

**МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ**  
**НАЦІОНАЛЬНИЙ АВІАЦІЙНИЙ УНІВЕРСИТЕТ**  
Факультет аеронавігації, електроніки та телекомунікацій  
Кафедра авіаційних комп'ютерно-інтегрованих комплексів

**ДОПУСТИТИ ДО ЗАХИСТУ**  
Завідувач випускової кафедри

\_\_\_\_\_ Віктор СИНЕГЛАЗОВ

“ \_\_\_\_\_ ” \_\_\_\_\_ 2023р.

**КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА**  
**(ПОЯСНЮВАЛЬНА ЗАПИСКА)**  
ВИПУСНИКА ОСВІТНЬОГО СТУПЕНЯ  
“МАГІСТР”

Спеціальність 151 «Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології»  
Освітньо-професійна програма «Комп'ютерно-інтегровані технологічні процеси і виробництва»

**Тема: Система автоматизованого проектування силового стабілізатора малого космічного апарата**

Виконавець: студентка групи КП-126М	Лещенко Д. О.
Керівник: кандидат технічних наук, професор	Аблесімов О.К.
Консультант розділу «Охорона навколишнього середовища»	Ольховик Ю. О.
Консультант розділу «Охорона праці»	Козлітін О. О.
Нормоконтролер: к.т.н., професор	Філяшкін М.К.

# НАЦІОНАЛЬНИЙ АВІАЦІЙНИЙ УНІВЕРСИТЕТ

Факультет аеронавігації, електроніки та телекомунікацій

Кафедра авіаційних комп'ютерно-інтегрованих комплексів

Освітньо-кваліфікаційний рівень магістр

Спеціальність 151 «Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології»

**ЗАТВЕРДЖУЮ**

Завідувач кафедри

ДТН професор

Синеглазов В.М.

“ ” вересня 2023 р.

## **ЗАВДАННЯ**

**на виконання кваліфікаційної роботи студентці**

Лещенко Діані Олександрівні

- 1. Тема роботи:** «Система автоматизованого проектування силового стабілізатора малого космічного апарата»
- 2. Термін виконання роботи:** з 01.10 2023р. до 25.12.2023р.
- 3. Вихідні данні до роботи:** Технічні параметри сучасних САПР, систем керування космічними апаратами; технічні характеристики датчиків орієнтації і навігації космічних апаратів.
- 4. Зміст пояснювальної записки (перелік питань, що підлягають розробці):**
  1. Аналіз проблеми керування малими космічними апаратами та визначення шляхів її вирішення.
  2. Структура й алгоритми етапів проектування технічної системи.
  3. Базові компоненти автоматизованого проектування.
  4. Формування алгоритму проектування.
  5. Математичне забезпечення проектування системи стабілізації.
  6. Дослідження та опис збуреного руху МКА.
  7. Визначення параметрів граничного циклу.
  8. Проектування на основі базових пакетів прикладних програм.
  9. Програме забезпечення проектування.
- 5. Перелік обов'язкового графічного матеріалу:** 1. Структура системи автоматизованого проектування. 2. Визначення основних процедур проектування. 3. Визначення базових компонент системи. 4. Структурна схема нелінійної системи стабілізації МКА. 5. Моделі досліджуваної системи. 6. Перехідні характеристики системи стабілізації МКА. 7. Пропозиції щодо

розвитку автоматизованих систем стабілізації МКА. 8. Програмне забезпечення автоматизованого синтезу.

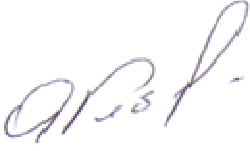
### 6. Календарний план-графік

№ п/п	Завдання	Термін виконання	Відмітка про виконання
1	Підбір літератури	01.10 –05.10	
2	Вступ	06.10–08.10	
3	Обґрунтування доцільності автоматизації проектування	09.10-21.10	
4	Формування алгоритму проектування силового стабілізатора МКА	22.10-31.10	
5	Математичне забезпечення проектування силових стабілізаторів МКА	01.11-12.11	
6	Програмно-методичне забезпечення автоматизованого проектування	13.11-25.11	
7	Охорона навколишнього середовища	26.11-01.12	
8	Охорона праці	02.12-08.12	
9	Висновки	09.12-12.12	
10	Презентація	13.12-16.12	

### 7. Консультація з окремих розділів:

Назва розділу	Консультант (посада, П.І.Б.)	Дата, підпис	
		Завдання видав	Завдання прийняв
Охорона навколишнього природного середовища			
Охорона праці			

8. Дата видачі завдання: “ 25 ” вересня 2023 р.

Керівник: професор \_\_\_\_\_  \_\_\_\_\_ Аблесімов О.К.  
(підпис)

*Завдання прийняла до виконання* \_\_\_\_\_ Лещенко Д.О.  
(підпис)

## РЕФЕРАТ

Тема кваліфікаційної роботи - «Система автоматизованого проектування силового стабілізатора малого космічного апарата».

У роботі виконано аналіз, розробка та синтез нелінійної силової системи стабілізації МКА. Було показано доцільність використання контурів корегування системи для МКА. Представлено алгоритмічне і програмне забезпечення аналізу та синтезу автоматизованої системи орієнтації та стабілізації МКА.

Пояснювальна записка до кваліфікаційної роботи - «Система автоматизованого проектування силового стабілізатора малого космічного апарата» : \_\_\_\_\_ стор., \_\_\_ рис., \_\_\_\_\_ табл.

САПР, МАЛИЙ КОСМІЧНИЙ АПАРАТ, АВТОМАТИЧНЕ КЕРУВАННЯ, СИСТЕМА ОРІЄНТАЦІЇ ТА СТАБІЛІЗАЦІЇ, КОРЕГУВАННЯ, АНАЛІЗ, СИНТЕЗ

Об'єкт дослідження – система стабілізації МКА; предмет дослідження – САПР силової системи.

**Мета дипломної роботи** – розробка структури САПР, математичного та програмного забезпечення автоматизованого проектування силового стабілізатора малого космічного апарата з нелінійним виконавчим приводом.

Метод дослідження – моделювання і синтез на основі базових пакетів прикладних програм, програмне забезпечення методів аналізу і синтезу, що найбільше зустрічаються в інженерній практиці.

## ПЕРЕЛІК ВЖИВАНИХ СКОРОЧЕНЬ І ТЕРМІНІВ

СУ — систему управління

АСК — автоматизована система керування

КА — космічний апарат

МКА — малого космічного апарата

САПР — система автоматизованого проектування

СОС — система орієнтації і стабілізації

КДП — Комп'ютерно-допоміжне проектування

КДВ — Комп'ютерно-допоміжне виробництво

КДІ — Комп'ютерно-допоміжна інженерія

ППП — пакети прикладних програм

ЦМ — центр мас

ЦТ — центр тиску

АФЧХ — Амплітудно-Фазової Характеристики

ЖНЗЗ — жорсткий зворотний зв'язок

## ЗМІСТ

Вступ .....	
1. Аргументація необхідності впровадження автоматизації у процесі проектування .....	
1.1. Аналіз проблеми управління космічними апаратами та визначення шляхів їх вирішення .....	
1.2. Розробка загальної структури системи проектування .....	
1.3. Вибір виду та методу проектування .....	
1.4. Формування послідовності проектних процедур .....	
2. Формування алгоритму проектування силового стабілізатора малого космічного апарата .....	
2.1. Визначення функціонального складу системи стабілізації МКА .....	
2.2. Моделювання силової системи стабілізації МКА .....	
2.3. Дослідження та опис збуреного руху МКА .....	
2.4. Вибір апарату опису нелінійних систем .....	
2.5. Алгоритм автоматизації проектування .....	
3. Математичне забезпечення проектування силових стабілізаторів МКА .....	
3.1. Аналіз умов, при яких можуть виникати граничні цикли .....	
3.2. Визначення параметрів граничного циклу .....	
3.3. Експериментальна перевірка розрахунків .....	
3.4. Синтезу регулятора, що виключає граничні цикли .....	
4. Програмно-методичне забезпечення проектування силових стабілізаторів МКА .....	
4.1. Проектування на основі базових пакетів прикладних програм .....	
4.1.1. Введення до закону регулювання похідної .....	
4.1.2. Введення до закону регулювання інтеграла .....	
4.2. Програмне забезпечення проектування .....	

4.2.1. Опис вхідних та вихідних даних програми .....	
4.2.2. Текст програмного коду її лістинг .....	
4.2.3. Опис інтерфейсу користувача .....	
5. Охорона праці .....	
5.1. Ергономічні аспекти .....	
5.2. Електробезпека .....	
5.3. Вплив на зір і зіральный комфорт .....	
5.4. Потенційні хімічні ризики .....	
5.5. Безпека даних та інформаційна безпека .....	
5.6. Пожежна безпека .....	
5.7. Комунікація та навчання .....	
5.8. Висновок.....	
6. Охорона навколишнього середовища.....	
6.1. Відходи та забруднення.....	
6.2. Використання ресурсів.....	
6.3. Енергоефективність.....	
6.4. Ризики від падінь та аварій.....	
6.5. Викиди і електромагнітні перешкоди.....	
6.6. Висновок.....	
Висновки.....	
Список використаної літератури.....	

## ВСТУП

Впровадження сучасних технологій у сферу космічних досліджень і розвитку космічних апаратів має величезне значення для подальшого розвитку астронавтики та супутникового зв'язку. Споживачі та оператори космічних систем надають перевагу надійним та ефективним космічним апаратам, здатним забезпечити стабільну роботу в умовах космосу. Однією з ключових складових успішної роботи космічного апарату є система керування та стабілізації.

У зв'язку з цим, дана робота присвячена розробці системи автоматизованого проектування силового стабілізатора для малого космічного апарата. Силовий стабілізатор є важливою складовою системи керування космічного апарату і відповідає за забезпечення стабільності апарату в просторі, що є критично важливим завданням для забезпечення точності та ефективності космічних місій.

Сучасні технології дозволяють створити інноваційні рішення для проектування та оптимізації силових стабілізаторів. Використання автоматизованих систем проектування дозволить вдосконалити процес розробки і створити більш ефективні стабілізатори, які відповідають сучасним вимогам і стандартам.

Основною метою цієї роботи є розробка структури САПР, математичного та програмного забезпечення автоматизованого проектування силового стабілізатора малого космічного апарата з нелінійним виконавчим приводом, з метою поліпшення їхньої надійності та ефективності. У рамках роботи буде проведено аналіз існуючих підходів до проектування стабілізаторів, розроблено та оптимізовано модель силового стабілізатора, а також виконано експериментальні випробування для підтвердження ефективності запропонованої системи.

Ця робота є актуальною та важливою, оскільки вона спрямована на покращення якості космічних місій та збільшення надійності космічних апаратів. Успішної реалізації запропонованої системи, це відкриє нові можливості для розвитку космічних досліджень і забезпечення стабільності та точності руху малих космічних апаратів.

Науковий та практичний внесок цієї роботи полягатиме у розробці і реалізації автоматизованої системи проектування силового стабілізатора, яка може бути



застосована в сучасних космічних технологіях та сприяти покращенню стабільності та надійності малих космічних апаратів.

## РОЗДІЛ 1

### АРГУМЕНТАЦІЯ НЕОБХІДНОСТІ ВПРОВАДЖЕННЯ АВТОМАТИЗАЦІЇ У ПРОЦЕСІ ПРОЕКТУВАННЯ

#### **1.1. Аналіз проблеми управління космічними апаратами та визначення шляхів їх вирішення**

В наш час глобальна космічна індустрія переживає інтенсивний розвиток, обумовлений як зростанням вимог до результатів космічних проєктів, так і з'явленням нових науково-технічних рішень і технологій, які відкривають нові можливості для вдосконалення ракетно-космічної техніки. Сильна конкуренція на світовому ринку космічних послуг змушує учасників цієї галузі швидко впроваджувати свої розробки з високою якістю та за доступними цінами, при цьому не втрачаючи якості та ефективності космічних систем.

Космічний апарат (КА) - це технічний пристрій або обладнання, спеціально розроблене для використання у космічних місіях або для дослідження космосу. Це може бути штучний супутник Землі, космічний корабель, міжпланетна станція, космічний телескоп, марсохід або інший транспортний, дослідницький або спостережальний апарат, який функціонує або операційно працює в космічному середовищі.

Залежно від областей застосування, КА поділяються на наступні категорії:

1. Суборбітальні апарати: Апарати, які проводять короточасні польоти у космос, але не досягають орбіти, зазвичай використовуються для проведення наукових досліджень та тестування технологій.

2. Навколоземні орбітальні апарати: Космічні апарати, які обертаються навколо Землі на геоцентричних орбітах, і використовуються для різних цілей, таких як зв'язок, спостереження, наукові дослідження тощо.

3. Міжпланетні (експедиційні) апарати: Космічні апарати, призначені для дослідження інших планет та об'єктів сонячної системи, долають великі відстані в космосі.

4. Напланетні апарати (місяцеходи, марсоходи та інше): Космічні апарати, які призначені для опускання на поверхню планет або місяців для наукових досліджень та дослідження місцевих умов.

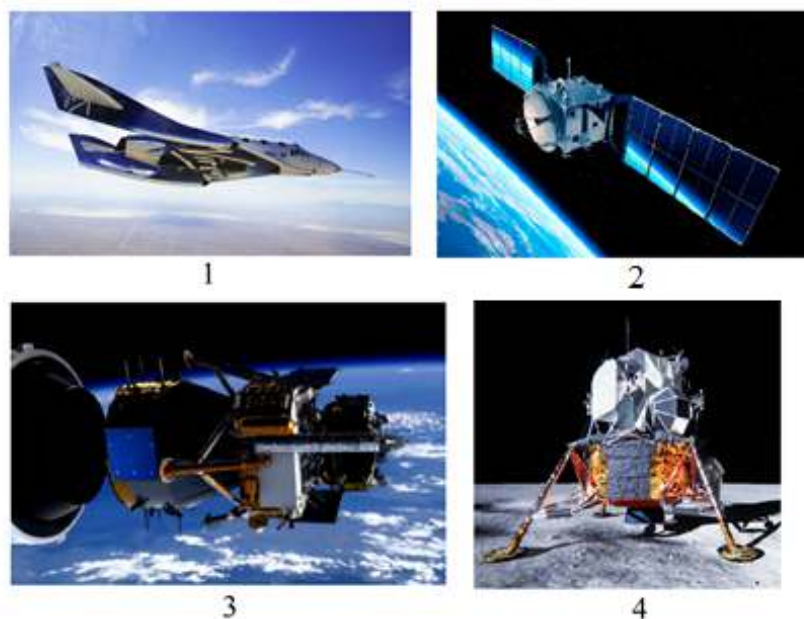


Рис 1.1. Космічні апарати

1. Суборбітальний корабль.
2. Штучний супутник Землі.
3. Автоматична міжпланетна станція.
4. Місячний модуль.

Ця класифікація враховує різні області та завдання, які можуть бути вирішені космічними апаратами, та розмежовує їх залежно від їхнього місця використання та функцій.

За призначенням, космічні апарати можна класифікувати на автоматичні та пілотовані.

Автоматичні космічні апарати:

1. Спостереження Землі: Автоматичні супутники та апарати для моніторингу земельних ресурсів, клімату, екології та інших аспектів нашої планети.
2. Дослідження космосу: Апарати для вивчення інших планет та астрономічних об'єктів, включаючи міжпланетні апарати та космічні телескопи.
3. Навігація та зв'язок: Супутники навігаційних систем (наприклад, GPS), а також апарати для забезпечення зв'язку.
4. Наукові дослідження: Апарати для вивчення космічного середовища, плазми, сонячних вітрів і т. д.
5. Розвідка та військове використання: Апарати для оборони, розвідки і комунікації з військовою метою.

6. Пошук та рятування: Супутники і апарати для пошуку та рятування під час надзвичайних ситуацій на морі, у пустелі або в інших віддалених областях.

Пілотовані космічні апарати:

1. Космічні кораблі: Транспортні апарати для перевезення людей і вантажів у космос.

2. Космічні станції: Житлові та дослідницькі платформи для тривалого перебування астронавтів у космосі.

3. Місяцеходи та марсоходи: Апарати, які використовуються для вивчення поверхні Місяця, Марса та інших небесних тіл.

4. Космічні апарати для наукових досліджень: Кораблі та станції для виконання наукових експериментів та досліджень у космосі.

5. Космічні туристичні місії: Апарати, які перевозять приватних осіб у космос на космічний відпочинок.

Ця класифікація враховує різні цілі та завдання, які можуть виконувати космічні апарати, в залежності від того, чи є в них екіпаж на борту.

З'явлення малих космічних апаратів (МКА) є важливою подією в сучасній космічній індустрії. Цей новий клас космічних апаратів характеризується компактністю, легкістю та доступністю, і він відкриває двері до ряду нових можливостей у сфері космічної діяльності.

Малим космічним апаратам вдалося досягти мініатюризації різних систем, включаючи енергетичні джерела, сенсори, трансмітери та інші компоненти, завдяки чому вони стали менш масивними і займають менше місця під час запуску. Це сприяє зниженню витрат на старт та обслуговування, що робить МКА більш доступними для різних видів місій та досліджень.

Однією з ключових переваг МКА є їхні можливості у проведенні наукових досліджень. Вони можуть бути використані для моніторингу земельних та природних ресурсів, вивчення клімату, атмосферних явищ, віддалених регіонів Землі, а також для дослідження інших планет та космічного середовища.

МКА також сприяють технологічному прогресу, оскільки розробка цих апаратів вимагає розробки нових методів мініатюризації та автономізації систем. Це сприяє вдосконаленню технологій для майбутніх космічних місій.

Малими космічними апаратами (МКА) характеризуються наступні ознаки:

- компактні розміри (до одного метра);
- невелика маса (від кількох одиниць до сотень кілограмів);
- можливість запуску як пасажирів на борту інших апаратів або конверсійний запуск;
- відносно низька вартість;
- використання нетрадиційних підходів у процесах розробки, випробувань та експлуатації.

Як приклад МКА (рис. 1.2):

а - інформаційного забезпечення угруповань військ;

б - дистанційного зондування Землі;

в - вивчення сонячно-земних зв'язків;

г - місячний орбітальний зонд.



а



б



в



г

Рис. 1.7 Малі космічні апарати

МКА можуть бути використані для різних цілей і завдань:

1. Наукові дослідження. Досліджень космічного середовища, вивчення астрономічних об'єктів або дослідження інших планет та їхніх супутників.
2. Спостереження Землі. Моніторингу Землі, включаючи вивчення клімату, природних катастроф, атмосферних явищ і тд.,
3. Технологічні демонстрації. Випробування нових технологій та концепцій в космічній сфері. А саме автономні системи, сенсори, трансмітери та інші.
4. Навігація та зв'язок. Забезпечення навігації на Землі або для покращення зв'язку.

Малий космічний апарат (МКА) складається з ряду основних систем, що включають енергетичну систему для постачання електроенергії, систему управління (СУ) та навігації для керування апаратом в космосі, комунікаційну систему для встановлення зв'язку, а також наукові та інструментальні системи для проведення досліджень. Крім цього, МКА має корпус та оболонку, які забезпечують захист від негативних впливів космосу, систему теплорегулювання для підтримки оптимальної температури, систему джерела даних і обробки інформації для збору та передачі даних, а також запаси для стабілізації і маневрового керування для зміни орієнтації та маневрування в космічному просторі. МКА покладають завдання керування його положенням навколо центру мас (кутовою орієнтацією) і управління рухом центру мас апарата в ситуаціях, коли параметри його орбіти змінюються.

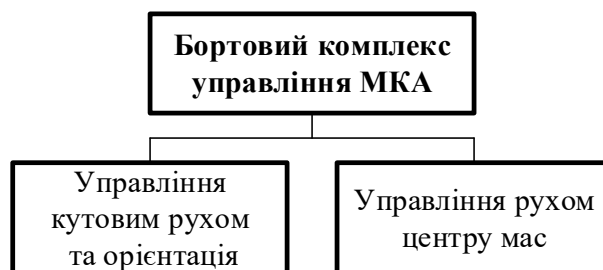


Рис. 1.3. Бортовий комплекс МКА

Однією з ключових завдань, які доводиться вирішувати практично протягом усього польоту більшості МКА, є забезпечення їхньої потрібної орієнтації в просторі. Ця орієнтація досягається шляхом обертання апарата навколо його центру мас і відносно заданих орієнтирів. Такі орієнтири можуть бути різними видимими

об'єктами, такими як зірки, Сонце, лінія горизонту, або напрямками в просторі, такими як місцева вертикаль, вектор геомагнітного поля або напрямок руху повітряного потоку. Їх можна визначити за допомогою вимірювальних приладів.

Проблему забезпечення потрібного кутового руху МКА розв'язує система орієнтації і стабілізації (СОС), що є важливою складовою системи управління КА. Ця система відзначається своєю точністю у плані визначення орієнтації і стабілізації в кутах та кутовій швидкості.

Важливими аспектами для МКА є параметри системи орієнтації і стабілізації, такі як їхні розміри та маса, витрати енергії, точність роботи та надійність функціонування, а також вартість. Зважаючи на те, що до цих систем входять різноманітні компоненти, такі як підсилювачі, блоки управління, датчики орієнтації і виконавчі органи, при проектуванні МКА необхідно враховувати обмеження з питань енергоспоживання, розмірів, маси і вартості цих компонентів.

Отже, вибір ефективної СОС є важливим завданням при розробці МКА, і він повинен враховувати компроміс між вимогами до точності та обмеженнями з питань ресурсів та вартості.

Забезпечення функціонування цільової апаратури ставить перед системою стабілізації МКА серйозні вимоги. Для досягнення заданої точності наведення, яка становить від 2 до 5 кутових хвилин, а також для забезпечення похибки стабілізації осей щодо розрахункових значень в межах встановленого просторового дозволу, потрібна система стабілізації, яка відповідає цим вимогам  $10^{-3} \dots 10^{-4} \text{ } \circ / \text{c}$ .

Також важливими аспектами є здатність маневрування МКА і можливість формування векторних маршрутів у будь-якому напрямку відносно основного шляху польоту.

Використання лінійних моделей систем стабілізації дозволяє проводити дослідження при їхньому проектуванні або модернізації. Проте на сьогоднішній день існує цілий клас систем стабілізації для космічних апаратів, і вивчення їх деталей свідчить про те, що вони мають нелінійний характер.

Всі реальні компоненти і системи, можна сказати, мають нелінійну природу. Під час проектування лінійної системи вони наближаються до лінійної форми шляхом лінеаризації нелінійного диференціального рівняння

$$y(t) = U \left[ r(t), \dots, r^{(m)}(t), m(t), \dots, m^{(k)}(t), \dot{y}(t), \dots, y^{(n)}(t) \right]$$

беручи до уваги, що в цьому автоматичному пристрої змінні коливаються так, що відхилення від заданих значень залишаються постійно на низькому рівні.

Проте на практиці існують нелінійні елементи, до яких неможливо застосувати операцію лінеаризації за величиною відхилення. Такі види нелінійностей називаються значущими. Звичайні приклади значущих нелінійностей в автоматичних системах показані на (рис. 1.4).

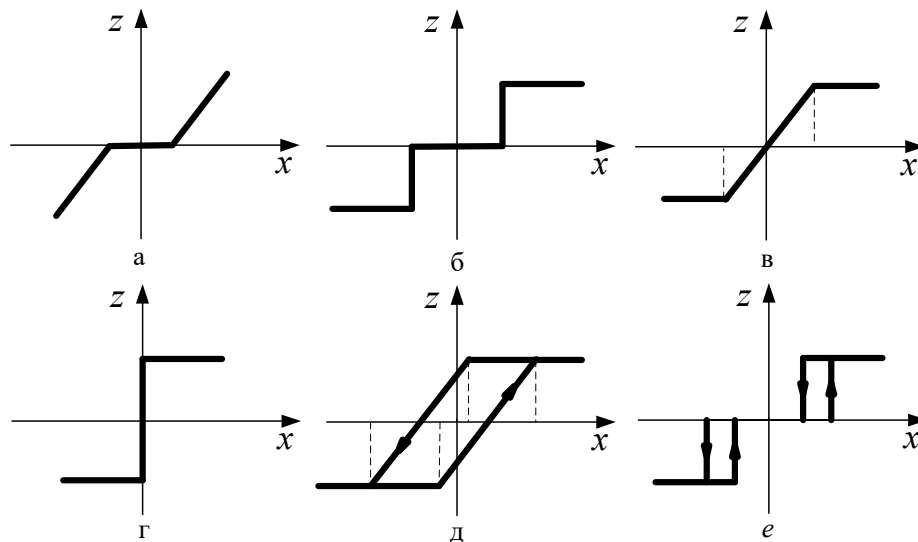


Рис. 1.4. Типові нелінійності систем :

а-пропорційна із зоною нечутливості, б-релейна із зоною нечутливості,  
в - з насиченням, г – ідеальне реле, д – петля гістерезису, е – реле з гістерезисом

Нелінійні елементи, які існують у системах автоматичного керування, зазвичай негативно впливають на якість процесів керування.

Це можна побачити на (рис. 1.5) прикладі моделей лінійної та нелінійної систем автоматичного керування, а також їх реакції на гармонійний та ступінчастий сигнали, де червоним показана реакція лінійної системи, а синім - нелінійної. Можна легко визначити, як нелінійність типу "зона нечутливості" впливає на динаміку автоматичної системи.



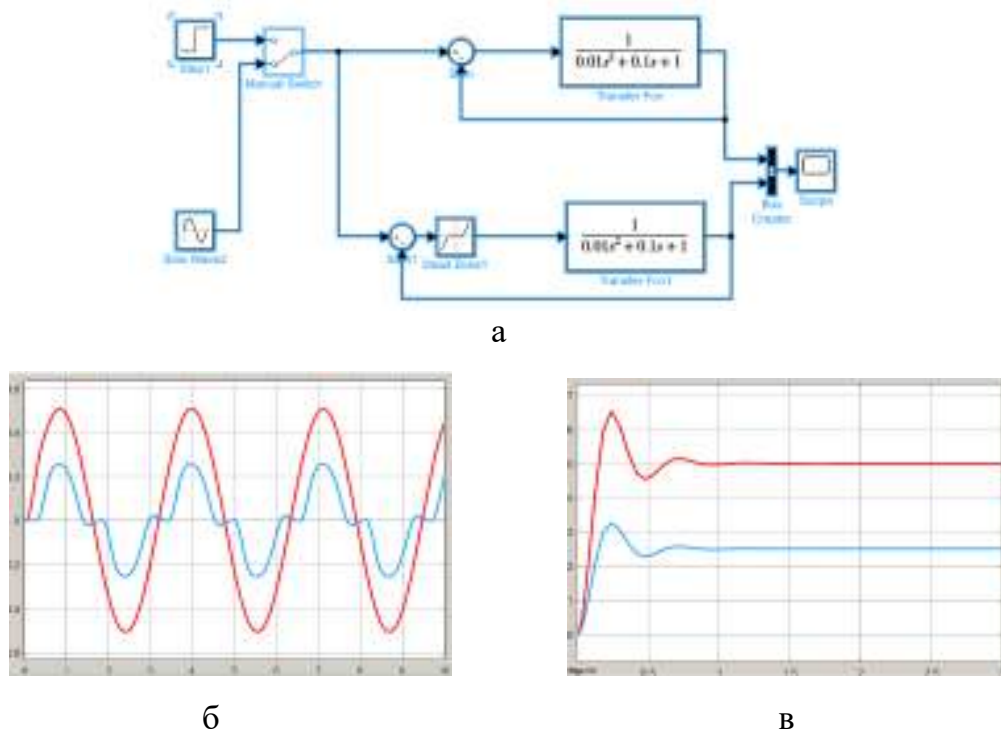


Рис. 1.5. Динаміка систем автоматичного керування:

а – моделі систем лінійної та нелінійної; б – реакція на гармонійний сигнал;  
в – реакція на ступінчастий сигнал

Нелінійні системи мають кілька особливостей, що відрізняють їх від лінійних систем. По-перше, параметри нелінійних систем залежать від вхідних значень цих систем, і тому на нелінійні системи не можна застосовувати принцип суперпозиції: реакція нелінійної системи не є простою сумою реакцій на окремі вхідні впливи.

Другою особливістю є те, що нелінійні диференціальні рівняння таких систем не мають загальних методів розв'язку. Перетворення Лапласа і Фур'є, а також відповідні передатні функції, які є корисними для дослідження лінійних систем, не можна застосовувати для нелінійних систем через їх лінійний характер.

Третьою особливістю нелінійних систем є можливість виникнення в них граничних циклів - незатухаючих коливань. Граничний цикл в загальному випадку не є синусоїдальним, і його амплітуда не залежить від зовнішнього впливу і початкових умов. У лінійних стаціонарних системах періодичні незгасаючі коливання є синусоїдальними і залежать від зовнішнього впливу та початкових умов.

В нелінійних системах, які впливаються періодичним вхідним сигналом, частота вимушених коливань може виникати як субгармоніка (підгармоніка), так і гармоніка (кратне значення) частоти вхідного сигналу.

Особливістю нелінійних систем є також явище стрибкоподібного резонансу, яке проілюстровано на (рис. 1.6).

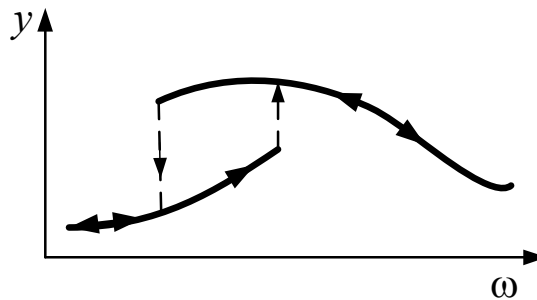


Рис. 1.6. Явище стрибкоподібного резонансу

В стійких нелінійних системах може існувати кілька різних точок рівноваги, до яких система буде конвергувати з часом при відсутності зовнішнього впливу. Конкретна точка рівноваги, до якої система збігатиметься, залежить від початкових умов.

У зв'язку з вищевикладеним, розробка системи орієнтації і стабілізації МКА стає досить цікавою задачею, оскільки вона повинна враховувати різноманітні фактори, що впливають на точність моделювання і опису МКА.

Оскільки склад і технічне виконання основних компонентів систем керування МКА можуть значно відрізнятись, застосування автоматизованих систем під час їх проектування є доцільним. Це сприяє:

- зменшенню трудомісткості проектування і планування;
- скороченню строків проектування;
- зменшенню собівартості проектування і виготовлення, що веде до зменшення витрат на експлуатацію;
- підвищенню якості і техніко-економічного рівня результатів проектування;
- зменшенню витрат на натурне моделювання і випробування.

Способом передбачення рішення в галузі проектування полягає у використанні комплексної автоматизації різних етапів роботи, таких як

проектування, конструювання, експериментальні та технологічні дослідження. Ця автоматизація базується на використанні сучасних обчислювальних технологій і стає важливим інструментом для підвищення науково-технічного рівня проекту, скорочення часу і витрат на його реалізацію. Це досягається завдяки обробці та аналізу великих обсягів інформації, зниженню технічного ризику під час проектування та іншим способом.

Основною метою цієї роботи є розробка структури САПР, математичного та програмного забезпечення автоматизованого проектування силового стабілізатора малого космічного апарата з нелінійним виконавчим приводом, з метою поліпшення їхньої надійності та ефективності.

У ході цієї роботи ставилися такі завдання:

- Визначення основних завдань та процедур для автоматизованого проектування.
- Запропонувати структуру САПР силового стабілізатора.
- Розробка методів проектування нелінійних систем орієнтації та стабілізації малих космічних апаратів.
- Проведення експериментальної перевірки функціональності та достовірності запропонованих рішень.
- Розробка програмного забезпечення для автоматизованого аналізу та синтезу системи орієнтації та стабілізації малого космічного апарату з нелінійним виконавчим приводом.

## **1.2. Розробка загальної структури системи проектування**

Система автоматизованого проектування (САПР) - це комплекс програмних і апаратних засобів, який використовується для автоматизації процесу проектування і розробки в різних галузях інженерії і технології. Вона допомагає інженерам і дизайнерам швидше та ефективніше створювати нові продукти, системи або конструкції, а також вдосконалювати існуючі. САПР включає в себе інструменти для моделювання, проектування, візуалізації, аналізу і управління проектними процесами, що сприяє підвищенню продуктивності та якості роботи.

Кожна зі складових системи автоматизованого проектування (САПР) виконує свою функціональну роль в інженерному і проектному процесі:

КДП - Комп'ютерно-допоміжне проектування (CAD - Computer-Aided Design) є ключовою складовою САПР і призначена для автоматизації процесу проектування. Вона надає інженерам інструменти для створення, редагування, візуалізації і аналізу різних видів проектної документації, включаючи малюнки, 3D-моделі, схеми і плани.

КДВ - Комп'ютерно-допоміжне виробництво (CAM - Computer-Aided Manufacturing) використовується для автоматизації процесу виробництва і виготовлення деталей або виробів, розроблених з використанням КДП (CAD). Вона генерує програми інструкцій для обладнання для створення конкретних деталей або виробів і включає такі процеси, як верстатний обробка, лазерна обробка, обробка матеріалів і 3D-друку.

КДІ - Комп'ютерно-допоміжна інженерія (CAE - Computer-Aided Engineering) використовується для інженерного аналізу та моделювання. Вона дозволяє інженерам проводити розрахунки, симуляції і тестування віртуально, що допомагає визначити ефективність і надійність продукту або системи. КДІ (CAE) включає в себе такі підсистеми, як аналіз напружень, обчислення теплопередачі, динамічний аналіз і інші інженерні обчислення.

Методи аналізу та синтезу в САПР мають декілька переваг. Вони дозволяють розробникові передбачити поведінку готового продукту і виявити можливі помилки до виготовлення реальних прототипів, тим самим економлячи кошти та ресурси. Оскільки витрати на конструювання в кінцевих стадіях розробки і виробництва продукту значно зростають, цей підхід допомагає зменшити терміни та вартість розробки.

Щодо спеціалізації САПР, вони поділяються на спеціалізовані і універсальні системи. Оскільки завдання автоматизованого проектування зазвичай важкі та складні, то САПР часто є спеціалізованими системами, розробленими для вирішення конкретних завдань у певних галузях. Основні функції САПР наведено на (рис. 1.7).

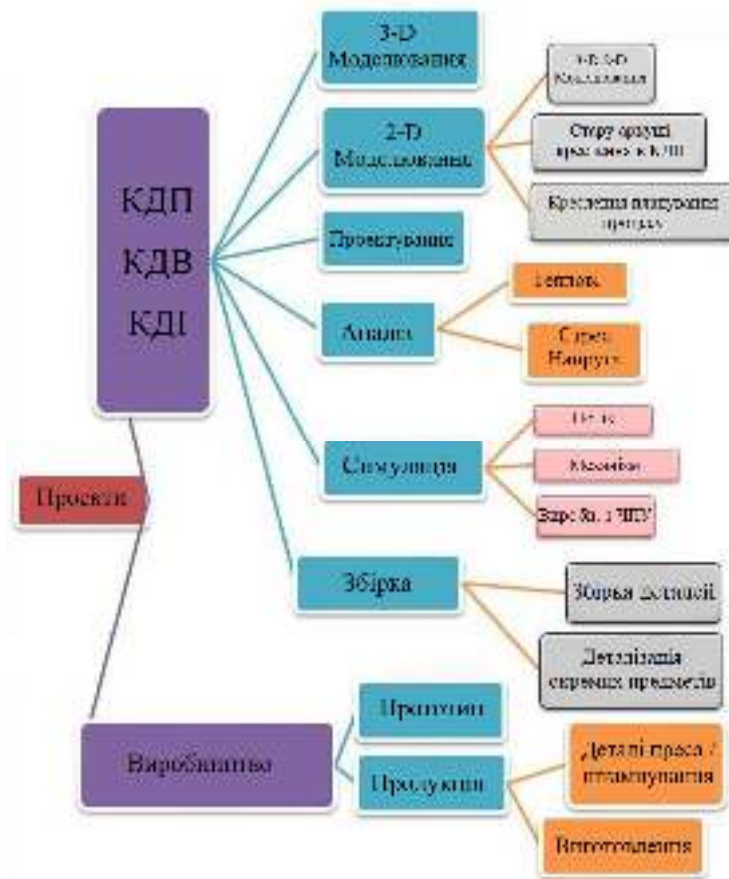


Рис. 1.7. Функції САПР

Зазвичай, САПР складаються з проектних і обслуговуючих компонентів.

Проектні компоненти виконують безпосередньо проектні завдання. Прикладами таких компонентів можуть бути аналітичні, функціональні або геометричні системи, що стосуються об'єктів проектування, а також системи створення конструкторської документації і схемотехнічного аналізу.

Обслуговуючі компоненти забезпечують функціонування проектних компонентів, і їхнє об'єднання часто називають системним середовищем (або оболонкою) САПР. Зазвичай до обслуговуючих компонентів входять системи керування проектними даними (PDM - Product Data Management), керування процесом проектування (DesPM - Design Process Management), інтерфейси для взаємодії розробників з комп'ютером, системи автоматизованої розробки програмного забезпечення (CASE - Computer Aided Software Engineering) для розробки і супроводу програмних компонентів САПР, навчальні компоненти для навчання користувачів технологіям, впровадженим у САПР.

### **1.3. Вибір виду та методу проектування**

У даній роботі основний акцент робиться на аспектах проектування технічних систем, включаючи обчислювальні системи, комплекси та комп'ютерні мережі.

Зазвичай, процес проектування будь-якої технічної системи включає кілька етапів і передбачає детальне вивчення характеристик системи з використанням математичних моделей. Цей процес може бути багатокроковим і ітераційним, що означає послідовні ітерації та вдосконалення проекту системи на кожному з етапів.

Під час виявлення та вивчення властивостей системи, в загальному випадку, потрібно розв'язувати такі стандартні завдання:

- Розробка математичних моделей.
- Розробка методики дослідження системи.
- Аналіз ризиків і розробка заходів для їх зменшення.
- Синтез системи та розробка проекту;
- Оцінка ефективності системи та визначення оптимізаційних параметрів.

Розробка математичних моделей - це процес створення абстрактних математичних представлень системи, які дозволяють описати її поведінку та взаємозв'язки між її складовими частинами. Ці моделі використовуються для аналізу, прогнозу та оптимізації роботи системи без необхідності проводити дорогі експерименти або випробування на реальному об'єкті. Математичні моделі можуть бути представлені у вигляді рівнянь, графів, таблиць або інших математичних структур, які відображають ключові параметри і взаємозв'язки системи. Це дозволяє вивчати та аналізувати систему з точки зору математики та фізики, що спрощує її подальше проектування та оптимізацію.

Розробка методики дослідження системи - це процес визначення конкретних кроків і плану дій для вивчення та аналізу системи з метою отримання важливої інформації про її властивості, функціонування та результативності. Ця методика включає в себе вибір необхідних інструментів, приладів, експериментальних підходів та алгоритмів для проведення досліджень. Методика дослідження дозволяє встановити, як система працює в реальних умовах, і зібрати дані, необхідні для подальшого аналізу та вдосконалення.

Аналіз ризиків та розробка заходів для їх зменшення - це процес ідентифікації потенційних небезпек та негативних подій, які можуть виникнути під час функціонування системи, та розробка стратегій для зменшення чи уникнення цих ризиків. Цей процес включає в себе кроки, спрямовані на оцінку ймовірності та впливу можливих подій, а також розробку конкретних заходів для мінімізації наслідків негативних сценаріїв.

Синтез системи та розробка проекту - це процес, під час якого на основі розроблених математичних моделей та результатів аналізу системи створюється конкретний проект цієї системи або її складових. Основна мета цього етапу - розробити деталізований план, який включає в себе всі необхідні кроки та ресурси для створення системи.

Під час синтезу системи та розробки проекту виконуються такі основні дії:

1. Проектування системи: розробка дизайну системи, включаючи її структуру, компоненти, архітектуру та інтерфейси.
2. Вибір технологій і ресурсів: визначення необхідних технічних засобів, програмного забезпечення, матеріалів та інших ресурсів для реалізації проекту.
3. Розробка деталей: створення конкретних технічних рішень для кожного компонента системи, включаючи алгоритми, схеми, програми, схеми з'єднань та інше.
4. Виробництво та збирання: виготовлення або збірка всіх компонентів системи відповідно до проекту.
5. Тестування та налагодження: перевірка функціональності та відповідності системи специфікаціям, а також виправлення помилок та налагодження роботи.
6. Впровадження: розгортання системи в реальних умовах і введення її в експлуатацію.

«Синтез» відображає процес об'єднання різних компонентів в єдину інтегровану систему, і це нерозривно пов'язано з терміном «аналіз», який передбачає детальне розглядання і вивчення окремих елементів. При цьому, термін "проектування" визначає процес створення прототипу або концепції нової системи,

яка базується на результаті аналізу та синтезу, і стає відповідним "планом" для подальшої реалізації.

Оцінка ефективності системи та визначення оптимізаційних параметрів - це процес, в ході якого аналізується робота системи або продукту для визначення, наскільки вона відповідає вимогам та специфікації, а також для ідентифікації можливих шляхів її покращення. Проводяться такі дії: збір і аналіз даних, оцінка відповідності вимогам, визначення ключових показників ефективності, аналіз результатів, розробка оптимізаційних заходів, виконання тестів і валідація.

Оцінка ефективності системи та визначення оптимізаційних параметрів допомагає забезпечити, що система відповідає вимогам і працює на найвищому рівні продуктивності та якості.

Для спрощення складних завдань, пов'язаних з проектуванням, зазвичай використовується поділ на послідовні етапи. На кожному з цих етапів розглядаються конкретні завдання проектування, де визначаються параметри, пов'язані з різними аспектами організації системи та різними моделями.

Проектування та дослідження систем зазвичай виконуються на кількісному рівні, використовуючи методи математичного моделювання, які можна поділити на дві групи на (рис. 1.8.):

1. Аналітичні методи, які включають в себе використання теорії ймовірностей, теорії масового обслуговування, теорії випадкових процесів, методів оптимізації та інші.

2. Статистичні або імітаційні методи, які базуються на проведенні численних експериментів з використанням спеціальних програмних інструментів та мов моделювання.

Ці підходи дозволяють ретельно досліджувати та проектувати системи, враховуючи різноманітні аспекти їх функціонування та оптимізації.





Рис. 1.8. Методи проектування

Аналітичні методи - це клас методів дослідження і моделювання, які використовують математичні або аналітичні підходи для аналізу і розуміння систем.

Ці методи включають в себе роботу з математичними рівняннями, теорією ймовірностей, статистикою, оптимізацією та іншими аналітичними інструментами. Вони дозволяють отримувати точні та аналітичні рішення для систем, які можуть бути описані математично.

Переваги аналітичного методу:

- Висока точність отриманих результатів.
- Здатність отримувати аналітичні рішення для деяких класів систем.
- Ефективність при роботі з відомими математичними моделями.

Недоліки аналітичного методу:

- Обмежена застосовність до складних та нелінійних систем.
- Потреба в точних математичних моделях, які не завжди доступні.
- Висока обчислювальна складність для деяких завдань.
- Не завжди ефективний для систем з великою кількістю змінних і параметрів.

Аналітичні методи застосовуються у наступних випадках:

1. Для проведення оціночних розрахунків на етапі попереднього аналізу і проектування, де вимагається швидкість і не висока точність результатів.
2. У випадках, коли необхідно дослідити систему при широкому спектрі зміни параметрів і властивостей, що дозволяє отримати базові дані для рекомендацій щодо подальшого проектування.

3. Під час вирішення завдань оптимального синтезу систем під час проектування нових систем.

В разі, коли аналіз математичної моделі аналітичними методами стає неможливим або невиправданим через складність алгоритмів, можуть бути використані імітаційні методи. Ці методи базуються на створенні імітаційних моделей, які описують процеси в системі у вигляді послідовності операцій та взаємодії між елементами. Імітаційні методи дозволяють враховувати властивості окремих елементів і отримувати результати, описуючи ефективність всієї системи. Такі методи зручні при складних обчисленнях, де аналітичні методи неефективні або неможливі через обмеження на точність і стійкість алгоритмів до похибок.

При створенні імітаційних моделей широко використовується метод статистичних випробувань, також відомий як метод Монте-Карло. Процедура побудови і аналізу імітаційних моделей, використовуючи цей метод, отримала назву статистичне моделювання. В рамках статистичного моделювання збираються статистичні дані щодо характеристик модельованої системи.

Основною перевагою імітаційного моделювання є його універсальність, яка полягає в здатності досліджувати системи будь-якої складності з будь-яким рівнем деталізації. Ця універсальність особливо важлива для систем із стохастичним характером функціонування, оскільки вона дозволяє вивчати властивості систем за будь-яких законів розподілу випадкових величин, що характеризують навантаження на систему.

Єдиним обмежуючим фактором для застосування імітаційного моделювання є продуктивність комп'ютера, на якому виконуються імітаційні експерименти. Чим складніша система, більше в ній елементів і зв'язків, тим потужніший комп'ютер потрібен для виконання імітаційних обчислень. Ця потужність включає не тільки швидкість обробки процесором, але і обсяг оперативної пам'яті, а іноді і високі вимоги до продуктивності та обсягу зовнішньої пам'яті.

Імітаційне моделювання має свої обмеження, які обмежують його застосування. Один з таких недоліків полягає в тому, що результати імітаційного моделювання є приватними і не вказують на залежності між характеристиками

функціонування системи і параметрами її структурно-функціональної організації, а лише визначають їх в окремих точках.

Крім того, імітаційне моделювання може бути ефективним інструментом у процесі проектування лише у випадку, коли потрібно порівняти кілька варіантів структури системи та вибрати найкращий. Проте вирішення задачі оптимального синтезу складних систем з великою кількістю параметрів структури і навантаження практично стає неможливим або супроводжується значними витратами часу і ресурсів через їх велику розмірність.

Імітаційне моделювання зазвичай використовується в таких ситуаціях:

- Для виконання оціночних розрахунків на етапі попереднього аналізу та проектування, коли не потрібна висока точність результатів.

- Для вивчення системи в широкому діапазоні зміни параметрів та властивостей, особливо якщо це може бути корисним для формування рекомендацій щодо проектування.

- Для вирішення завдань оптимального синтезу системи під час проектування нових систем.

Для дослідження та проектування складних систем із стохастичним характером функціонування найбільш ефективним є комбінований підхід, який об'єднує аналітичні та імітаційні методи. Це дозволяє отримати комплексну інформацію про систему та забезпечити високу точність результатів.

Автоматизація проектування використовує комп'ютери та спеціальні програми для оптимізації процесу розробки систем. Вона допомагає уникнути суб'єктивних оцінок, покращити якість проектної документації, зменшити час проектування і вибрати найкращий або оптимальний варіант системи.

Методи та засоби автоматизації проектування різняться в залежності від характеру і призначення проєктованих систем. Вони особливо корисні при створенні великих і складних технічних систем з численними елементами та складними зв'язками між ними, наприклад, обчислювальних систем і комп'ютерних мереж. Вони допомагають визначити конфігурацію системи, технічні параметри пристроїв, розрахувати їх продуктивність, надійність і економічну ефективність.

## 1.4. Формування послідовності проектних процедур

Етапи проектування складаються зі спеціалізованих проектних процедур, які завершуються окремими частковими проектними рішеннями. Поданий на (рис. 1.9) типовий послідовний порядок таких проектних процедур вказує на один із етапів низхідного проектування.

На попередньому етапі вирішуються завдання, властиві ієрархічному рівню "i". Один з результатів вирішення цих завдань на етапі низхідного проектування - це формулювання технічного завдання для проектування системи на рівні "(i+1)".

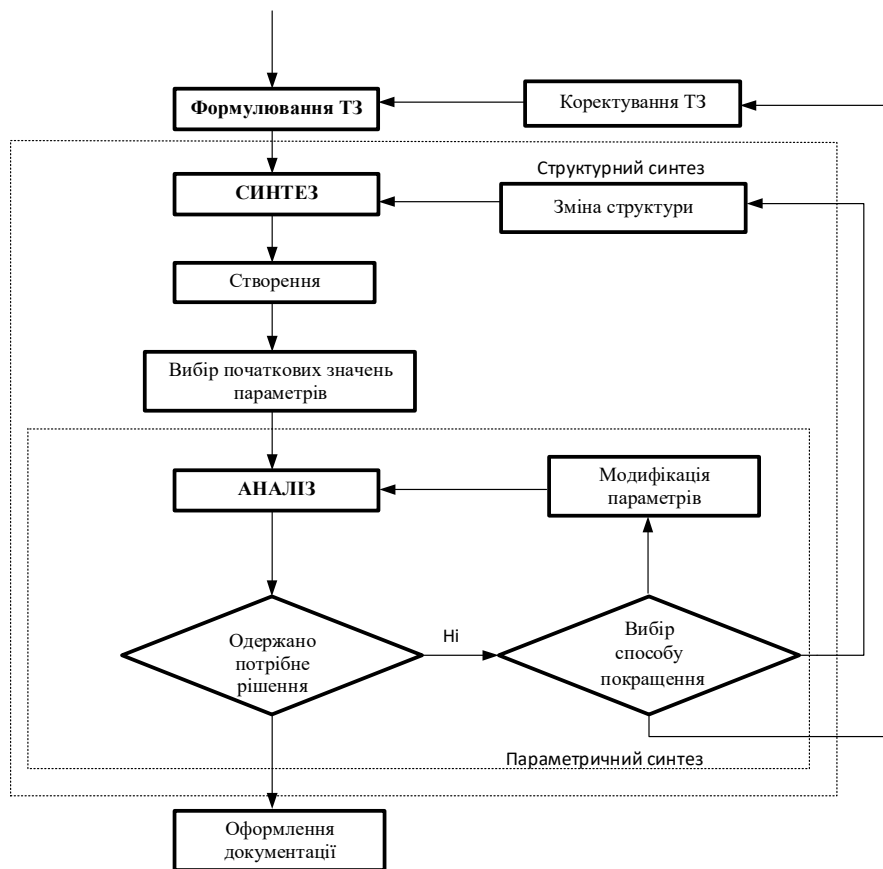


Рис.1.9. Послідовність проектних процедур

Проектування системи починається з синтезу початкового варіанту її структури. Для оцінки цього варіанту створюється математична модель, побудована на основі експериментальних даних про об'єкт.

Після визначення початкових значень параметрів елементів проводиться аналіз варіанту, що дозволяє його оцінити. Оцінка зазвичай включає в себе перевірку відповідності умовам працездатності системи, визначеним в технічному завданні. Якщо умови працездатності виконуються, то отримане проектне рішення

системи " $(i+1)$ " рівня фіксується, описується у відповідній формі і формулюється технічне завдання на проектування елементів системи наступного рівня. У випадку незадовільного результату вибирається один з можливих шляхів для покращення проекту.

Зазвичай, найпростіше змінювати числові значення внутрішніх параметрів елементів системи. Послідовність процедур, яка включає модифікацію множини внутрішніх параметрів, аналіз і оцінку отриманих результатів, називається параметричним синтезом.

Якщо ці модифікації спрямовані на пошук найкращого значення певного показника якості, то параметричний синтез стає оптимізацією. Проте, якщо за допомогою параметричного синтезу не можна досягти прийнятого рівня виконання умов працездатності, то вдається до іншого підходу, який передбачає модифікацію структури системи.

На цьому етапі створюється новий варіант структури, для якого знову проводяться процедури моделювання та параметричного синтезу. Якщо цей спосіб також не призводить до прийнятого проектного рішення, то постає питання про коригування технічного завдання, яке було сформульоване на попередньому етапі (рівні) проектування.

Це коригування може вимагати повторного виконання низки процедур на  $i$ -го ієрархічному рівні, що визначає ітераційний характер проектування.

Можна спостерігати характерну особливість взаємозв'язку між проектними процедурами аналізу і синтезу на (рис. 1.10). Ця особливість виявляється в тому, що процедура аналізу вкладена в процедуру оптимізації (параметричного синтезу), а процедура оптимізації вкладена в процедуру синтезу, об'єднуючи структурний і параметричний синтез.



Рис.1.10. Вкладеність процедур синтезу та аналізу

Вкладеність означає, що для виконання одного етапу оптимізації потрібно виконати багато разів процедуру аналізу, і навпаки, для вирішення задачі синтезу потрібно виконати багато разів процедуру оптимізації. Очевидно, що такий самий характер взаємодії мають і процедури аналізу.

Ця особливість означає, що процес синтезу проектного рішення на певному етапі проектування може потребувати великої кількості варіацій аналізу.

Базові компоненти забезпечення автоматизованого проектування наведені на (рис. 1.11).



Рис. 1.11. Базові компоненти забезпечення

Математичне забезпечення включає в себе набір математичних моделей, методів та алгоритмів, призначених для розв'язання завдань автоматизованого проектування (рис. 1.12).

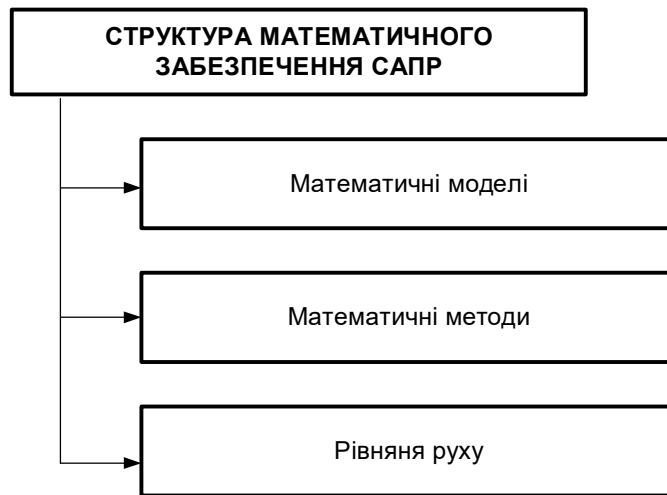


Рис. 1.12. Структура математичного забезпечення

Математична модель - це група математичних об'єктів та їх взаємозв'язків, які відображають деякі властивості модельованого об'єкта чи процесу. Важливо зазначити, що математична модель не обов'язково повинна бути повністю ідентичною оригіналу, адже її головне призначення полягає в упрощенні і уявленні досліджуваного явища або процесу для подальшого математичного аналізу та дослідження. У випадках, коли необхідно врахувати більші деталі та властивості оригіналу, рівень складності математичної моделі може зростати. Таким чином, в процесі проектування технічних систем і процесів використовуються математичні моделі різних рівнів деталізації та складності, в залежності від поставлених завдань та потреб дослідження.

При математичному моделюванні важливими компонентами є наступні елементи:

1. Рівняння руху. Це рівняння, яке враховує очікувані умови експлуатації об'єкта. Воно описує динаміку об'єкта та його зміну в часі.

2. Умови однозначності. Це співвідношення, що враховують вплив фізичних констант, розмірів виробу, початкових і граничних умов. Вони допомагають забезпечити однозначність рішення задачі.

3. Рівняння фізичних процесів. Ці рівняння описують фізичні процеси взаємодії об'єкта з середовищем. Вони можуть включати в себе різноманітні фізичні закони та явища, що відбуваються в системі.

4. Рівняння напруженого стану. Ці рівняння описують напружений стан елементів виробу. Вони допомагають визначити, як об'єкт реагує на зовнішні навантаження.

5. Рівняння, що описують зв'язки з економічною ефективністю. Ці рівняння встановлюють зв'язки між критерієм економічної ефективності та фізичними властивостями об'єкта. Вони допомагають оцінити, наскільки ефективною є конкретна конфігурація системи.

Ці компоненти математичної моделі допомагають у розумінні та аналізі поведінки системи під впливом різних факторів. На основі цього математичного забезпечення будуються пакети прикладних програм (ППП) (рис. 1.13) та інші інструменти автоматизованого проектування, які сприяють оптимізації та полегшують процес проектування.

Поділяючи процес створення пакетів прикладних програм (ППП) на етапи, можна уявити його як піраміду, де кожен рівень має свою специфічну роль. На найнижчому рівні розташовані математичні моделі та методи, що служать основою для розуміння проблеми. На наступному рівні знаходяться алгоритми, які визначають послідовність дій для вирішення задачі на основі математичних моделей і методів. Потім йдуть обчислювальні алгоритми, які перетворюють абстрактні алгоритми в конкретні числові операції.



Рис. 1.13. Структура програмного забезпечення



На останньому рівні розташовані програми, які вже представляють собою конкретні реалізації алгоритмів. Досвідчені програмісти можуть об'єднувати два верхні рівні, спочатку розробляючи зручний обчислювальний алгоритм, а потім перетворюючи його в програму за допомогою відповідної мови програмування.

Зазвичай, процес розробки програмної продукції складається на 70% з роботи над математичними моделями та методами, які є фундаментальною основою, і на 30% з написання конкретних програм.

Щодо операційної системи, вона включає кілька складових, таких як керуюча програма, яка відповідає за керування всіма обчислювальними процесами, програма для обробки мовлення, яка полегшує введення завдань в комп'ютер за допомогою перетворення прикладних програм у формат, зрозумілий для ЕОМ, і обслуговуюча програма, яка забезпечує стандартні операції обслуговування, такі як компіляція, сортування, об'єднання даних, редагування міжпрограмних зв'язків та операції з файлами.

## РОЗДІЛ 2 ФОРМУВАННЯ АЛГОРИТМУ ПРОЕКТУВАННЯ СИЛОВОГО СТАБІЛІЗАТОРА МАЛОГО КОСМІЧНОГО АПАРАТА

### 2.1. Визначення функціонального складу системи стабілізації МКА

Для успішної роботи системи стабілізації необхідно, щоб об'єкт був оснащений виконавчими механізмами, які можуть створювати управляючі моменти з великою потужністю і при цьому ефективно використовувати енергію. Управління об'єктом можливе завдяки використанню гіроскопів.

Припустимо, що на борту МКА встановлений двоступеневий гіроскоп з кінетичним моментом  $H$ . Для розуміння, припустимо, що вісь прецесії гіроскопа співпадає з віссю  $OX$ , а вектор  $H$  знаходиться у вихідному положенні в площині орбіти. За спільної дії корпусу апарату, ця механічна система утворює триступеневий гіроскоп, де корпус МКА виступає як зовнішня рамка. Однією з особливостей такого триступеневого гіроскопа є його прецесія під дією зовнішніх моментів. Це означає, що для створення моменту, який керує об'єктом, достатньо прикласти момент  $M$  до вісі прецесії двоступеневого гіроскопа. Під впливом цього моменту апарат розпочне обертатися з певною кутовою швидкістю

$$\omega_g = \frac{M}{H}.$$

У цьому прикладі, використовуючи двоступеневий гіроскоп, можливо вирішити завдання розгортання МКА навколо осі тангажу.

Якщо на МКА діє збурюючий момент  $M_z$ , то гіроскоп, для компенсації цього моменту, розпочне прецесію у напрямку об'єднання (найкоротшого шляху) векторів  $H$  і  $M_z$ . Як тільки вектор  $H$  вирівнюється з віссю  $OZ$ , гіроскоп втрапить можливість протистояти зовнішнім моментам.

Явно видно, що для забезпечення управління моментами стабілізації по трьом осям необхідно мати, як мінімум, двоступеневий гіроскоп. На (рис. 2.1) представлена функціональна схема запропонованої активної силової системи стабілізації МКА на гіроскопах.

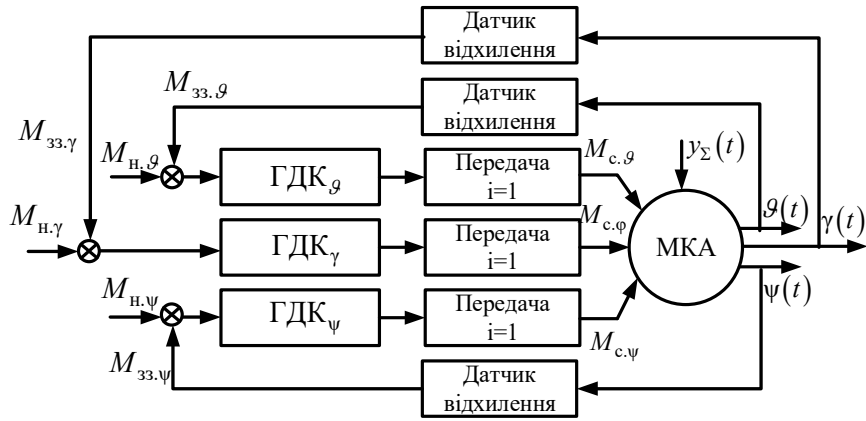


Рис. 2.1. Функціональна схема силової системи стабілізації

Напрямок об'єкта керування, а саме МКА, визначається за допомогою гіроскопічних датчиків кута, які розташовані безпосередньо на об'єкті керування. Вхідними сигналами є вказані задані моменти наведення для кутів тангажу  $M_{н.φ}$ , крену  $M_{н.γ}$  і рискання  $M_{н.ψ}$ .

Якщо об'єкт керування відхиляється від заданого напрямку  $φ, γ, ψ$  під впливом збурень  $y_Σ(t)$ , то датчики вимірюють це відхилення і перетворюють його на відповідні моменти зворотного зв'язку. Ці сигнали використовуються для генерації моментів силової стабілізації гіроскопів  $M_{с.і}(t)$ , які протидіють моменту збурення  $y_Σ(t)$  і зменшують розсіювання об'єкта керування від заданого напрямку. Збільшення моменту стабілізації допомагає досягти більш точної стабілізації об'єкта керування.

Для компенсації впливу окремих інтенсивних зовнішніх збурень в системах стабілізації можуть використовуватися спеціальні канали регулювання, спрямовані на компенсацію цих збурень.

## 2.2. Моделювання силової системи стабілізації МКА

Погляньмо на МКА як на жорстке тіло, яке в результаті прикладених до нього сил виконує обертально-поступальний рух. Іншими словами, центр мас МКА рухається в інерціальному просторі по фіксованій траєкторії, а водночас сам МКА здійснює обертальні рухи навколо свого центра мас. Для керування обертальним рухом МКА використовується система стабілізації.

Рівняння руху симетричного МКА відносно центра мас у зв'язаній системі координат мають стандартну форму динамічних рівнянь Ейлера:

$$J_x \frac{d^2\vartheta}{dt^2} = -M_{xк} + M_{xзб},$$

$$J_y \frac{d^2\gamma}{dt^2} = -M_{yк} + M_{yзб},$$

$$J_z \frac{d^2\psi}{dt^2} = -M_{zк} + M_{zзб}.$$

де,  $J_x, J_y, J_z$  головні центральні моменти інерції МКА відносно відповідних осей;

$M_{xк}, M_{yк}, M_{zк}$  та  $M_{xзб}, M_{yзб}, M_{zзб}$  проекції керуючого та збурюючого моментів на відповідні осі;

$$\omega_x = \frac{d\vartheta}{dt}, \omega_y = \frac{d\gamma}{dt}, \omega_z = \frac{d\psi}{dt} \text{ компоненти миттєвої кутової швидкості МКА}$$

вздовж зв'язаних осей.

Отже, за умови, що кутові швидкості і кутові відхилення МКА від заданої орієнтації малі, можна розглядати рух космічного апарата на невеликому часовому інтервалі як три незалежні рухи по відношенню до відповідних осей.

Згідно з рівняннями руху, можемо представити структурну модель МКА як об'єкта керування системи орієнтації та стабілізації. Структурну схему можна побачити на (рис. 2.2).

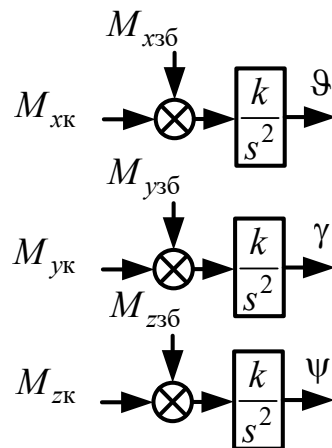


Рис 2.2. Структурна схема МКА як об'єкта керування

На цій схемі використовуються позначення  $k_x = \frac{1}{J_x}$ ,  $k_y = \frac{1}{J_y}$ ,  $k_z = \frac{1}{J_z}$  - це коефіцієнти підсилення для кожної з осей керування.

Додамо до наших досліджень МКА, який має гіродін як невід'ємну складову частину. Гіродін (див. рис. 2.3) є обертовим інерціальним пристроєм, що застосовується для високоточної стабілізації невеликих космічних апаратів та забезпечення їх точної орієнтації під час польоту. Це трьохступінчастий силовий гіроскоп, який діє як гіростабілізатор. Управління орієнтацією МКА здійснюється завдяки тому, що корпус малого космічного апарату, на якому розміщений гіродін, виступає в ролі зовнішньої рамки.

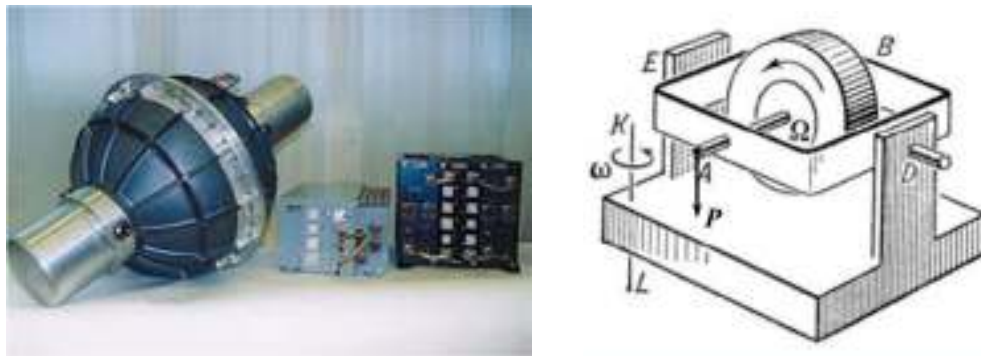


Рис. 2.3. Гіродін

Коли на внутрішню рамку гіродіна діє момент корекції  $M_{\text{кор}}$ , зовнішня рамка, тобто корпус МКА, розпочинає прецесіювати. Це призводить до того, що корпус космічного корабля змушений змінювати свою орієнтацію в просторі, виправляючи її.

Рівняння руху зовнішньої рамки гіродіна, а відповідно і МКА, складається з двох складових. По-перше, це зовнішній момент  $M_x$ , який виникає в результаті зовнішніх впливів на МКА. По-друге, це моменти, які протидіють цьому зовнішньому моменту.

Один з таких моментів, який протидіє зовнішньому моменту, - це інерційний момент МКА та гіродіна, а саме:

$$M_{jx} = J_x \frac{d\omega_x}{dt},$$

де -  $J_x$  момент інерції МКА та ротора гіродіна відносно осі  $x$ .

Другий момент виникає від опору сил тертя МКА в просторі:

$$M_{\text{тр}x} = f_x \omega_x \approx 0,$$

де -  $f_x$  коефіцієнт в'язкого тертя, який дорівнює нулю у космосі  $f_x \approx 0$ .

Зовнішньому моменту також протидіє гіроскопічний момент, який виникає внаслідок відносного руху  $\Omega_p$  ротора гіродіна і переносного руху  $\omega_y$  ротора гіродіна:

$$M^{(y)}_{\text{г}x} = H\omega_y = J_p \Omega_p \omega_x.$$

Отже, можемо виразити рівняння моментів, що діють на зовнішню рамку гіродіна - МКА, у такому вигляді:

$$J_x \frac{d\omega_x}{dt} + H\omega_y = M_x$$

або у вигляді операторів:

$$J_x s \omega_x = M_x - H\omega_y \Rightarrow J_x s^2 \vartheta = M_x - H\omega_y.$$

Використовуючи це рівняння, ми можемо визначити передатну функцію зовнішньої рамки гіродіна - МКА:

$$W_{\text{нр}}(s) = \frac{\vartheta}{M_x - H\omega_y} = \frac{1/J_x}{s^2} = \frac{k_x}{s^2}$$

і побудувати структурну схему (рис. 2.4).

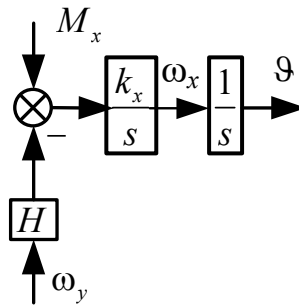


Рис. 2.4. Структурна схема зовнішньої рамки гіродіна

На схемі  $k_x = \frac{1}{J_x}$  – статичний передатний коефіцієнт між зовнішньою рамкою

та МКА.

Внутрішня рамка піддана впливу наступних моментів:

- зовнішнього моменту  $M_y$ ;

- інерційного моменту ротора і внутрішньої рамки:

$$M_{jy} = J_y \frac{d\omega_y}{dt},$$

де  $J_y$  - момент інерції ротора і внутрішньої рамки відносно осі  $y$ ;

- моменту від сил тертя в опорі внутрішньої рамки:

$$M_{\text{тр}y} = f_y \omega_y,$$

де  $f_y$  - коефіцієнт в'язкого тертя в опорі внутрішньої рамки;

- гіроскопічного моменту, що виникає внаслідок відносного  $\Omega_p$  і переносного  $\omega_x$  руху ротора:

$$M^{(x)}_{\text{г}y} = H\omega_x = J_p \Omega_p \omega_x.$$

На практиці в опорах використовується сухе тертя. Момент тертя в опорі майже сталий за амплітудою і завжди діє проти напрямку швидкості  $\omega_y$ .

Враховуючи, що рух рамки здійснюється за гармонічним законом

$$\omega_y = \omega_{ym} \sin \frac{2\pi}{T} t,$$

ми можемо виразити закон зміни моменту тертя у вигляді прямокутної періодичної функції тієї ж частоти  $\frac{2\pi}{T}$  (рис. 2.5).

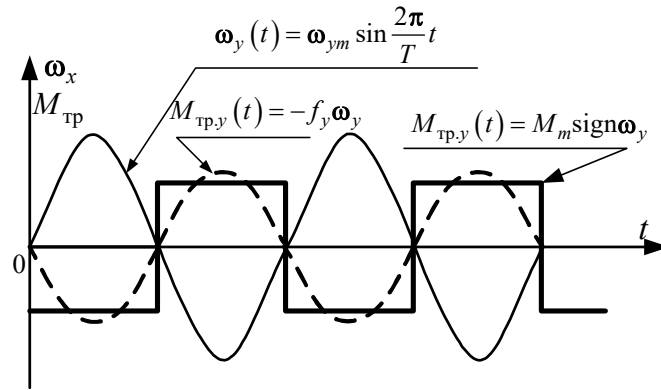


Рис. 2.5. Момент тертя в опорі рамки гіродіну

Закон зміни моменту тертя з плином часу має такий вигляд

$$M_{\text{тр},y} = M_m \text{sign} \omega_y.$$

Рівняння моментів, що діють на внутрішню рамку, можна записати

$$J_y \frac{d\omega_y}{dt} + M_m \text{sign} \omega_y - H\omega_x = M_y,$$

або у вигляді операторів, враховуючи, що  $\omega_y = \frac{d\beta}{dt}$ ,

$$J_y s^2 \beta = M_y + H\omega_x - M_m \text{sign} \omega_y,$$

де  $\beta$  - кут повороту внутрішньої рамки гіродіна.

Отримане рівняння є значною нелінійним. Виходячи з нього, ми можемо визначити передатну функцію внутрішньої рамки гіродіна

$$W_{\text{вр}}(s) = \frac{\beta}{M_y + H\omega_x - M_m \text{sign} \omega_y} = \frac{1/J_y}{s^2} = \frac{k_y}{s^2},$$

де  $k_y = \frac{1}{J_y}$  - передатковий коефіцієнт для внутрішньої рамки гіродіна.

За допомогою цієї передатної функції ми можемо побудувати структурну схему для внутрішньої рамки гіродіна. Структурну схему показано на (рис. 2.6).



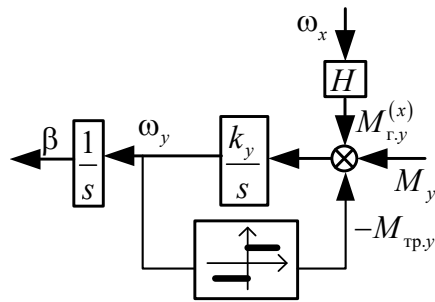


Рис. 2.6. Структурна схема внутрішньої рамки гіродіна

Об'єднавши структурні схеми рамок гіродіна, ми отримуємо повну структурну схему МКА з гіродіном. Цю схему представлено на (рис. 2.7).

Аналогічним чином можна отримати моделі МКА з гіродінами для інших площин.

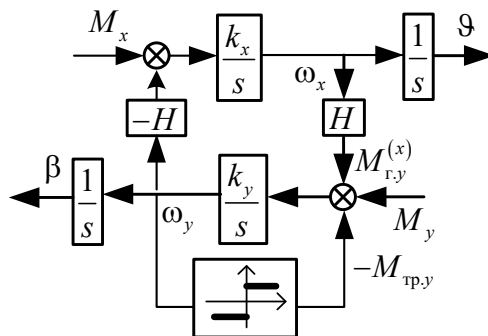


Рис. 2.7. Структурна схема МКА з гіродіном

Для виконання функцій керуючого пристрою МКА, гіродін оснащується електромагнітом, який генерує момент і прикладає його до внутрішньої рамки гіродіна. Роботу цього магніта, яка вимагає високої точності, можна описати системою рівнянь

$$\left. \begin{aligned} L \frac{di}{dt} + Ri &= U, \\ M_H &= C_M \frac{U}{R_p + R_{пер}} i \cos \alpha = k_M i \cos \alpha \end{aligned} \right\},$$

де  $\alpha$  - кут повороту ротора електромагніту.

Після цього передатна функція магніта матиме вигляд

$$W_{\text{ем}}(s) = \frac{M_{\text{н}}}{i \cos \alpha} = \frac{1/R}{Ts + 1} \cdot k_{\text{м}}, \text{ де } T = \frac{L}{R}.$$

Враховуючи роботу електромагніта на лінійній ділянці косинусоїди, ми можемо побудувати структурну схему для електромагніта (рис. 2.8).

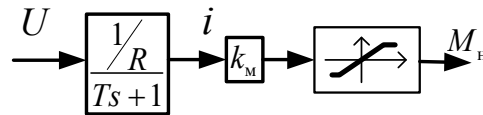


Рис. 2.8. Структурна схема електромагніта

Об'єднавши передатні функції цих елементів, отримуємо загальну математичну модель системи стабілізації МКА, яка представлена на (рис. 2.9).

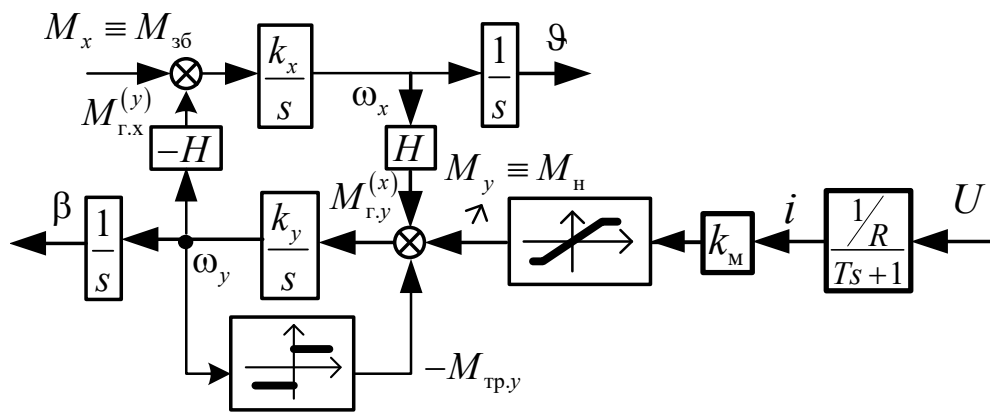


Рис. 2.9. Математична модель силової системи стабілізації МКА

Після деяких еквівалентних перетворень ми отримуємо розрахункову модель нелінійної силової системи стабілізації МКА з гіродінами, яка наведена на (рис. 2.10).

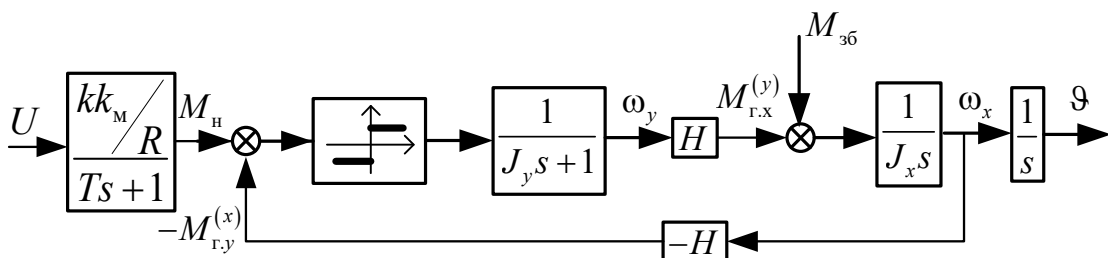


Рис. 2.10. Розрахункова модель нелінійної силової системи стабілізації МКА на гіродінах

Враховуючи обмежений діапазон обертання ротора електромагніту, ми можемо прийняти лінійну статичну характеристику зі значенням крутості  $k = 0,992$ .

### **2.3. Дослідження та опис збуреного руху МКА**

Опис і вивчення руху МКА та небесних тіл в Сонячній системі на основі рішення задачі двох тіл є важливим етапом при дослідженні реальних рухів об'єктів у космосі. Задача двох тіл виступає як еталон для аналізу і прогнозу руху об'єктів різної природи, які піддаються впливу гравітаційних сил.

У реальних умовах немає ідеальних незбурених орбіт. Об'єкти в космосі взаємодіють між собою гравітаційно, що викликає зміни в їхніх траєкторіях. Наприклад, Земля притягується до Сонця, і ця гравітаційна сила впливає на рух МКА, як і на інші об'єкти у Сонячній системі. При цьому, інші планети також впливають на рух Землі та МКА.

Рух МКА, під впливом всіх цих гравітаційних сил, є збуреним рухом. Фактичний рух МКА не є ідеальною орбітою, як в задачі двох тіл, оскільки під впливом різних сил, відомих і невідомих, траєкторія МКА може відхилитися від передбаченої.

Вивчення обуреного руху є важливим, оскільки воно дозволяє точніше визначити фактичний рух МКА і передбачити можливі відхилення від ідеальних траєкторій. Це необхідно для планування та виконання місій у космосі, а також для забезпечення безпеки і точності навігації об'єктів у Сонячній системі.

Можна виділити три основні категорії факторів, що викликають обурення руху МКА:

#### **1. Вплив гравітаційних сил і негравітаційних факторів:**

- Вплив нецентральності поля сил тяжіння основного тіла, що притягує. Це обумовлено відмінністю форми тіла від ідеальної сфери і нерівномірним розподілом мас усередині нього.

- Вплив гравітаційного тяжіння Сонця, Місяця і інших планет.

- Вплив світлового тиску і електродинамічних сил, що виникають при русі МКА в магнітному полі Землі або планет.

- Дія додаткових сил, наприклад, аеродинамічна сила опору атмосфери планети, особливо для МКА на низьких орбітах.

2. Відхилення початкових умов польоту МКА.

3. Додаткові сили випадкового характеру, пов'язані з управлінням рухом МКА за допомогою коригувальних імпульсів зміни швидкості та іншими факторами.

Аналіз наукових джерел вказує на те, що природа гравітаційних збурень пов'язана з законами всесвітнього тяжіння. Розглянемо маленький космічний апарат (рис. 2.11), який має два однакових об'єми з однаковими масами  $m_1 = m_2$ , розташовані на відстані  $l$  від центра маси.

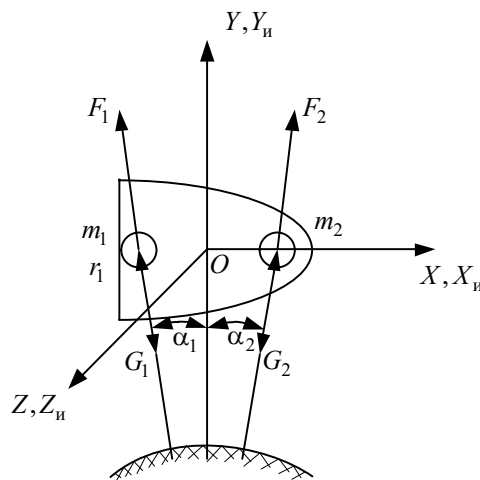


Рис. 2.11. Схема гравітаційних сил

Під час обертання МКА навколо осі  $OZ$  проти годинникової стрілки сили  $G_1$  і  $G_2$  вже не будуть однаковими. Тепер вони  $r_1 < r_2$ ,  $G_1 < G_2$ , тому момент, обумовлений нерівністю сил  $G_1$  і  $G_2$ , знайдемо з виразу:

$$M_{\text{гр}} = (G_1 \cos \alpha_1 - G_2 \cos \alpha_2) l$$

де  $\alpha_1, \alpha_2$  - кути між радіусами-векторами і віссю .

Цей момент спрямований так, що він схильний розвертати апарат навколо своєї вертикальної осі. Існують спеціальні формули, що дозволяють розрахувати величину гравітаційних збурень. У першому наближенні, компоненти гравітаційного моменту в проєкціях на координатні осі зв'язаної системи виявляються наступними:

$$\left. \begin{aligned} M_x &= -3\omega_0^2(J_z - J_y)\gamma; \\ M_y &\approx 0; \\ M_z &= -3\omega_0^2(J_x - J_y)\vartheta, \end{aligned} \right\}$$

де - кутова швидкість МКА, який переміщується по круговій орбіті.

Вплив розглянутого обурення на рух МКА проявляється з плином часу. Ці обурення, які призводять до постійних змін на орбіті, називаються віковими, оскільки зі збільшенням часу польоту ці обурення накопичуються.

Якщо корпус МКА має провідну оболонку, то під час його руху в магнітному полі Землі в оболонці МКА генеруються електричні струми. Ці струми створюють результатуєчий магнітний потік  $B$ , який взаємодіючи з магнітним полем Землі  $B_e$ , призводить до виникнення магнітного обурюєчого моменту  $M_M$  (рис. 2.12). Величина моменту  $M_M$  залежить від поточного положення МКА на орбіті і відносного обертання навколо центра мас.

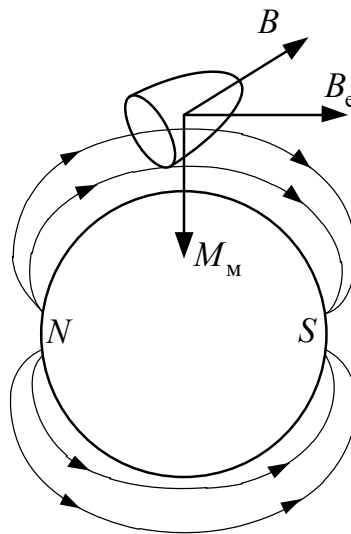


Рис. 2.12. Магнітний збурюєчий момент

Складові магнітного обурюєчого моменту в проєкціях на осі зв'язаної системи координат можуть бути обчислені для кожного конкретного положення КА:

$$M_M = B \times B_e.$$

Зазначимо, що магнітне поле самого об'єкта формується також завдяки електричним струмам, що протікають через його спеціальне обладнання.

На висоті понад 150-200 км атмосфера стає значно розрідженішою, і, відповідно, опір МКА, що рухається, стає дуже слабким. Але через те, що сила опору діє постійно, навіть при своїй невеликій величині вона може значно змінювати елементи орбіти протягом тривалого часу.

Аеродинамічний обурюючий момент виникає, коли центр мас (ЦМ) та центр тиску (ЦТ) аеродинамічних сил не збігаються (рис.2.13).

З малюнка можна зрозуміти, що аеродинамічна сила  $Q$  викликає виникнення обурюючого моменту  $M_a$ . Проекції цього моменту на осі зв'язаної системи координат можна розрахувати за допомогою формули:

$$M_{ai} = m_i \frac{\rho V^2}{2} S_M L, (i = x, y, z),$$

де  $m_i$  - аеродинамічні коефіцієнти, що залежать від форми МКА, кутів атаки і ковзання;  $\rho$  - щільність повітря на висоті польоту КА;  $V$  - швидкість польоту щодо повітряного середовища;  $S_M$  - площа миделевого перетину;  $L$  - довжина корпусу МКА.

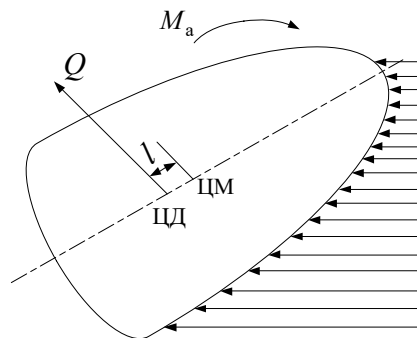


Рис. 2.13 Схема аеродинамічних збурень

Якщо замінити набігаючий аеродинамічний потік потоком сонячної радіації в формальному сенсі, стає очевидним ще один чинник, який спричиняє виникнення збурюючих моментів. Ці моменти слід враховувати на висотах понад  $h \geq 500$  км.

Збурюючі моменти, обумовлені тиском елементарних частинок, що випромінюються Сонцем, можуть бути обчислені за допомогою такої формули:

$$M_c = p_c S_{ct} l \sin \nu,$$

де:  $p_c$  - тиск сонячної радіації;  $S_{ct}$  - різниця площ поверхні МКА, освітленої справа і зліва щодо осі стабілізації;  $l$  - відстань між центром мас і центром тиску сонячних променів;  $\nu$  - кут між напрямком на Сонце і поздовжньою віссю МКА.

Вплив збурень на рух МКА може мати різні прояви, і вони поділяються на дві головні категорії: періодичні та вікові. Вікові збурення накопичуються з плином часу. Періодичні обурення повторюються через певний інтервал часу. До періодичних також відносять короткі та довгі періоди. Довгі періоди спостерігаються на великих часових інтервалах, тому іноді їх розглядають як вікові збурення.

Розглянемо особливості збурень, що викликаються тиском сонячного світла. Силу сонячного тиску можна розрахувати за такою формулою:

$$q = q_0 \left( \frac{r_0}{r} \right)^2,$$

де:  $q_0 = 4,4 \cdot 10^{-6} \frac{H}{m^2}$  - світловий тиск на відстані від Землі;  $r_0$  - середній радіус орбіти Землі;  $r$  - відстань від МКА до Сонця.

Дослідження свідчать, що на висоті менше  $h < 500$  км світловий тиск має менший вплив на рух космічного апарата, ніж опір атмосфери. Тому при проведенні балістичних розрахунків тиск сонячного світла не враховується. Між висотами  $500 \text{ км} < h < 700 \text{ км}$  вплив світлового тиску і опору атмосфери приблизно однаковий. Однак на висотах понад  $h > 700$  км світловий тиск стає більш важливим, ніж опір атмосфери.

#### **2.4. Вибір апарату опису нелінійних систем**

Нелінійні системи мають ряд характеристик, які відрізняють їх від лінійних систем і потребують спеціальних методів аналізу та синтезу. Таким методом, на нашу думку, є гармонійна лінеаризація (з використанням описової функції). Цей метод ґрунтується на тому, що нелінійний елемент замінюється лінійним вузлом, параметри якого визначаються за наявності синусоїдального вхідного сигналу, при умові, що амплітуди перших гармонік на виході нелінійного елемента та відповідної лінійної ланки рівні.

Нехай структурна схема нелінійної системи має форму, яку можна бачити на (рис. 2.14).

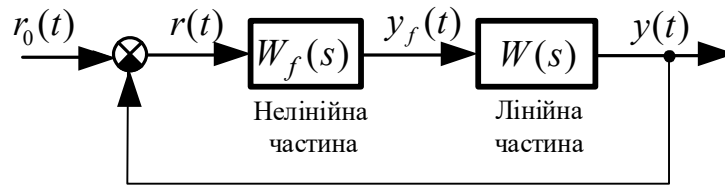


Рис. 2.14. Нелінійна система

Якщо припустити, що лінійна частина системи веде себе як низькочастотний фільтр і не передає вищі гармоніки, і якщо на вході нелінійної частини є синусоїдальний сигнал, то можна вважати, що вихідні коливання є гармонійними і можна розглядати лише їх першу гармоніку.

Давайте знайдемо передатну функцію нелінійного елемента

$$W_f = \frac{y_f(t)}{r(t)},$$

де  $r(t) = a_m \sin \omega t$ ;  $y_f(t) = F(a_m \sin \omega t)$ .

Розкладемо функцію  $y_f(t)$  в ряд Фур'є

$$y_f(t) = F(a_m \sin \omega t) = a_{m0} + \sum_{i=1}^k N_k \sin k\omega t + \sum_{i=1}^k C_k \cos k\omega t.$$

Обмежимо наше дослідження лише першою гармонікою розкладу нелінійного елемента, який має симетричну і непарну характеристику.

$$y_f(t) = F(a_m \sin \omega t) = N_1(a_m, \omega) \sin \omega t + C_1(a_m, \omega) \cos \omega t,$$

де  $N_1(a_m, \omega)$  та  $C_1(a_m, \omega)$  - коефіцієнти розкладу.

Врахувавши те, що  $\cos \omega t = \frac{1}{\omega} \cdot \frac{d \sin \omega t}{dt}$ , напишемо

$$W_f = \frac{y_f(t)}{x(t)} = \frac{N_1(a_m, \omega) \sin \omega t + \frac{1}{\omega} C_1(a_m, \omega) \frac{d}{dt} \sin \omega t}{a_m \sin \omega t}.$$



Замінімо  $\frac{d}{dt} \equiv s$ :

$$W_f = \frac{N_1(a_m, \omega)}{a_m} + \frac{C_1(a_m, \omega)}{a_m} \cdot \frac{s}{\omega}.$$

Знайдемо описуючу функцію або коефіцієнти гармонійної лінеаризації, замінюючи  $s$  на  $j\omega$

$$W_f(a_m, \omega) = \frac{N_1 + jC_1}{a_m} = \frac{N_1}{a_m} + j \frac{C_1}{a_m} = q + jq'.$$

У загальному випадку, описуюча функція залежить як від амплітуди, так і від частоти вхідної синусоїди нелінійного елемента. Враховуючи це, структурна схема нелінійної системи приймає такий вигляд (рис. 2.15).

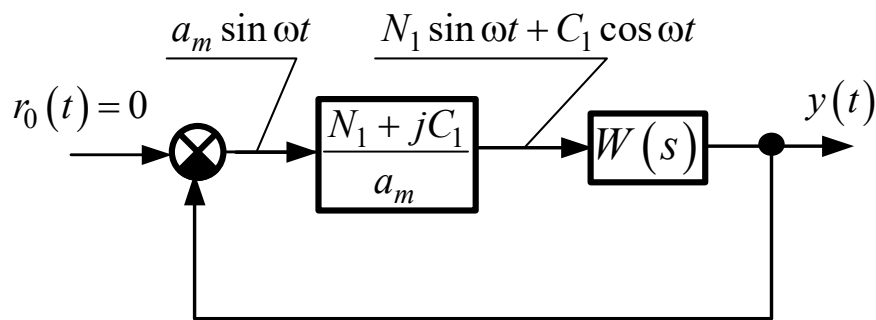


Рис. 2.15. Лінеаризована модель нелінійної системи

Отже, під час гармонійної лінеаризації нелінійна характеристика замінюється лінійною, крутизна якої залежить від амплітуди вхідного сигналу нелінійного елемента. При введенні сигналів різної амплітуди, нахил цієї прямої змінюється відповідно.

Для врахування нелінійності системи стабілізації МКА ми використовуємо таблиці коефіцієнтів гармонійної лінеаризації типових нелінійностей і знаходимо значення цих коефіцієнтів

$$\frac{N_1}{a_m} = q = \frac{2k}{\pi} \left( \arcsin \frac{b}{a_m} + \frac{b}{a_m} \sqrt{1 - \left( \frac{b}{a_m} \right)^2} \right)$$

Передатна функція нелінійного елемента типу сухого тертя набуває вигляд

$$W_f(a_m, \omega) = \frac{2k}{\pi} \left( \arcsin \frac{b}{a_m} + \frac{b}{a_m} \sqrt{1 - \left( \frac{b}{a_m} \right)^2} \right)$$

Обчислюємо передатні функції лінійної частини системи стабілізації МКА

$$W_x(s) = \frac{\mathfrak{G}}{M_H} = \frac{H}{J_x J_y s^2 + J_y s + H^2} \cdot \frac{1}{s};$$

$$W_y(s) = \frac{\mathfrak{G}}{M_y} = \frac{J_x s + 1}{J_x J_y s^2 + J_y s + H^2} \cdot \frac{1}{s}.$$

За допомогою методу гармонійної лінеаризації ми можемо в подальшому застосовувати класичні методи дослідження якості і стійкості системи стабілізації МКА.

## 2.5 Алгоритм автоматизації проектування

У процесі наших досліджень ми отримали нові наукові відкриття, які можна викласти у вигляді алгоритму. Цей алгоритм призначений для поліпшення ефективності при розв'язанні завдань, пов'язаних із проектуванням оптимальних систем стабілізації нелінійних систем МКА.

Основна мета цього алгоритму - надати дослідникам необхідні практичні знання, що дозволять їм самостійно працювати над автоматизацією проектування оптимальних систем стабілізації МКА.

Наша методика (рис. 2.16 - 2.17), дозволяє розбити процедуру проектування системи стабілізації МКА на окремі етапи. Кожен з цих етапів розв'язує окрему підзадачу. Такий підхід дозволяє нам концентрувати зусилля на кожній окремій підзадачі, яка може бути вирішена у вигляді окремої процедури або функції. Потім інформація передається від одного етапу до іншого.

Для повного розроблення цього алгоритму необхідно пройти через вісім етапів, чотири з яких є попередніми, і чотири - основними.

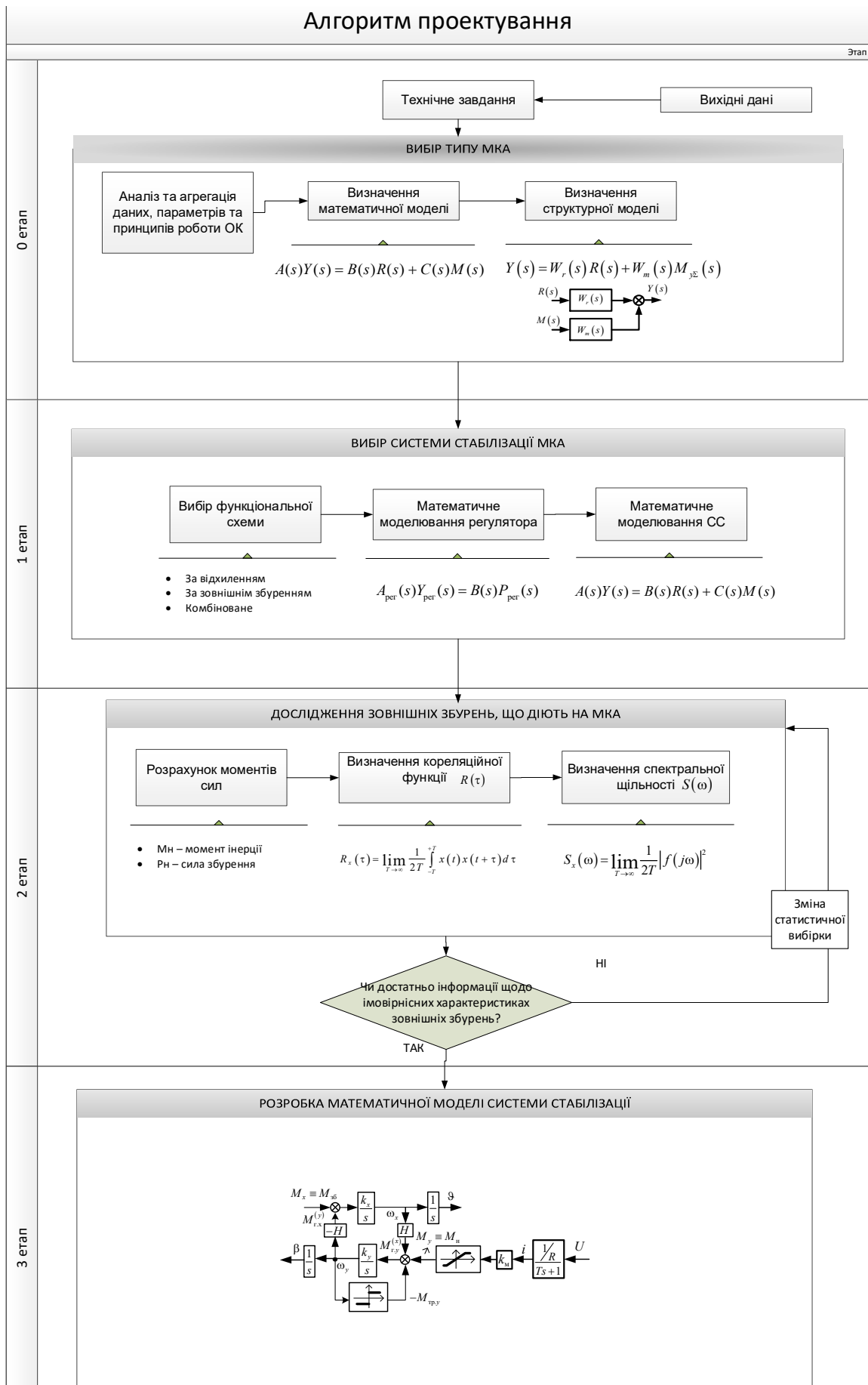
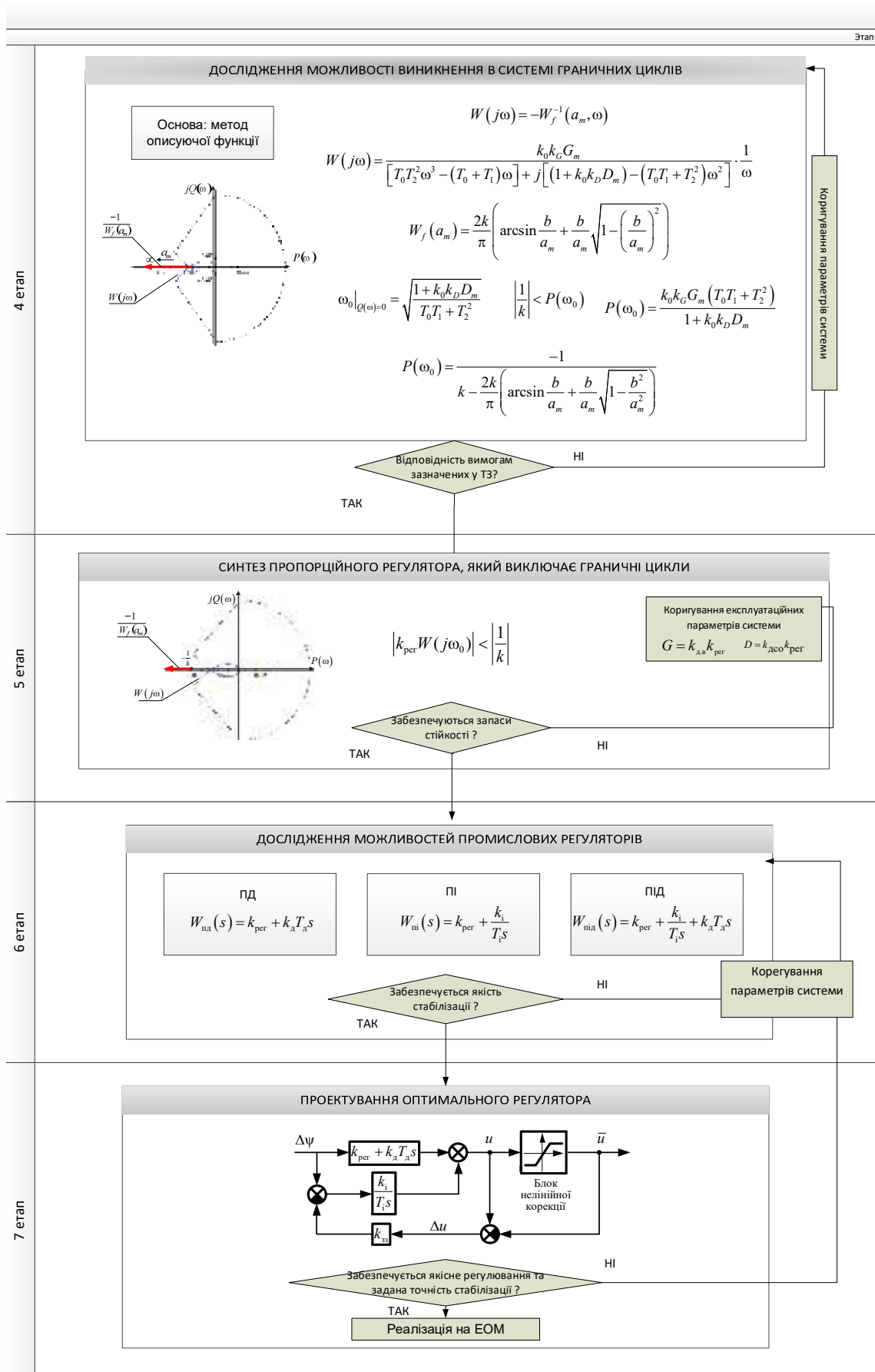


Рис. 2.16. Автоматизація проектування регулятора (етап 0 – 3)



До попередніх етапів нашого алгоритму відносяться такі кроки:

- Вибір об'єкта керування.
- Вибір системи стабілізації для об'єкта керування.
- Вивчення зовнішніх впливів і збурень, які діють на об'єкт керування.
- Розробка математичної моделі для системи стабілізації.

До основних етапів нашого алгоритму входять такі кроки:

- Аналіз можливості виникнення граничних циклів у системі.
- Створення пропорційного регулятора, який усуває граничні цикли.
- Дослідження можливостей використання існуючих промислових регуляторів.
- Проектування оптимального регулятора.

Перший крок в системі автоматизованого проектування - це побудова математичної моделі, яка найкраще відображає властивості реального об'єкта. Під час створення цієї моделі ми стараємося зберігати лише найбільш важливі параметри і спростити математичний опис процесу. Створення моделі відбувається за допомогою порівняння теорії і експерименту, і цей процес може бути ітеративним.

Завершальним етапом автоматизованого проектування є саме створення оптимальної нелінійної системи стабілізації.

Отже, наша розроблена і впроваджена автоматизація проектування має наступні переваги:

- Скорочує час проектування об'єкта.
- Створює реальний нелінійний об'єкт у віртуальному просторі ПК.
- Підвищує якість і точність його функціонування.
- Зменшує витрати на виробництво, зокрема на його стендові та натурні випробування.

Ключовою частиною ефективної автоматизації є її реалізація на електронних обчислювальних машинах, в нашому випадку, програмно-методичне забезпечення синтезу.

### РОЗДІЛ 3 МАТЕМАТИЧНЕ ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ ПРОЕКТУВАННЯ СИЛОВИХ СТАБІЛІЗАТОРІВ МКА

#### 3.1. Аналіз умов, при яких можуть виникати граничні цикли.

У розділі 2 була розроблена математична модель для системи стабілізації, яка має нелінійний характер. Зображення цієї моделі можна побачити (рис. 3.1).

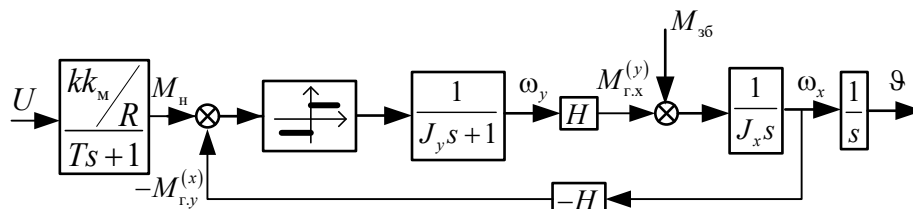


Рис. 3.1. Розрахункова модель нелінійної силової системи стабілізації МКА

Показано закон зміни моменту тертя в опорі рамки гірдину з плином часу

$$M_{\text{тр},y} = M_m \text{sign} \omega_y,$$

який відповідає характеристиці, ідеальному релейному вимикачу (сухе тертя)

$$z = \begin{cases} -z_{\max} & \text{при } x < 0 \\ +z_{\max} & \text{при } x > 0 \end{cases}.$$

Основною особливістю нелінійних систем є їхнє здатність генерувати граничні цикли, які є періодичними коливаннями без згасання. При цьому амплітуда цих коливань не залежить від зовнішніх впливів чи початкових умов. Граничний цикл може мати різні форми, не обов'язково синусоїдальні.

У нелінійних системах існує два типи граничних циклів: стійкі та нестійкі.

У стійкому граничному циклі амплітуда коливань відновлюється до попереднього значення після виникнення деякого збурення (рис. 3.2).

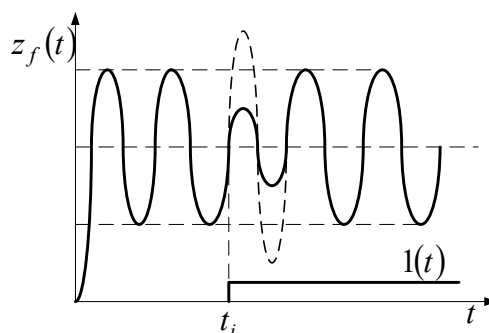


Рис. 3.2. Стійкий граничний цикл

З іншого боку, у деяких нелінійних системах граничний цикл називається нестійким, якщо зменшення амплітуди коливань (рис. 3.3 а) призводить до їхнього згасання, а збільшення амплітуди (рис. 3.3 б) може призвести до необмеженого зростання амплітуди або виникнення нового граничного циклу з іншою амплітудою частотою.

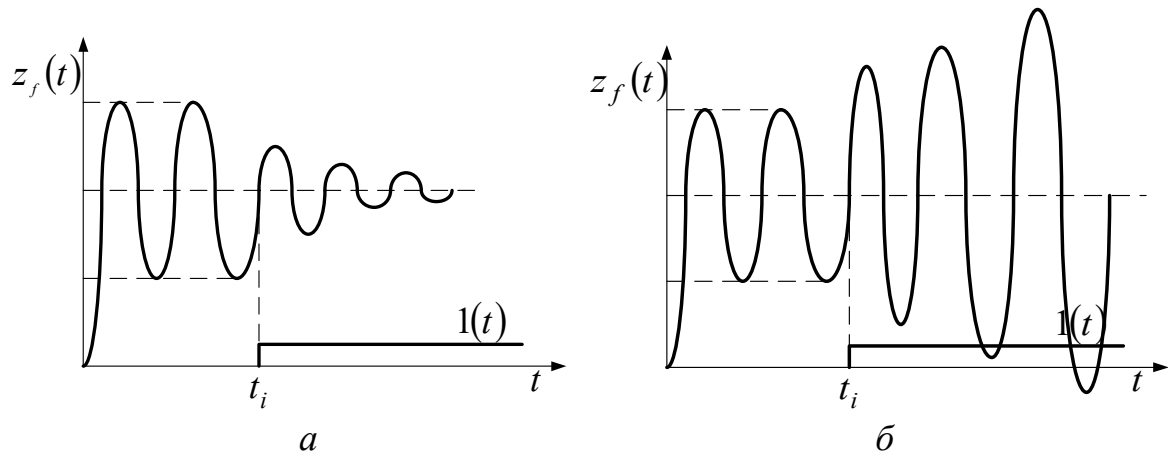


Рис. 3.3. Нестійкий граничний цикл:

*a* – при зменшенні амплітуди коливань; *б* – при збільшенні амплітуди коливань

Можливо передбачити наявність граничного циклу в замкнутій системі, якщо для певних значень амплітуди  $a_m$  та частоти  $\omega_0$  гармонійного сигналу на вході нелінійного елемента виконується наступна рівність:

$$1 + W(j\omega)W_f(a_m, \omega) = 0.$$

Або це рівняння можна записати у вигляді:

$$W(j\omega) = -\frac{1}{W_f(a_m, \omega)}, \quad (3.1)$$

де  $W_f^{-1}(a_m, \omega)$  - описуюча функція нелінійної частини системи;  $W(j\omega)$  - частотна передатна функція лінійної частини системи.

Оскільки описуюча функція і частотна передатна функція узагальненому випадку є комплексними функціями, то це рівняння не піддається безпосередньому рішенню щодо амплітуди  $a_m$  і частоти  $\omega_0$  гармонійного сигналу. Тому доцільно використовувати метод графоаналізу для його розв'язання.

### 3.2. Визначення параметрів граничного циклу

Якщо ми побудуємо графік на комплексній площині для функцій  $W(j\omega)$  і  $\frac{-1}{W_f(a_m)}$ , то точка їх перетину, які задовольняють виразу (3.1). Знайдені значення амплітуди  $a_m$  і частоти  $\omega_0$  визначають закон зміни граничного циклу.

В параграфі 2.4 було визначено передатну функцію (або описуючу функцію) для нелінійного елемента системи стабілізації МКА, який характеризується типом сухого тертя:

$$W_f(a_m, \omega) = \frac{2k}{\pi} \left( \arcsin \frac{b}{a_m} + \frac{b}{a_m} \sqrt{1 - \left( \frac{b}{a_m} \right)^2} \right),$$

де  $b$  представляє ширину зони лінійного режиму роботи нелінійності,  $C$  - величину, що обмежує вхідний сигнал, і  $k = \frac{C}{b} = \operatorname{tg} \alpha$  - коефіцієнт посилення в лінійному режимі. При побудові графіку зворотної описуючої функції ми розглянемо окремі сценарії її обчислення:

- для  $a_m = b$ , маємо  $W_f(a_m = b) = \frac{2k}{\pi} (\arcsin 1) = \frac{2k}{\pi} \cdot \frac{\pi}{2} = k$ ;
- для  $a_m \rightarrow \infty$ , отримуємо  $W_f(a_m \rightarrow \infty) = \frac{2k}{\pi} \left( \arcsin 0 + \frac{b}{\infty} \right) = 0$ .

Графічне представлення  $W_f^{-1}(a_m, \omega)$  на комплексній площині (рис. 3.4) є прямою лінією, яка співпадає з негативним напрямком вісі абсцис.

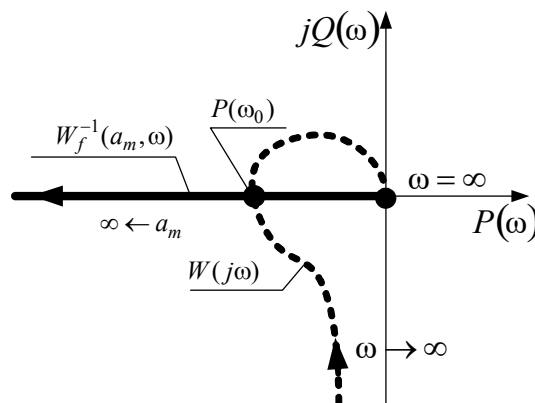


Рис. 3.4. Параметри граничного циклу



За модулем зворотної описуючої функції мінімальне значення дорівнює  $-\frac{1}{k}$ .

Максимальне значення за модулем збільшується до нескінченності при  $a_m \rightarrow \infty$ .

Тепер знайдемо еквівалентну передатну функцію лінійної складової системи.

$$W_x(s) = \frac{\mathfrak{G}}{M_H} = \frac{H}{J_x J_y s^2 + J_y s + H^2} \cdot \frac{1}{s}.$$

Перейдемо в частотну область, замінюючи  $s$  на  $j\omega$ :

$$W_x(j\omega) = \frac{H}{-jJ_x J_y \omega^2 - J_y \omega + jH^2} \cdot \frac{1}{\omega} = \frac{-H}{J_y \omega^2 - j(H^2 \omega - J_x J_y \omega^3)}.$$

На основі частотної передатної функції лінійної складової системи, можемо визначити алгоритм для розрахунку її Амплітудно-Фазової Характеристики (АФЧХ).

$$W(j\omega) = P(\omega) + jQ(\omega),$$

$$P(\omega) = \frac{-J_y H \omega^2}{J_y^2 \omega^4 + (H^2 \omega - J_x J_y \omega^3)^2}$$

$$Q(\omega) = \frac{-H(H^2 \omega - J_x J_y \omega^3)}{J_y^2 \omega^4 + (H^2 \omega - J_x J_y \omega^3)^2}.$$

Графік АФЧХ на комплексній площині, який змінюється при зміні частоти  $\omega$  від  $0$  до  $\infty$ , показаний на (рис. 3.4) у вигляді пунктирної лінії.

Знайдемо координати точки перетину між  $W(j\omega)$  і  $W_f^{-1}(a_m)$ .

Спочатку визначимо частоту можливого граничного циклу:

$$\omega_0|_{Q(\omega)=0} = \frac{H}{\sqrt{J_x J_y}}.$$

Підставляючи значення  $\omega_0$  в дійсну частину рівняння  $P(\omega)$ , знаходимо:

$$P(\omega_0) = \frac{-J_x}{H}.$$

Граничний цикл буде можливий, якщо  $\left| \frac{1}{k} \right| < P(\omega_0)$ , що означає  $k > \frac{H}{J_x}$ .

Для визначення амплітуди можливого граничного циклу  $a_m$ , використовуємо рівняння (3.1) і підставляємо в нього значення для  $W(j\omega)$  і  $\frac{-1}{W_f(a_m, \omega)}$ :

$$\frac{-J_x}{H} = \frac{-1}{k - \frac{2k}{\pi} \left( \arcsin \frac{b}{a_m} + \frac{b}{a_m} \sqrt{1 - \frac{b^2}{a_m^2}} \right)}.$$

На практиці, для визначення амплітуди, ми використовуємо таблиці функції  $W_f(a_m, \omega)$  на основі значення лівої частини рівняння. Це можливо, якщо маємо доступ до інформації про параметр  $b$  нелінійного елемента.

Після отримання цих даних ми фіксуємо закон зміни можливого граничного циклу  $\vartheta_0(t) = -\vartheta(t) = -a_m \sin \omega_0 t$  у відповідності до отриманих даних.

Враховуючи значення параметрів систем стабілізації космічних апаратів, які були визначені відповідно до джерел [2,4,5], і використовуючи отримані алгоритми, визначаємо частоту граничного циклу і координати точки перетину зворотної описуючої функції та АФЧХ.

$$\omega_0 = 0,168 \text{ рад/с}; P(\omega_0) = -0,047$$

На (рис. 3.5) представлені графіки зворотної описуючої функції нелінійної складової системи та АФЧХ лінійної частини.

Зауважується, що при частоті  $\omega = 0,128$  АФЧХ лінійної частини перетинає вісь абсцис, і цей перетин співпадає з точкою  $(-0,047; j0)$  на графіку зворотної АФЧХ нелінійного елемента.

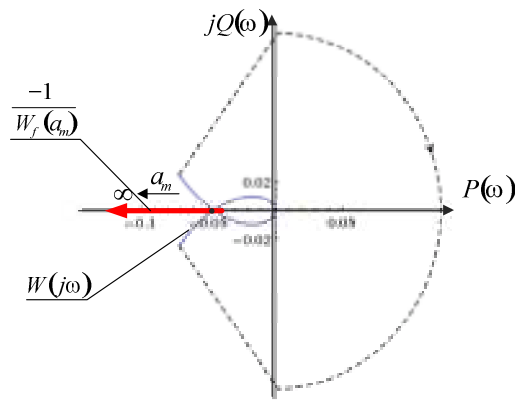


Рис. 3.5. Зворотна описуюча функція та АФЧХ

На основі аналізу отриманого графіку робимо висновок, що можливий граничний цикл буде реалізований, якщо  $\left| \frac{1}{k} \right| < P(\omega_0)$ , при  $k > 21,27$ .

Для визначення амплітуди можливого граничного циклу  $a_m$  ми використовуємо рівняння (3.1) і підставляємо в нього значення для  $W(j\omega_0)$  і  $W_f(a_m, \omega)$ :

$$-0,047 = \frac{-1}{k - \frac{2k}{\pi} \left( \arcsin \frac{b}{a_m} + \frac{b}{a_m} \sqrt{1 - \frac{b^2}{a_m^2}} \right)}$$

На основі таблиць функції  $W_f(a_m)$  при встановленому параметрі  $b=1$ , маємо  $a_m = 1,98$  град. Таким чином, в системі стабілізації космічного апарату (МКА) можливий граничний цикл з параметрами  $\vartheta_0(t) = -1,98 \cdot \sin 0,168t$

Для оцінки стійкості цього граничного циклу, ми використовуємо критерій Гольдфарба. Згідно з цим критерієм, якщо під час руху вздовж зворотної описуючої функції нелінійної складової системи  $\frac{1}{W_f(a_m, \omega)}$  в напрямку зростання амплітуди

$a_m$  виходимо з контуру, охопленого АФЧХ лінійної частини системи  $W(j\omega)$ , то в точці їх перетину вказує на стійкі автоколивання. У випадку, коли ми виходимо за межі АФЧХ, це вказує на нестійкі автоколивання.

Графічну інтерпретацію цього критерію можна побачити на (рис. 3.6).

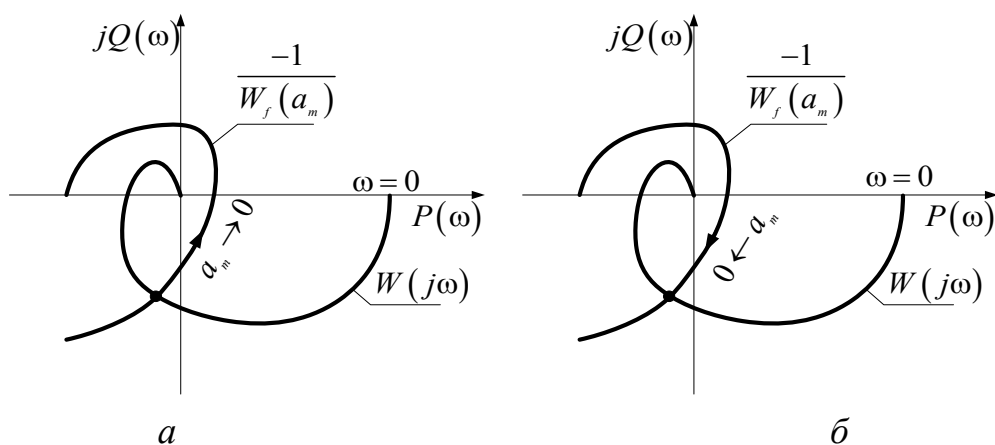


Рис. 3.6. Критерій Гольдфарба:

*a* – стійкі автоколивання; *б* – нестійкі

У системі, для якої наведені частотні характеристики на (рис. 3.6 а), спостерігаються стійкі автоколивання, що свідчить про наявність стійкого граничного циклу. У випадку системи, зображеної на (рис. 3.6 б), спостерігаються нестійкі автоколивання, що вказує на нестійкий граничний цикл.

Після аналізу результатів досліджень системи стабілізації космічного апарату (МКА), ми приходимо до висновку, що можливий граничний цикл з вказаними параметрами є стійким.

### 3.3. Експериментальна перевірка розрахунків

Для перевірки правильності обчислень був проведений комп'ютерний експеримент за допомогою середовища Simulink.

Наведено модель нелінійної системи стабілізації космічного апарату (МКА), яка відповідає структурній схемі системи (рис 3.7).

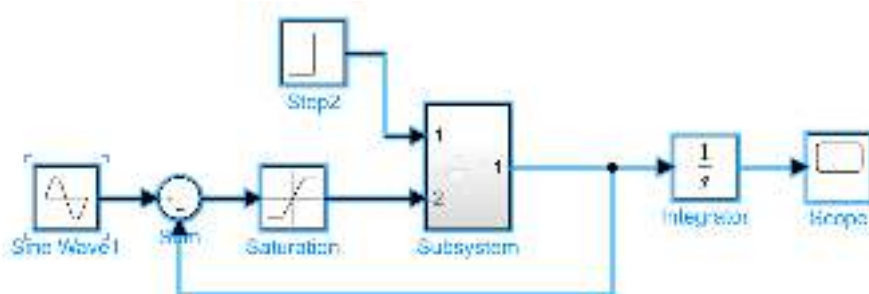


Рис. 3.7. Модель системи стабілізації МКА

До входу моделі був поданий гармонійний сигнал із такими параметрами:  
 $a_m = 1,98 \text{ град}$  і  $\omega_0 = 0,168 \text{ рад/с}$ . Реакція системи була визначена за допомогою моделі осцилографа.

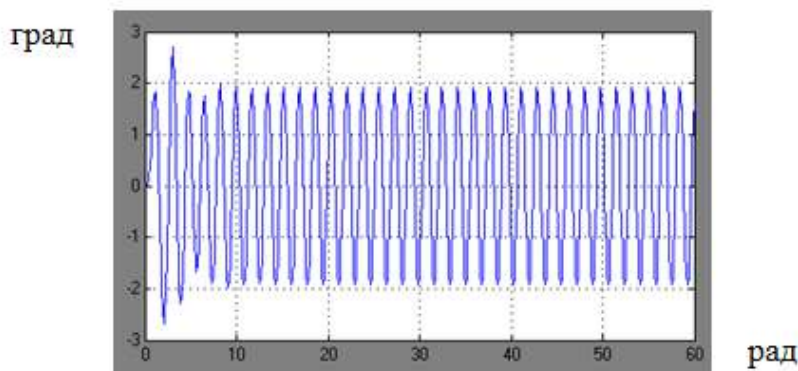


Рис. 3.8. Осцилограма граничного циклу

Результати експерименту, які представлені на (рис. 3.8), підтвердили відповідність даним розрахунків щодо існування граничного циклу в системі з отриманими параметрами.

### 3.4. Синтез регулятора для уникнення граничних циклів

На практиці, у системі стабілізації, важливо уникнути можливості виникнення граничного циклу. Для цього ми розробляємо регулятор, який мінімізує цю можливість.

Ми використовуємо метод описуючої функції для синтезу такого регулятора. На (рис. 3.10) наведено структурну схему системи з П-регулятором, де передатний коефіцієнт регулятора позначений як  $k_{\text{рег}}$ .

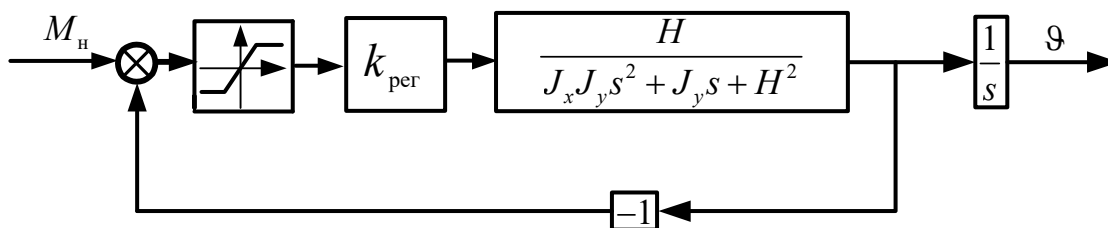


Рис. 3.9. Нелінійна система з регулятором

Для виключення можливості виникнення граничного циклу, необхідно, щоб зворотна описуюча функція і АФЧХ лінійної частини системи не перетиналися у

комплексній площині. Іншими словами, це означає, що значення  $|k_{\text{пер}}W(j\omega)|_{\omega=0,168}$  повинно бути менше за мінімальне значення за модулем зворотної описуючої функції:

$$|k_{\text{пер}}W(j0,168)| < \left| \frac{1}{k} \right|.$$

Для забезпечення необхідного запасу стійкості за модулем для систем стабілізації, ми приймаємо:

$$k_{\text{пер}} < \left| \frac{1}{2 \cdot W(j0,168)k} \right|,$$

щоб гарантувати стабільну роботу системи.

Враховуючи  $k = 22$ , визначаємо коефіцієнт передачі П-регулятора, який синтезується, як  $k_{\text{пер}} \approx 0,484$ .

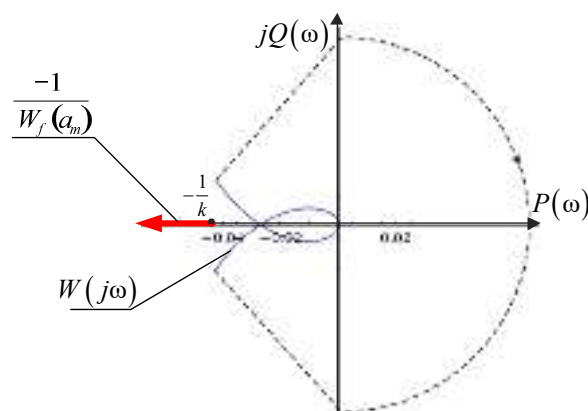


Рис. 3.10. Вплив регулятора на взаємне розташування зворотної передатної функції нелінійного елемента системи та АФЧХ її лінійної частини

Взаємне розташування зворотної передатної функції нелінійного елемента системи та АФЧХ її лінійної частини представлено на (рис. 3.10).

Для оцінки динамічних характеристик системи та окремих її ланок досліджуючи реакцію на типові вхідні сигнали, які найкраще повно відображають особливості реальних збурень.

Знаючи, як система реагує на типові впливи, можемо робити висновки, як вона буде поводитися при більш складних і непередбачуваних змінах вхідних сигналів.

В даному випадку на вхід системи із синтезованим регулятором був поданий одиничний ступінчатий сигнал. Це дозволило отримати перехідну характеристику системи стабілізації, яка представлена на (рис. 3.11).

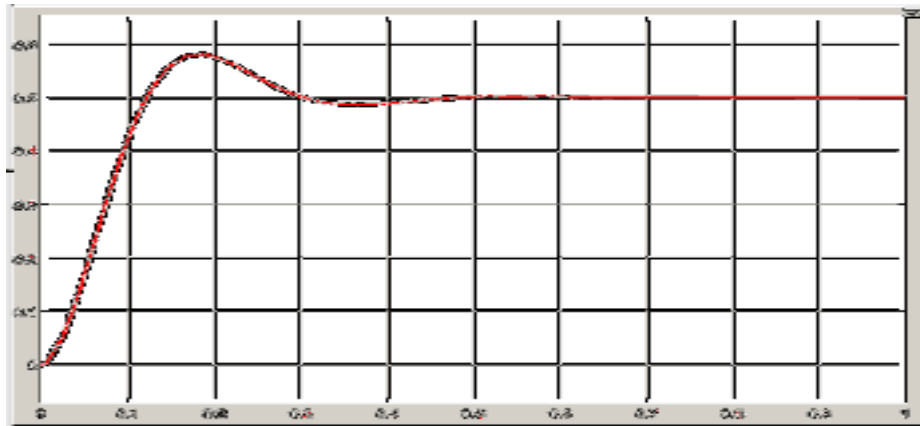


Рис. 3.11. Перехідна характеристика системи стабілізації з регулятором

З очевидністю можна зазначити, що коливання в системі згасають, і система прямує до сталого значення. Отже, можна стверджувати, що ймовірність виникнення граничного циклу в системі стабілізації космічного апарату (МКА) виключена.

## **РОЗДІЛ 4**

### **ПРОГРАМНО-МЕТОДИЧНЕ ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ ПРОЕКТУВАННЯ СИЛОВИХ СТАБІЛІЗАТОРІВ МКА**

У інженерній практиці, особливо при автоматизованому виборі оптимальних проектних рішень, використовуються математичні методи для аналізу та створення складних технічних систем. Це стало можливим завдяки появі швидких комп'ютерів. Проте широкі можливості комп'ютерів можуть бути використані ефективно лише за наявності відповідної методичної підтримки, оскільки застосування методів моделювання та оптимізації складних технічних систем пов'язане з викликами щодо їх реалізації на практиці, зокрема, створення алгоритмів та програм для комп'ютерів.

У роботі пропонуємо два способи для вирішення завдання програмно-методичного забезпечення автоматизації проектування:

- Використання базових пакетів прикладних програм для моделювання та синтезу.

- Розробка програмного забезпечення для виконання аналізу та синтезу.

Середовище візуального програмування GUIDE (Graphical User Interface Design Environment) дозволяє спроектувати графічний інтерфейс користувача і подальше програмування безпосередньо в ньому.

Однією з основних питань при розв'язанні другого завдання є вибір мови програмування для реалізації математичних алгоритмів. Основним варіантом розглядається мова програмування MATLAB через її здатність ефективно описувати складні обчислення над великими обсягами даних у різних форматах, а також через її широке використання в інженерній практиці.

#### **4.1. Проектування на основі базових пакетів прикладних програм**

Проектування - це спеціалізований розрахунок, спрямований на досягнення оптимальної структури системи та визначення найкращих значень параметрів її компонентів. Для досягнення необхідної якості процесів управління, таких як точність і якість перехідних процесів, існують два основних підходи.



Перший підхід включає в себе зміну параметрів системи, що призводить до зміни коефіцієнтів характеристичного рівняння та, отже, часових і частотних характеристик системи.

Другий підхід полягає в додаванні до системи додаткових компонентів, які називаються коригуючими пристроями.

Існують кілька методів корекції:

- включаючи паралельну, послідовну, комбіновану корекцію
- корекцію зовнішнього впливу.

Паралельний коригуючий пристрій  $W_k$ , або додатковий зворотний зв'язок, з'єднує вихід будь-якого елемента системи з його входом або з входом одного з попередніх елементів і забезпечує необхідну зміну динамічних характеристик компонентів, які на нього впливають.

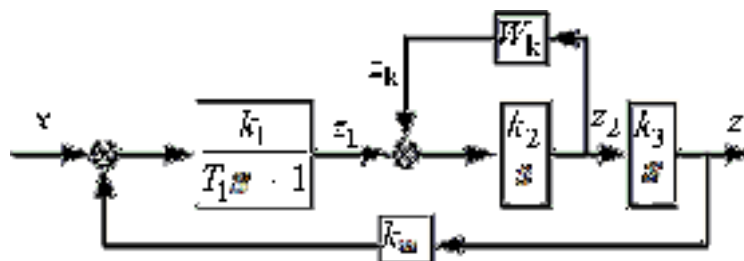


Рис. 4.1. Паралельний

При цьому зворотний зв'язок може бути двох типів:

- Жорстким, що означає, що він діє постійно як у сталих, так і в перехідних режимах.
- Гнучким, що означає, що він активується лише в перехідних режимах.

Паралельні коригуючі пристрої широко використовуються в системах автоматичного керування. Однак їхнім недоліком є необхідність мати в попередньому підсилювачі великий коефіцієнт посилення (особливо при застосуванні ЖНЗЗ), а також порівняльна складність деяких елементів, які забезпечують введення коригуючих зворотних зв'язків, таких як тахогенератори, гіротахметри, диференціюючі трансформатори і т. д.

Послідовний коригуючий пристрій вставляється безпосередньо в прямий шлях системи і забезпечує додаткове перетворення керуючого сигналу без зміни динамічних характеристик компонентів системи.

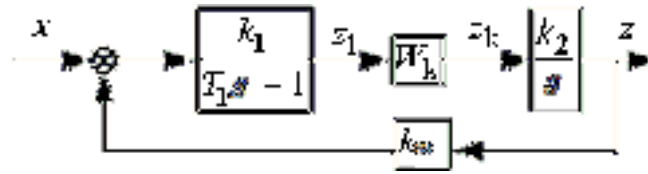


Рис. 4.2. Послідовний коригуючий пристрій

Послідовні коригуючі пристрої мають певні переваги щодо технічної реалізації порівняно з паралельними коригуючими пристроями, оскільки їх можна втілити у вигляді простих пасивних  $RC$  контурів. Проте ефективність їх функціонування в значній мірі залежить від стабільності параметрів та характеристик інших елементів системи. Тому при застосуванні послідовних коригуючих пристроїв необхідно встановлювати високі вимоги до стабільності параметрів елементів, які входять у прямий ланцюг компонентів системи.

Якщо сигнал на вході послідовного коригуючого пристрою дорівнює  $z_1$ , то на виході можна отримати сигнал  $z_k$ , який узагальнено пропорційний вхідній величині, її похідній та інтегралу:

$$z_k(t) = k_k \left( z_1(t) + T_d \frac{dz_1(t)}{dt} + \frac{1}{T_i} \int_0^t z_1(t) dt \right),$$

де:  $W_k = k_k$  - передатний коефіцієнт послідовного коригуючого пристрою;

$T_d, T_i$  - постійні часу похідної та інтеграла від вхідного сигналу.

За допомогою принципу суперпозиції розглянемо, як окремі компоненти сигналу впливають на вихід послідовного коригуючого пристрою та його вплив на роботу системи стабілізації МКА.

#### 4.1.1. Введення до закону регулювання похідної

У системах автоматичного управління, де присутні ланки з великими постійними часами, характер процесу регулювання визначається, переважно,

величиною постійної часу найбільш інерційної ланки. У нашому випадку, основним інерційним елементом системи є невеликий космічний апарат.

При керуванні подібними об'єктами важливо, щоб система стабілізації реагувала максимально швидко на зовнішні збурення. Зазвичай цю швидкість досягають шляхом включення в закон регулювання окремого компонента, який додається до керуючого сигналу і пропорційний похідній від відхилення регульованої величини від заданого значення.

Для введення похідної у закон регулювання, в прямий ланцюг системи послідовно включається форсуюча ланка першого порядку, яка має передатну функцію:

$$W_k(s) = \frac{z_k(t)}{z_1(t)} = k(1 + T_d s).$$

Сигнал на виході такого коригуючого пристрою можна виразити так:

$$z_k(t) = k(1 + T_d s)z_1(t)$$

він складається з вхідного сигналу, помноженого на певний коефіцієнт  $k$ , і додаткової складової  $kT_d s z_1(t)$ , яка пропорційна першій похідній цього вхідного сигналу.

Розглянемо, наприклад згідно з (рис. 4.3), що форсуюча ланка активується через датчик розгодження і на її вході маємо вхідний сигнал  $z_1(t) = x(t) - z_{зз}(t)$ .

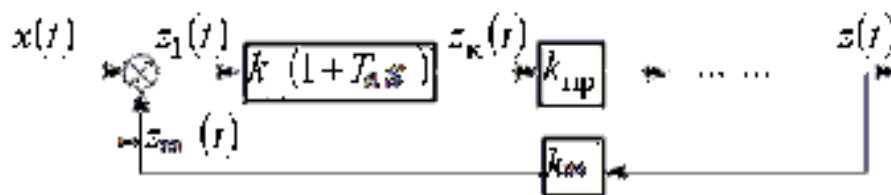


Рис. 4.3. Система з форсуючою ланкою

Якщо сигнал розузгодження змінюється за гармонічним законом  $z_1(t) = Z_1 \sin \omega t$ , маємо сигнал на виході коригуючого пристрою:

$$z_k(t) = k \left[ Z_1 \sin \omega t + T_d \frac{d(Z_1 \sin \omega t)}{dt} \right] = kZ_1 \sin \omega t + kT_d \omega Z_1 \cos \omega t.$$

Позначимо  $T_d \omega = \operatorname{tg} \varphi_k$ . Тоді:

$$z_k(t) = \left\{ \begin{array}{l} kZ_1 \sin \omega t (1 + \operatorname{ctg} \omega t \cdot \operatorname{tg} \varphi_k) = \\ = kZ_1 \sin \omega t \frac{\sin(\omega t + \varphi_k)}{\sin \omega t \cdot \cos \varphi_k} = \\ = kZ_1 \frac{\sin(\omega t + \varphi_k)}{\cos \varphi_k} \end{array} \right\} = Z_k \sin(\omega t + \varphi_k),$$

де  $Z_k = \frac{kZ_1}{\cos \varphi_k}$ .

Отже, на виході послідовного коригувального пристрою отримуємо сигнал, який також змінюється за законом синуса і має ту ж саму частоту, що і сигнал на його вході, але він відрізняється за амплітудою на величину  $\varphi_k = \operatorname{arctg} T_d \omega$ .

Результати покані на осцилограмах сигналів (рис. 4.4). Сигнал розгодження позначений синім кольором, а вихідний сигнал - червоним. Порівнюються системи без корекції і системи з форсованою корекцією.

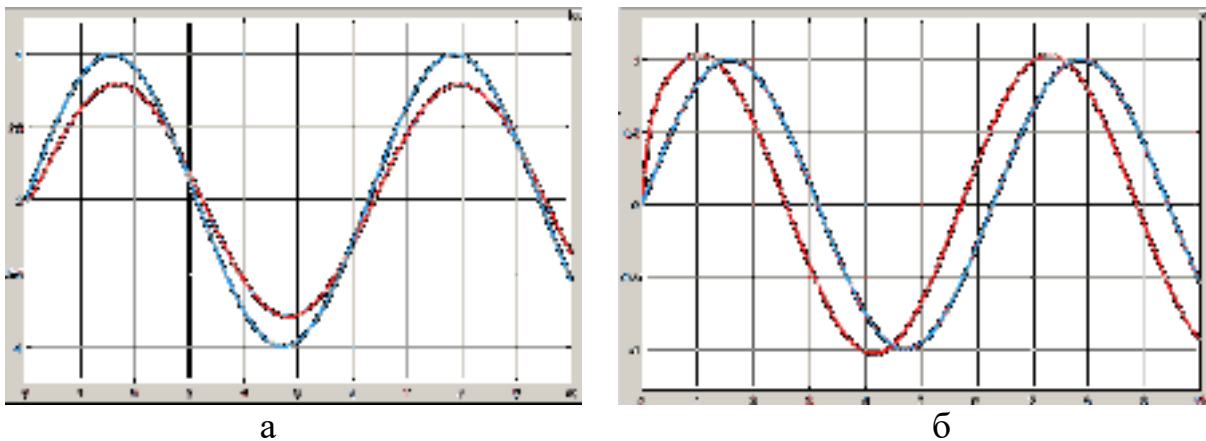


Рис. 4.4. Осцилограми сигналів  $z_1(t)$ ;  $z(t)$ :

а – при  $W_k = 1$ ; при  $W_k = k(1 + T_d s)$

Отже, правильним вибором постійної часу  $T_d$  форсуючого контуру можна забезпечити необхідне передбачення моменту стабільності, який впливає на МКА.

Представлена структурна схема системи стабілізації МКА з форсуючим контуром, яка працює в режимі стабілізації (рис. 4.5).

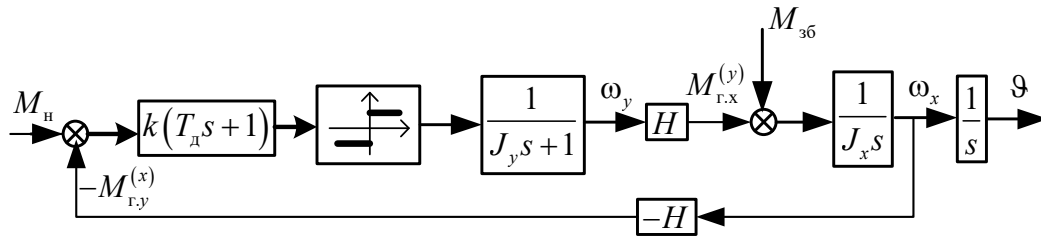


Рис. 4.5. Система стабілізації МКА с форсуючим контуром

Включення в закон регулювання, разом із сигналом розгодження і його похідної, призведе до наступних результатів:

- Збільшення швидкодії системи стабілізації завдяки активному втручання у перехідні процеси.
- Підвищення запасу стійкості системи.

#### 4.1.2. Введення до закону регулювання інтеграла

При включенні коригувального пристрою в прямий ланцюг системи (рис. 4.6), сигнал на його виході містить дві компоненти: одну, яка пропорційна розгодженню, і іншу, яка пропорційна інтегралу від розгодження, тобто

$$z_k(t) = k \left[ z_1(t) + \frac{1}{T_i} \int_0^t z_1(t) dt \right] = k \left( 1 + \frac{1}{T_i s} \right) z_1(t),$$

можливо зменшити помилку регулювання практично до нуля.

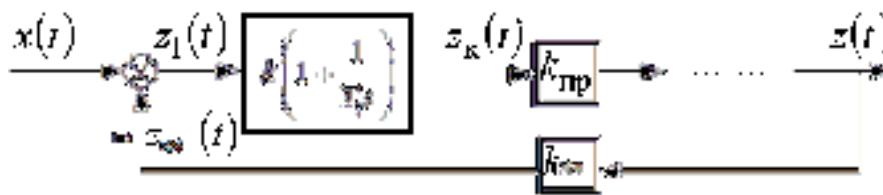


Рис. 4.6. Система з інтегруючою ланкою

Розглянемо систему, де передавальна функція помилки записується в загальному вигляді, як:

$$W_s(s) = \frac{1}{1 + W_p(s)}.$$

Етап стабілізації у такій системі характеризується тим, що встановлена помилка регулювання

$$z_1 = \lim_{s \rightarrow 0} |W_s(s)| x = \frac{x}{1 + k_p},$$

має кінцеве значення і зменшується зі збільшенням передатного коефіцієнта  $k_p$  відкритого циклу.

Якщо до прямого ланцюга системи додати послідовний коригуючий пристрій, чий вихідний сигнал містить компоненту, пропорційну інтегралу від помилки, то передавальна функція помилки набуде такого вигляду:

$$W_s(s) = \frac{1}{1 + W_p(s)W_k(s)} = \frac{1}{1 + W_p(s)k \left(1 + \frac{1}{T_i s}\right)} = \frac{T_i s}{T_i s + k(1 + T_i s)W_p(s)}$$

Усталена помилка в цьому випадку дорівнює нулю. Дійсно.

$$z_1 = \lim_{s \rightarrow 0} |W_s(s)| x = \lim_{s \rightarrow 0} \left| \frac{T_i s}{T_i s + k(1 + T_i s)W_p(s)} \right| \cdot x = 0.$$

Отриманий результат демонструє (рис. 4.7). На ньому показані осцилограми сигналів розгодження, позначені синім кольором, і вихідного сигналу, позначені червоним кольором, для систем, де відсутня корекція і для систем з інтегруючою корекцією. Обидві системи працюють в режимі слідкування.

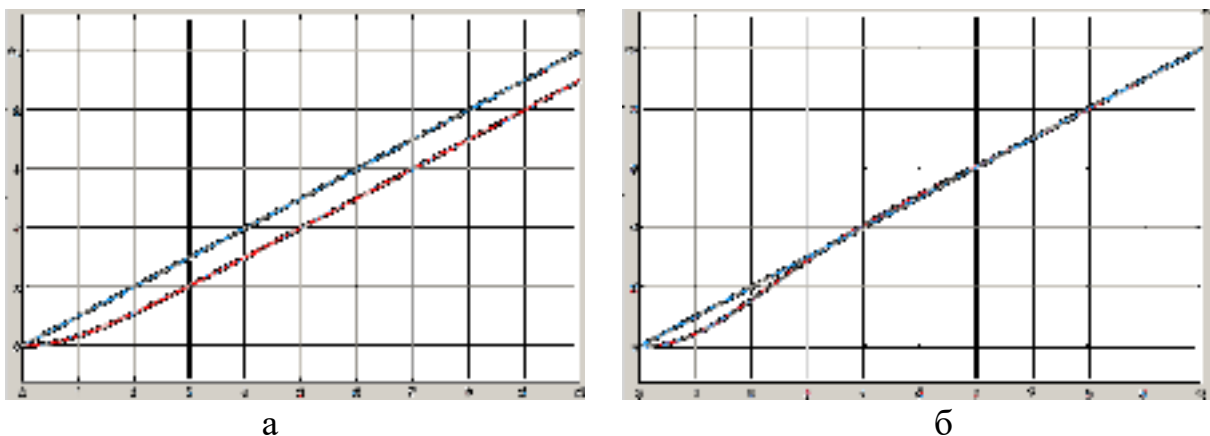


Рис. 4.7. Осцилограми сигналів  $z_1(t); z(t)$ :

а – при  $W_k = 1$ ; при  $W_k = k \left(1 + \frac{1}{T_i s}\right)$

Отже, у режимі стеження без корекції виникає помилка відстеження. Введення інтегрального компонента до закону управління практично зводить цю помилку до мінімуму.

Враховуючи це, ми приходимо до висновку про необхідність включення інтегрального контура корекції до системи стабілізації МКА. Це включення повинно бути активовано під час роботи системи стабілізації в режимі зміни просторової орієнтації МКА.

На рисунку 4.8 наведено структурну схему системи стабілізації МКА з інтегральним контуром, яка працює в режимі керування просторовою орієнтацією МКА.

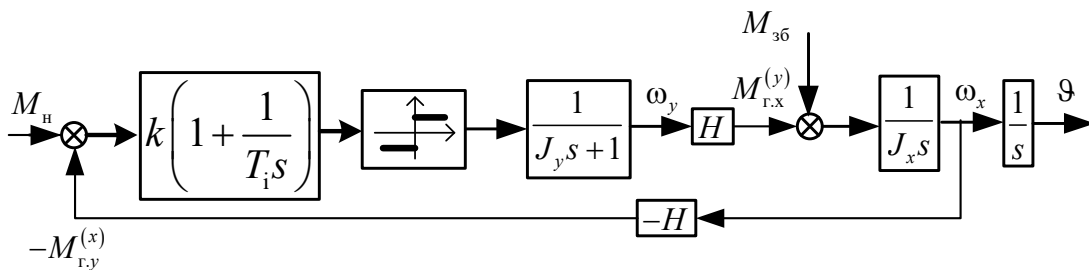


Рис. 4.8. Система стабілізації МКА с інтегруючим контуром

Важливо мати на увазі, що введення інтегрального компонента до закону регулювання може призвести до зниження стійкості системи та зменшення її швидкодії.

З цієї причини, рекомендується враховувати режим роботи системи стабілізації і автоматично перемикає її на той чи інший тип коригувального пристрою в залежності від потреби.

## 4.2. Програмне забезпечення проектування

Корекційні пристрої широко використовуються у різних системах автоматичного керування. Це включає в себе системи управління рухомими об'єктами, такими як літаки, ракети, кораблі та супутники. Вони також застосовуються у складних технологічних процесах, реверсивних виконавчих механізмах, а також у хімічній та нафтохімічній промисловості для управління

різними пристроями, такими як пневмоперетворювачі, перетворювачі частоти, регулятори температури, тиску, витрати речовини та інші.

На сучасному світовому ринку доступні універсальні мікропроцесорні пристрої, які можуть бути використані у різних системах управління. Однак їх необхідно налаштовувати під конкретні завдання та об'єкти управління.

Повноцінне використання корекційних пристроїв можливе лише при правильному розрахунку їх параметрів, який повинен враховувати особливості характеристик керованих об'єктів.

Отже, використання графічного інтерфейсу MATLAB може сприяти розробці універсального додатка для вивчення систем стабілізації МКА, що забезпечить швидкий і зручний вибір необхідних параметрів коригувальних пристроїв.

#### **4.2.1. Опис вхідних та вихідних даних програми**

Середовище візуального програмування GUIDE (Graphical User Interface Design Environment) спрямоване, передусім, на розробку графічного інтерфейсу користувача, а потім на програмування. Для створення конкретного додатку елементи GUI перетягуються з панелі інструментів в вікно додатку. Після додавання елемента інтерфейсу необхідно присвоїти йому тег (ім'я), яке ідентифікуватиме цей об'єкт серед інших.

У GUI додатку для налаштування коригувальних пристроїв розміщено такі елементи:

- Елемент інтерфейсу для відображення графіку перехідного процесу системи стабілізації.
- Три слайдера для встановлення числових значень коефіцієнтів коригувальних пристроїв:  $K_1$  (П-складова),  $K_2$  (І-складова) та  $K_3$  (Д-складова).
- Шість елементів Edit Text для задання межових значень цих коефіцієнтів (Максимальне та Мінімальне значення).
- Три текстових елементи Static Text для виведення поточних значень коефіцієнтів (Поточне значення).
- Шість текстових елементів для відповідних підписів.



Граничні значення коефіцієнтів коригувального пристрою можуть бути встановлені методом експерименту, враховуючи отримані значення в попередніх розділах. Зразок додатку із елементами інтерфейсу, які були додані з панелі інструментів, можна побачити (рис. 4.9).

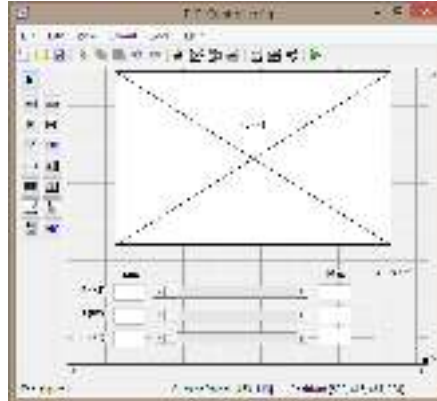


Рис. 4.9. Вікно заготовки додатку GUI

Графічний інтерфейс готовий для впровадження програмного коду.

#### 4.2.2. Текст програмного коду її лістинг

Після збереження графічного інтерфейсу в MATLAB автоматично створюється програмний код для нього. Таким чином, після ініціалізаційного блоку цього коду можна вставити основну частину команд для вирішення конкретної задачі:

```
function mySliderCallback(hObject, eventdata, handles)
%отримання max та min складових регулятора
max1=str2double(get(handles.edit1, 'String'));
max2=str2double(get(handles.edit2, 'String'));
max3=str2double(get(handles.edit3, 'String'));
min1=str2double(get(handles.edit4, 'String'));
min2=str2double(get(handles.edit5, 'String'));
min3=str2double(get(handles.edit6, 'String'));
%отримання значень зі слайдерів
c1=get(handles.slider1, 'Value');
c2=get(handles.slider2, 'Value');
c3=get(handles.slider3, 'Value');
```

```

%визначення поточних значень коефіцієнтів складових регулятора
cur1=min1+(max1-min1)*c1;
cur2=min2+(max2-min2)*c2;
cur3=min3+(max3-min3)*c3;
%виведення поточних значень коефіцієнтів
set(handles.text7, 'String', cur1);
set(handles.text8, 'String', cur2);
set(handles.text9, 'String', cur3);
%перехідна характеристика
axes(handles.axes1);
cla;
hold on;
grid on

%присвоєння коефіцієнтів регулятора
K1=cur1;
K2=cur2;
K3=cur3;
%параметри системи
Wob=tf([30],[0.01 0.2 1 0]);%об'єкт
Wg=tf([0.09], [0.01 1]);%підсилювач
N=100;
Wp=tf([K1/N+K3 K1+K2/N K2], [1/N 1 0]);%регулятор
W1=series(Wg, Wob);
W=series(Wp,W1);%передатна функція розімкнутої системи
sys=feedback(W,1);%передатна функція замкнутої системи
t=5;
step(sys,t)
grid on
xlabel('t');

```

```
ylabel('h');
```

Утворений програмний код доповнюється функціями звернення до слайдерів:

```
function slider1_Callback(hObject, eventdata, handles)
```

```
mySliderCallback(hObject, eventdata, handles);
```

```
function slider2_Callback(hObject, eventdata, handles)
```

```
mySliderCallback(hObject, eventdata, handles);
```

```
function slider3_Callback(hObject, eventdata, handles)
```

```
mySliderCallback(hObject, eventdata, handles);
```

Не залежно від того, скільки слайдерів є і які теги вони мають, вказана функція виглядає однаково для кожного слайдера.

### 4.2.3. Опис інтерфейсу користувача

Після виконання програмного коду, який був описаний раніше, відкривається діалогове вікно, яке показано на (рис. 4.10).

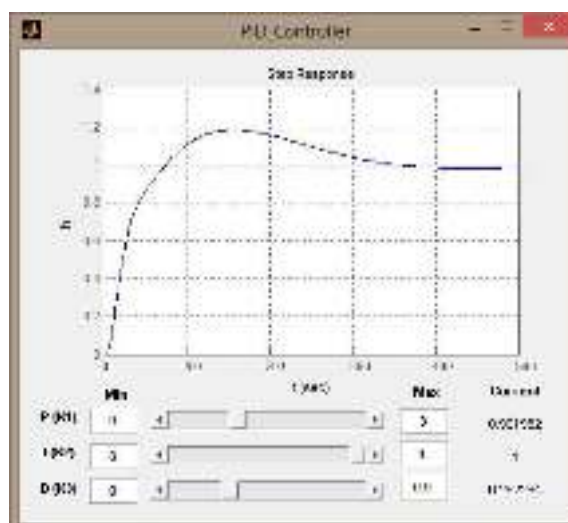


Рис. 4.10. Діалогове вікно інтерфейсу

Розроблений інтерфейс дозволяє вам, переміщаючи регулятори слайдерів у діалоговому вікні, визначити коефіцієнти корегувальних пристроїв на основі отриманих перехідних характеристик. На (рис. 4.10) наведено приклад перехідної функції з встановленими слайдерами в положення, що відповідають оптимальним значенням коефіцієнтів корегувального пристрою, отриманим у попередніх розділах.

Видалення команди очистки поточного графіку "cla" в М-файлі програми дозволить отримати сімейство перехідних характеристик для будь-якої множини параметрів корегувальних пристроїв. Це може бути корисним при виборі характеристики з бажаними показниками якості, як показано на (рис. 4.11).

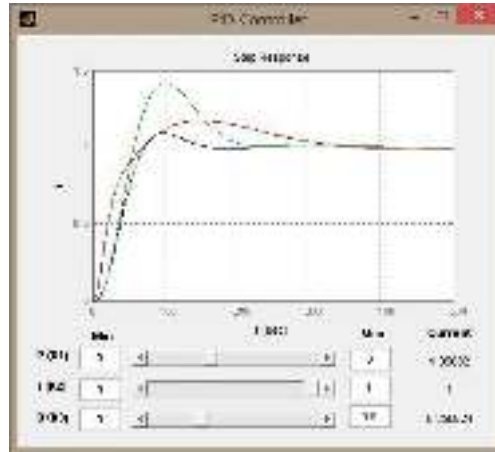


Рис. 4.11. Приклад сімейства характеристик

Графіки у діалоговому вікні можна змінити, використовуючи редактор властивостей (Property Editor). Цей редактор також дозволяє відзначити на графіку основні параметри якості перехідної функції, такі як максимальне значення амплітуди, перевищення, стале значення та час перехідного процесу.

Отже, розроблена програма для налаштування коефіцієнтів корегувального пристрою в графічному інтерфейсі дозволяє швидко розраховувати коефіцієнти корегувального пристрою для системи стабілізації малого космічного апарату, використовуючи видалення та комбінування необхідних каналів.

## **РОЗДІЛ 5 ОХОРОНА ПРАЦІ**

У цьому розділі ми розглянемо ключові аспекти охорони праці, пов'язані із системою автоматизованого проектування силового стабілізатора малого космічного апарата. Ми розглянемо потенційні ризики та небезпеки, пов'язані з роботою цієї системи, і запропонуємо заходи забезпечення безпеки, щоб забезпечити найвищий рівень захисту для персоналу, апаратури і зовнішнього середовища в умовах космічного простору.

Цей розділ також розглядає актуальні стандарти та нормативні вимоги, які повинні дотримуватися під час розробки, випробувань та експлуатації силового стабілізатора МКА. Забезпечення відповідності цим стандартам відіграє важливу роль у забезпеченні надійності і безпеки роботи МКА в космосі.

Розглянемо питання навчання та підготовки персоналу, які відповідають за обслуговування та управління системою силового стабілізатора, а також за проведення регулярних технічних оглядів та ремонтних робіт. Всі ці аспекти є ключовими для забезпечення ефективної та безпечної роботи МКА у космічному середовищі.

### **5.1. Ергономічні аспекти**

Розробка та експлуатація системи автоматизованого проектування може вимагати великої кількості годин роботи перед комп'ютерними моніторами. Недотримання правильної організації робочого місця та відповідних ергономічних стандартів може призвести до ризику розвитку мускульно-суглобових захворювань та стресу.

Необхідно враховувати наступні потенційні ризики та небезпеки:

1. Мускульно-суглобові захворювання: Довгі години роботи за комп'ютером можуть спричиняти напругу в м'язах та суглобах працівників. Це може призвести до розвитку таких захворювань, як синдром карпального каналу, біль у шії, спині, і зап'ястях. Продовжена експозиція цим факторам може створити загрозу здоров'ю.

2. Психоемоційні навантаження: Робота з великою кількістю інформації, аналіз проектів та постійні дедлайни можуть призвести до психологічного стресу та втоми. Це може вплинути на ефективність та психофізичний стан працівників.

Заходи забезпечення безпеки в ергономіці включають:

1. Організація робочого місця: Працівники повинні мати комфортне робоче місце з належною регулюванням висоти столу та стільця, а також правильною організацією обладнання, щоб запобігти мускульним та суглобовим навантаженням.

2. Регулярні перерви: Програма регулярних коротких перерв допомагає працівникам розслабити м'язи, розім'яти шию та спину, а також відпочити очам.

3. Правильне освітлення: Освітлення робочого простору має бути достатньо яскравим та рівномірним, з використанням антиблікових покриттів на моніторах, щоб уникнути надмірного напруження очей.

4. Економія рухів: Важливо зменшити кількість надмірних рухів, що можуть призвести до втоми. Використання гарячих клавіш, шорткатів та миші з великою роздільною здатністю може полегшити роботу.

5. Психологічна підтримка: Забезпечення психологічної підтримки працівників у вигляді консультацій або навчання стратегіям керування стресом допоможе зменшити психоемоційні навантаження.

6. Навчання і усвідомлення: Працівники повинні бути навчені правилам безпеки та ергономічним стандартам роботи з комп'ютером, а також усвідомлювати важливість дотримання цих правил для свого здоров'я.

Враховуючи ці заходи, можна забезпечити безпеку та комфорт працівників, які взаємодіють з системою автоматизованого проектування силового стабілізатора МКА, і зменшити ризики, пов'язані з ергономічними аспектами роботи.

## **5.2. Електробезпека**

Робота з комп'ютерами та електронною апаратурою може створювати потенційні ризики електротравматизму. Важливо дотримуватися правил безпеки щодо використання електроніки, установки та заземлення обладнання.

Потенційні ризики та небезпеки, пов'язані з електробезпекою, включають:

1. Електротравматизм: Робота з електронікою та електричним обладнанням може призвести до потенційного електротравматизму. Напруга, яка використовується в системі, може бути небезпечною для життя та здоров'я працівників.

2. Перегрів електронної апаратури: Продовжена робота обчислювального обладнання може призвести до перегріву, що може викликати пожежу або пошкодження обладнання.

3. Недостатня вентиляція: Комп'ютери та інші електронні пристрої виробляють тепло. Недостатній рівень вентиляції може призвести до перегріву приміщення та небезпеки пожежі.

4. Замкнення та короткі замикання: Неправильне підключення, недоліки в кабелях або пошкодження ізоляції можуть призвести до замкнень або коротких замикань, що можуть викликати пожежу або електротравматизм.

5. Безпека під час робіт на електроустаткуванні: Робота з електронікою та електричним обладнанням може вимагати обслуговування або ремонту. Важливо дотримувати правил безпеки під час виконання цих робіт для запобігання електротравматизму.

Заходи забезпечення безпеки в електробезпеці включають:

1. Оцінка ризиків: Проведення ретельної оцінки ризиків з електробезпеки в робочому середовищі, щоб виявити потенційні небезпеки та визначити, як їх уникнути.

2. Захист від електротравматизму: Використання ізольованого електроінструменту, захисного одягу та обладнання, що запобігає прямому контакту з напругою, для захисту працівників від електротравматизму.

3. Регулярна перевірка та обслуговування обладнання: Регулярна інспекція та обслуговування електронної апаратури та електричного обладнання для виявлення та виправлення можливих проблем до того, як вони стануть загрозою.

4. Ефективна вентиляція: Забезпечення належної вентиляції в приміщенні, де працюють працівники, щоб запобігти перегріву та покращити загальний комфорт.

5. Заходи безпеки при роботі на електроустаткуванні: Надання навчання та інструкцій щодо безпеки під час робіт на електроустаткуванні та обслуговування.

6. Відповідність нормативам та стандартам: Дотримання вимог електробезпеки, включаючи національні та міжнародні стандарти та правила.

За допомогою цих заходів можна мінімізувати ризики, пов'язані з електробезпекою, та забезпечити безпеку працівників, які працюють з системою автоматизованого проектування силового стабілізатора МКА.

### **5.3. Вплив на зір і зіральний комфорт**

Постійна робота перед комп'ютерними моніторами може викликати втоми очей та негативно впливати на зір. Рекомендується встановлення правильного освітлення, користування антибліковими екранами та регулярні перерви для відпочинку очей.

Потенційні ризики та небезпеки, пов'язані з впливом на зір та зіральний комфорт, включають:

1. Втома очей: Подовжена робота перед монітором може призводити до втоми очей, що проявляється у вигляді сухості, свербіжу, почервоніння та болі в очах.

2. Синдром комп'ютерного зору: Довгий час перед монітором може викликати синдром комп'ютерного зору, який включає симптоми, такі як блимання, дублювання тексту, розсіяне бачення та розсіяний фокус.

3. Блики та відблиски: Погане освітлення або неправильне розташування моніторів може створити блики та відблиски, які впливають на чіткість та зручність перегляду.

4. Погіршення зору на відстань: Постійна робота перед близькоспрямованим дисплеєм може вплинути на здатність фокусування очей на об'єктах на віддалену відстань.

5. Негативний вплив на сон: Вечірня робота перед монітором може порушувати природний ритм сну та призводити до безсоння.

Заходи забезпечення безпеки для забезпечення зірального комфорту включають:



1. Оптимальне освітлення: Забезпечення належного освітлення робочого місця з можливістю регулювання яскравості. Важливо уникати відблисків на моніторі.

2. Перерви для відпочинку очей: Регулярні короткі перерви для відпочинку очей, під час яких працівники можуть фокусувати погляд на віддаленому об'єкті.

3. Антиблікові заходи: Використання антиблікових покриттів на моніторах та антиблікових окулярів, які сприяють зниженню бликів.

4. Правильний вибір шрифтів і розмірів тексту: Використання оптимальних розмірів та типів шрифтів для полегшення читання без надмірного напруження очей.

5. Окуляри індивідуальної корекції: Забезпечення, щоб працівники, які користуються окулярами або контактними лінзами, мали правильну корекцію для роботи з комп'ютером.

6. Слідкування за режимом роботи та сном: Поширення усвідомленості про важливість правильного режиму сну та обмеження тривалості часу перед екраном під час нічної роботи.

За допомогою цих заходів можна забезпечити зіральный комфорт та зменшити негативний вплив на зір працівників, які взаємодіють з системою автоматизованого проектування силового стабілізатора МКА.

#### **5.4. Потенційні хімічні ризики**

Використання хімічних речовин у процесі виготовлення електронних компонентів або при лабораторних дослідженнях може створювати ризик отруєння або впливу на дихальні шляхи. Необхідно дотримуватися вимог щодо безпечного оброблення та зберігання хімічних речовин.

Потенційні ризики та небезпеки, які можуть виникнути, включають:

1. Токсичні речовини: Використання токсичних речовин або розчинників під час лабораторних робіт або обробки матеріалів може призвести до отруєння працівників, які можуть надихати пари цих речовин або потрапляти в контакт з ними через шкіру.

2. Пожежна небезпека: Деякі хімічні речовини можуть бути запальними або підвищувати ризик пожежі. Неналежне зберігання та обробка хімікатів може спричинити пожежу.

3. Ризики вибуху: Використання хімічних речовин у недопустимих умовах або їх неналежне зберігання може створити ризик вибуху.

4. Викиди газів та речовин у повітря: Неправильне вентильовання або недостатні заходи безпеки під час обробки хімічних речовин можуть призвести до викидів шкідливих газів або парів у повітря робочого приміщення.

5. Забруднення довкілля: Неправильна утилізація хімічних відходів може спричинити забруднення навколишнього середовища токсичними речовинами.

Заходи забезпечення безпеки для управління потенційними хімічними ризиками включають:

1. Оцінка ризиків: Визначення та оцінка ризиків, пов'язаних з використанням конкретних хімічних речовин у процесі проектування та виробництва стабілізатора.

2. Використання безпечних альтернатив: Максимально можливе використання безпечних альтернативних матеріалів і процесів, що не вимагають використання небезпечних речовин.

3. Належне зберігання та обробка: Зберігання та обробка хімічних речовин повинні відповідати нормативам та стандартам безпеки.

4. Особистий захист: Працівники повинні мати доступ до відповідного особистого захисту, такого як захисні костюми, респіратори та рукавички.

5. Вентиляція та контроль: Забезпечення ефективної вентиляції та контролю за викидами шкідливих речовин в атмосферу.

6. Навчання та інструктаж: Надання навчання та інструктажу працівникам з питань безпеки під час роботи з хімічними речовинами та застосування заходів безпеки.

За допомогою цих заходів можна зменшити ризики, пов'язані з потенційними хімічними небезпеками та забезпечити безпеку працівників, які взаємодіють з хімічними речовинами в системі автоматизованого проектування стабілізатора для МКА.

## **5.5. Безпека даних та інформаційна безпека**

Важливо забезпечити захист конфіденційної інформації та даних, які обробляються в системі автоматизованого проектування, щоб уникнути можливості витоку даних або кібератак.

Потенційні ризики та небезпеки, пов'язані з безпекою даних та інформаційною безпекою, включають:

1. Несанкціонований доступ: Несанкціонований доступ до конфіденційної інформації може призвести до витоку даних, викрадення інтелектуальної власності, або порушення конфіденційності.

2. Віруси та шкідливе програмне забезпечення: Віруси, шпигунське програмне забезпечення та інші види зловмисного ПЗ можуть завдати шкоди інформації та системам, що призводить до втрати даних та порушення робочих процесів.

3. Атаки на мережу: Атаки на мережу, такі як DDoS атаки або злам систем безпеки, можуть призвести до припинення роботи системи, витоку інформації, або внесення змін у проектну документацію.

4. Соціальна інженерія: Атаки на інформаційну безпеку можуть бути проведені шляхом маніпуляції працівників для отримання доступу до системи або інформації.

5. Зберігання та обробка даних: Неправильне зберігання та обробка даних можуть призвести до їх втрати, витоку або пошкодження.

Заходи забезпечення безпеки для безпеки даних та інформаційної безпеки включають:

1. Автентифікація та авторизація: Застосування механізмів автентифікації, таких як паролі, біометричні дані або двофакторна аутентифікація, та визначення прав доступу для обмеження несанкціонованого доступу до інформації.

2. Шифрування: Використання шифрування для захисту даних під час передачі та зберігання.

3. Регулярні апдейти та патчі: Постійне оновлення програмного забезпечення та застосування патчів для запобігання вразливостям, які можуть бути використані для атак.

4. Навчання та інструктаж: Навчання працівників щодо інформаційної безпеки, включаючи усвідомлення ризиків та правила безпеки в обробці даних.

5. Резервне копіювання та відновлення: Регулярне створення резервних копій даних та процедури відновлення для запобігання втраті даних.

6. Моніторинг та виявлення інцидентів: Встановлення систем моніторингу для виявлення несправностей або підозрілих дій, а також швидкого реагування на інциденти.

7. Політика інформаційної безпеки: Встановлення чітких політик та процедур інформаційної безпеки, а також їх активне дотримання.

За допомогою цих заходів можна забезпечити безпеку даних та інформаційну безпеку в системі автоматизованого проектування стабілізатора для МКА і запобігти потенційним ризикам та небезпекам, пов'язаним з безпекою даних та інформаційною безпекою.

## **5.6. Пожежна безпека**

Використання електронної апаратури може створювати пожежний ризик, особливо в умовах недостатньої вентиляції та перегріву обладнання. Важливо дотримувати правил безпеки щодо електропожеж та мати в розпорядженні засоби пожежогасіння.

Потенційні ризики та небезпеки, пов'язані з пожежною безпекою, включають:

1. Коротке замикання та перевантаження: Використання електроніки та електроприладів в системі може призвести до коротких замикань або перевантажень, що можуть спричинити пожежу.

2. Несправні електричні системи: Неналежне обслуговування електричних систем та електрообладнання може призвести до несправностей, які включають перегрів, іскри та пожежу.

3. Пожежні речовини: Наявність горючих матеріалів, таких як документи, меблі, кабелі, або легкозаймисті речовини в робочому приміщенні може сприяти швидкому поширенню вогню.

4. Відсутність засобів вогнегасіння: Недостатнє забезпечення системами вогнегасіння, такими як вогнегасники та пожежні траси, може призвести до неможливості швидко і ефективно загасити пожежу.

5. Погана організація робочого простору: Завантажений або неорганізований робочий простір може змінити можливість швидкої евакуації працівників у разі пожежі.

Заходи забезпечення безпеки для пожежної безпеки включають:

1. Оцінка ризиків: Проведення оцінки ризиків щодо пожежної безпеки для ідентифікації потенційних загроз та визначення заходів безпеки.

2. Системи пожежного спостереження: Встановлення систем виявлення та автоматичної сигналізації про пожежу для раннього виявлення і сповіщення працівників про можливу небезпеку.

3. Вогнегасники та пожежні траси: Розташування вогнегасників та пожежних трас для швидкого доступу та використання у разі пожежі.

4. Пожежні учбові заняття: Організація пожежних учбових занять для працівників для навчання їх правилам евакуації та використання засобів вогнегасіння.

5. Організація робочого простору: Забезпечення належного організованого робочого простору та вільних шляхів для евакуації.

6. Внутрішні правила та процедури: Встановлення та дотримання внутрішніх правил та процедур щодо пожежної безпеки, включаючи інструкції з використання вогнегасників.

За допомогою цих заходів можна мінімізувати ризики та небезпеки, пов'язані з пожежною безпекою, та забезпечити безпеку працівників, які працюють в системі автоматизованого проектування стабілізатора для МКА.

### **5.7. Комунікація та навчання**

Наявність ефективної системи комунікації та навчання щодо правил охорони праці допомагає працівникам розуміти та дотримуватися процедур та нормативів безпеки.

Потенційні ризики та небезпеки в цьому контексті включають:

1. Недорозуміння: Недорозуміння в комунікації між працівниками може призвести до помилок у виробництві або проектуванні, що може вплинути на безпеку та якість продукту.

2. Недостатня навчальна база: Недостатня підготовка та навчання працівників можуть призвести до несправностей в роботі, небезпеки для здоров'я та недосягнення мети проекту.

3. Співпраця та командна робота: Проекти МКА часто вимагають співпраці та командної роботи. Неправильна комунікація та недоліки в навичках співпраці можуть призвести до незгідностей, конфліктів та невиконання завдань.

4. Технічні засоби комунікації: Наявність та надійність технічних засобів комунікації, таких як електронна пошта, відеоконференції, може впливати на якість спілкування та можливість отримання важливої інформації.

5. Планування та управління навчанням: Недостатнє планування та надання можливостей для навчання працівників може призвести до відсталості в навичках та знаннях.

Заходи забезпечення безпеки для комунікації та навчання включають:

1. Чітка комунікація: Забезпечення чіткої та відкритої комунікації між працівниками та командами для уникнення недорозумінь.

2. Навчальні програми: Встановлення програм навчання та навчальних матеріалів для надання необхідних знань та навичок працівникам.

3. Оцінка навчання: Оцінка та перевірка знань та навичок працівників для переконання, що вони готові до безпечної роботи.

4. Розвиток навичок співпраці та командної роботи: Навчання працівників навичкам співпраці та командної роботи для підтримки ефективної комунікації в команді.

5. Засоби комунікації: Забезпечення належного функціонування та надійності технічних засобів комунікації.

6. Планування навчання та управління знаннями: Розробка планів навчання та системи управління знаннями для постійного навчання та покращення навичок працівників.

За допомогою цих заходів можна підвищити якість комунікації та навчання, зменшити ризики, пов'язані з недорозуміннями та недоліками в навичках, та покращити безпеку та продуктивність працівників в системі автоматизованого проектування стабілізатора для МКА.

## **5.8. Висновок**

Охорона праці в системі автоматизованого проектування силового стабілізатора малого космічного апарата (МКА) вимагає комплексного підходу до ідентифікації та управління ризиками та небезпеками, що можуть виникнути на робочому місці. У нашій попередній відповіді були розглянуті різні аспекти охорони праці, включаючи ергономіку, електробезпеку, вплив на зір та зіральний комфорт, потенційні хімічні ризики, безпеку даних та інформаційну безпеку, пожежну безпеку, а також комунікацію та навчання.

Враховуючи ці аспекти, важливо пам'ятати про необхідність систематичного аналізу та оцінки ризиків, планування та впровадження заходів безпеки, а також постійного навчання та навчання працівників для підвищення рівня обізнаності та навичок. Керівництво та працівники повинні працювати разом для створення безпечного та продуктивного робочого середовища.

Загальна мета впровадження заходів з охорони праці в системі проектування стабілізатора для МКА - це забезпечення безпеки працівників, запобігання аваріям та інцидентам, збереження інформації та зниження ризиків для успішної реалізації проекту. Всі вищезазначені заходи забезпечення безпеки сприятимуть досягненню цієї мети та забезпечать ефективну роботу системи автоматизованого проектування стабілізатора для МКА.

## РОЗДІЛ 6 ОХОРОНА НАВКОЛИШНЬОГО СЕРЕДОВИЩА

Система автоматизованого проектування силового стабілізатора малого космічного апарата є критичним аспектом сучасних космічних технологій. Забезпечення охорони навколишнього середовища у космічних дослідженнях вимагає надзвичайної уваги до зменшення впливу космічних апаратів на космос та земну екосистему. У даному розділі буде розглянуто важливі аспекти системи автоматизованого проектування силового стабілізатора та її роль у забезпеченні ефективної охорони навколишнього середовища під час запуску та експлуатації малого космічного апарата.

З моменту запуску перших супутників і до сьогоднішнього дня космічні дослідження стали необхідною складовою нашої науково-технічної діяльності. Вони допомагають розкрити та вивчити найбільш складні явища у Всесвіті, вивчити нашу планету та інші об'єкти Сонячної системи. Проте разом із збільшенням кількості запусків космічних апаратів зростає і поглиблюється занос впливу людей на навколишнє середовище.

Силовий стабілізатор малого космічного апарата відіграє ключову роль у забезпеченні точного позиціонування та стабільності апарата під час його руху в космічному просторі. Автоматизована система проектування цього пристрою відкриває перед нами можливість поєднати високу технологію зі збереженням навколишнього середовища.

Досягнення в сфері автоматизованого проектування дозволяють вдосконалити конструкцію силових стабілізаторів таким чином, щоб знизити споживання енергії, вагу та ресурси, що використовуються. Це сприяє зменшенню екологічного відбитку космічних місій і сприяє збереженню навколишнього середовища. Окрім цього, автоматизоване проектування дозволяє прискорити процес розробки та впровадження нових технологій, сприяючи подальшій охороні природи та довкілля.

У цьому розділі ми розглянемо технічні аспекти системи автоматизованого проектування силового стабілізатора малого космічного апарата, її переваги в плані



охорони навколишнього середовища та роль цієї системи у створенні більш сталого та екологічно безпечного підходу до космічних досліджень.

### **6.1. Відходи та забруднення**

Під час процесу автоматизованого проектування та виробництва силового стабілізатора можуть утворюватися відходи та забруднення. Це може включати в себе хімічні речовини, електронний сміття та інші матеріали, які можуть негативно впливати на навколишнє середовище, якщо не враховувати відповідні стандарти та норми їх обробки та видалення.

Деякі з цих потенційних ризиків та небезпек включають:

1. Хімічні забруднення: Під час виробництва силових стабілізаторів можуть використовуватися хімічні речовини, які можуть бути потенційно токсичними або небезпечними для здоров'я людини та навколишнього середовища. Наприклад, розчинники, фарби, клеї та інші хімічні компоненти можуть створювати викиди і можуть потрапити до ґрунту чи водойм, що може призвести до забруднення.

2. Електронний сміття: Розробка та виробництво електронних компонентів для силових стабілізаторів може призвести до великих обсягів електронного сміття. Це може бути проблемою, оскільки багато електронних компонентів містять небезпечні речовини, такі як свинець, кадмій та інші важкі метали, які можуть витікати в навколишнє середовище, якщо сміття неконтрольовано знищується чи залишається без надійного перероблення.

Заходи зменшення забруднення навколишнього середовища включають:

1. Використання безпечних матеріалів: Можна встановити стандарти для використання безпечних та екологічно безпечних матеріалів під час виробництва силового стабілізатора. Це допоможе зменшити ризики хімічного забруднення та токсичних викидів.

2. Переробка та вторинне використання: Замість викидання електронного сміття можна стимулювати переробку та вторинне використання вже відслуживших своєму терміну придатності електронних компонентів та пристроїв. Це сприяє зменшенню негативного впливу на навколишнє середовище та зменшує потребу у видобутку нових ресурсів.

3. Відповідальне використання ресурсів: Ефективне використання ресурсів, включаючи енергію та сировину, сприяє зниженню викидів та збереженню природних ресурсів.

4. Система відходів та ефективне управління: Встановлення системи обліку та контролю за відходами, а також використання ефективних методів їх знищення, дозволяє зменшити негативний вплив на довкілля та забезпечити безпечне видалення відходів.

Загальною метою цих заходів є збереження навколишнього середовища та мінімізація екологічного відбитку під час розробки та виробництва силових стабілізаторів для космічних апаратів.

## **6.2. Використання ресурсів**

Розробка та виробництво силового стабілізатора можуть вимагати значних кількостей природних ресурсів, таких як метали, пластик та енергія. Це може призвести до виснаження природних ресурсів і збільшення викидів CO<sub>2</sub> під час видобутку і виробництва.

Потенційні ризики та небезпеки можуть бути наступними:

1. Викиди CO<sub>2</sub> і інших парникових газів: Виробництво силового стабілізатора може вимагати значних кількостей енергії, яка може бути вироблена за допомогою споживання вугільного пального або інших викидів CO<sub>2</sub>-забруднюючих джерел енергії. Це призводить до збільшення викидів парникових газів, що впливає на глобальне потепління та зміни клімату.

2. Викиди виробничих відходів: Виробництво силових стабілізаторів може супроводжуватися викидами відходів, включаючи обрізки матеріалів, надлишки фарб, пластикові відходи тощо. Це може призвести до забруднення навколишнього середовища і потребує належного управління та видалення цих відходів.

3. Використання обмежених ресурсів: Ресурси, такі як рідкі метали, можуть бути обмеженими та вичерпними. Використання їх у великих кількостях для виробництва силових стабілізаторів може призвести до дефіциту цих ресурсів та зменшення їх доступності для інших промислових та технологічних застосувань.

Заходи зменшення забруднення навколишнього середовища та ризиків, пов'язаних з використанням ресурсів, можуть включати:

1. Використання відновлювальних джерел енергії: Перехід до використання відновлювальних джерел енергії, таких як сонячна або вітрова енергія, для виробництва електроенергії під час проектування та виробництва силового стабілізатора допоможе зменшити викиди CO<sub>2</sub> та інших шкідливих газів.

2. Ефективне використання матеріалів: Розробка та використання ефективних та легких матеріалів для конструкції силових стабілізаторів може допомогти зменшити використання обмежених ресурсів та об'єми виробничих відходів.

3. Вторинне використання та переробка: Сприяння вторинному використанню та переробці компонентів та матеріалів силового стабілізатора допомагає подовжити їх життєвий цикл та зменшити виробничі відходи.

4. Споживання ресурсів за потребою: Оптимізація використання ресурсів під час проектування та виробництва, включаючи енергію та сировину, сприяє зменшенню викидів та мінімізує відбиток на навколишнє середовище.

За врахуванням цих заходів можна здійснити проектування та виробництво силових стабілізаторів, зменшуючи їх негативний вплив на навколишнє середовище і сприяючи сталому розвитку космічних технологій.

### **6.3. Енергоефективність**

Недостатня енергоефективність силового стабілізатора може призвести до великого споживання електроенергії під час його експлуатації. Це може вплинути на екологічну стійкість, особливо якщо електроенергія виробляється з використанням вугілля або інших забруднюючих джерел енергії.

Потенційні ризики та небезпеки включають:

1. Високе споживання енергії: Якщо силовий стабілізатор не є енергоефективним, це може призвести до великого споживання електроенергії під час його роботи. Це може вимагати більше виробництва електроенергії, що, в свою чергу, може бути здійснене за рахунок викидів CO<sub>2</sub> та інших забруднюючих речовин.

2. Забруднення навколишнього середовища: Високий споживання енергії також може вести до більшого використання забруднюючих джерел енергії, таких як вугільне паливо або природний газ, що сприяє збільшенню викидів парникових газів і забрудненню навколишнього середовища.

3. Зниження ефективності пристроїв: Низька енергоефективність силового стабілізатора може призвести до зменшення його загальної продуктивності та надійності, що може викликати негативні наслідки в космосі та вплинути на тривалість місії космічного апарата.

Для зменшення забруднення навколишнього середовища та ризиків, пов'язаних з низькою енергоефективністю, можна вжити наступні заходи:

1. Ефективне використання енергії: Проектувати силовий стабілізатор так, щоб він ефективно використовував енергію та мінімізував втрати енергії під час роботи. Це може бути досягнуто через оптимізацію дизайну та використання високоефективних компонентів.

2. Використання відновлювальних джерел енергії: Використовувати відновлювальні джерела енергії, такі як сонячні панелі або вітрові турбіни, для живлення силового стабілізатора, особливо під час експлуатації в космосі, де сонячне випромінювання легко доступне.

3. Використання енергоефективних матеріалів: Використовувати матеріали з високим коефіцієнтом теплопровідності та мінімізувати тепловтрати, що допомагає зменшити споживання енергії під час роботи силового стабілізатора.

4. Моніторинг та підтримка: Забезпечити систему моніторингу та підтримки для постійного контролю та підвищення ефективності силового стабілізатора під час експлуатації.

За допомогою цих заходів можна покращити енергоефективність силових стабілізаторів, зменшити негативний вплив на навколишнє середовище та забезпечити стабільне та надійне функціонування космічних апаратів.

#### **6.4. Ризики від падінь та аварій**

Космічний апарат із силовим стабілізатором може підлягати ризику аварій під час запуску та руху в космосі. Це може призвести до викидів пального, токсичних речовин або навіть радіоактивних матеріалів у навколишнє середовище.

Потенційні ризики та небезпеки, можуть включати:

1. Забруднення при падінні: При аварійному падінні космічного апарата, силовий стабілізатор може пошкодитися та викинути різні матеріали і речовини в навколишнє середовище. Це може призвести до забруднення природи, включаючи ґрунт і водойми.

2. Негерметичність та розкриття шкідливих речовин: Внаслідок аварії, силовий стабілізатор може постраждати і стати негерметичним. Це може призвести до викидів шкідливих речовин, які можуть забруднити довкілля і створити небезпеку для здоров'я людини.

3. Розпад матеріалів: Під час аварій можуть розпадатися матеріали силового стабілізатора, що може призвести до утворення небезпечних частинок і речовин, які можуть мати негативний вплив на навколишнє середовище та живі організми.

Заходи зменшення забруднення навколишнього середовища в разі ризиків від падінь та аварій включають:

1. Використання безпечних матеріалів: Під час проектування силового стабілізатора слід використовувати безпечні матеріали, які не викидають шкідливі речовини під час аварій.

2. Розробка міцних оболонок: Забезпечити міцні та надійні оболонки для силового стабілізатора, які зменшують ризик руйнування при падінні чи аварії та запобігають викидам матеріалів.

3. Аварійний контроль та управління: Розробити системи аварійного контролю та управління, які можуть забезпечити безпеку силового стабілізатора та запобігти аваріям або мінімізувати їх наслідки.

4. Моніторинг та підтримка: Забезпечити системи моніторингу та підтримки для постійного контролю за станом силового стабілізатора під час експлуатації та у разі аварій, щоб забезпечити безпеку і попередити небажані викиди.

За допомогою цих заходів можна мінімізувати негативний вплив на навколишнє середовище при можливих ризиках та аваріях, пов'язаних з силовим стабілізатором космічного апарата.

## **6.5. Викиди і електромагнітні перешкоди**

Робота електронних компонентів та системи автоматизованого проектування може вплинути на електромагнітне оточення, що має важливе значення у космосі. Негативний вплив на супутники та інші космічні апарати може призвести до загрози для навколишнього середовища в космосі.

Потенційні ризики та небезпеки, можуть включати:

1. Викиди газів: В процесі роботи силового стабілізатора можуть виникати викиди газів, таких як азотні оксиди або інші шкідливі речовини. Це може призвести до забруднення атмосфери в околицях апарата та сприяти зміні клімату.

2. Електромагнітні перешкоди: Робота силового стабілізатора може створювати електромагнітні поля, які можуть впливати на інші системи та обладнання в космічному середовищі, включаючи інші супутники та комунікаційні пристрої.

Для зменшення забруднення навколишнього середовища та ризиків, пов'язаних з викидами та електромагнітними перешкодами, можна вжити наступні заходи:

1. Використання енергоефективних технологій: Впровадити технології, які зменшують споживання енергії силовим стабілізатором та, відповідно, викиди газів.

2. Використання діагностики та контролю викидів: Розробити системи моніторингу та контролю, які дозволяють вчасно виявляти та коригувати викиди газів або інших шкідливих речовин.

3. Електромагнітна сумісність: Проектувати силовий стабілізатор так, щоб мінімізувати електромагнітні перешкоди та забезпечити сумісність з іншими космічними системами.

4. Використання безшумних матеріалів: Забезпечити використання матеріалів, які не генерують шум та вібрації, що можуть бути шкідливими для навколишнього середовища та інших супутників.

5. Здійснення аналізу життєвого циклу: Провести аналіз життєвого циклу силового стабілізатора для ідентифікації можливостей зменшення забруднення навколишнього середовища на різних етапах його життєвого циклу.

За допомогою цих заходів можна зменшити негативний вплив силових стабілізаторів на навколишнє середовище та забезпечити сталий та екологічно безпечний розвиток космічних технологій.

## **6.6. Висновок**

Важливість системи автоматизованого проектування силового стабілізатора малого космічного апарата для охорони навколишнього середовища для сучасних викликів у сфері екології і змін клімату, розробка та впровадження екологічно дружніх технологій для космічних апаратів стає надзвичайно важливою.

Аналіз потенційних ризиків та небезпек, пов'язаних з охороною навколишнього середовища у процесі проектування та виробництва силового стабілізатора, показав, що існують конкретні загрози, такі як викиди газів, електромагнітні перешкоди, забруднення при падінні та аварії, які можуть призвести до негативного впливу на довкілля та здоров'я людини.

Проте, за допомогою відповідних заходів, можна знизити ці ризики та небезпеки. Важливо розробляти та використовувати енергоефективні технології, відновлювальні джерела енергії, безпечні матеріали та системи моніторингу та контролю. Крім того, ефективний аналіз життєвого циклу та підтримка системи дозволяють забезпечити сталість та екологічну безпеку космічних технологій.

В цілому, система автоматизованого проектування силового стабілізатора малого космічного апарата має великий потенціал для зменшення негативного впливу на довкілля та сприяння сталому розвитку космічних технологій. Важливо продовжувати дослідження та розробки в цій області, щоб забезпечити більш безпечну та екологічно дружню експлуатацію космічних апаратів у майбутньому.

## ВИСНОВКИ

Результати досліджень та розробок, проведених у рамках даної роботи, свідчать про важливість та актуальність питання забезпечення стабільності та якості керування малими космічними апаратами (МКА). Проблема забезпечення необхідної якості керування малими космічними апаратами вимагає впровадження високоефективних систем їх стабілізації, і ця робота спрямована на розробку системи автоматизованого проектування силового стабілізатора для МКА.

У ході виконання роботи було створено комплексну систему автоматизованого проектування (САПР) нелінійної силової системи стабілізації МКА. В рамках цього процесу були визначені базові компоненти та їх характеристики, розроблені алгоритми проектування, розроблено математичне забезпечення для моделювання системи та визначено склад системи керування МКА на гіродінах. Ці кроки спрямовані на забезпечення ефективного та надійного функціонування стабілізатора під час місій в космосі.

Крім того, було розроблено методи та алгоритми програмно-методичного забезпечення досліджень, які включають в себе структурне моделювання системи стабілізації, проектування на основі базових пакетів прикладних програм та програмну реалізацію аналізу та синтезу системи. Ці методи та алгоритми дозволили провести якісні дослідження та оптимізацію системи стабілізації, забезпечуючи її ефективність.

Однією з ключових відзнак даної роботи проведення експериментальних досліджень для підтвердження результатів. Теоретичні та експериментальні дослідження методів розрахунку системи стабілізації МКА продемонстрували високу збіжність результатів, що свідчить про перспективність розроблених методів та системи проектування.

Результати даної роботи свідчать про можливість вдосконалення якості керування малими космічними апаратами за допомогою високоефективних систем стабілізації, розроблених з використанням автоматизованої системи проектування. Впровадження цих розробок може сприяти покращенню надійності та ефективності МКА сприятиме розвитку космічних досліджень.



## СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. Аблесімов О.К., Александров Є.Є., Александрова І.Є. Автоматичне керування рухомими об'єктами й технологічними процесами. - Харків: НТУ "ХПІ", 2008. - 443с.
2. Аблесімов О.К., Гончар А.Ю. Спостерігачі стану в САУ БПЛА.- Київ: «Електроніка та системи управління», 2012 -98с
3. Рогожин В. О., Синєглазов В. М., Філяшкін М.К. Пілотажно-навігаційні комплекси повітряних суден. — К. : Вид-во НАУ, 2005. — 316с.
4. Аблесімов О.К. Теорія автоматичного керування. - К.: Освіта України, 2019. — 270 с.
5. Зайцев Г.Ф., Стеклов В.К., Бріцький О.І. Теорія автоматичного управління. - К: Техніка, 2002. - 688с.
6. Наумчук О. М. Основи систем автоматизованого проектування. – Рівне: НУВГП, 2008. – 136с.
7. Тимченко А. А. Основи системного проектування та системного аналізу складних об'єктів: Основи САПР та системного проектування складних об'єктів: Підручник / за ред.. В.І.Бикова.- 2-ге вид. – К.: Либідь, 2003. – 272 с.
8. Желібо Є.П., Заверуха Н.М., Зацарний В.В. Безпека життєдіяльності: Навч. посіб. для студентів вищих навчальних закладів. 3-є видання /За ред.. Є.П. Жалібо. –К.: Каравела, 2004. – 328 с.20
9. Лапін В.М. Безпека життєдіяльності. Навчальний посібник. 2-е видання. – Львів: Львівський банківський коледж; К.: Т-во «Знання», КОО, 1999.
10. ДСТУ 2293-99 «Охорона праці. Терміни та визначення основних понять».