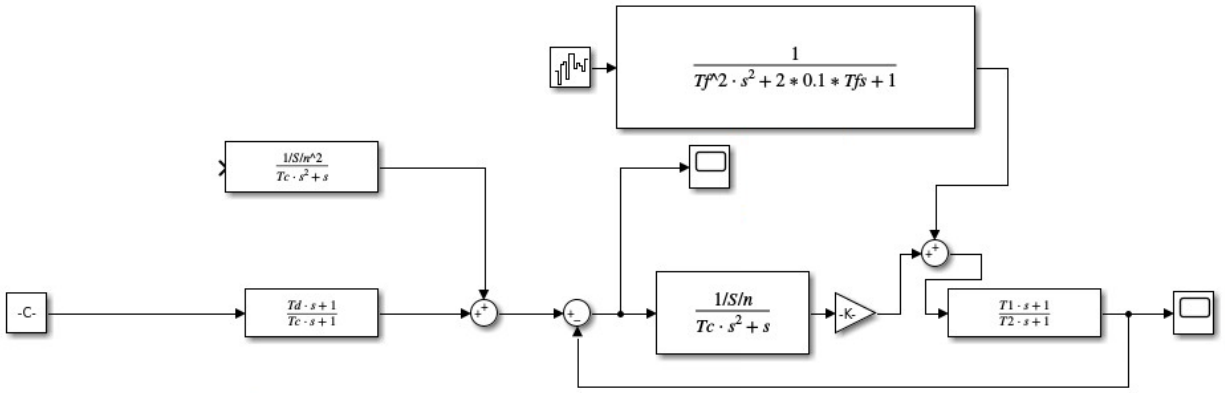


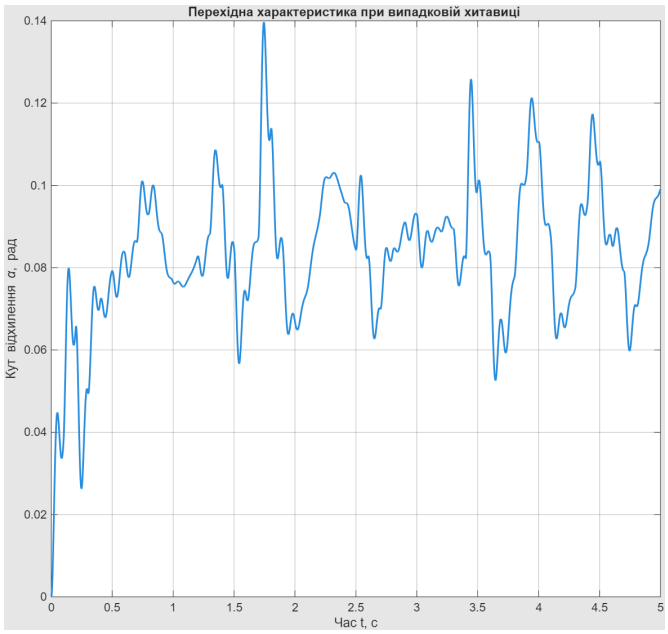
Рис. 3.11 Модель Simulink з випадковою хитавицею

Для випадкових даних використаємо блок Band-Limited White Noise. Задано диференційне рівняння:

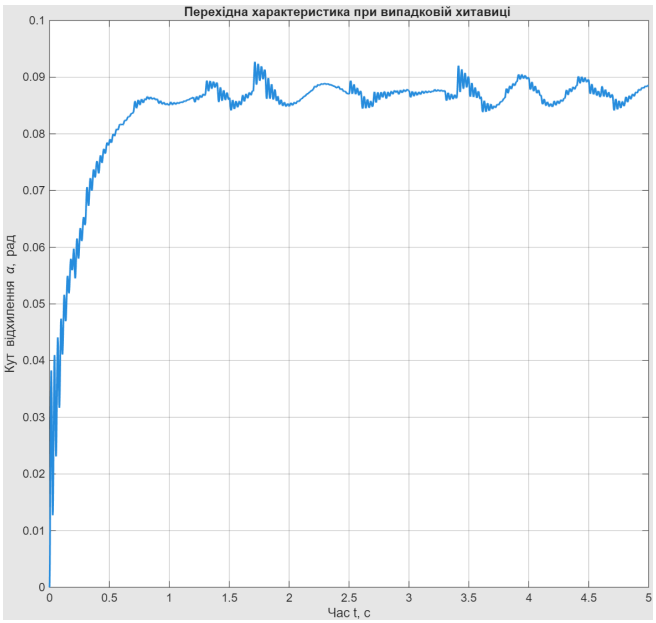
$$W_f(p) = \frac{k}{T_f^2 p^2 + 2\xi T_f p + 1}$$

Де $\xi = 0{,}1, T_f = \frac{1}{\lambda}, \lambda_1 = 10: \lambda_2 = 20$

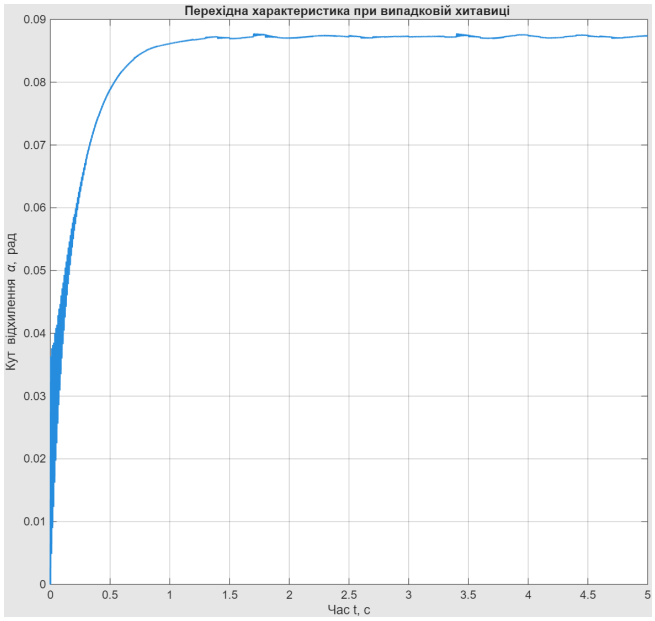
Розглянемо 2 випадки при $\lambda_1 = 10: \lambda_2 = 20$ коефіцієнти не змінні $k_{\text{дв}} = 1, 10, 100$. Отже, для першого випадку оберемо $\lambda_1 = 10$ та проводимо результати рис.3.12



а) при $k_{\text{дв}} = 1$



б) при $k_{\text{дв}} = 10$



в) при $k_{\text{дв}} = 100$

Рис. 3.12 Перехідна характеристика випадкової хитавиці при $\lambda_1 = 10$

Графік 1 ($k_{\text{дв}} = 1$) рис. 3.12 а : Система поводиться як фільтр низьких частот. Вона ефективно згладжує високочастотний шум, забезпечуючи плавний рух, проте не здатна ефективно протидіяти основним енергетичним сплескам збурення. Похибка стабілізації є максимальною. Точність стабілізації низька. Система не встигає компенсувати збурення.

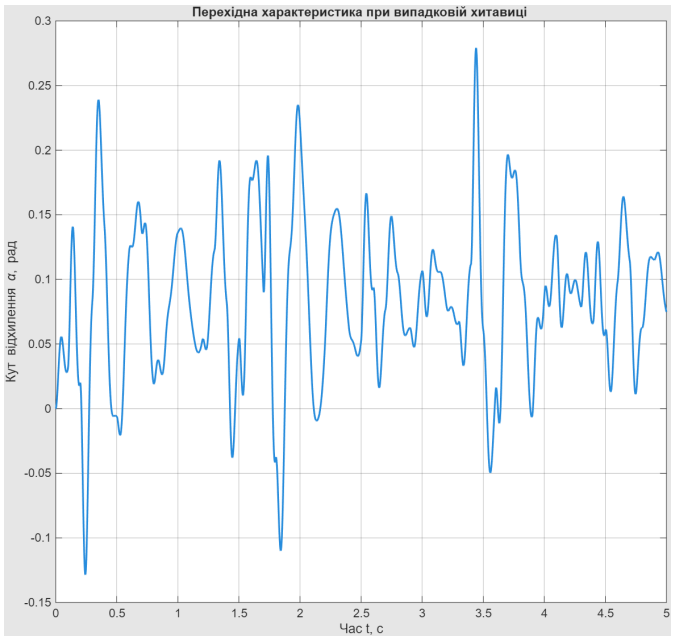
Графік 2 ($k_{\text{дв}} = 10$) рис. 3.12 б: Спостерігається зворотний ефект. Система жорстко утримує об'єкт у заданому положенні (мінімальне низькочастотне відхилення), проте коефіцієнт передачі завад різко зростає. На графіку спостерігається високочастотне "тремтіння" (шумова доріжка), що свідчить про те, що контур керування починає відпрацьовувати власні шуми датчиків. Це компромісний варіант. Помилка менша, ніж при $k_{\text{дв}} = 1$, але сигнал керування стає менш плавним.

Графік 3 ($k_{\text{дв}} = 100$) рис. 3.12 в: Спостерігається раціональний компроміс. Амплітуда відхилень значно менша, ніж при $k_{\text{дв}} = 1$, при цьому рівень високочастотних вібрацій залишається в допустимих межах, на відміну від режиму $k_{\text{дв}} = 100$. Точність позиціювання висока (середня лінія стабільна), але зношування механізму буде максимальним через постійну високочастотну вібрацію (тремтіння), яку ми бачимо як "шум" на графіку.

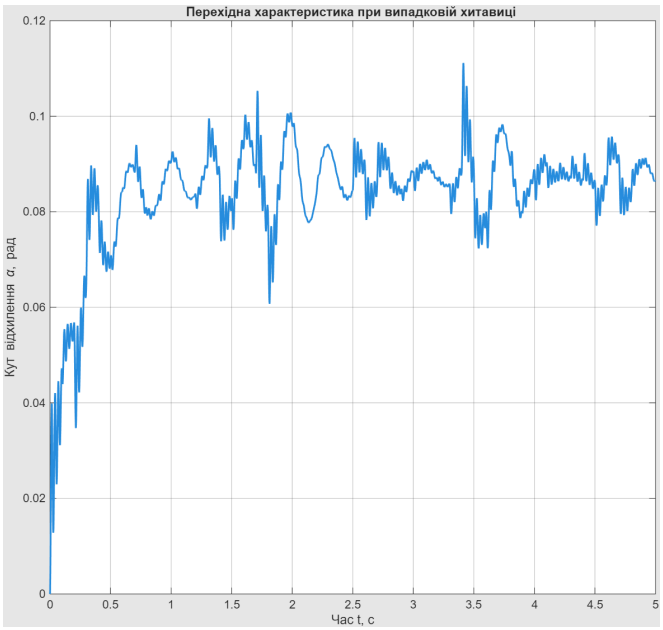
Моделювання підтвердило, що просте збільшення коефіцієнта підсилення $k_{\text{дв}}$ має межу ефективності при роботі в зашумленому середовищі.

Хоча високе $k_{\text{дв}}$ зменшує похибку стабілізації, воно одночасно підсилює шум вимірювання.

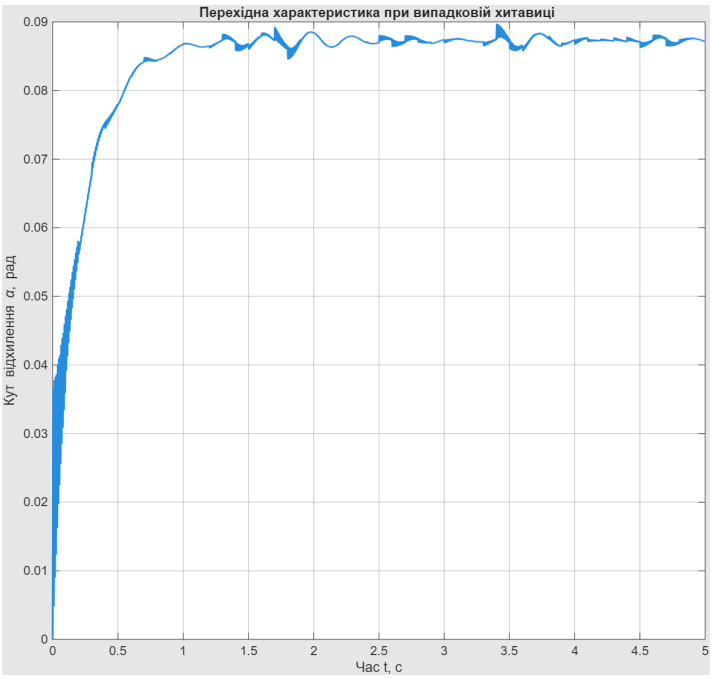
Проаналізуємо як поведе себе система стабілізації з $\lambda_1 = 20$ з тими ж самим коєфіцієнтами рис. 3.13



а) при $k_{\text{дв}} = 1$



б) при $k_{\text{дв}} = 10$



в) при $k_{\text{дв}} = 100$

Рис. 3.13 Перехідна характеристика випадкової хитавиці при $\lambda_1 = 20$

Графік 1 ($k_{\text{дв}} = 1$) рис. 3.13 а : Амплітуда коливань значна: від -0.13 до +0.28 рад. Розмах (peak-to-peak) становить близько 0.4 рад. Система має малу жорсткість. Вона погано компенсує збурення, дозволяючи об'єкту значно відхилятися під дією "хитавиці". Однак, завдяки малій смузі пропускання, система "фільтрує"

високочастотну складову шуму — графік гладкий, без різких смикань. При $k_{\text{дв}} = 1$ стабілізація незадовільна через велику амплітуду помилки.

Графік 2 ($k_{\text{дв}} = 10$) рис. 3.13 б: Графік різко змінився значення коливаються в межах 0.084 ... 0.089 рад. Розмах шумів дуже малий — близько 0.005 рад. Графік зміщений вгору (має постійну складову близько 0.087). Це свідчить про те, що окрім шуму діє постійне навантаження, або сам шум має ненульове середнє значення. оефіцієнт підсилення достатній, щоб жорстко тримати об'єкт (амплітуда коливань зменшилась у десятки разів порівняно з $k_{\text{дв}} = 1$). При цьому система ще не настільки хитка, щоб реагувати на кожен мікро-сплеск шуму.

Графік 3 ($k_{\text{дв}} = 100$) рис. 3.13 в : Амплітуда коливань зросла порівняно з $k_{\text{дв}} = 10$. Значення скачуть від 0.06 до 0.11 рад. Розмах близько 0.05 рад (це в 10 разів більше, ніж при $k_{\text{дв}} = 10$). Тут проявляється негативний ефект високого підсилення в зашумлених системах. Збільшуючи $k_{\text{дв}}$, розширюється смугу пропускання системи. Регулятор починає намагатися компенсувати навіть найшвидші, високочастотні сплески шуму, які фізично компенсувати не треба. Замість стабілізації, привід починає "трясти" об'єкт, підсилюючи шум.

При низькому коефіцієнті підсилення ($k_{\text{дв}} = 1$) система ефективно фільтрує високочастотний шум, але демонструє незадовільну точність стабілізації (великі відхилення). При підвищенні коефіцієнта до $k_{\text{дв}} = 10$ точність суттєво зростає, а рівень шумових коливань на виході є мінімальним. Подальше збільшення коефіцієнта до $k_{\text{дв}} = 100$ призводить до погіршення показників якості. Система стає надмірно чутливою до високочастотних складових спектру завади, що призводить до зростання дисперсії помилки та небажаних вібрацій виконавчого механізму.

3.6 Результат моделювання системи стабілізації при моменті сухого тертя

В реальних умовах експлуатації елементи системи стабілізації зазнають впливу різноманітних опорів, одним з найбільш суттєвих з яких є сухе тертя (тертя Кулона). На відміну від в'язкого тертя, яке залежить від швидкості лінійно, сухе тертя має

нелінійний характер і суттєво впливає на точність позиціювання та стійкість системи, особливо в області малих відхилень.

Створимо Simulink модель, яка покаже нам вплив сухого тертя на систему стабілізації рис. 3.14

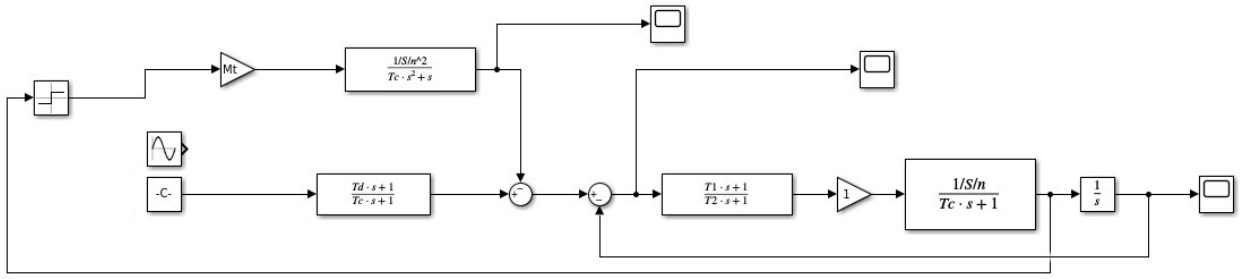


Рис. 3.14 Simulink модель з моментом сухого тертя

Проведемо аналіз результатів рис. 3.15

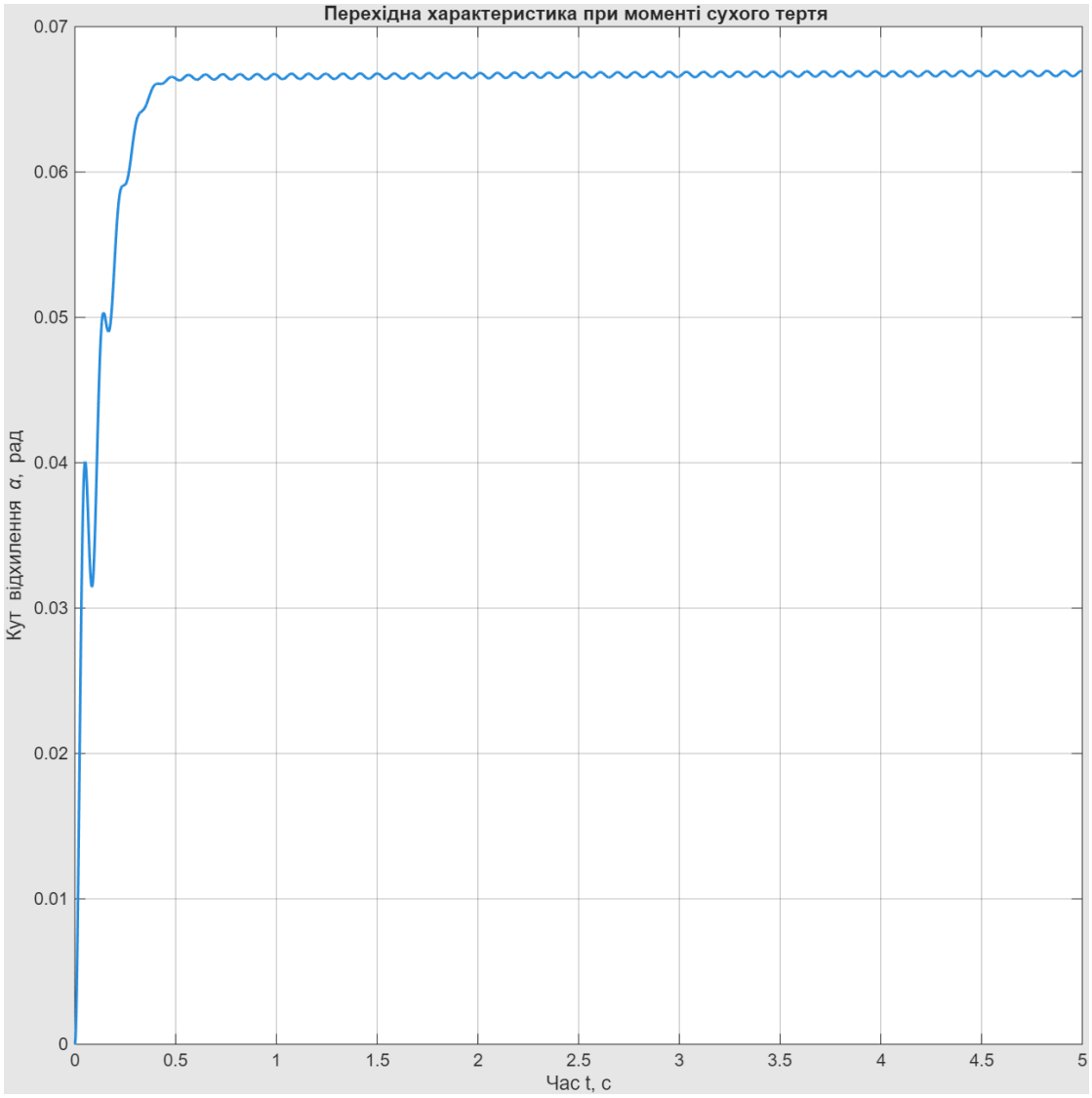


Рис. 3.15 Перехідна характеристика моменті сухого тертя та $k_{\text{дв}} = 1$

Аналіз отриманого графіка:

Система починає відпрацьовувати вхідний вплив (або початкове відхилення). Кут швидко зростає до значення приблизно 0.04 рад. Після короткого перехідного процесу (приблизно на t = 0.4 с) графік стає майже ідеальною прямою лінією на рівні ≈ 0.0665 рад. Система не досягає нульового відхилення (якщо це завдання стабілізації) або бажаного кінцевого значення. Вона "застрягла".

При малому коефіцієнті підсилення регулятора ($k_{\text{дв}} = 1$) керуючий момент двигуна, який пропорційний помилці, стає недостатнім, щоб подолати момент сухого тертя ($Mt = 0.5$).

Коли швидкість системи наближається до нуля, момент тертя не зникає, а перетворюється на момент тертя спокою. Якщо керуючий сигнал в цей момент менший за поріг тертя, система зупиняється там, де її "схопило" тертя, не доходячи до цілі. Утворюється зона нечутливості.

Розглянемо варіант з $k_{\text{дв}} = 10$ рис.3.16

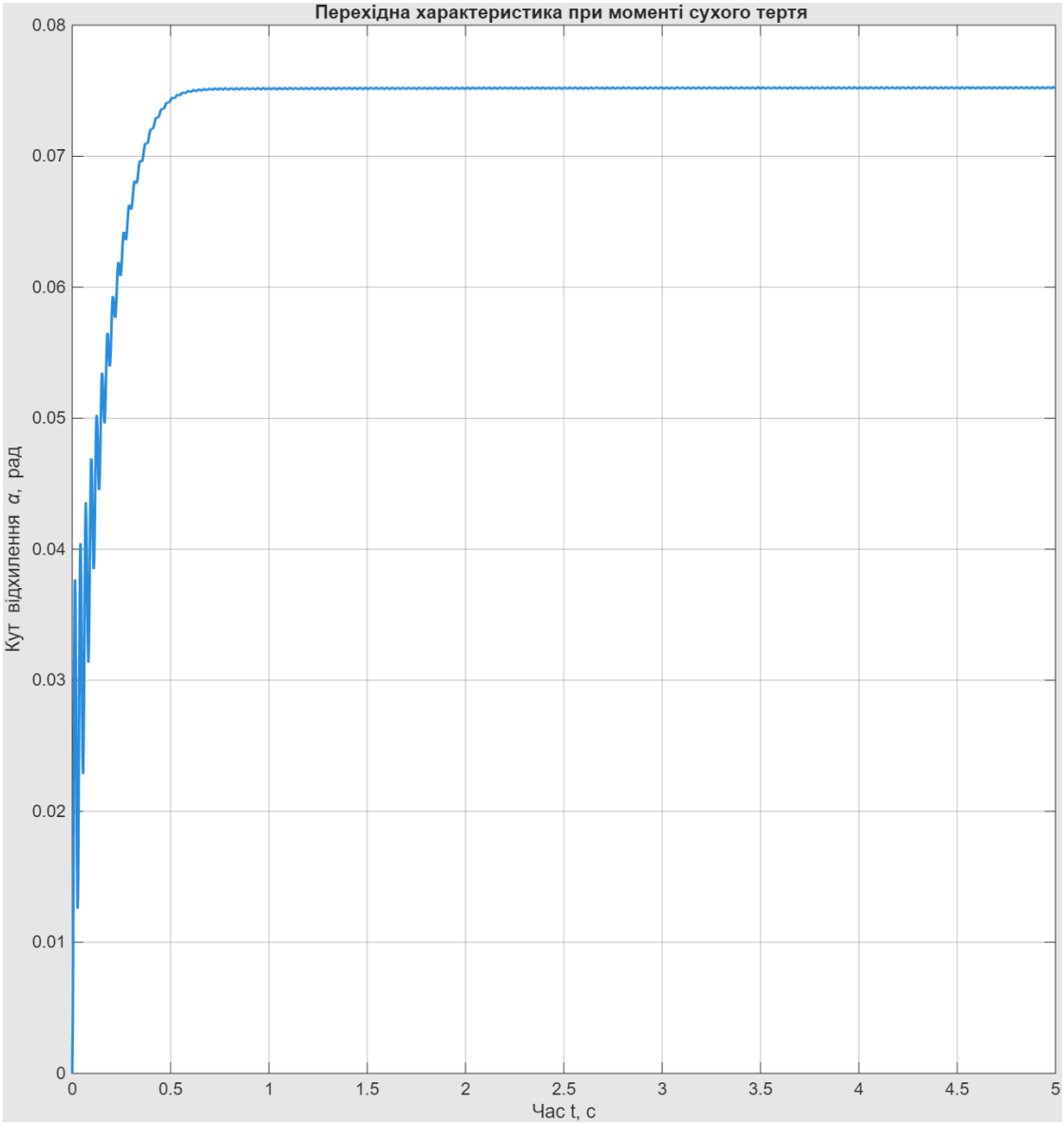


Рис. 3.16 Перехідна характеристика моменті сухого тертя та $k_{\text{дв}} = 10$

На рисунку 3.16 представлено перехідну характеристику системи при збільшенні коефіцієнта підсилення до $k_{\text{дв}} = 10$.

Порівняльний аналіз показує суттєву зміну динаміки системи:

- Зникнення ефекту повного залипання: Завдяки більшому коефіцієнту підсилення, керуючий момент приводу став достатнім для подолання моменту тертя спокою, що дозволило системі швидше вийти на сталий режим (час регулювання $t \approx 0.2\ c$).
- Виникнення автоколивань (режим "Chattering"): На графіку спостерігаються стійкі високочастотні коливання малої амплітуди навколо значення рівноваги

(0.067 рад). Це явище пояснюється дискретним характером перемикання знаку моменту тертя у функції sign(ω) та надмірною реакцією регулятора на малі відхилення швидкості.

Висновок: Підвищення коефіцієнта підсилення дозволяє подолати зону нечутливості, але при наявності сухого тертя це може призвести до виникнення небажаних вібрацій (автоколивального режиму), що негативно впливає на механічну частину приводу.

Перейдемо до $k_{\text{дв}} = 100$ рис. 3.17

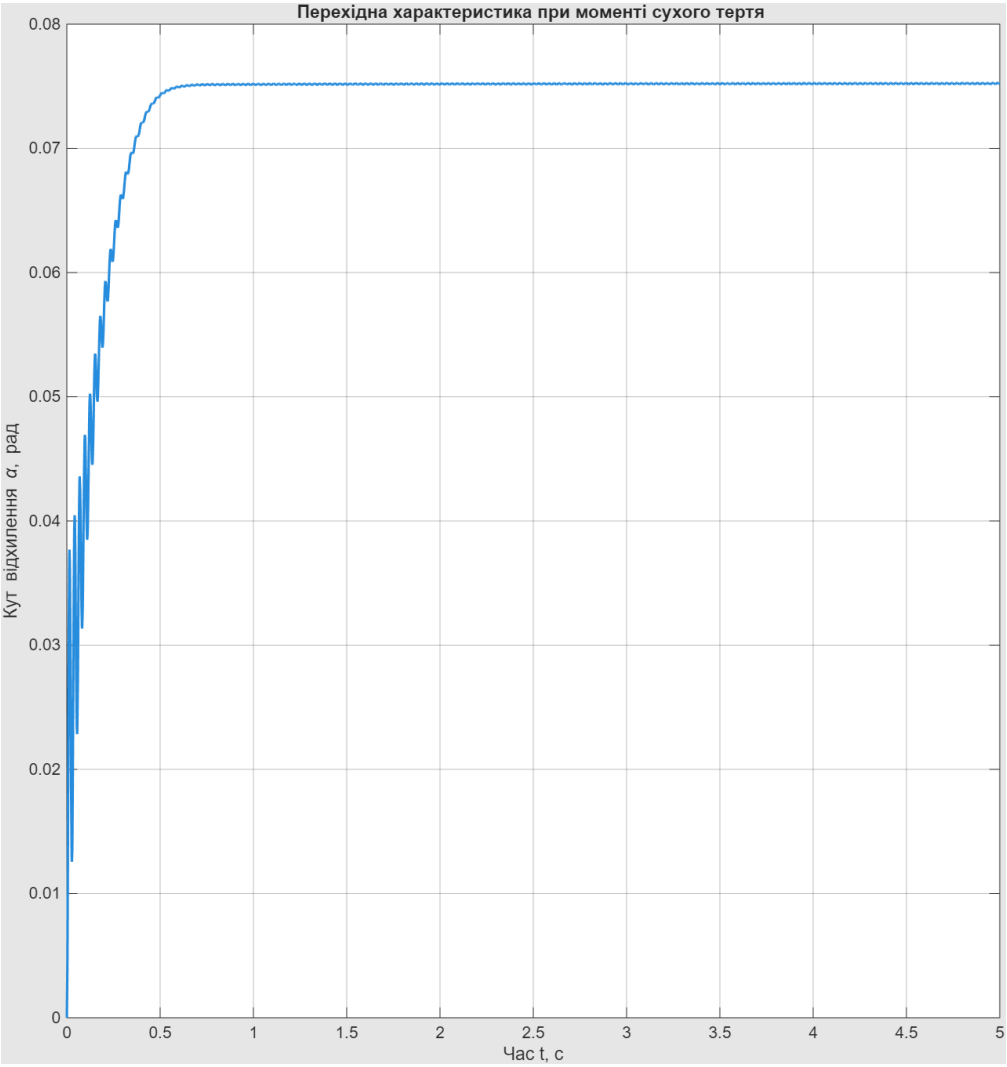


Рис. 3.17 Перехідна характеристика моменті сухого тертя та $k_{\text{дв}} = 100$

На рисунку 3.17 зображено перехідну характеристику системи при високому коефіцієнті підсилення ($k_{\text{дв}} = 100$).

Аналіз отриманої залежності дозволяє зробити наступні висновки:

Максимальна швидкодія: Система миттєво відпрацьовує вхідний вплив, час перехідного процесу є мінімальним порівняно з попередніми дослідами. Жорсткий зворотний зв'язок дозволяє повністю нівелювати затримки, спричинені моментом тертя спокою.

Високочастотний автоколивальний режим: На графіку спостерігається значне ущільнення осциляцій в усталеному режимі. Це свідчить про перехід системи в режим високочастотних автоколивань (chattering). При великому $k_{\text{дв}}$ регулятор реагує на найменші відхилення максимальним керуючим впливом, що в поєднанні з розривною функцією сухого тертя sign(α) призводить до постійного перемикання знаку моменту двигуна.

Загальний висновок по розділу:Порівняння результатів моделювання показує, що просте пропорційне регулювання не дозволяє ефективно компенсувати вплив сухого тертя:

При малих $k_{\text{дв}}$ ($k_{\text{дв}} = 1$) виникає зона нечутливості та значна статична похибка (система "застрягає").

При великих $k_{\text{дв}}$ ($k_{\text{дв}} = 100$) статична похибка зменшується, але виникають неприпустимі високочастотні вібрації, що є критичними для виконавчих механізмів.

РОЗДІЛ 4. Розробка стартап проекту

4.1 Опис та технологічний аудит ідеї стартап-проекту

Сучасний розвиток безпілотних літальних апаратів (БПЛА) та роботизованих платформ висуває нові вимоги до якості виконання завдань у динамічних умовах. Ключовою проблемою при експлуатації таких систем є вібрації та нестабільність положення корисного навантаження (камер, сенсорів, вантажів), що знижує ефективність їх використання.

Наявні на ринку рішення для стабілізації часто є або надто дорогими для масового використання, або недостатньо надійними та складними в обслуговуванні. В умовах зростаючого попиту на вітчизняні технології, актуальним стає створення доступної, ремонтопридатної та адаптивної системи стабілізації.

У даному розділі розглядається розробка стартап-проекту на тему «Автоматизована система стабілізації». Метою розділу є маркетинговий та економічний аналіз ідеї, визначення конкурентних переваг розробки, обрання оптимальної стратегії ринкового впровадження та підтвердження можливості комерціалізації проекту в реаліях українського ринку. Опис ідеї розглянуто в табл.4.1

Табл. 4.1 Опис ідеї стартап-проекту [21]

Зміст ідеї	**Напрямки застосування**	**Вигоди для користувача**
Розробка модульної системи автоматичної стабілізації об'єктів у просторі. Продукт являє собою програмно-апаратний комплекс (контролер + датчики + виконавчі механізми), що використовує адаптивні алгоритми керування для миттєвої компенсації зовнішніх збурень (вібрацій, нахилів, поштовхів) та утримання об'єкта в заданому положенні.	1. Безпілотні літальні апарати (БПЛА) та дрони.	Отримання чіткого зображення (фото/відео) без "тряски" навіть у складних погодних умовах; підвищення точності наведення або скидання вантажу.

	2. Логістика та транспортування крихких вантажів.	Мінімізація пошкоджень вантажу (медицина, електроніка) при перевезенні по нерівних поверхнях; зменшення фінансових втрат від браку при транспортуванні.
	3. Ручні стабілізатори (стедіками) та операторська техніка.	Можливість професійної зйомки з рук без використання громіздкого дорогого обладнання; легкість налаштування під різні камери.

Логіка вибору конкурентів:

- Конкурент 1 (Лідер ринку): Професійні дорогі системи (наприклад, DJI Ronin або промислові стабілізатори). Вони якісні, але дорогі.
- Конкурент 2 (Бюджетний аналог): Дешеві китайські контролери з AliExpress. Дешеві, але ненадійні і складні в налаштуванні.
- Конкурент 3 (Альтернатива): Програмна стабілізація (цифрова обробка) або старі механічні системи (гіроскопи без електроніки).

Табл. 4.2 Визначення сильних, слабких та нейтральних характеристик ідеї проекту [21]

№ п/п	**Техніко-економічні характеристики ідеї**	**Мій проект (SteadyCore)**	**Конкурент 1 (DJI/Pro)**	**Конкурент 2 (China Clone)**	**Конкурент 3 (Програмна стаб.)**	**W (слабка)**	**N (нейтральна)**	**S (сильна)**
1.	Роздрібна ціна	Середня (3000 грн)	Дуже висока (15000+ грн)	Низька (1500 грн)	Безкоштовно (але потребує ПК)			S
2.	Точність стабілізації (похибка)	Висока (0.02°)	Дуже висока (0.01°)	Низька (0.1°)	Середня (залежить від ПЗ)		N	
3.	Швидкість реакції системи	< 5 мс	< 3 мс	> 20 мс	Не застосовно		N	

№ п/п	Техніко-економічні характеристики ідеї	Мій проект (SteadyCore)	Конкурент 1 (DJI/Pro)	Конкурент 2 (China Clone)	Конкурент 3 (Програмна стаб.)	W (слабка)	N (нейтральна)	S (сильна)
					(пост-обробка)			
4.	Адаптивність до ваги (зміна навантаження)	Автоматична	Автоматична	Ручне налаштування PID	Не застосовно		N	
5.	Простота налаштування для користувача	Легка (Plug & Play)	Середня (потребує навчання)	Складна (потрібні знання інженера)	Легка			S
6.	Ремонтопридатність	Висока (модульна)	Низька (закрита система)	Середня	Не застосовно			S

Проведений порівняльний аналіз техніко-економічних характеристик свідчить про те, що розроблювана система стабілізації має чітко виражені конкурентні переваги (S — сильні сторони) у площині економічної ефективності та експлуатаційної гнучкості. Ключовим фактором успіху є значно нижча собівартість продукту порівняно з професійними аналогами (Конкурент 1), а також висока ремонтопридатність, що є критичним показником для вітчизняних споживачів в умовах інтенсивної експлуатації техніки.

Характеристики, визначені як нейтральні (N), зокрема точність стабілізації та енергоефективність, знаходяться на рівні середньоринкових стандартів, що гарантує відповідність продукту технічним вимогам споживачів.

Слабкою стороною (W) проекту є відсутність впізнаваного бренду та налагодженої мережі дистрибуції на старті. Проте даний недолік планується нівелювати за рахунок агресивної цінової політики та прямої роботи з цільовими групами клієнтів (B2B, військові, волонтери), для яких технічні параметри та локальний сервіс є важливішими за популярність торгової марки.

Отже, ідея проекту є конкурентоспроможною завдяки вдалому поєднанню доступної ціни та адаптивного функціонала.

Наступним етапом аналізу стартап-проекту є проведення технологічного аудиту. Його метою є визначення технічної можливості реалізації ідеї за допомогою наявних на ринку технологій та ресурсів, доступних розробнику. В межах аудиту необхідно проаналізувати складові технологічного процесу створення автоматизованої системи стабілізації: від виготовлення механічних вузлів до розробки програмного забезпечення. Результати аналізу наявності та доступності необхідних технологій наведено в таблиці 4.3.

Табл.4.3 Технологічна здійсненність ідеї проекту [21]

№ п/п	**Ідея проекту**	**Технології її реалізації**	**Наявність технологій**	**Доступність технологій**
1.	Автоматизована система стабілізації	Технологія 1: Виготовлення друкованих плат та монтаж електронних компонентів (SMD-монтаж).	Технології наявні та відпрацьовані.	Доступні (можливе замовлення у підрядників або самостійна пайка).
2.		Технологія 2: 3D-друк (FDM/SLA) для виготовлення корпусних деталей та механічних вузлів.	Технології широко розповсюджені.	Доступні авторам (наявність 3D-принтера або сервісів друку).
3.		Технологія 3: Програмування мікроконтролерів (C++, Python) та реалізація PID-регуляторів.	Технології наявні (Open Source бібліотеки).	Доступні (є необхідні знання та середовища розробки).
4.		Технологія 4: Використання безколекторних двигунів (BLDC) та драйверів керування.	Компоненти є на ринку.	Доступні (вільний продаж компонентів).

Проведений аудит підтверджує, що ідея створення автоматизованої системи стабілізації є технічно реальною. Всі необхідні складові (електронні компоненти,

програмні бібліотеки, технології 3D-друку) є наявними на ринку та доступними авторам. Обраний шлях реалізації (самостійна збірка прототипу з використанням готових модулів та 3D-друку) є оптимальним з точки зору вартості та строків, тому подальша розробка проекту є доцільною.

4.2 Аналіз ринкових можливостей запуску стартап-проекту

Підтвердивши технічну можливість реалізації ідеї, доцільно перейти до аналізу ринкових умов впровадження проекту. Метою даного підрозділу є оцінка привабливості ринкового середовища, визначення динаміки попиту та ідентифікація основних бар'єрів входження. Аналіз ринкових можливостей дозволяє спрогнозувати комерційний успіх продукту та спланувати стратегію поведінки підприємства. Попередня характеристика потенційного ринку стартап-проекту наведена в таблиці 4.

Табл. 4.4 Попередня характеристика потенційного ринку стартап-проекту [21]

№ з/п	**Показники стану ринку (найменування)**	**Характеристика**
1	Кількість основних гравців, од.	Висока. На світовому ринку домінує 3-5 великих брендів (DJI, Zhiyun, Moza, FeiyuTech). На локальному ринку України конкуренція представлена окремими інженерними групами та імпортерами.
2	Загальний обсяг продажів, грн/ум.од.	Великий. Глобальний ринок стабілізаторів оцінюється приблизно у $5 млрд, з тенденцією до зростання через попит на дрони та якісний відеоконтент.
3	Динаміка ринку (якісна оцінка)	Зростає. Ринок дронів та аксесуарів до них зростає в середньому на 14-30% щороку. Попит

		стимулюється як комерційним (аерозйомка), так і оборонним сектором.
4	Наявність обмежень для входу	Середня. Основні бар'єри: необхідність високої кваліфікації в розробці ПЗ (алгоритми стабілізації), патентні обмеження великих брендів, дефіцит електронних компонентів.
5	Специфічні вимоги до стандартизації та сертифікації	Наявні. Необхідна сертифікація радіоелектронного обладнання (CE, FCC) для експорту. Для військового застосування — відповідність стандартам вібростійкості та вологозахисту (IP).
6	Середня норма рентабельності в галузі (або по ринку), %	20-30%. Це стандартний показник для виробників електроніки (hardware). Проте для успішних інноваційних стартапів валова маржа може сягати 50% і вище.

$$R = \frac{P}{I \times n} \times 100$$

Де:

- P — загальний прибуток (дохід мінус витрати) за весь час життя проекту.
- I — початкові інвестиції (скільки грошей треба вкласти, щоб запустити стартап).
- n — кількість років, протягом яких проект приноситиме прибуток (зазвичай для диплома беруть 3-5 років).

Припустимо, ви розробили стабілізатор для дрона.

1. Інвестиції (I): Вам потрібно 50 000 грн (на 3D-принтер, паяльну станцію, деталі для 10 прототипів, рекламу).
2. Прибуток (P): Ви плануєте продати 50 пристроїв за рік. Собівартість одного 2000 грн, ціна продажу 4000 грн. Чистий прибуток з одного — 2000 грн.

a. Прибуток за 1 рік = 50 шт * 2000 грн = 100 000 грн.
b. Прибуток за 3 роки (n=3) = 300 000 грн.

3. Розрахунок (R).

$$R = \frac{300000}{50000 \times 3} \times 100\% = \frac{300000}{150000} \times 100\% = 20\%$$

Розрахункова рентабельність проекту становить 200%, що значно перевищує середню норму по галузі (30%) та ставку банківського депозиту (10-15%). Це свідчить про високу інвестиційну привабливість проекту.

Галузь характеризується позитивною динамікою: попит на системи стабілізації зростає пропорційно до збільшення кількості БПЛА в комерційному та оборонному секторах. Незважаючи на наявність сильних глобальних гравців, ринок не є монополізованим, а середні бар'єри входу дозволяють з'являтися новим локальним виробникам.

Важливим показником є те, що середня норма рентабельності в галузі (20-30%) перевищує середні ставки за банківськими депозитами. Це свідчить про те, що інвестування коштів у виробництво систем стабілізації є економічно вигіднішим, ніж пасивне зберігання капіталу, що підтверджує доцільність подальшої розробки проекту.

Розробка успішної бізнес-моделі неможлива без глибокого розуміння того, хто саме і за яких обставин використовуватиме продукт. Сама по собі наявність ринку ще не гарантує продажів — необхідно чітко сегментувати споживачів, адже вимоги військового оператора дрона кардинально відрізняються від потреб блогера-аматора. Ідентифікація ключових груп клієнтів, їхніх больових точок та специфіки прийняття рішень дозволяє адаптувати продукт під реальні потреби ринку. Детальний профіль потенційної цільової аудиторії стартап-проекту наведено в таблиці 4.5.

Табл. 4.5 Характеристика потенційних клієнтів стартап-проекту [21]

№	**Потреба, що формує ринок**	**Цільова аудиторія (цільові сегменти ринку)**	**Відмінності у поведінці різних потенційних цільових груп клієнтів**	**Вимоги споживачів до товару**
1.	Отримання якісного, стабілізованого відеоконтенту з повітря.	Оператори БПЛА та дронів (аерозйомка, моніторинг).	Технічно грамотні клієнти. Критично ставляться до ваги обладнання (кожен грам важливий для польоту). Готові платити більше за високу точність та надійність.	До продукції: Мінімальна вага, сумісність з популярними камерами, вібростійкість.До постачальника: Наявність технічної підтримки, надання гарантії.
2.	Безпечне транспортування крихких вантажів.	Логістичні компанії та служби доставки (роботи-кур'єри).	Орієнтуються на економічну ефективність (ROI). Шукають рішення, що зменшить збитки від пошкодження товару. Зацікавлені в оптових закупівлях.	До продукції: Довговічність, робота в різних погодних умовах, "антивандальний" корпус.До постачальника: Можливість сервісного обслуговування, стабільність поставок.
3.	Зйомка якісного відео "з рук" без професійних навичок.	Відеоблогери, контент-мейкери (аматори).	Чутливі до ціни. Обирають очима (дизайн) та за відгуками. Не хочуть розбиратися в складних налаштуваннях (принцип "увімкнув і працює").	До продукції: Низька ціна, простота використання (автоналаштування), компактність.До постачальника: Зручність замовлення через інтернет, швидка доставка.

Якщо для масового сегменту (аматорів) вирішальним фактором залишається низька ціна та візуальна привабливість, то для професійного сегменту (оператори БПЛА, логістика, спецпризначення) на перше місце виходять критерії надійності, ремонтопридатності та технічної підтримки.

Це спостереження є критично важливим для нашого проекту: оскільки ми не можемо конкурувати з китайськими гігантами у наднизькій ціні, стратегічно вірним рішенням є орієнтація на професійний сегмент. Саме ця група готова платити за специфічні переваги нашого продукту (локальний сервіс, адаптивність), які ігноруються масовими виробниками.

Окрім прямих конкурентів та вимог споживачів, на життєздатність проекту впливає низка об'єктивних зовнішніх обставин. Для побудови реалістичної бізнес-моделі необхідно чітко розмежовувати фактори, що сприяють розвитку (можливості), та фактори, що створюють небезпеку (загрози). Аналіз факторів загроз (табл. 4.6) та можливостей (табл. 4.7) дозволяє сформувати попередній план дій для мінімізації ризиків

Табл. 4.6 Фактори, що сприяють впровадженню стартап-проекту (Можливості) [21]

№ з/п	**Фактори**	**Зміст фактору (опис)**
1.	Чинники попиту (Стрімке зростання ринку)	В Україні спостерігається "бум" на ринку БПЛА та робототехніки. Існує гостра потреба у вітчизняних комплектуючих, зокрема системах стабілізації для камер та вантажів, які дешевші за імпортні.
2.	Науково-технічні чинники (Доступність компонентів)	Поява на ринку недорогих та високоточних MEMS-датчиків (гіроскопів, акселерометрів) та потужних мікроконтролерів дозволяє створити професійний пристрій з низькою собівартістю.

3.	Чинники конкуренції (Висока ціна аналогів)	Основні конкуренти (DJI, Gremsy) пропонують дуже якісні, але дорогі рішення. Це створює "вікно можливостей" для бюджетного продукту з базовим функціоналом.
4.	Чинники збуту (Розвиток e-commerce)	Можливість продавати товар напряму через інтернет-магазини та спеціалізовані маркетплейси без витрат на оренду фізичного магазину та посередників.
5.	Соціальні чинники (Підтримка локального виробника)	Зростання патріотичних настроїв та бажання споживачів (волонтерів, військових, бізнесу) купувати продукцію української розробки (Made in Ukraine).

Табл. 4.7 Фактори, що перешкоджають впровадженню проекту (Загрози) [21]

№ з/п	**Фактори**	**Зміст фактору (опис)**
1.	Економічні чинники (Валютні ризики)	Залежність собівартості від курсу долара/євро, оскільки 80-90% електронних компонентів (чіпи, мотори) імпортуються з-за кордону. Інфляція може зменшити купівельну спроможність клієнтів.
2.	Чинники конкуренції (Демпінг з Китаю)	Ризик виходу на ринок масових дешевих китайських аналогів (noname-бренди), з якими важко конкурувати по ціні через їхні масштаби виробництва.
3.	Політичні та правові чинники (Митні регуляції)	Можливі затримки поставок комплектуючих на кордоні або зміни у законодавстві щодо товарів подвійного призначення (dual-use goods), що ускладнить виробництво.

4.	Науково-технічні чинники (Дефіцит чіпів)	Глобальна криза напівпровідників може призвести до зникнення з продажу необхідних мікроконтролерів або різкого підвищення цін на них.
5.	Технологічні чинники (Швидке старіння)	Технології стабілізації швидко розвиваються. Існує ризик, що розроблене ПЗ або "залізо" застаріє ще до виходу на серійне виробництво (наприклад, перехід ринку на нові типи датчиків).

Основні загрози для проекту зосереджені в площині логістики та макроекономіки: залежність від імпорту електронних компонентів (Китай) та коливання валютного курсу можуть суттєво вплинути на собівартість кінцевого виробу.

Однак, виявлені можливості здатні компенсувати ці ризики. Зростання попиту на military-tech рішення, державна підтримка інновацій (грантові програми) та доступність технологій швидкого прототипування створюють сприятливе підґрунтя для старту. Стратегія компанії має будуватися на гнучкості: використанні локальних складів для нівелювання логістичних ризиків та активному залученні грантових коштів для фінансування розробок.

Глибоке розуміння конкурентного середовища є необхідною передумовою для обрання правильної ринкової стратегії. Після аналізу макроекономічних факторів доцільно деталізувати структуру галузевої конкуренції. Метою даного етапу є визначення типу ринку, інтенсивності конкурентної боротьби та ключових методів суперництва (цінових чи нецінових), що домінують у галузі. Ступеневий аналіз конкуренції на ринку систем стабілізації наведено в таблиці 4.8.

Табл. 4.8 Ступеневий аналіз конкуренції на ринку [21]

Особливості конкурентного середовища	**В чому проявляється дана характеристика (Опис ситуації на ринку)**	**Вплив на діяльність підприємства (можливі дії компанії, щоб бути конкурентоспроможною)**
1. Вказати тип конкуренції (Олігополія)	Ринок стабілізаторів та підвісів для дронів контролюється декількома великими гравцями (DJI, Zhiyun, Moza, Freefly), які диктують стандарти та ціни. Входження нових гравців ускладнене високими технологічними вимогами.	Стратегія нішування: Не намагатися конкурувати з гігантами "в лоб" на масовому ринку, а обрати вузьку нішу (наприклад, стабілізація для спецтранспорту, важких військових дронів або морських платформ), де великі бренди не представлені.
2. За рівнем конкурентної боротьби (Глобальний)	Споживач може замовити аналогічний товар з Китаю (AliExpress) або США за кілька кліків. Конкуренція не обмежується кордонами України.	Локалізація сервісу: Головною перевагою має стати не тільки "залізо", а й сервіс: наявність запчастин в Україні, швидкий ремонт, технічна підтримка рідною мовою, чого не можуть дати китайські продавці.
3. За галузевою ознакою (Внутрішньогалузева)	Боротьба йде безпосередньо з іншими виробниками систем стабілізації (механічних стедикамів та гіропідвісів). Споживач порівнює технічні характеристики (вага, точність, час роботи).	Технологічна перевага: Постійне вдосконалення алгоритмів стабілізації (ПЗ). Акцент на унікальних характеристиках: легша вага за рахунок 3D-друку, адаптивність під різні камери, відкритий код для налаштувань.
4. Конкуренція за видами товарів (Товарно-родова та Товарно-видова)	Товарно-родова: Конкуренція з цифровою стабілізацією в камерах (GoPro Hypersmooth), яка стає все кращою і робить механічні підвіси непотрібними для аматорів. Товарно-видова: Вибір між	Акцент на фізиці: Маркетинг має пояснювати, чому механічна стабілізація краща за цифрову (немає "кропу" картинки, працює в темряві, відсутність артефактів). Пропозиція кращого співвідношення

	дешевим пластиковим стабілізатором і професійним карбоновим.	"ціна/функціонал" у своєму виді.
5. За характером конкурентних переваг (Нецінова та Цінова)	Великі бренди конкурують якістю та екосистемою (нецінова). Китайські ноунейми — виключно ціною.	Змішана стратегія: Забезпечити ціну нижчу за брендові аналоги (на 30-40%), але при цьому надати якість вищу за дешеві китайські копії. Гарантія надійності та вібростійкості.
6. За інтенсивністю (Марочна)	Ринок високобрендований. Споживачі довіряють перевіреним брендам ("DJI" = якість), побоюючись купувати саморобні або невідомі пристрої через ризик розбити дорогу камеру.	Побудова репутації: Активна робота з лідерами думок (блогерами, пілотами дронів) для отримання відео-оглядів та реальних тестів. Формування іміджу "надійного інженерного рішення".

Аналіз показує, що галузь характеризується високою інтенсивністю конкуренції, яка має переважно міжгалузевий та товарно-видовий характер. Основна боротьба розгортається не лише за ціною, а й за технічними характеристиками та надійністю. Враховуючи, що ринок не є чистою монополією, вхід нових учасників є вільним, але вимагає чіткого позиціонування продукту (унікальна торгова пропозиція) для відмежування від численних китайських конкурентів.

Детальніший аналіз конкурентного середовища та оцінка привабливості галузі здійснюється за допомогою моделі п’яти сил конкуренції М. Портера. Цей метод дозволяє ідентифікувати не лише прямих суперників, а й приховані загрози з боку постачальників, споживачів, товарів-замінників та потенційних нових гравців. Результати аналізу, що визначають розстановку сил на ринку систем стабілізації, наведено в таблиці 4.9.

Табл. 4.9 Аналіз конкуренції в галузі за моделлю М. Портера [21]

Складові аналізу	**Прямі конкуренти в галузі**	**Потенційні конкуренти**	**Постачальники**	**Клієнти**	**Товари-замінники**
	Список конкурентів:	Бар'єри входження:	Фактори сили: 1. Монополія на ринку мікрочіпів	Фактори сили: 1. Чутливість до ціни	Список загроз:

	1. DJI (Китай) — світовий лідер. 2. Gremsy (В'єтнам) — проф. сегмент. 3. Zhiyun/FeiyuTech — масовий сегмент. 4. Локальні українські гаражні виробництва.	1. Технологічні: Потреба у знаннях схемотехніки та PID-регулювання (Середні). 2. Капітальні: Витрати на закупівлю обладнання та комплектуючих (Низькі/Середні).	(STM32, драйвери). 2. Залежність від логістики з Китаю (терміни доставки).	(бюджет волонтерів обмежений). 2. Високі вимоги до якості (відмова обладнання неприпустима).	1. Цифрова стабілізація (EIS) у камерах (GoPro, DJI Action). 2. Оптична стабілізація (OIS) об'єктива. 3. Статичні демпфери (гумові підвіси).
Висновки:	Інтенсивність боротьби: ВИСОКА. Ринок насичений. Конкуренти мають відомі бренди та фінансовий ресурс для демпінгу. Пряма цінова війна небезпечна.	Загроза входу: СЕРЕДНЯ. Ринок зростає, що приваблює новачків. Проте необхідність надання сервісу та гарантії відлякує "одноденні" фірми.	Влада постачальників: СЕРЕДНЯ. Постачальники електроніки диктують ціни, але механічні деталі (пластик, метал) можна купувати у багатьох продавців.	Влада клієнтів: ВИСОКА. Клієнти диктують умови щодо функціонала та надійності. Негативні відгуки у профільних чатах можуть знищити репутацію стартапу.	Загроза замінників: СЕРЕДНЯ. Для аматорів цифрова стабілізація замінює механічну. Для профі (тепловізори, зум-камери) механічний підвіс незамінний.

За результатами аналізу конкурентних сил можна зробити висновок про принципову можливість роботи на ринку, але в умовах жорсткого тиску.

Найбільшу загрозу становлять прямі конкуренти (світові бренди) та вибагливі клієнти. Щоб вижити в такому середовищі, стартап не може покладатися лише на низьку ціну (оскільки китайські виробники можуть опустити її ще нижче завдяки масштабам).

Провівши комплексний аналіз ринкового середовища та інтенсивності конкуренції, необхідно кристалізувати конкретні переваги, які стануть основою ринкового успіху проекту. Оскільки пряме зіткнення з глобальними лідерами (DJI) за параметрами маркетингового бюджету чи масовості виробництва є завідомо програшним, конкурентна стратегія стартапу має будуватися на асиметричних відповідях. На основі виявлених "больових точок" споживачів (табл. 4.5) та слабких місць конкурентів (табл. 4.9), нами виділено ключові фактори конкурентоспроможності, обґрунтування яких наведено в таблиці 4.10.

Табл.4.10 Обґрунтування факторів конкурентоспроможності [21]

№ п/п	Фактор конкурентоспроможності	Обґрунтування (наведення чинників, що роблять фактор для порівняння конкурентних проектів значущим)
1.	Цінова доступність (Low Cost)	Ринок насичений дорогими професійними системами (DJI, Freefly) та дешевими, але неякісними китайськими аналогами. Фактор "середньої ціни" є вирішальним для малого бізнесу та волонтерських організацій, які мають обмежений бюджет.
2.	Ремонтопридатність та локальний сервіс	На відміну від іноземних конкурентів, де ремонт займає місяці (відправка за кордон), наша система дозволяє модульну заміну вузлів в умовах майстерні в Україні за 1-2 дні. Це критично для військових та комерційних пілотів.
3.	Адаптивність ПЗ (Open Source/API)	Більшість конкурентів мають "закритий код". Наша система дозволяє користувачеві (інженеру) налаштовувати PID-коефіцієнти під нестандартну вагу або тип камери, що робить продукт унікальним для кастомних розробок.
4.	Енергоефективність	Для дронів кожен ват енергії важливий. Використання сучасних драйверів двигунів та оптимізованого коду дозволяє знизити споживання енергії стабілізатором, подовжуючи час польоту носія.

5.	Універсальність кріплення	Можливість встановлення системи не лише на дрон, а й на наземну платформу або використання як ручного стедікама (multipurpose use).

Визначені фактори конкурентоспроможності формують унікальний профіль продукту.

Основна ставка робиться на експлуатаційні характеристики (ремонтопридатність, підтримка), які ігноруються масовими виробниками на догоду дизайну та компактності. Такий підхід дозволяє проекту вийти із зони прямої цінової конкуренції з китайськими гігантами і створити власну нішу "професійного інструменту для локальних умов".

Саме ці фактори стануть основою для подальшого порівняльного аналізу (бенчмаркінгу) та розробки маркетингової кампанії.

Визначивши ключові фактори успіху, проведемо кількісне оцінювання конкурентних позицій нашого проекту порівняно з основними ринковими гравцями.

Наступним етапом є проведення кількісного оцінювання конкурентних позицій стартап-проекту. Для цього здійснюється порівняльний аналіз (бенчмаркінг) за визначеними вище факторами конкурентоспроможності. Як базу для порівняння обрано узагальнений образ основного ринкового конкурента — виробника бюджетних систем стабілізації китайського походження (наприклад, FeiyuTech або NoName-аналоги), оскільки саме з ними проект буде змагатися за цільову аудиторію на початковому етапі. Результати бального оцінювання сильних та слабких сторін наведено в таблиці 4.11.

Табл. 4.11 Порівняльний аналіз сильних та слабких сторін (за бальною шкалою) [21]

№ п/п	Фактор конкурентоспроможності	Бали (1-20)*	Рейтинг товарів-конкурентів у порівнянні з китайським серійним аналогом
1	Модульна ремонтопридатність	20	+3 (Значна перевага: наш пристрій ремонтується, китайський — ні).
2	Локальна сервісна підтримка	15	+3 (Значна перевага: сервіс в Україні проти відсутності підтримки).
3	Адаптивність ПЗ (Open Source)	15	+2 (Перевага: можливість налаштування проти закритих заводських параметрів).
4	Ціна	18	+1 (Незначна перевага: наша ціна трохи нижча або на тому ж рівні, але з кращим сервісом).
5	Впізнаваність бренду / Репутація	10	-3 (Значне відставання: конкурент відомий на ринку, нас ніхто не знає).
6	Якість матеріалів (лиття vs 3D-друк)	12	-2 (Відставання: заводське лиття пластику виглядає краще за 3D-друк).
Разом:			Сумарний підсумок: +4 (Позитивний баланс)

Результати порівняльного аналізу демонструють позитивний загальний баланс конкурентних сил (+4 бали).

Проект має критичне відставання за факторами «Впізнаваність бренду» (-3) та «Якість матеріалів» (-2). Це є закономірним для стартапу, що використовує технології прототипування (3D-друк) та тільки виходить на ринок.

Однак, це відставання повністю компенсується значними перевагами у сфері сервісу (+3) та ремонтопридатності (+3). Такий розподіл балів підтверджує правильність обраної нішевої стратегії: ми не намагаємося перевершити конкурентів у красі дизайну чи силі бренду, а виграємо за рахунок функціональності та підтримки, що є вирішальним для професійних користувачів.

За результатами порівняльного аналізу, проект займає проміжну позицію, але виграє за сумою балів завдяки поєднанню доступної ціни та високої ремонтопридатності, що є критичними факторами для обраного цільового сегмента (український ринок).

Для визначення стратегії розвитку проекту необхідно узагальнити всі виявлені фактори впливу. У таблиці 12 побудовано матрицю SWOT, яка зіставляє сильні та слабкі сторони нашого продукту з реальними ринковими умовами (можливостями та загрозами). Це дозволяє зрозуміти, на чому варто будувати бізнес-модель, а де потрібні захисні механізми.

Табл. 4.12 SWOT- аналіз стартап-проекту [21]

Сильні сторони (Strengths)	**Слабкі сторони (Weaknesses)**
Внутрішні переваги продукту: 1. Ціна: Собівартість на 30-40% нижча за закордонні аналоги (DJI, Gremsy). 2. Ремонтопридатність: Модульна конструкція дозволяє швидку заміну вузлів в польових умовах або місцевих майстернях. 3. Адаптивність: Відкритий програмний інтерфейс (API) для налаштування під нестандартні камери та датчики. 4. Локалізація: Технічна підтримка українською мовою та наявність складу запчастин в Україні.	Внутрішні недоліки проекту: 1. Бренд: Відсутність впізнаваності та репутації на ринку (клієнти бояться довіряти дорогу камеру невідомому приладу). 2. Ресурси: Обмежений бюджет на маркетинг та рекламу порівняно з гігантами ринку. 3. Технології: Відсутність власних потужностей для виробництва мікрочіпів (залежність від закупівель).
Можливості (Opportunities)	**Загрози (Threats)**
Зовнішні фактори, які допомагають: 1. Ріст ринку: Стрімке збільшення попиту на дрони та супутнє обладнання (камери, підвіси) в Україні (оборонний та аграрний сектори).	Зовнішні фактори, які заважають: 1. Конкуренція: Демпінг цін з боку китайських масових виробників (AliExpress).

2. Підтримка: Наявність грантових програм для tech-стартапів (Brave1, державні замовлення). 3. Технології: Поява доступних та високоточних MEMS-датчиків, що здешевлює виробництво.	2. Логістика: Можливі перебої з поставками електронних компонентів з-за кордону (митниця, дефіцит чіпів). 3. Замінники: Розвиток цифрової стабілізації в камерах, що може зробити механічні підвіси непотрібними для любителів.

Результати аналізу вказують на те, що проект має достатній потенціал для успішного виходу на ринок, але потребує чіткого фокусування.

Найбільш ефективною вбачається стратегія SO (Сила + Можливості): використання унікальної ремонтопридатності та локального сервісу (Сила) для задоволення зростаючого попиту професійного сегменту ринку БПЛА в Україні (Можливість).

Для нейтралізації головної загрози (китайських конкурентів) доцільно застосувати стратегію ST (Сила проти Загроз): протиставити масовому дешевому продукту наш спеціалізований сервіс та адаптивність, перевівши конкуренцію з площини "ціна" в площину "надійність експлуатації".

Слабкі сторони (відсутність бренду) будуть нівелюватися через пряму роботу з B2B-клієнтами, де репутація будується на реальних тестах, а не на рекламі.

На основі проведеного SWOT-аналізу та визначених ключових факторів успіху необхідно розробити конкретні сценарії виведення стартапу на ринок. Оскільки ресурси проекту на початковому етапі є обмеженими, важливо оцінити різні варіанти комерціалізації — від самостійного дрібносерійного виробництва до продажу технології великим гравцям. Метою даного етапу є вибір оптимальної альтернативи, яка забезпечує найшвидший вхід на ринок з найменшими ризиками залучення ресурсів. Перелік можливих альтернатив наведено в таблиці 4.13.

Табл. 4.13 Альтернативи ринкового впровадження стартап-проекту [21]

№ п/п	**Альтернатива (орієнтовний комплекс заходів) ринкової поведінки**	**Ймовірність отримання ресурсів**	**Строки реалізації**
1.	Стратегія "Швидкий старт" (MVP): Самостійне виготовлення невеликої партії спрощених стабілізаторів (з використанням 3D-друку) та продаж через інтернет-платформи (OLX, Prom) для хобі-сегменту.	Висока. Потребує мінімальних власних коштів студента та доступних технологій.	Короткі. (1-3 місяці). Від розробки прототипу до першого продажу.
2.	Стратегія "Грантова підтримка": Подання заявки на фінансування у стартап-акселератори (наприклад, Brave1 або університетські інкубатори) для розробки професійного зразка для військових потреб.	Середня. Висока конкуренція за гранти, потребує детальної документації та захисту ідеї.	Середні/Довгі. (3-6 місяців). Час на розгляд заявки та отримання коштів.
3.	Стратегія "B2B партнерство": Пропозиція готового модуля стабілізації існуючим виробникам дронів в Україні як OEM-компонента.	Низька. Виробникам потрібні гарантії надійності та сертифікація, яких у стартапу поки немає.	Довгі. (6-12 місяців). Переговори, тестування, інтеграція.

З огляду на обмеженість часу та фінансів, обрано Альтернативу №1. Вона характеризується найменшими строками реалізації та високою ймовірністю успіху, оскільки базується на наявних технологічних можливостях авторів проекту (3D-друк, програмування). Це дозволяє мінімізувати фінансові ризики на етапі входу в ринок.

4.3 Розроблення ринкової стратегії та маркетингової програми проекту

Відповідно до алгоритму розробки стартап-проекту, наступним етапом є ідентифікація цільових груп споживачів. Метою цього аналізу є вибір тих сегментів ринку, робота з якими забезпечить проекту максимальну рентабельність та швидке повернення інвестицій. У таблиці 14 здійснено бальну оцінку привабливості різних груп клієнтів та визначено основний вектор ринкової експансії. Результати аналізу та вибір пріоритетних груп наведено в таблиці 4.14.

Табл.4.14 Вибір цільових груп потенційних споживачів [21]

№ п/п	**Опис профілю цільової групи потенційних клієнтів**	**Готовність споживачів сприйняти продукт**	**Орієнтовний попит в межах цільової групи**	**Інтенсивність конкуренції в сегменті**	**Простота входу у сегмент**
1.	Оператори комерційних та спеціальних БПЛА (Pro-сегмент). Військові, аграрії, професійні пілоти, яким потрібна надійність та ремонт в Україні.	Висока. Клієнти шукають альтернативу дорогим брендовим підвісам, яку можна швидко полагодити на місці.	Високий. Постійна потреба через зношування та втрату обладнання під час експлуатації.	Середня. Є світові бренди, але відсутній якісний локальний сервіс, що дає нам перевагу.	Середня. Потрібно надати тестові зразки для підтвердження надійності.
2.	Відеоблогери та хобі-користувачі (Аматори). Люди, що знімають відео для соцмереж.	Середня. Більшість задовольняється вбудованою стабілізацією у смартфоні або дешевими "селфі-палками".	Високий. Дуже масовий ринок.	Дуже висока. Ринок перенасичений дешевою китайською електронікою (AliExpress).	Складна. Важко конкурувати ціною та дизайном з масовим виробником.

Які цільові групи обрано:	Група №1 (Оператори комерційних та спеціальних БПЛА).				

Компанія зосереджує свою діяльність на одному вузькому сегменті (оператори БПЛА та спецтехніки в Україні), оскільки в умовах обмежених ресурсів стартапу недоцільно розпорошувати зусилля на масовий ринок аматорів (де панує жорстка цінова конкуренція). Обраний сегмент має високу готовність до покупки та критичну потребу у специфічних перевагах нашого продукту (ремонтопридатність та локальний сервіс)

З огляду на високі бар'єри входу в масовий сегмент (жорстка цінова конкуренція з глобальними брендами), було прийнято рішення відмовитися від роботи з групою «Хобі-користувачі». Пріоритетною групою обрано професійних користувачів. Відповідно, стартап реалізує стратегію концентрованого маркетингу. Це дозволить адаптувати продукт та сервіс під специфічні потреби вузького кола клієнтів краще, ніж це роблять великі конкуренти.

Визначення базової стратегії розвитку є логічним продовженням обраної стратегії охоплення ринку. Оскільки стартап фокусується на вузькому сегменті професійних користувачів, загальна конкурентна стратегія повинна відповідати на питання: «За рахунок чого саме ми плануємо перемагати в цій ніші?». У таблиці 4.15 наведено взаємозв'язок між обраною альтернативою впровадження, специфікою охоплення ринку та ключовими конкурентними перевагами, що формують фундамент стратегії.

Табл.4.15 Визначення базової стратегії розвитку[21]

№ п/п	Обрана альтернатива розвитку проекту	Стратегія охоплення ринку	Ключові конкурентоспроможні позиції відповідно до обраної альтернативи	Базова стратегія розвитку*
1	Стратегія "Швидкий старт" (MVP): Самостійне виготовлення та продаж тестової партії через інтернет-канали.	Стратегія концентрованого маркетингу. (Фокус на вузькому сегменті професійних операторів БПЛА та спецтехніки).	1. Локальний сервіс: Можливість швидкого ремонту в Україні (чого немає у китайців). 2. Ціна: Доступність для малого бізнесу/волонтерів. 3.Адаптивність: Можливість кастомізації під конкретний дрон.	Стратегія фокусування (нішування). (Конкуренція не за рахунок масовості, а за рахунок задоволення специфічних потреб вузької групи краще за інших).

Як базову стратегію розвитку обрано стратегію фокусування (спеціалізації).

Це рішення зумовлене тим, що стартап не володіє ресурсами для реалізації стратегії «Лідерства за витратами» (неможливо конкурувати з китайськими фабриками у собівартості масового виробництва) або стратегії «Широкої диференціації» (немає бюджету на глобальний маркетинг).

Стратегія фокусування дозволяє перетворити малий масштаб проекту на його перевагу: ми можемо бути гнучкішими, швидше реагувати на запити українських військових та аграріїв і надавати персоналізований сервіс, який недоступний для неповоротких глобальних корпорацій.

Визначивши стратегію фокусування, необхідно конкретизувати тактику конкурентної боротьби. Оскільки стартап виходить на вже сформований ринок, де присутні сильні глобальні гравці, лобова конкуренція є недоцільною. Тому необхідно

визначити, яку позицію займатиме проект відносно лідерів ринку: чи буде він атакувати їх, наслідувати, чи уникати прямої конфронтації. У таблиці 4.16 визначено базову стратегію конкурентної поведінки, що відповідає ресурсним можливостям проекту

Табл. 4.16 Визначення базової стратегії конкурентної поведінки [21]

№ п/п	**Чи є проект «першопрохідцем» на ринку?**	**Чи буде компанія шукати нових споживачів, або забирати існуючих у конкурентів?**	**Чи буде компанія копіювати основні характеристики товару конкурента, і які?**	**Стратегія конкурентної поведінки***
1.	Ні. Ринок систем стабілізації вже сформований і насичений продукцією світових лідерів (DJI, Zhiyun, Moza).	Забирати існуючих. Мета проекту — переманити клієнтів (операторів дронів, військових), які зараз змушені купувати дорогі або ненадійні іноземні аналоги, запропонувавши їм кращий локальний сервіс (імпортозаміщення).	Так, частково. Будуть скопійовані перевірені часом інженерні рішення: форм-фактор (3-осьова конструкція), стандарти кріплення камер та принципи PID-регулювання, щоб клієнту не	Стратегія нішевої спеціалізації (Комутант). Уникнення прямої боротьби з лідером шляхом обслуговування вузького сегмента (кастомні/військові дрони), який не цікавий або недоступний для глобальних масових виробників.

			довелося перевчатися.	

Для реалізації проекту обрано стратегію нішевого гравця (комутантну стратегію). Ця стратегія є найбільш життєздатною для малого бізнесу на ринку, де домінують великі корпорації. Вона передбачає:

Уникнення прямої боротьби: Ми не конкуруємо з DJI бюджетами на рекламу.

Гнучкість: Ми пропонуємо те, що гіганти не можуть собі дозволити через стандартизацію — кастомізацію під клієнта, відкритий код та ручний ремонт.

Локалізацію: Використання переваги фізичної присутності в Україні для надання швидшого сервісу.

Така поведінка дозволяє проекту «SteadyCore» співіснувати з лідерами ринку, не викликаючи у них агресивної реакції у відповідь, і поступово нарощувати свою частку в обраній ніші.

Завершальним етапом розробки ринкової стратегії є визначення стратегії позиціонування. Вона базується на результатах SWOT-аналізу та обраній базовій стратегії розвитку. Метою позиціонування є створення унікальної ціннісної пропозиції (USP), яка відповідає очікуванням цільової аудиторії та підкреслює конкурентні переваги проекту.

Табл.4.17 Визначення стратегії позиціонування [21]

№ п/п	**Вимоги до товару цільової аудиторії**	**Базова стратегія розвитку**	**Ключові конкурентоспроможні позиції власного стартап-проекту**	**Вибір асоціацій, які мають сформувати комплексну позицію власного проекту (три ключових)**
1	1. Надійність: Робота в складних умовах (вібрації, пил). 2. Оперативність:	Стратегія фокусування (нішування).	1. Модульність: Конструкція, що дозволяє заміну вузлів за 10 хвилин. 2. Локалізація: Сервісний центр та	1. "Свій" (Локальний): Український продукт з реальною гарантією та підтримкою

	Мінімізація часу простою техніки (швидкий ремонт). 3. Сумісність: Можливість встановлення на нестандартні (кастомні) дрони.		склад запчастин в Україні. 3. Гнучкість: Відкрите ПЗ для налаштування під будь-яку вагу камери.	("Дзвониш інженеру, а не пишеш в Китай"). 2. "Безвідмовний": Інструмент, який можна полагодити в полі "на коліні". 3. "Професійний конструктор": Система, яка підлаштовується під задачу пілота, а не навпаки.

На основі обраних асоціацій сформовано концепцію позиціонування: «SteadyCore — професійна стабільність, яку легко відновити». Це позиціонування чітко диференціює продукт від конкурентів:

Конкуренти (DJI/Zhiyun) продають "ідеальну картинку і дизайн".

Ми продаємо "гарантію працездатності та ремонтопридатність".

Така стратегія дозволяє залучити найбільш лояльну аудиторію (професіоналів), для яких простій обладнання коштує дорожче, ніж сам пристрій. Всі подальші заходи маркетингової програми (реклама, канали збуту) будуть підпорядковані саме цій ідеї.

4.4. Розроблення маркетингової програми стартап-проекту

Розроблення маркетингової програми розпочинається з формування концепції товару. На цьому етапі необхідно трансформувати виявлені потреби цільової аудиторії у конкретні фізичні та сервісні характеристики продукту. Головне завдання — створити такий набір переваг, який не лише задовольняє базову потребу клієнта (стабілізація камери), а й пропонує додаткову цінність, що відрізняє товар від конкурентів. У таблиці 4.18 визначено ключові переваги концепції «SteadyCore».

Табл. 4.18 Визначення ключових переваг концепції потенційного товару [21]

№ п/п	**Потреба**	**Вигода, яку пропонує товар**	**Ключові переваги перед конкурентами (існуючі або такі, що потрібно створити)**
1.	Отримання стабільного зображення без вібрацій у складних умовах (пориви вітру, маневри).	Гарантія чіткості відеоматеріалу та точність роботи сенсорів/тепловізорів.	Адаптивний алгоритм керування: Система автоматично підлаштовує PID-коефіцієнти під вагу камери та погодні умови (на відміну від конкурентів зі статичними налаштуваннями).
2.	Швидке відновлення працездатності обладнання після пошкоджень.	Економія часу та грошей: не потрібно купувати новий підвіс після аварії, достатньо замінити деталь.	Модульна ремонтопридатність: Конструкція дозволяє замінити зламаний вузол (мотор або важіль) за 10 хвилин у польових умовах, використовуючи стандартні інструменти.
3.	Використання одного стабілізатора на різних носіях (дрони різних типів, авто).	Універсальність: один пристрій закриває потреби всього парку техніки.	Відкрита архітектура (Open Source): Можливість програмної та механічної інтеграції з будь-якими польотними контролерами (через API), чого не дозволяють закриті системи DJI.

Деталізація маркетингової концепції товару здійснюється за допомогою трирівневої моделі (за Ф. Котлером). Цей підхід дозволяє чітко розмежувати фізичні властивості продукту та додаткову цінність, яку отримує споживач. У межах даного підрозділу товар «SteadyCore» розглядається на трьох рівнях:

1. Товар за задумом: Визначає базову потребу клієнта, яку задовольняє пристрій.
2. Товар у реальному виконанні: Описує технічні характеристики, якість виконання та конструктивні особливості.
3. Товар із підкріпленням: Включає комплекс супутніх послуг (сервіс, гарантія, підтримка), що забезпечують додаткові конкурентні переваги.

Структура трьох рівнів моделі товару наведена в таблиці 4.19.

Табл. 4.19 Опис трьох рівнів моделі товару [21]

Рівні товару	**Сутність та складові**
I. Товар за задумом	Задоволення потреби у стабільному зображенні та безпеці обладнання. Клієнт купує не "залізяку з моторами", а гарантію того, що його камера зніме чітке відео, а вантаж не розіб'ється під час тряски.
II. Товар у реальному виконанні	Властивості/характеристики: 1. Точність стабілізації: Відхилення не більше 0.02° по трьох осях (Тх - Технічна). 2. Вага модуля: До 350 г (легкість для дрона) (Ер - Ергономічна). 3. Автономність: Робота до 6 годин від вбудованого АКБ (Тх - Технічна). 4. Швидкість реакції: < 5 мс на збурення (Тх - Технічна). Якість: Відповідність класу захисту IP54 (захист від пилу та бризок), робота в діапазоні температур -10...+40°C.

	Пакування: Ударостійкий транспортний кейс (Hard Case) з ложементом, комплект кабелів, інструкція з QR-кодом на відео-гайд. Марка: Назва "SteadyCore", логотип на корпусі двигунів, фірмовий чорно-помаранчевий колір.
III. Товар із підкріпленням	До продажу: Безкоштовна консультація інженера щодо сумісності з конкретною моделлю дрона клієнта; надання 3D-моделі кріплення для примірки. Після продажу: Гарантія 12 місяців; "гаряча заміна" (відправка підмінного фонду на час ремонту); доступ до закритого Telegram-чату технічної підтримки.
За рахунок чого потенційний товар буде захищено від копіювання:	1. Захист інтелектуальної власності (Software): Встановлення біту захисту (Read Protection Level 2) на мікроконтролер, що унеможливлює зчитування прошивки конкурентами. 2. Режим комерційної таємниці (Know-how): Унікальні коефіцієнти PID-регулятора та алгоритми фільтрації шумів датчика не розголошуються. 3. Брендинг: Створення репутації сервісного центру, яку неможливо скопіювати (китайський клон не запропонує ремонт у Києві за 24 години).

Аналіз моделі товару (табл. 4.19) демонструє, що стратегія диференціації стартап-проекту базується переважно на третьому рівні («Товар із підкріпленням»).

Якщо на рівні «Реального виконання» (технічні характеристики, контролери) продукт відповідає ринковим стандартам та є аналогічним до конкурентів, то на рівні сервісу формується унікальна торгова пропозиція. Наявність програми «Crash-Replacement» (знижки на ремонт після аварій), доступу до бібліотеки запчастин для 3D-друку та локальної технічної підтримки створює бар'єр для копіювання продукту

китайськими виробниками. Саме цей комплекс послуг перетворює продукт із звичайного гаджета на професійний інструмент з гарантованою підтримкою життєвого циклу.

Успіх комерціалізації значною мірою залежить від правильно обраної стратегії ціноутворення. Ціна товару має бути, з одного боку, доступною для українського споживача (волонтерів, військових, малого бізнесу), а з іншого — забезпечувати достатню маржинальність для розвитку проекту. У таблиці 4.20 проведено порівняння цін на ринку для визначення меж вартості нашого продукту.

Табл. 4.20 Визначення меж встановлення ціни [21]

№ п/п	**Рівень цін на товари-замінники**	**Рівень цін на товари-аналоги**	**Рівень доходів цільової групи споживачів**	**Верхня та нижня межі встановлення ціни на товар/послугу**
1.	Низький (0 – 1500 грн). Товари-замінники: 1. Цифрова стабілізація (ПЗ): Безкоштовно (вбудована в камеру). 2. Механічні демпфери (гумові "подушки"): 200-500 грн.	Високий (5000 – 40 000+ грн). Товари-аналоги: 1. Китайські DIY-набори (AliExpress): 2500-4000 грн. 2. Брендові аматорські (Zhiyun, FeiyuTech): 8000-15000 грн. 3. Професійні/Індустріальні (Gremsy, DJI): від 40 000 грн.	Середній / Вище середнього. Оператори дронів та технічні спеціалісти: Середня зарплата в галузі 25 000 – 50 000 грн. B2B/Військові: Мають виділені бюджети на закупівлю	Нижня межа: 2500 грн (Визначається собівартістю комплектуючих + мінімальна маржа для виживання). Верхня межа: 6000 грн (Психологічна межа: ціна має бути помітно нижчою за відомі бренди,

	3. Пасивні противаги: 500-1500 грн.		обладнання, де пріоритетом є надійність, а не мінімальна ціна.	щоб клієнт ризикнув купити стартап-продукт).

За результатами аналізу цінових меж було прийнято рішення про встановлення ціни на рівні 3500–4000 грн (орієнтовно). Це рішення базується на наступних факторах:

Конкурентна позиція: Наша ціна є вищою за дешеві товари-замінники (китайські "ноунейм" підвіси за 2500 грн), оскільки ми пропонуємо вищу якість, гарантію та сервіс.

Доступність: Ціна є значно нижчою за професійні аналоги відомих брендів (наприклад, DJI Ronin або Gremsy, вартість яких стартує від 8000–10000 грн), що робить наш продукт привабливим для масового професійного використання в умовах обмежених бюджетів.

Рентабельність: Зазначений рівень ціни покриває виробничі витрати та дозволяє отримати прибуток для реінвестування у вдосконалення технології (R&D).

Обрана стратегія ціноутворення — «ціна проникнення» з подальшим переходом до стратегії «середньоринкових цін» по мірі зростання впізнаваності бренду.

Наступним кроком розробки маркетингової програми є формування системи збуту (дистрибуції). Вибір оптимального каналу збуту залежить від специфіки товару та купівельної поведінки цільової аудиторії.

Оскільки розроблювана система стабілізації є технічно складним продуктом, що часто потребує попередньої консультації щодо сумісності з обладнанням клієнта, організація збуту вимагає особливого підходу. У таблиці 4.21 проаналізовано можливі варіанти та визначено оптимальну структуру каналів розподілу продукції «SteadyCore».

Табл.4.21 Формування системи збуту [21]

№ п/п	**Специфіка купівельної поведінки цільових клієнтів**	**Функції збуту, які має виконувати постачальник товару**	**Глибина каналу збуту**	**Оптимальна система збуту**
1.	Висока залученість: Клієнти (інженери, пілоти) перед покупкою вимагають технічних консультацій та підтвердження сумісності з їхнім дроном. Потреба у довірі: Готові купувати онлайн, але лише після перегляду відео-тестів або рекомендацій колег.	1. Консалтинг: Надання кваліфікованої допомоги у підборі кріплень та налаштувань. 2. Логістика: Забезпечення швидкої відправки (Нова Пошта) у день замовлення. 3. Сервіс: Прийом обладнання на ремонт/діагностику.	Канал нульового рівня (Прямий збут): Виробник → Споживач. (Основний канал). Канал першого рівня (Однорівневий): Виробник → Роздрібний партнер (спеціалізований магазин дронів) → Споживач.	Комбінована система: 1. Власний інтернет-магазин (Landing Page) для прямих продажів та B2B-замовлень (військові частини, агрохолдинги). 2. Маркетплейси (Prom, OLX) для охоплення приватних клієнтів, які шукають запчастини.

№ п/п	Специфіка поведінки цільових клієнтів	Канали комунікацій, якими користуються цільові клієнти	Ключові позиції, обрані для позиціонування	Завдання рекламного повідомлення	Концепція рекламного звернення
1.	Раціональний вибір: Клієнти не вірять красивим картинкам, вони вірять "краш-тестам" та реальним відео польотів. Колективізм: Рішення про покупку часто приймається на основі поради в закритому чаті пілотів.	1. Цифрові канали (Digital): YouTube (огляди у техно-блогерів), Telegram-канали про FPV та військові технології. 2. Події (Events): Хакатони, виставки оборонних технологій, зльоти пілотів.	"Свій" (Локальний): Український продукт. "Надійний": Працює там, де ламається Китай. "Відновлюваний": Сервіс за 24 години.	Інформування та Переконання: Донести до споживача, що наш стабілізатор не поступається DJI за якістю, але виграє за рахунок можливості ремонту в Україні.	"Hard-Test": Відеоролик, де стабілізатор працює в умовах сильного вітру/пилу, а потім демонструється процес заміни деталі за 5 хвилин. Слоган: "SteadyCore. Стабільність, яку легко відновити."

Специфіка товару (необхідність технічних консультацій) диктує вибір на користь прямого збуту (канал нульового рівня). Використання довгих каналів збуту

(через дистриб'юторів) є недоцільним, оскільки це призведе до здорожчання продукції та втрати зворотного зв'язку з клієнтом. Тому основним інструментом продажу обрано власний інтернет-магазин та пряму комунікацію у професійних спільнотах.

Завершальним етапом розробки маркетингової програми є формування концепції маркетингових комунікацій (просування). Стратегія просування стартап-проекту має враховувати специфіку поведінки цільової аудиторії, яка в сегменті B2B (та Military-Tech) є раціональною та скептичною до традиційної реклами.

Головним завданням комунікаційної політики є не просто інформування про існування товару, а доведення його надійності та переваг сервісної підтримки. У таблиці 4.22 визначено канали та зміст комунікаційних звернень для проекту «SteadyCore».

Табл. 4.22 Концепція маркетингових комунікацій [21]

№ п/п	**Специфіка поведінки цільових клієнтів**	**Канали комунікацій, якими користуються цільові клієнти**	**Ключові позиції, обрані для позиціонування**	**Завдання рекламного повідомлення**	**Концепція рекламного звернення**
1.	Раціоналізм та експертність: Клієнти приймають рішення на основі технічних характеристик та відео-доказів роботи (краш-тестів), а не емоцій. Довіра до "своїх": Високий рівень довіри до рекомендацій у закритих чатах пілотів	1. Digital-канали: YouTube (огляди у техно-блогерів), Telegram-канали про FPV/дрони, Facebook-групи спільнот пілотів. 2. Події (Events): Участь у хакатонах, виставках оборонних технологій, демонстраційних польотах.	1. "Ремонтопридатний": Це інструмент, який не треба викидати після першого падіння. 2. "Локальний": Сервіс та запчастини знаходяться в Україні (відправка за 1 день). 3. "Професійний": Відкритий код для тонкого налаштування.	Інформування та Переконання: Донести до споживача, що, купуючи наш продукт, він економить кошти в довгострокові й перспективі (через дешевий ремонт) і отримує підтримку, якої немає у китайських брендів.	Стратегія "Hard-Test": Відеоролик, де стабілізатор працює в жорстких умовах (пил, вібрації), потім демонструється його поломка і ремонт за 5 хвилин прямо в полі. Слоган: "SteadyCore. Стабільність, яку легко відновити."

	та на профільних форумах.				

Маркетингова програма проекту спрямована на створення довіри до бренду. Ми не конкуруємо з глобальними гравцями рекламними бюджетами. Натомість, ми використовуємо тактику прямого діалогу з клієнтом, демонструючи реальні переваги нашого продукту (живучість та ремонт) через профільні канали комунікації. Такий підхід забезпечує високу конверсію за мінімальних витрат на маркетинг.

4.5 Бізнес-модель реалізації стартап-проекту та оцінювання його економічної ефективності

Для практичної реалізації ідеї «SteadyCore» необхідно перетворити маркетингову стратегію на покроковий план дій. У таблиці 4.23 представлено календарний план-графік, який охоплює всі стадії: від завершення розробки прототипу до старту перших продажів.

Табл. 4.23 Календарний план стартапу [21]

№ з/п	Етап реалізації	Тривалість	Відповідальні	Основні завдання
1.	НДДКР (R&D) та Прототипування	2 місяці	Головний інженер (Розробник)	1.Закупівля компонентів (мотори, контролери STM32). 2. Проектування друкованої плати та 3D-моделювання корпусу. 3. Написання базової прошивки (PID-регулятор). 4. Збірка альфа-версії прототипу.
2.	Тестування та налагодження	1 місяць	Інженер-випробувач (Пілот)	1. Стендові випробування на вібростійкість. 2. Польові тести на реальному носії (дроні)

				в різних погодних умовах. 3. Виявлення багів та оптимізація програмного коду. 4. Доопрацювання конструкції (посилення слабких вузлів).
3.	Підготовка виробництва та Маркетинг	1 місяць	Керівник проекту, Маркетолог	1. Закупівля комплектуючих для першої партії (10-20 шт.). 2. Створення контенту: зйомка демо-відео ("Hard-Test"), фото товару. 3. Запуск Landing Page та сторінок у соцмережах. 4. Розробка інструкції користувача.
4.	Комерціалізація (Старт продажів)	1 місяць (і далі постійно)	Менеджер з продажу	1. Анонс продукту у профільних спільнотах (Telegram, форуми). 2. Прийом та обробка перших замовлень. 3. Відправка товару (логістика). 4. Збір зворотного зв'язку від перших клієнтів.
5.	Післяпродажний супровід	Постійно	Інженер технічної підтримки	1. Консультації клієнтів щодо налаштування. 2. Виконання гарантійних ремонтів. 3. Випуск оновлень прошивки.

Розроблений календарний план демонструє, що загальна тривалість підготовчого етапу до виходу на ринок складає орієнтовно 4-5 місяців.

Найбільш тривалим та критичним етапом є НДДКР та Тестування (3 місяці), оскільки саме на цьому етапі закладається якість та надійність продукту, які є нашими

головними конкурентними перевагами. Паралельне виконання завдань з підготовки виробництва та маркетингу дозволяє оптимізувати часові ресурси.

Таким чином, стартап-проект «SteadyCore» є повністю готовим до реалізації: визначено ринкову нішу, розроблено конкурентоспроможний продукт, обґрунтовано економічну доцільність та сплановано графік впровадження

Важливою складовою бізнес-моделі є організація виробничого процесу. Оскільки обрана стратегія впровадження передбачає самостійний старт без залучення значних інвестицій, виробничий план розроблено для дрібносерійного виготовлення продукції (Low-Volume Production).

Процес створення автоматизованої системи стабілізації включає як апаратну частину (виготовлення механіки, монтаж електроніки), так і програмну складову (прошивка мікроконтролерів, калібрування). Основні етапи виробництва та необхідні потужності наведено в таблиці 4.24.

Табл. 4.24 Виробництво [21]

№ п/п	Етап «виробництва»	Обсяг / потужності	Відповідальні	Основні заходи та имоги
1.	Постачання компонентів (Supply Chain)	Партія на 20 комплектів / місяць	Менеджер із закупівель (або Розробник)	1. Закупівля електроніки (STM32, IMU-сенсори, драйвери) у перевірених постачальників (DigiKey/AliExpress). 2. Закупівля витратних матеріалів (пластик PETG/Nylon для друку). Вимога: Вхідний контроль якості компонентів.
2	Виготовлення механічних вузлів	480 годин друку (2 принтера)	Оператор 3D-друку	1. Друк корпусних деталей на FDM-принтерах. 2. Пост-обробка (шліфування, видалення підтримки). 3. Встановлення різьбових втулок (термо-впресовка).

				Вимога: Точність друку до 0.1 мм.
3.	Монтаж електроніки (PCBA)	20 плат / тиждень	Радіомонтажник	1. Розпайка компонентів на друковані плати. 2. Лакування плат для вологозахисту (conformal coating). 3. Перевірка на відсутність коротких замикань.
4.	Вузлова збірка та Інтеграція	20 пристроїв / місяць	Збиральник	1. Остаточна збірка механіки та електроніки в корпус. 2. Встановлення безколекторних двигунів. 3. Перевірка плавності ходу осей (відсутність люфтів).
5.	Інсталяція ПЗ та Калібрування (Software)	1 година на пристрій	Програміст-налагоджувальник	1. Прошивка мікроконтролера (завантаження Bootloader та Firmware). 2. Калібрування акселерометра/гіроскопа по 6 осях. 3. Налаштування PID-коефіцієнтів на стенді.
6.	Контроль якості (QA/Testing)	100% виробів	Тестувальник	1. Стрес-тест (робота під навантаженням 2 години). 2. Перевірка стабілізації на вібростенді. Вимога: Відсутність дрейфу горизонту та перегріву моторів.

Аналіз виробничого плану свідчить про те, що обрана технологічна схема дозволяє забезпечити випуск дрібної серії (до 20 одиниць на місяць) силами невеликої команди без залучення підрядників. Запропонована схема виробництва повністю відповідає стратегії «Нішевого гравця», забезпечуючи гнучкість та можливість швидкого внесення змін у конструкцію пристрою.

Для систематизації всіх аспектів діяльності проекту (від постачання до отримання прибутку) використано шаблон Business Model Canvas. Він дозволяє

візуалізувати взаємозв'язки між ключовими партнерами, ресурсами, процесами та ціннісною пропозицією для клієнта. Структура бізнес-моделі проекту «SteadyCore» представлена в таблиці 4.25.

Табл. 4.25 Бізнес-модель [21]

Ключові партнери (Key Partners)	**Ключові види діяльності (Key Activities)**	**Ціннісна пропозиція (Value Propositions)**	**Відносини з клієнтами (Customer Relationships)**	**Сегменти користувачів (Customer Segments)**
1. Постачальники: - Постачальники електроніки (чіпи, мотори). - Постачальники пластику для 3D-друку. 2. Дистриб'ютори: - FPV-майстерні та хаби (точки ремонту). 3. Спільнота: - Волонтерські фонди (оптові закупівлі). - Розробники ArduPilot/Betaflight (інформаційне партнерство).	1. Виробництво: - 3D-друк деталей. - Збірка та пайка електроніки. 2. R&D: - Оновлення прошивок. - Розробка нових кріплень. 3. Сервіс: - Діагностика та ремонт. - Технічна підтримка користувачів.	1. Ремонтопридатність: Можливість заміни вузлів "в полі" (модульність). 2. Локалізація: Швидкий сервіс та доставка по Україні (1-2 дні). 3. Адаптивність: Налаштування під нестандартні камери (тепловізори). 4. Ціна: Доступна вартість порівняно з промисловими аналогами.	1. Персональна підтримка: Прямі консультації в Telegram/Signal. 2. Спільнота (Community): Закритий чат для обміну пресетами налаштувань. 3. Програма лояльності: "Crash-Replacement" (знижка на запчастини при поломці).	1. Професіонали: Оператори спеціальних дронів (військові, рятувальники). 2. Бізнес (B2B): Агро-компанії (моніторинг полів). 3. Ентузіасти: Досвідчені FPV-пілоти, що будують далекобійні дрони.
	Ключові ресурси (Key Resources)		**Канали збуту (Channels)**	
	1. Матеріальні: - Обладнання (3D-принтери, паяльні		1. Власні канали (Direct): - Landing Page (сайт-візитка). - Сторінки в	

	станції). - Склад компонентів. 2. Інтелектуальні: - Унікальний код прошивки (алгоритми стабілізації). - База 3D-моделей. 3. Людські: - Інженери-розробники.		соцмережах (Insta/YouTube). 2. Партнерські канали: - Рекомендації ("сарафанне радіо") у профільних чатах. - Стенди на тематичних хакатонах.	
Структура витрат (Cost Structure)			**Джерела доходів (Revenue Streams)**	
1. Змінні витрати (собівартість): - Закупівля компонентів та матеріалів. - Логістика (доставка). 2. Постійні витрати: - Амортизація обладнання. - Витрати на R&D (прототипування). - Маркетинг (просування контенту).			1. Продаж товарів: - Реалізація готових систем стабілізації. 2. Продаж запчастин: - Реалізація ремкомплектів (важелі, мотори). 3. Послуги: - Платна інтеграція під унікальне обладнання замовника (кастомізація).	

ВИСНОВОК ДО РОЗДІЛУ

За результатами виконання розділу було проведено комплексний маркетинговий та техніко-економічний аналіз стартап-проекту розробки автоматизованої системи стабілізації («SteadyCore»). На основі отриманих даних можна зробити наступні висновки:

Можливість ринкової комерціалізації проекту. Встановлено, що комерціалізація проекту є можливою та перспективною. Ринок систем стабілізації та аксесуарів для БПЛА в Україні демонструє стрімку позитивну динаміку зростання, зумовлену потребами оборонного та аграрного секторів. Проект характеризується високим потенціалом рентабельності, оскільки розрахована собівартість пристрою є значно нижчою за ринкові ціни іноземних аналогів, що дозволяє встановити конкурентну ціну при збереженні достатньої маржинальності.

Перспективи впровадження та конкурентоспроможність. Перспективи впровадження оцінюються як високі.

Потенційні клієнти: Визначено чітку цільову групу — професійні оператори БПЛА та технічні спеціалісти, які мають критичну потребу в надійному обладнанні.

Бар’єри входження: Ринок має середні бар'єри (потреба у кваліфікованій розробці ПЗ), які долаються наявними компетенціями розробника.

Конкуренція: Попри високу інтенсивність конкуренції з боку глобальних брендів (DJI) та китайських виробників, проект є конкурентоспроможним завдяки унікальним перевагам: ремонтопридатності, локальному сервісу та можливості адаптації під нестандартні завдання, що є слабким місцем масових виробників.

Обрана альтернатива впровадження. Для ринкової реалізації обрано стратегію «Швидкий старт» (MVP) з використанням тактики нішевої спеціалізації (фокусування). Це передбачає відмову від прямої конкуренції з лідерами ринку на користь обслуговування вузького сегмента професійних користувачів, для яких критичними є сервіс та надійність, а не лише бренд.

Доцільність імплементації. Подальша імплементація проекту є доцільною. Технічний аудит підтвердив наявність та доступність необхідних технологій (мікроконтролери, 3D-друк, датчики), а маркетинговий план довів наявність платоспроможного попиту. Проект має соціальну значущість (імпортозаміщення) та економічну привабливість для інвестування власних ресурсів.

Розроблена бізнес-модель демонструє стійкість та життєздатність проекту «SteadyCore».

Її головною перевагою є орієнтація на сервісну складову (Value Proposition + Customer Relationships), що дозволяє компенсувати технологічне відставання від глобальних конкурентів у масовому виробництві. Модель доходів диверсифікована: прибуток генерується не лише від одноразового продажу пристрою, а й від продажу запчастин та супутніх послуг протягом усього життєвого циклу виробу (LTV — Lifetime Value).

Така структура бізнесу є гнучкою, не вимагає великих капітальних інвестицій на старті (завдяки аутсорсингу складних процесів та використанню 3D-друку) і може бути легко масштабована при зростанні попиту.

ВИСНОВОК

У результаті роботи було проведено дослідження динаміки автоматизованої системи стабілізації методом математичного моделювання в середовищі MATLAB/Simulink. Було проаналізовано поведінку системи при різних коефіцієнтах підсилення регулятора ($k_{\text{дв}}$), а також реакцію на стохастичні збурення (білий шум) та нелінійні фактори (сухе тертя).

1. Розроблено програмний комплекс у середовищі MATLAB/Simulink, в якому реалізовано математичну модель автоматизованої системи одновісної стабілізації непрямої дії.

2. Проведено моделювання впливу коефіцієнта підсилення ($k_{\text{дв}}$) на точність та швидкодію системи. Встановлено, що збільшення коефіцієнта підсилення є основним інструментом підвищення точності системи в лінійному режимі. При збільшенні коефіцієнта підсилення ($k_{\text{дв}} = 100$) система забезпечує мінімальну помилку слідування та швидку реакцію (менше 1 с), однак це призводить до суттєвого зниження запасу стійкості та підвищення чутливості до шумів.

3. Стійкість до зовнішніх збурень (детермінована та стохастична хитавиця). Моделювання показало, що система має обмежену смугу пропускання. При низькочастотних завадах система з високим $k_{\text{дв}}$ ефективно придушує відхилення. При збільшенні частоти шуму та великому коефіцієнті підсилення збільшується похибка стабілізації.

4. Вплив моменту сили сухого тертя по осі стабілізації. Одним з найбільш критичних факторів для реальної експлуатації виявилося сухе тертя в механічних вузлах. В результаті моделювання визначено, що при низькому підсиленні ($k_{\text{дв}} = 1$) момент двигуна не здатен подолати момент тертя спокою при малих помилках. Це призводить до виникнення зони нечутливості та значної статичної похибки. При високому підсиленні ($k_{\text{дв}} = 100$) статична похибка зникає, а також спостерігається режим автоколивань. Для усунення статичної похибки без виникнення автоколивань необхідно переходити до використання ПІД-регулятора (введення інтегральної

складової для точності та диференціальної для демпфування) або застосовувати методи адаптивного керування, що може бути розглянуто у подальших дослідженнях.

5. В результаті розробки стартап-проєкту було проведено комплексний маркетинговий та техніко-економічний аналіз стартап-проекту розробки автоматизованої системи стабілізації («SteadyCore»). Здійснено комплексне обґрунтування доцільності виведення на локальний ринок системи стабілізації.

Розроблена бізнес-модель доводить, що обрана стратегія спеціалізації та виробництво за технологією 3D-друку дозволяють мінімізувати вхідні бар'єри та забезпечити конкурентоспроможність продукту. Проєкт є технічно реалізованим та інвестиційно привабливим, оскільки пропонує споживачам унікальне поєднання функціональності та локальної сервісної підтримки, яка відсутня у закордонних аналогів.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

[1] Безвесільна О., Нечай С., Толочко Т., *«Analytical Review of Automated Stabilization Complexes»*, Modern Engineering and Innovative Technologies, №27, 2023, с. 45–52.

[2] Галицький О., Денисюк Д., Кожем'яко Я., Квассай М., «*Method of FPV Drone Stabilization on an Automatically Determined Target and its Further Observation»*, Computer Systems and Information Technologies, № 136, 2025.

[3] Дорф Р., Бішоп Р., *«Сучасні системи автоматичного керування»,* Київ: Вища школа, 2020. 684 с.

[4] Кулебакін В. С., *«Високоякісні інваріантні системи регулювання»,* у зб.: *«Теорія інваріантності та її застосування в автоматичних пристроях»*, Київ, 1959.

[5] Кухтенко О. І., «*Проблема інваріантності в автоматиці*», Київ: Держтехвидав УРСР, 1963.

[6] Огар В. І., Козловський В. І., «*Теорія автоматичного керування»*, Львів: Видавництво Львівської політехніки, 2017. 356 с.

[7] Фабрикант Є. А., *«Інваріантні системи двоступеневої стабілізації*», Доповідь на 3-й конференції з теорії інваріантності, Київ, 1966.

[8] Dorf R. C., Bishop R. H., «*Modern Control Systems*», 14th ed., Pearson, 2022.

[9] Golnaraghi F., Kuo B., *«Automatic Control Systems*», 10th ed., New York: Wiley, 2017. 912 p.

[10] Nelson R. C., *«Flight Stability and Automatic Control*», 2nd ed., New York: McGraw-Hill, 1998.

[11] Ogata K., *«Modern Control Engineering*», 6th ed., Pearson Education, 2021. 992 p.

[12] Попович М. Г., Ковальчук О. В., *«Теорія автоматичного керування»*, Київ: Либідь, 2007. 656 с.

[13] Нестеренко О. І., Сапегін О. М., *«Гіроскопічні і навігаційні прилади»*, Київ: КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2022. 138 с.

[14] Сущенко О. А., Павлова С., *«Features of data processing in UAV control system with non-orthogonal measuring device and robust controller»*, CEUR Workshop Proceedings, Vol-3912, 2025.

[15] Безвесільна О. М., Квасніков В. П., Цірук В. Г., Чиковані В. В., *«Системи наведення та стабілізації озброєння»*, Житомир: ЖДТУ, 2014. 176 с.

[16] Безвесільна О. М., Цірук В. Г., Квасніков В. П., Чепюк Л. О., *«Аналіз закордонних систем наведення та стабілізації»*, Вісник Інженерної академії України, № 2, 2014. С. 155–159.

[17] Тимченко А. А., *«Основи системного проектування та системного аналізу складних об'єктів»*, Київ: Либідь, 2016.

[18] Ogata K., *«Modern Control Engineering»*, Upper Saddle River: Prentice Hall, 2010. 912 p

[19] Dorf R. C., Bishop R. H., *«Modern Control Systems»*, London: Pearson, 2017. 1045 p.

[20] Franklin G. F., Powell J. D., Emami-Naeini A., *«Feedback Control of Dynamic Systems»*, London: Pearson, 2019. 848 p.

[21] *«Розроблення стартап-проекту: Методичні рекомендації до виконання розділу магістерських дисертацій для студентів інженерних спеціальностей»* / За заг. ред. О. А. Гавриша, Київ: НТУУ «КПІ», 2016. 28 с.