

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
НАЦІОНАЛЬНИЙ АВІАЦІЙНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
ФАКУЛЬТЕТ АЕРОНАВІГАЦІЇ, ЕЛЕКТРОНІКИ ТА ТЕЛЕКОМУНІКАЦІЙ
КАФЕДРА АЕРОКОСМІЧНИХ СИСТЕМ УПРАВЛІННЯ

ДОПУСТИТИ ДО
ЗАХИСТУ

Завідувач кафедри

_____ Мельник Ю.В.

“__” _____ 2024 р.

КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА

(ПОЯСНЮВАЛЬНА ЗАПИСКА)

ВИПУСКНИКА ОСВІТНЬО-КВАЛІФІКАЦІЙНОГО СТУПЕНЯ

“БАКАЛАВР”

Тема: «Застосування параметричної оптимізації для системи управління літального апарату»

Виконавець: студент групи СУ-403Б Романюк Тарас Андрійович

Керівник: к.т.н., доцент Абрамович Олена Олександрівна

Нормоконтролер: к.т.н., доцент Дивнич Микола Полікарпович

Київ 2024

НАЦІОНАЛЬНИЙ АВІАЦІЙНИЙ УНІВЕРСИТЕТ

Факультет аеронавігації, електроніки та телекомунікацій

Кафедра аерокосмічних систем управління

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

ЗАТВЕРДЖУЮ

Завідувач кафедри

_____ Мельник Ю.В.

«_____» _____ 2024 р.

ЗАВДАННЯ

на виконання кваліфікаційної роботи

Романюка Тараса Андрійовича

1. Тема кваліфікаційної роботи

Затверджена наказом ректора від «01» квітня 2024 р. № 511/ст.

2. Термін виконання роботи: з 13.05.2024 до 16.06.2024.

3. Вихідні дані до роботи: модель безпілотного літального апарата, задана в просторі станів матрицями А, В, С, D.

4. Зміст пояснювальної записки: вступ до безпілотних літальних апаратів, аналіз методу параметричної оптимізації системи управління для безпілотних літальних апаратів, застосування параметричного синтезу в проектуванні системи управління для безпілотних літальних апаратів.

5. Перелік ілюстративного матеріалу презентації: основні функції та завдання БПЛА, порівняння структурно-параметричного та параметричного синтезу, алгоритм параметричної оптимізації, перехідні характеристики замкненої системи, перехідні характеристики замкненої системи при оцінюванні якості.

6. Календарний план-графік

№ пор.	Завдання	Термін виконання	Відмітка про виконання
1.	Затвердження теми кваліфікаційної роботи	13.05.2024	

2.	Вступ, опис актуальності теми	16.05.2024	
3.	Пошук інформації для теорії	20.05.2024	
4.	Розробка практичної частини	25.05.2024	
5.	Оформлення роботи, доповнення теоретичної частини	30.05.2024	
6.	Підготовка доповіді та презентації	02.06.2024	
7.	Написання висновків та рекомендацій	03.06.2024	

7. Дата видачі завдання: «13» травня 2024 р.

Керівник кваліфікаційної роботи _____Абрамович О.О.
(підпис керівника (П.І.Б))

Завдання прийняв до виконання _____Романюк Т.А.
(підпис керівника (П.І.Б))

РЕФЕРАТ

Текстова частина роботи: 58 стор., 10 рис., 6 табл.

Об'єкт дослідження – алгоритми параметричної оптимізації, які можна використовувати для покращення характеристик системи управління.

Предмет дослідження – безпілотний літальний апарат.

Мета роботи – дослідити та проаналізувати можливості застосування параметричної оптимізації для покращення характеристик системи управління літального апарату.

Методи дослідження – комплексний аналіз та узагальнення наукової інформації, застосування алгоритму Нелдера-Міда для параметричної оптимізації та використання штрафної функції, використання комп'ютерного моделювання.

У кваліфікаційній роботі було розглянуто актуальність безпілотного літального апарату як літального апарату, застосовано структурно-параметричну та параметричну оптимізації для системи управління літального апарату в цілях вдосконалення існуючої системи управління.

БПЛА, ЛА, СИСТЕМА УПРАВЛІННЯ, ПАРАМЕТРИЧНА ОПТИМІЗАЦІЯ,
СТРУКТУРНО-ПАРАМЕТРИЧНА ОПТИМІЗАЦІЯ

ЗМІСТ

РЕФЕРАТ	4
ВСТУП.....	6
РОЗДІЛ 1.....	7
ВСТУП ДО БЕЗПЛОТНИХ ЛІТАЛЬНИХ АПАРАТІВ.....	7
1.1. Розвиток та актуальність застосування технології БПЛА як об'єкту управління.....	7
1.2. Визначення та загальна характеристика безпілотних літальних апаратів	9
1.3. Застосування БПЛА в різних сферах	10
1.3.1. Військове застосування	10
1.3.2. Цивільне застосування	11
1.4. Класифікація БПЛА	13
1.5. Основні характеристики БПЛА	16
1.6. БПЛА як об'єкт управління.....	19
1.6. Висновки	21
РОЗДІЛ 2.....	24
АНАЛІЗ МЕТОДУ ПАРАМЕТРИЧНОГО СИНТЕЗУ СИСТЕМ УПРАВЛІННЯ	24
2.1. Загальна характеристика систем управління	24
2.1.1. Системи управління	24
2.1.2. Дискретні системи управління	25
2.2. Огляд методів синтезу систем управління для БПЛА.....	27
2.2.1. Структурний та структурно-параметричний синтез	27
2.2.2. Алгоритм структурно-параметричного синтезу	29
2.2.3. Суть параметричного синтезу	30
2.2.4. Алгоритм параметричного синтезу	32
2.3. Штрафна функція	35
2.4. Метод Нелдера-Міда	37
Висновки	39
РОЗДІЛ 3.....	41
ЗАСТОСУВАННЯ ПАРАМЕТРИЧНОГО СИНТЕЗУ В ПРОЕКТУВАННІ СИСТЕМИ УПРАВЛІННЯ ДЛЯ БПЛА.....	41
3.1. Виконання структурно-параметричної та параметричної оптимізації над системою управління БПЛА	41
ПІДСУМОК.....	53
ЛІТЕРАТУРА.....	55
ДОДАТОК 1.....	56
ПРОГРАМА ФУНКЦІЇ ДЛЯ МІНІМІЗАЦІЇ.....	56
ДОДАТОК 2.....	57
ПРОГРАМА ОЦІНЮВАННЯ РЕЗУЛЬТАТІВ ВИКОНАННЯ ОПТИМІЗАЦІЙНОЇ ПРОЦЕДУРИ	57

ВСТУП

Безпілотні літальні апарати (БПЛА) стрімко набувають популярності в сучасному світі завдяки своїй автономності, високій ефективності та різноманітних сфер застосувань. Вони стали невід'ємною частиною багатьох галузей, включаючи військову справу, цивільну авіацію, сільське господарство, екологічний моніторинг та логістику. У зв'язку з цим виникає потреба в розробці та вдосконаленні систем управління БПЛА, які здатні забезпечити стабільну та точну роботу літальних апаратів в умовах змінного середовища.

Одним із перспективних методів для підвищення ефективності систем управління є параметрична оптимізація. Цей підхід дозволяє знаходити оптимальні параметри системи управління, що забезпечують найкращі показники стабільності, точності та ефективності. Параметрична оптимізація дозволяє враховувати різноманітні вимоги та обмеження, характерні для роботи БПЛА, що є критично важливим для їхнього успішного застосування.

Актуальність теми "Застосування параметричної оптимізації для системи управління літального апарату" обумовлена не лише технологічними викликами, але й економічною ефективністю. Використання параметричної оптимізації дозволяє значно знизити витрати на експлуатацію та обслуговування БПЛА, а також підвищити їхню продуктивність та надійність. Це відкриває нові можливості для широкого впровадження БПЛА в різні галузі.

У рамках даної дипломної роботи буде проведено детальний аналіз методу параметричної оптимізації та його застосування для систем управління БПЛА. Розглянуто різні підходи до параметричної оптимізації. Особлива увага буде приділена практичному застосуванню цих методів для оптимізації параметрів управління конкретними типами БПЛА.

Результати дослідження будуть підтверджені за допомогою комп'ютерного моделювання в середовищі розробки MATLAB та практичних експериментів, що дозволить оцінити ефективність запропонованих методів. Також будуть розглянуті можливі обмеження та напрямки подальших досліджень у цій галузі. Основною метою роботи є демонстрація того, що параметрична оптимізація є потужним інструментом для поліпшення характеристик систем управління БПЛА та забезпечення їхньої надійної роботи в різних умовах.

Таким чином, дана дипломна робота має на меті зробити внесок у розвиток технологій управління безпілотними літальними апаратами, підвищуючи їхню ефективність та надійність. Використання параметричної оптимізації дозволить досягти нових висот у розвитку БПЛА, роблячи їх ще більш корисними та продуктивними для сучасного суспільства.

РОЗДІЛ 1

ВСТУП ДО БЕЗПЛОТНИХ ЛІТАЛЬНИХ АПАРАТІВ

1.1. Розвиток та актуальність застосування технології БПЛА як об'єкту управління

Безпілотні літальні апарати, стали невід'ємною частиною сучасної авіації, знаходячи застосування у військовій, цивільній та комерційній сферах. Вони відрізняються автономністю, можливістю виконання складних завдань в умовах, недоступних для пілотованих літальних апаратів, та відносно низькою вартістю. Розвиток БПЛА можна розділити на кілька ключових етапів, кожен з яких приніс важливі технологічні досягнення та розширив можливості цих апаратів. З розвитком технологій автономного управління та штучного інтелекту, можливості БПЛА значно розширюються, що відкриває нові горизонти для їх застосування. Цей розділ присвячений аналізу сучасного стану технології БПЛА та обґрунтуванню актуальності їх використання як об'єкту управління.

Початковий етап розвитку (1900-ті - 1950-ті роки). Перші реальні спроби створення безпілотних апаратів відбулися під час Першої світової війни. Одним із таких прикладів є експериментальні польоти літаючих бомб, які мали завдання доставляти вибухові пристрої до цілей, що знаходилися на значній відстані. Ці апарати мали механічні системи навігації і обмежені можливості управління, але стали важливим кроком у розвитку БПЛА. У 1918 році був розроблений та відправлений на перший виліт "Жук Кеттерінга" який спочатку був названий як "повітряна торпеда Кеттерінга", який використовувався для автоматичного бомбардування. Хоча, революційна технологія "Жук" виявилася успішною, її не вдалося застосувати в Першій світовій війні, оскільки війна завершилася до завершення розробки і введення "Жука" в експлуатацію. [1]

Після закінчення Першої світової війни інтерес до безпілотних апаратів зменшився, але розвиток технологій продовжувався.

Кафедра АКСУ				ПОЯСНЮВАЛЬНА ЗАПИСКА			
Виконав	Романюк Т.А.			Вступ до безпілотних літальних апаратів			Аркушів
Керівник	Абрамович О.О.						58
Н-контр.	Дивнич М.П.				№ СУ-403Б		
Зав.каф.	Мельник Ю.В.						

У міжвоєнний період розробники у різних країнах експериментували з радіокерованими літальними апаратами, які могли б виконувати розвідувальні та тренувальні місії. В цей час з'явилися перші зразки радіокерованих мішеней, які використовувалися для тренування зенітної артилерії. У 1930-х роках британські інженери активно працювали над створенням радіокерованих літаків. Одним із результатів цих зусиль став літак DH.82B Queen Bee, який використовувався для тренування стрільців зенітної артилерії. Цей апарат став прообразом сучасних безпілотних цільових літаків і показав можливість створення ефективних безпілотних систем.[2]

Становлення технології (1960-ті - 1980-ті роки). У цей період розвиток електроніки та сенсорних технологій сприяв створенню більш досконалих БПЛА. Військові програми США та СРСР активно використовували дрони для розвідки та спостереження. У СРСР, починаючи з 50-х років минулого століття, активно проводилися дослідження з метою створення військових безпілотних літальних апаратів. Першим у своєму роді став дрон для розвідки, модель Ла-17, який був розроблений у Конструкторському бюро Лавочкина. Його максимальна вага досягала 3 тонн, він міг розвивати швидкість до 900 км/год і мав максимальну дальність польоту 17 км. Цей безпілотник міг перебувати в повітрі до години.[3]

Радянський Союз мав значну програму розробки безпілотних літальних апаратів для розвідки та інших військових завдань. Одним з перших був надзвуковий розвідувальний Ту-123 "Ястреб" (1964). Найвідоміші моделі - це розвідувальні "Стриж" (1979) та "Рейс" (1976), які використовувались у війнах в Афганістані, Чечні, Грузії та Україні. [4]

Сучасний етап (1990-ті - сьогодні). З 1990-х років розвиток GPS, цифрових камер та комп'ютерних технологій значно розширив можливості БПЛА. Вони стали використовуватися не лише у військових, але й у цивільних цілях: для картографування, моніторингу навколишнього середовища, агровиробництва та доставки товарів. Наприклад, дрони типу "Predator" і "Reaper" широко використовувалися під час конфліктів у Афганістані та Іраку.

Військові безпілотні літальні апарати стрімко набирають обертів, стаючи одним із найдинамічніших секторів сучасної військової авіації. Їхній вплив на тактику ведення бойових дій вже відчутний, а прогнози на майбутнє ще більш вражаючі. Цю епоху ще називають "віком дронів та гаубиць", де БПЛА виступають в ролі "очей" артилерії. Ринок бойових безпілотників переживає бурхливий ріст. Інвестиції в цю сферу постійно зростають, стимулюючи розробку нових, все більш досконалих моделей БПЛА. Їхні можливості постійно розширюються, роблячи безпілотники незамінними помічниками на полі бою.

Ось декілька значних факторів, які роблять БПЛА такими перспективними:

- *Широкий спектр завдань:* БПЛА можуть використовуватися для ведення розвідки, нанесення ударів, коригування артилерійського вогню, радіоелектронної боротьби, евакуації поранених та багато іншого.
- *Висока мобільність:* БПЛА здатні швидко переміщатися на значні відстані, забезпечуючи оперативність та гнучкість у бойових діях.
- *Низький ризик для особового складу:* Завдяки безпілотному керуванню БПЛА мінімізують ризики для життя військових.
- *Відносно низька вартість:* У порівнянні з традиційними бойовими літаками, БПЛА мають значно нижчу вартість виробництва та експлуатації.

Важливо зазначити, що розвиток БПЛА несе з собою й певні виклики. Питання, пов'язані з автономними системами озброєння, а також проблеми кібербезпеки та протидії ворожим БПЛА потребують ретельного вивчення та вирішення.

1.2. Визначення та загальна характеристика безпілотних літальних апаратів

Літальний апарат (ЛА) - це пристрій, який може підніматися та переміщатися в атмосфері або в космосі.

Безпілотний літальний апарат (БПЛА), також відомий як дрон, - це повітряне судно, яке може здійснювати політ без фізичної присутності пілота на борту.

Українське законодавство визначає поняття безпілотного повітряного судна та безпілотного авіаційного комплексу таким чином:

Безпілотний літальний апарат - повітряне судно, призначене для виконання польоту без пілота на борту, керування польотом якого і контроль за яким здійснюються відповідною програмою або за допомогою спеціальної станції керування, що знаходиться поза повітряним судном. [5]

Безпілотне повітряне судно - повітряне судно, призначене для виконання польоту без пілота на борту, керування польотом якого і контроль за яким здійснюються за допомогою спеціальної станції керування, що розташована поза повітряним судном. [6]

БПЛА представляють собою різноманітну категорію авіаційних систем, які варіюються за розмірами, формою, можливостями і призначенням. Вони можуть бути як невеликими апаратами, які важать лише декілька грамів, так і великими комплексами, які можуть нести значні корисні навантаження. Основні компоненти БПЛА включають фюзеляж, силову установку, систему керування польотом, засоби навігації та зв'язку. БПЛА можуть керуватися дистанційно за допомогою оператора на землі або ж діяти автономно за заздалегідь запрограмованими інструкціями.

Існує два основних типи БПЛА:

- *Дистанційно керовані літальні апарати (ДКЛА):* Керуються пілотом на землі за допомогою пульта дистанційного керування або комп'ютера. Цей тип БПЛА часто використовується для завдань, що потребують високої точності і оперативного контролю, таких як аерофотозйомка, спостереження та інспекції. Оператор контролює БПЛА в режимі реального часу, використовуючи відео та телеметричні дані, що передаються з борту апарата.
- *Автономні літальні апарати (АЛА):* Діють за заздалегідь запрограмованим планом польоту, можуть самостійно приймати рішення в залежності від ситуації. Ці апарати оснащені складними системами навігації та штучного інтелекту, що дозволяють їм адаптуватися до змінних умов середовища і виконувати завдання без прямого втручання людини. Вони можуть використовуватися для виконання місій, що вимагають тривалого перебування у повітрі або роботи у важкодоступних місцях.

1.3. Застосування БПЛА в різних сферах

1.3.1. Військове застосування

Військове використання безпілотних літальних апаратів представляє собою мабуть одну з найбільш поширених областей застосування. Військові сили всього світу вже давно використовують БПЛА для вирішення різних завдань, від розвідки до безпосередньої бойової діяльності.

Однією з основних функцій БПЛА у військовій сфері є розвідка та збір розвідувальної інформації на ворожих територіях. Завдяки високоточному обладнанню, вони можуть виявляти та слідкувати за рухом ворожих військ, об'єктів інфраструктури та іншої важливої інформації, що є ключовою для планування операцій. Один з найпопулярніших БПЛА для цієї сфери - MQ-9 Reaper. Цей БПЛА має довгий час польоту та високу точність збору розвідувальної інформації.

БПЛА також використовуються для здійснення атак на ворожі цілі. Завдяки можливості озброєння різними видами зброї, вони можуть наносити удари по важливим об'єктам противника, таким як військові бази, техніка та командні пункти. Це дозволяє знижувати ризик для власних військових, виконуючи завдання в умовах, небезпечних для життя людини. Прекрасним прикладом БПЛА, призначеним для здійснення атак на ворожі цілі, є Bayraktar TB2, створений турецькою компанією Baykar Makina. Він може бути озброєний ракетами, що дозволяє наносити точні удари по важливим об'єктам противника. Застосування у спеціальних операціях, таких як пошук і рятування або надання допомоги природним катастрофам. Вони можуть забезпечувати надійну зв'язок з постраждалими, виконувати пошукові місії в небезпечних умовах та доставляти допомогу на місця подій. Також можуть функціонувати як "літаючі вежі",

покращуючи зв'язок в складних умовах бойових дій та забезпечуючи надійну комунікацію на великі відстані.

1.3.2. Цивільне застосування

Безпілотні літальні апарати знаходять все ширше застосування у цивільних сферах, забезпечуючи інноваційні рішення для багатьох галузей економіки та суспільного життя. Від сільського господарства до рятувальних операцій, БПЛА демонструють потенціал для покращення ефективності, точності та безпеки виконання завдань.

До найбільш важливих цивільних сфер застосування можна віднести сільське господарство, інспекції інфраструктури, рятувальні операції, логістика та кіноіндустрія.

Сільське господарство. У сільському господарстві БПЛА використовуються для моніторингу стану полів, посівів та ґрунтів. Завдяки високоякісним камерам та сенсорам, такі БПЛА, як DJI Agras T20, можуть надавати точну інформацію про стан рослин, вологість ґрунту, а також ідентифікувати проблемні зони, що дозволяє фермерам своєчасно реагувати на зміни та покращувати врожайність. Вони також можуть застосовуватися для точкового внесення добрив та пестицидів, що зменшує витрати на хімікати та знижує негативний вплив на навколишнє середовище.

Інспекції інфраструктури. БПЛА значно спрощують процес інспекції різних інфраструктурних об'єктів, таких як мости, лінії електропередач, нафто- і газопроводи. Наприклад, модель DJI Matrice 300 RTK використовується для перевірки стану важкодоступних або небезпечних об'єктів, знижуючи ризики для інспекторів та підвищуючи ефективність проведення перевірок. За допомогою високоякісних камер та сенсорів БПЛА можуть здійснювати детальний огляд об'єктів, фіксуючи навіть найдрібніші пошкодження, які можуть бути непомітні з землі.

Рятувальні операції. У рятувальних операціях БПЛА відіграють вирішальну роль, надаючи можливість швидко і точно знаходити постраждалих у важкодоступних або небезпечних районах. Один з прикладів таких БПЛА - DJI Mavic 2 Enterprise, обладнаний тепловізором для пошуку людей у складних умовах, таких як лісові пожежі або руйнування будівель. Завдяки можливості оперативного отримання даних з повітря, рятувальники можуть швидше реагувати на надзвичайні ситуації, знижуючи ризики для свого життя та підвищуючи шанси на порятунок постраждалих.

Логістика та доставка. Останнім часом БПЛА активно застосовуються у сфері логістики та доставки. Компанії, такі як Amazon, тестують дрони для швидкої доставки товарів у межах міста. БПЛА, такі як Amazon Prime Air, можуть значно скоротити час доставки, особливо у важкодоступних або густонаселених

районах [7]. Використання дронів для доставки медичних препаратів, зразків для лабораторій та інших критично важливих вантажів вже демонструє свою ефективність, особливо у віддалених або ізольованих місцевостях.

Кіноіндустрія та медіа. У кіноіндустрії та медіа БПЛА використовуються для зйомок високоякісних відеоматеріалів з повітря. Моделі, такі як DJI Inspire 2, дозволяють кінематографістам отримувати унікальні кадри, що раніше були неможливими або дуже дорогими для зйомки. Завдяки стабілізації зображення та можливості знімати у форматі 4K, дрони забезпечують високу якість відеоматеріалів, відкриваючи нові горизонти для творчих проєктів та журналістських розслідувань.

Як було згадано вище, безпілотні літальні апарати мають широкий спектр функцій і завдань, які вони виконують у різних галузях. Ось таблиця 1.1, яка демонструє основні функції та завдання БПЛА:

Таблиця 1.1

Функції БПЛА	Завдання БПЛА
Розвідка та спостереження	- Військова розвідка та спостереження за противником
	- Моніторинг кордонів та зон конфліктів
	- Екологічний моніторинг та вивчення навколишнього середовища
Аерофотозйомка та картографування	- Створення високоточних карт та 3D моделей місцевості
	- Аерофотозйомка для геодезії та містобудування
Транспортні та логістичні послуги	- Доставка товарів, медикаментів та іншого вантажу
	- Логістика у важкодоступних районах
Агрономія та сільське господарство	- Моніторинг стану посівів та аналіз ґрунтів
	- Внесення добрив та пестицидів
Пошук та рятування	- Пошук зниклих людей та рятувальні операції
	- Моніторинг природних катастроф та координація дій рятувальників
Інспекція та моніторинг інфраструктури	- Інспекція нафто- та газопроводів, ліній електропередач
	- Моніторинг будівельних об'єктів та веж зв'язку
Медіа та розваги	- Зйомка фільмів, реклами та спортивних подій
	- Організація шоу з використанням дронів
Наукові дослідження	- Вивчення важкодоступних регіонів (арктичні зони, океани тощо)
	- Збір наукових даних у реальному часі
Безпека та охорона	- Патрулювання територій та охорона об'єктів
	- Контроль натовпу та забезпечення безпеки масових заходів
Маркетинг та реклама	- Рекламні кампанії з використанням дронів
	- Підтримка маркетингових акцій та івентів

Ця таблиця ілюструє основні напрямки використання БПЛА у сучасному світі, хоча їх можливості постійно розширюються з розвитком технологій.

1.4. Класифікація БПЛА

Безпілотні літальні апарати стали важливим інструментом у різних галузях, включаючи військову, цивільну та комерційну сфери. Їх різноманітність обумовлена численними характеристиками та функціональними можливостями, що дозволяють використовувати їх у різних умовах і для різних завдань. Класифікація БПЛА розглядається за різними критеріями, що дозволяє систематизувати знання про ці пристрої та їх можливості.

Класифікація БПЛА має важливе значення для розуміння їхніх можливостей, обмежень, а також для розробки регуляторних рамок і стандартів безпеки. Система класифікації дозволяє структуровано підходити до вивчення, впровадження та контролю цих авіаційних систем у різних галузях. Вона сприяє забезпеченню безпеки польотів, ефективному управлінню повітряним простором та оптимальному використанню ресурсів.

Існує кілька основних стандартів класифікації БПЛА, розроблених міжнародними організаціями та національними регуляторами, такими як НАТО, Федеральне управління авіації США (FAA), Європейське агентство авіаційної безпеки (EASA) та Міжнародна організація цивільної авіації (ICAO). Кожен з цих стандартів враховує різні параметри, такі як вага, дальність польоту, висота польоту, тип керування і рівень ризику операцій.

У цьому розділі буде детально розглянуто різні підходи до класифікації БПЛА, проаналізовано основні критерії, на яких базуються ці класифікації, та охарактеризовано специфічні особливості кожної з них. Це дозволить не лише краще зрозуміти існуючу систему класифікації безпілотних літальних апаратів, але й визначити перспективи її вдосконалення у контексті стрімкого розвитку технологій та збільшення сфери застосування дронів.

БПЛА мають переваги перед пілотованою авіатехнікою, такі як відсутність екіпажу та систем життєзабезпечення, низька вартість та витрати на створення, виробництво та експлуатацію, малі розміри в поєднанні з високою надійністю, дальністю польоту, маневреністю та можливістю розміщення різного обладнання на борту. БПЛА використовуються в різних сферах людських інтересів, де вони є незамінними. Різноманітність БПЛА визначається їх технологічністю, яка розвивається швидко, що призводить до збільшення видів цих апаратів та їх характеристик. Класифікації БПЛА не завжди враховують всі існуючі види через постійний розвиток технологій. Використання БПЛА для доставки товарів є перспективним напрямком, де автоматизація та швидкість грають важливу роль. Визначення оптимального типу БПЛА та системи дозволить покращити процес доставки товарів.

Метою даної роботи є аналіз різних видів безпілотних літальних апаратів, їх класифікація та розробка моделі системи доставки товарів з використанням

БПЛА. Вибір конкретного типу БПЛА для цієї системи буде здійснено на основі проведеного аналізу та класифікації різних видів цих апаратів.

Класифікація за призначенням

Класифікація БПЛА за призначенням є однією з основних, оскільки дозволяє зрозуміти, для яких завдань розроблені ті чи інші апарати. Основними категоріями є:

1. Військові БПЛА: Використовуються для розвідки, спостереження, коригування вогню артилерії, нанесення ударів та інших військових операцій. Наприклад, дрони типу "Reaper" або "Bayraktar".
2. Цивільні БПЛА: Використовуються для картографування, моніторингу навколишнього середовища, сільського господарства, інспекції інфраструктури та доставки товарів. Наприклад, дрони компаній DJI та Parrot.
3. Комерційні БПЛА: Застосовуються у сфері реклами, кінематографії, надання послуг доставки та інших комерційних цілях.

Класифікація за дальністю польоту

Дальність польоту - це ще один фактор, який розглядається при описі різних БПЛА, і він визначає час, протягом якого БПЛА може залишатися в повітрі. Системи класифікуються за короткою, середньою або високою дальністю польоту. БПЛА з низькою дальністю польоту зазвичай мають час польоту менше шести годин. До цієї категорії зазвичай належать мікро- і міні-БПЛА, а також деякі тактичні БПЛА. БПЛА із середньою дальністю польоту мають час польоту від 6 до 24 годин. Тактичні БПЛА зазвичай мають середню дальність польоту. Система з часом місії понад 24 години вважається БПЛА з високою дальністю польоту. Середньовисотні та висотні БПЛА зазвичай класифікуються в цій категорії.

Менші БПЛА зазвичай мають низьку дальність польоту через обмеження розміру та ваги. Ці БПЛА генерують меншу підйомну силу через менший розмах крил і меншу потужність двигунів. Компроміси між авіонікою та корисним навантаженням з паливом та елементами живлення можуть збільшити дальність і час польоту цих систем. Для збільшення дальності польоту можуть використовуватися менші камери з меншою роздільною здатністю, меншою вагою та об'ємом, що дозволяє застосовувати більші, важчі та потужніші батареї або двигуни. Більші двигуни забезпечують більшу швидкість і більшу висоту польоту, але вимагають більше місця та потужності. Розвиток технологій призведе до створення менших, більш потужних підсистем, що ще більше збільшить дальність і час польоту цих малих систем.

Дальність польоту визначає радіус дії БПЛА і залежить від їхньої конструкції та призначення:

- БПЛА з короткою дальністю: До 50 км, використовуються для локальних завдань.
- БПЛА з середньою дальністю: Від 50 до 200 км, підходять для регіональних місій.
- БПЛА з великою дальністю: Понад 200 км, використовуються для стратегічних і тривалих місій.

Класифікація за розмірами та масою

Розміри та маса БПЛА визначають їхню здатність до виконання певних завдань, а також умови використання. Основні категорії включають:

- Мікро-БПЛА: Вага до 2 кг, використовуються для короткочасних місій на невеликій відстані. Прикладом можуть бути дрони для інспекції будівель.
- Малі БПЛА: Вага від 2 до 25 кг, застосовуються для розвідки та спостереження на середніх дистанціях.
- Середні БПЛА: Вага від 25 до 150 кг, здатні виконувати тривалі місії на значній відстані.
- Великі БПЛА: Вага понад 150 кг, використовуються для стратегічних військових місій, наприклад, "Global Hawk".

Існує кілька стандартів класифікації безпілотних літальних апаратів, які використовуються в різних країнах та організаціях. Одним з найвідоміших є стандарт НАТО, який класифікує БПЛА за такими критеріями, як розмір, вагу, радіус дії та висота польоту. Цей стандарт забезпечує узгодженість та взаємосумісність систем БПЛА між країнами-членами НАТО.

Крім стандарту НАТО, існують також національні стандарти, розроблені окремими країнами відповідно до їхніх специфічних потреб та умов. Наприклад, у Сполучених Штатах Федеральне управління цивільної авіації (FAA) має свої класифікації та регулювання для БПЛА, які враховують як комерційні, так і приватні застосування. Ці стандарти визначають вимоги до безпеки, ліцензування операторів та технічних характеристик апаратів, що дозволяє забезпечити безпеку польотів та мінімізувати ризики для громадян.

Додатково до національних стандартів, міжнародні організації, такі як Міжнародна організація цивільної авіації (ІКАО), також розробляють свої класифікації та рекомендації для використання БПЛА. Ці рекомендації спрямовані на гармонізацію правил та регламентів між країнами, що сприяє глобальній інтеграції БПЛА в повітряний простір. Вони охоплюють аспекти, пов'язані з безпекою польотів, технічним обслуговуванням, та правовими питаннями.

Стандарт НАТО класифікує БПЛА за трьома категоріями на основі ваги та дальності польоту. (таблиця 1.2) [8]

Таблиця 1.2

Класифікація БПЛА відповідно до стандартів НАТО

Клас	Категорія	Рівень воєнних дій	Висота застосування	Радіус застосування	Рівень застосування	Приклад
I (маса до 150 кг)	мікро (до 2 кг)	тактичний підрозділ	до 60 м	до 5 км	взвод, відділення	Black Widow
	міні (до 15 кг)	тактичний підрозділ	до 900 м	до 25 км	рота, взвод, відділення	Skylark
	малі (15–150 кг)	тактичне формування	до 1500 м	до 50 км	батальйон	Scan Eagle
II (маса 150–600 кг)	тактичні	тактичний	до 5500 м	до 200 км	бригада, дивізія	Hermes 450
III (маса понад 600 кг)	середньовисотні великої дальності	оперативний	до 14000 м	необмежений	корпус, армія	Bayraktar TB2
	висотні великої дальності	стратегічний	до 20000 м	необмежений	театр воєнних дій	MQ-4 Global Hawk
	ударні	стратегічний	до 20000 м	необмежений	театр воєнних дій	MQ-9 Reaper

Класифікація безпілотних літальних апаратів є дуже важливим етапом у процесі їх розробки, експлуатації та регулювання. Вона допомагає встановити параметри та обмеження для забезпечення безпеки польотів, визначити правила експлуатації та отримання дозволів, а також сприяє кращому розумінню можливостей та обмежень конкретного типу БПЛА. Класифікація також грає важливу роль у визначенні ефективності та придатності цих апаратів для виконання конкретних завдань.

1.5. Основні характеристики БПЛА

БПЛА відрізняються від традиційних літальних апаратів тим, що можуть функціонувати без прямої участі пілота на борту. Основні характеристики БПЛА включають їхню конструкцію, типи сенсорів, системи управління, можливості зв'язку та живлення. Ці аспекти визначають ефективність та область застосування БПЛА.

До основних систем БПЛА входять:

1. Силова установка (двигун). БПЛА можуть мати електричні двигуни або двигуни внутрішнього згорання, включаючи ракетні. Двигуни, що працюють на рідкому паливі (бензин, водень), мають перевагу в тривалості безперервної роботи, що дозволяє використовувати дрони без дозаправки до 8-10 годин. Електродвигуни забезпечують роботу дронів до 3-4 годин залежно від погодних умов і температури. Електричні дрони є надійнішими, безпечнішими, легшими, що покращує їх керованість і маневреність, а також мають кращі амортизаційні властивості під час посадки, що подовжує їх термін служби. Вони використовують літій-полімерні батареї (Li-Po), які мають меншу енергетичну ємність порівняно з двигунами внутрішнього згорання, але є дешевшими у виробництві та менш шумними. Ведуться розробки БПЛА з іонними двигунами, які створюють тягу за допомогою іонізованого газу. Перевагами іонних двигунів є економічність та надзвичайно довгий термін безперервної роботи але вони мають значно меншу тягу порівняно з двигунами внутрішнього згорання. [9]

2. Електронна система управління. БПЛА керуються за допомогою бортового комп'ютера, розвиток якого залежав від прогресу обчислювальних технологій. Сучасні дрони використовують або відкриті операційні системи на зразок Linux, або спеціалізовані операційні системи реального часу, такі як QNX, VME, VxWorks, XOberon тощо. Програмне забезпечення безпілота призначене для отримання даних від датчиків, що контролюють системи силової установки та зв'язку з оператором. Основні датчики зчитують зовнішню та внутрішню інформацію і співвідносять її між собою. Сучасні рішення включають інтеграцію бортового комп'ютера та основних систем дрону на єдиній платі в одному корпусі. Процесор бортового комп'ютера зазвичай має архітектуру RISC ARM, подібну до тієї, що використовується в мобільних телефонах, смартфонах та планшетах. [9]

3. Система зв'язку. Для зв'язку з БПЛА та високошвидкісної передачі даних на наземний пункт управління використовується командна радіолінія зв'язку. Зв'язок між БПЛА та пультом керування зазвичай здійснюється в діапазоні ультракоротких хвиль, який охоплює частоти від 200 до 400 МГц. [9]

4. Навігаційна система. Навігаційна система. Навігаційними системами, що використовуються на переважній кількості БПЛА є супутникові радіонавігаційні системи. До найпоширеніших із них належать GPS/NAVSTAR (США), Beidou (BDS)/GNSS (Китай), Galileo (ЄС), DORIS (Франція), ГЛОНАСС (росія), QZSS (Японія), IRNSS (Індія). Сигнали супутникових радіонавігаційних систем формуються на частотах в діапазоні від 1,1 до 1,6 ГГц. Як правило, прості навігаційні системи, що встановлюються на надлегких, легких та малих БПЛА використовують інтегрований режим обробки сигналів від кількох сигналів супутникових радіонавігаційних систем, що забезпечує точність навігації від 1 до 2,5 м у горизонтальній площині та по висоті. На складніших дронах встановлюються елементи автоматичної навігаційної системи – акселерометри, гіроскопи, барометри, лазерні висотоміри тощо. [9]

Основні характеристики безпілотних літальних апаратів варіюються в залежності від типу БПЛА, але загалом можна виділити кілька ключових параметрів. Розміри та вага є одними з перших показників, що привертають увагу. Розмах крила може коливатися від декількох десятків сантиметрів для мікро-БПЛА до десятків метрів для великих військових апаратів. Довжина також залежить від типу БПЛА та може становити від кількох десятків сантиметрів до декількох метрів. Максимальна злітна вага включає в себе масу апарату, палива та корисного навантаження і зазвичай вимірюється в кілограмах або фунтах. Щодо льотних характеристик, вони включають максимальну та крейсерську швидкості, максимальну висоту польоту та тривалість польоту, яка позначає максимальний час, протягом якого БПЛА може перебувати в повітрі без дозаправки.



Рисунок 1.1 – БПЛА MQ-9 Reaper

Безпілотний літальний апарат “MQ-9A Reaper” (рисунок 1.1) є одним з найвідоміших і широко використовуваних безпілотних апаратів у військових операціях. Розроблений компанією General Atomics Aeronautical Systems, він призначений для виконання різних завдань, включаючи розвідку, спостереження, рекогностування та нанесення ударів по наземним цілям. Розглянемо основні характеристики цього апарата.

Основні характеристики для БПЛА “MQ-9A Reaper” наведено в таблицях 1.3 та 1.4. [10 - 12]

Таблиця 1.3

Технічні характеристики БПЛА “MQ-9A Reaper”

Екіпаж	0 на борту, 2 на наземній станції	
Довжина	11 м	
Розмах крил	20 м	
Висота	3.81 м	
Порожня вага	2,223 кг	
Максимальна злітна вага:	4,760 кг	
Ємність палива	1,800 кг	
Вантажопідйомність	Внутрішня	360 кг
	Зовнішня	1,400 кг
Силова установка	1 × Honeywell TRE331-10 турбогвинтовий двигун, 900 к.с. (671 кВт) з цифровою електронною системою керування двигуном	

Таблиця 1.4

Льотні характеристики БПЛА “MQ-9A Reaper”

Максимальна швидкість	482 км/год
Крейсерська швидкість	313 км/год
Дальність польоту	1,900 км
Тривалість польоту	27 годин
Практична стеля	15,420 м
Робоча висота	7.5 км

1.6. БПЛА як об’єкт управління

На рух безпілотних літальних апаратів впливають багато факторів, серед яких є маса апарату, розташування центру ваги, кути нахилу (тангаж, крен, ристання) та канали управління. Потрібно розуміти та врахувати ці параметри тому що, вони є критично важливими для забезпечення стабільного і точного польоту. У цьому розділі ми детально розглянемо, як кожен із цих факторів впливає на поведінку БПЛА, і які методи використовуються для оптимізації їх управління. В основному, виділяють мультикоптери, квадрокоптери та гексакоптери. Основною перевагою цих апаратів є їх висока маневреність.

Управління БПЛА здійснюється за допомогою дистанційних пультів, що працюють на радіоканалах, або через автономні системи, що використовують GPS-навігацію та інші сенсори. При ручному управлінні виникають складнощі, пов'язані зі спеціальною підготовкою операторів, обмеженою робочою дальністю та впливом погодних умов.

У контексті безпілотних літальних апаратів, тангаж, крен і рискання є основними кутами, що визначають їх просторове положення та рух. Ці кути належать до системи управління орієнтацією літального апарату та впливають на його здатність виконувати маневри та підтримувати стабільний політ.

До основних каналів управління відносяться:

1. Канал управління двигуном (тяга)
2. Канал управління тангажем
3. Канал управління креном
4. Канал управління рисканням

Канал управління двигуном - це механізм управління потужністю та тягою двигуна безпілотного літального апарату. Його функції включають регулювання швидкості, напрямку та висоти польоту. Канал тяги працює на основі команд, що надходять з пульта керування або автопілота. Зміни потужності двигуна досягаються за допомогою регулювання обертів або кута нахилу лопатей (у випадку гвинтових двигунів) або руху сопла (у випадку реактивних двигунів).

Крен – це кут нахилу БПЛА вправо або вліво відносно його поздовжньої осі (вісь X). Крен визначає горизонтальне обертання апарату навколо цієї осі. Зміна кута крену дозволяє апарату нахилитися вбік, що є важливим для виконання поворотів та утримання курсу. Позитивний крен вказує на те, що апарат нахилиється вправо, що в результаті викликає рух в цьому напрямку. Негативний крен, навпаки, означає нахил апарату вліво, що призводить до його руху вліво.

Рискання – це кут повороту БПЛА навколо його вертикальної осі (вісь Y). Рискання визначає напрямок, в який вказує ніс апарату, і відповідає за зміну курсу під час польоту. Цей кут впливає на поворот апарату в горизонтальній площині. Позитивне рискання відбувається, коли ніс апарату повертається вправо, змінюючи напрямок польоту в цьому напрямку. Негативне рискання відбувається, коли ніс апарату повертається вліво, змінюючи напрямок польоту вліво.

Тангаж – це кут нахилу носа БПЛА відносно горизонтальної площини. Іншими словами, це вертикальне обертання апарату навколо його поперечної осі (вісь Z). Зміна кута тангажу призводить до підйому або опускання носа БПЛА, що дозволяє апарату змінювати висоту польоту та швидкість горизонтального руху. Позитивний тангаж передбачає, що ніс апарату піднімається, орієнтуючись вгору. Це сприяє підйому або уповільненню апарату під час горизонтального польоту. Негативний тангаж, навпаки, передбачає опускання носа апарату вниз, що дозволяє йому знижуватися або прискорюватися.

Кути нахилу БПЛА вказано на рисунку 1.2:

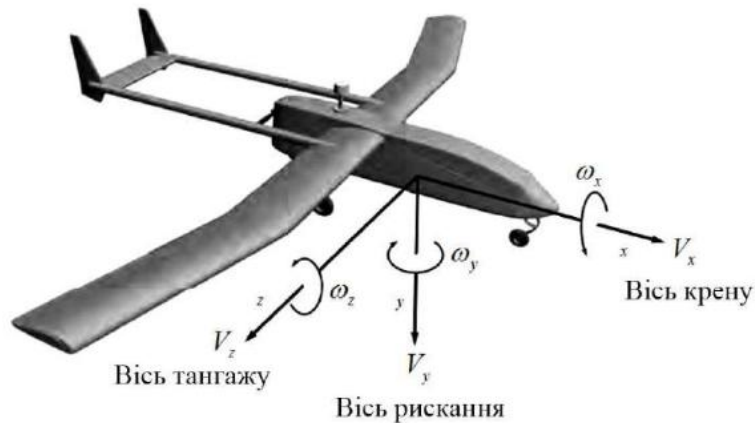


Рисунок 1.2 – Кути нахилу та осі БПЛА

Управління тягою здійснюється шляхом регулювання потужності двигунів БПЛА. Це дозволяє контролювати висоту польоту та швидкість апарату. Зміна тяги здійснюється через регулятори швидкості, які отримують команди від контролера польоту.

Маса та центр ваги БПЛА значно впливають на його аеродинамічні характеристики та стабільність в польоті. Збільшення маси БПЛА потребує більшої тяги для підйому апарату, що впливає на ефективність роботи двигунів та витрату енергії. Тяжчий апарат може мати більш обмежену маневреність і потребувати потужніших двигунів та батарей для забезпечення тривалого польоту. Центр ваги визначає баланс апарату. Якщо центр ваги розташований не симетрично або зміщений відносно центральної осі, це може призвести до нестабільності польоту. Зміщення центра ваги вперед або назад впливає на тангаж, а вліво або вправо – на крен. В ідеалі, центр ваги повинен бути розташований якомога ближче до центру апарату для забезпечення рівномірного розподілу маси та стабільного польоту.

БПЛА мають низку переваг перед пілотованими апаратами:

- економічність: відсутність екіпажу знижує витрати на виконання завдань та підвищує корисне навантаження апарату;
- відсутність потреби в аеродромах для злету та посадки;
- можливість виключення людського фактору при використанні автоматичних систем управління, що підвищує точність виконання завдань.

1.6. Висновки

У першому розділі роботи здійснено детальний огляд розвитку та сучасного стану технологій безпілотних літальних апаратів. Підтверджено, що БПЛА є актуальними та перспективними об'єктами для дослідження і впровадження в різні галузі завдяки своїм унікальним характеристикам, таким як автономність, гнучкість застосування та економічність.

Аналізуючи актуальність безпілотних літальних апаратів як системи управління, можна зробити кілька важливих висновків. По-перше, сучасний розвиток технологій привів до значного підвищення автономності та функціональності БПЛА, що дозволяє використовувати їх у різноманітних сферах. Безпілотні літальні апарати стали незамінними в військовій сфері для розвідки, моніторингу та виконання бойових завдань без ризику для життя пілотів.

По-друге, цивільне застосування БПЛА також стрімко розширюється. Вони використовуються для аерофотозйомки, екологічного моніторингу, сільського господарства, логістики та багатьох інших сфер. Така широка сфера застосування обумовлена їхньою здатністю виконувати завдання в важкодоступних або небезпечних для людини умовах, що робить БПЛА ефективним інструментом для зниження витрат та підвищення продуктивності.

По-третє, важливим аспектом актуальності БПЛА є їх економічна ефективність. Завдяки відносно низькій вартості розробки та експлуатації, БПЛА забезпечують значні економічні переваги в порівнянні з традиційними пілотованими літальними апаратами.

Розвиток технологій штучного інтелекту та машинного навчання в майбутньому дозволить значно поліпшити системи управління БПЛА. Вони стають все більш автономними та здатними виконувати складні завдання без участі людини. Це не тільки підвищує ефективність виконання завдань, але й мінімізує людські помилки. Постійне вдосконалення сенсорних технологій дозволяє БПЛА отримувати більш точну та детальну інформацію про навколишнє середовище. Це підвищує точність виконання завдань та забезпечує більш високу якість отриманих даних, що є важливим для наукових досліджень, геодезії та картографії.

Актуальність дослідження систем управління БПЛА підтверджується й тим, що ця сфера є предметом активних наукових досліджень і технічних розробок у багатьох країнах світу. Інновації в цій галузі стимулюються попитом на ефективні та безпечні рішення для різних видів діяльності, від промислових до соціальних.

На завершення, актуальність безпілотних літальних апаратів як систем управління обумовлена їхньою багатофункціональністю та технологічними перевагами. В сучасному світі, який швидко змінюється та вимагає нових підходів до вирішення складних задач робить їх важливими. Подальші дослідження та

розробки в цій галузі безсумнівно сприятимуть ще більшому розширенню можливостей та сфер застосування БПЛА.

РОЗДІЛ 2

АНАЛІЗ МЕТОДУ ПАРАМЕТРИЧНОГО СИНТЕЗУ СИСТЕМ УПРАВЛІННЯ

2.1. Загальна характеристика систем управління

2.1.1. Системи управління

У сучасних умовах розвитку технологій та ускладнення завдань, які постають перед безпілотними літальними апаратами, питання ефективного управління ними набуває особливої актуальності. Системи управління є важливим компонентом будь-якого БПЛА, оскільки від їхньої надійності та точності залежить успішне виконання місій. Синтез систем управління БПЛА включає розробку алгоритмів та методів, що забезпечують стабільність, маневреність та адаптивність до змінних умов польоту.

Управління безпілотними літальними апаратами є складним та багатогранним завданням, що вимагає високого рівня автоматизації та інтеграції різних технологій. Системи управління БПЛА включають широкий спектр компонентів та функцій, які забезпечують стабільність польоту, точність виконання завдань та адаптацію до змінних умов середовища. У цьому розділі розглядаються основні характеристики систем управління, зокрема їх структура, основні функції та вимоги до них. Особлива увага приділяється параметрам, що впливають на ефективність та надійність роботи систем управління, а також методам їх оцінки та оптимізації. Розуміння загальних характеристик систем управління є критично важливим для подальшого аналізу методів їх синтезу та вдосконалення, що дозволить забезпечити підвищену продуктивність та надійність БПЛА в різноманітних умовах експлуатації.

Система управління — це сукупність засобів, що забезпечують досягнення заданих цілей шляхом цілеспрямованого впливу на об'єкт управління. Основними елементами системи управління є об'єкт управління, контролер, датчики та виконавчі механізми.

Як відомо, типи систем управління бувають адаптивними та оптимальними.

Кафедра АКСУ				ПОЯСНЮВАЛЬНА ЗАПИСКА			
Виконав	Романюк Т.А.			Аналіз методу параметричного синтезу систем управління			Аркушів
Керівник	Абрамович О.О.						58
Н-контр.	Дивнич М.П.				№ СУ-403Б		
Зав.каф.	Мельник Ю.В.						

Адаптивні системи управління можуть автоматично змінювати свої параметри для компенсації зовнішніх і внутрішніх збурень. Ці системи здатні забезпечувати стабільне функціонування навіть при зміні характеристик об'єкта управління. Основна особливість адаптивних систем полягає в наявності алгоритмів ідентифікації та адаптації, які дозволяють динамічно налаштовувати параметри регулятора.

Оптимальні системи управління прагнуть мінімізувати або максимізувати певний функціонал якості, залежно від поставленої задачі. Наприклад, у задачах термінального управління мінімізується відхилення від заданої траєкторії в кінцевій точці інтервалу управління. Інші задачі можуть включати мінімізацію витрат палива або часу досягнення цілі.

Обидва типи систем мають свої переваги та недоліки. АСУ більш гнучкі та стійкі до змін, але їх може бути складно розробити та налаштувати. ОСУ ж простіші у проектуванні та реалізації, але їм потрібна точна математична модель об'єкта управління, що не завжди можливо.

Але існує ще один вид систем управління який буде розглядатися в практичній частині, це дискретна система управління.

2.1.2. Дискретні системи управління

В практичній частині для параметричної оптимізації необхідно буде працювати над дискретними системами управління. Для цього потрібно знати значення певні відмінності між системами управління.

Дискретні системи управління (ДСУ) — це СУ, до складу яких входить хоча б одна ланка дискретної дії.

Ланка дискретної дії (дискретний елемент) — це ланка, вихідна величина якої змінюється дискретно, тобто стрибками, навіть у разі плавної зміни вхідної величини.

Дискретний елемент перетворює неперервні сигнали на дискретні. Інформація про змінні системи, зібрана лише у визначені моменти часу, називається дискретним сигналом. Це перетворення здійснюється шляхом квантування даних за часом, рівнем або одночасно за часом і рівнем.

Головною особливістю дискретних систем управління (ДСУ) є те, що обробка інформації відбувається на рівні кодів, а не аналогових сигналів. Переваги ДСУ включають:

- Підвищена точність вимірювань.
- Використання цифрових сигналів (кодів), датчиків, мікропроцесорів, що збільшує точність обробки інформації.

- Можливість реалізації складних сучасних алгоритмів управління та їх змін у програмному забезпеченні.
- Значно менші габарити, вага та енергоспоживання порівняно з аналоговими системами управління завдяки розвитку мікроелектроніки.

В обчислювальну машину (ОМ) вмонтовано програмований таймер (ПТ), який видає імпульси в заданий час. Практично всі об'єкти управління є аналоговими (неперервними) пристроями або системами, тому кожна ДСУ включає цифро-аналогові (ЦАП) та аналогово-цифрові перетворювачі (АЦП). Схему ДСУ ілюстровано на рис.2.1

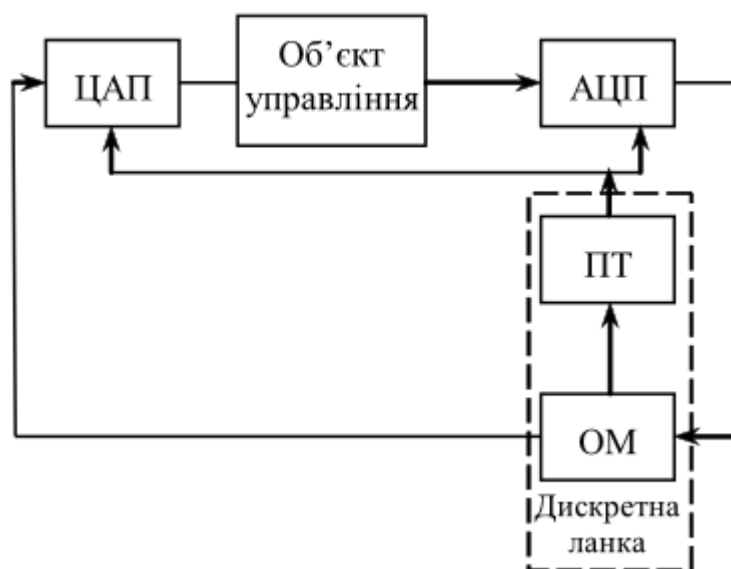


Рис 2.1. Схема дискретної системи

Існує багато причин, через які дискретні сигнали з'являються в автоматичних системах. Основні з них:

- Імпульсна модуляція.
- Способи зміни сигналів.
- Використання мікропроцесорної техніки для аналого-цифрового перетворення.

Імпульсна модуляція здійснює спеціальну дискретизацію сигналу. Її мета - передача одночасно кількох сигналів через один канал і підвищення захисту від перешкод при передачі на великі відстані. Наприклад, при керуванні двигуном постійного струму за допомогою широтно-імпульсної модуляції (ШІМ) керуючого сигналу потрібна імпульсна модуляція через особливості пристрою об'єкта керування.

Друга причина пов'язана з використанням цифрових або декрементних цифрових датчиків. Дискретний сигнал виробляється для аналізу обстановки за допомогою системи технічного зору.

Основною причиною є третя, коли використання обчислювальної техніки в контурі передбачає перетворення вхідних сигналів у дискретну форму для подальшої їх обробки. У цифрових системах дискретизація сигналу є аналого-цифровим перетворенням, тобто перетворенням неперервного сигналу у послідовність значень, представлених у цифровому коді.

Залежно від виду дискретного перетворення, дискретні системи поділяють на імпульсні та цифрові. Імпульсні системи використовують імпульсну модуляцію, а цифрові системи здійснюють аналого-цифрове перетворення сигналу.

Імпульсні системи класифікують за методом модуляції сигналу: амплітудно-імпульсна модуляція (АІМ), широтно-імпульсна модуляція (ШІМ) та часо-імпульсна модуляція (ЧІМ). Часо-імпульсна модуляція додатково поділяється на фазо-імпульсну та частотно-імпульсну модуляцію. При амплітудно-імпульсній модуляції сигнал замінюється послідовністю імпульсів, амплітуда яких пропорційна значенням сигналу, виміряним у рівномірні моменти часу. Широтно-імпульсна модуляція змінює ширину імпульсу, при цьому форма, амплітуда та моменти виникнення залишаються незмінними. Амплітудно-імпульсна модуляція визначає лінійний спосіб перетворення неперервного сигналу в дискретний. Інші способи модуляції є нелінійними. Отже, лінійними імпульсними системами є системи з лінійною неперервною частиною та амплітудно-імпульсною модуляцією.

У цифрових системах значення сигналу, виміряні в рівномірні моменти часу, представлені в цифровій формі. Під час перетворення визначається правило, за яким значенням неперервного сигналу присвоюється одне з дискретних значень. Цей процес називається квантуванням за рівнем. При квантуванні "крок квантування" визначається кількістю розрядів числа.

2.2. Огляд методів синтезу систем управління для БПЛА

2.2.1. Структурний та структурно-параметричний синтез

Робастність визначається як здатність автоматизованих систем зберігати стійкість та забезпечувати стабільний рівень якості в межах припустимих значень під впливом параметричних збурень без застосування методів адаптації.

В теорії робастності існує три методи синтезу:

- структурно-параметричний синтез;
- структурний синтез;

- параметричний синтез.

Структурно-параметричний синтез є одним з основних підходів до створення робастних систем управління. Цей метод поєднує визначення оптимальної структури системи з подальшим налаштуванням її параметрів для досягнення найкращих показників якості та стійкості управління.

Структурно-параметричний синтез робастних систем управління поєднує два етапи: визначення структури регулятора та параметричну оптимізацію цієї структури. На першому етапі використовується один із відомих методів синтезу для визначення структури системи управління, яка підходить для номінальної моделі об'єкта. Це можуть бути методи, що не належать до теорії робастного управління, такі як синтез у просторі станів або частотній області.

На другому етапі відбувається робастна оптимізація параметрів отриманої структури, щоб забезпечити необхідну якість управління та стійкість системи при зміні параметрів об'єкта.

До переваг структурно-параметричного синтезу можна віднести забезпечення робастності системи шляхом параметричної оптимізації. Недоліками цього методу є те, що може бути необхідно багаторазово повторювати процедуру оптимізації для досягнення бажаного результату.

Структурний синтез робастних систем управління зосереджується на визначенні структури системи управління без урахування конкретних параметрів регулятора. Мета цього методу полягає у відборі оптимальної топології системи, яка забезпечувала б необхідні робастні властивості. До переваг структурного синтезу можна віднести можливість знайти оптимальну структуру системи, що може бути менш чутливою до змін параметрів. Серед недоліків можна виділити те, що цей метод не враховує параметри регулятора, що може вимагати додаткових етапів оптимізації, і він є менш гнучким у порівнянні зі структурно-параметричним синтезом.

Класифікація структурно-параметричного та параметричного синтезу за параметрами наведена у таблиці 2.1

Порівняння структурно-параметричного та параметричного синтезу

Параметр	Структурно-параметричний синтез	Параметричний синтез
Основна ідея	Комбінування структури та параметрів системи для досягнення оптимальної роботи.	Налаштування параметрів у заздалегідь визначеній структурі для оптимальної роботи.
Мета	Одночасно визначити як оптимальну структуру, так і оптимальні параметри системи.	Визначити оптимальні параметри для існуючої структури системи.
Складність	Вища, оскільки потребує аналізу різних структур і відповідних параметрів.	Нижча, оскільки зосереджується тільки на налаштуванні параметрів.
Гнучкість	Більш гнучкий підхід, оскільки дозволяє змінювати як структуру, так і параметри.	Менш гнучкий, оскільки структура системи вже визначена і не змінюється.
Застосування	Використовується у складних системах, де структура системи може бути змінена для досягнення кращої продуктивності.	Використовується у системах з фіксованою структурою, де потрібно лише оптимізувати параметри.
Переваги	Можливість досягти кращих результатів завдяки оптимізації як структури, так і параметрів.	Швидший та менш ресурсомісткий процес оптимізації параметрів.
Недоліки	Більш ресурсомісткий і складний процес, що потребує більше обчислювальних ресурсів.	Обмеження на поліпшення продуктивності через фіксовану структуру системи.

2.2.2. Алгоритм структурно-параметричного синтезу

В задачі структурно-параметричного синтезу розглядається лінійна система, яка описується диференціальним рівнянням

$\dot{x} = Ax + Bu$, x - вектор змінних стану системи, u - вектор змінних управління, A , B – матриці системи.

Тоді на першому етапі потрібно задати четвірку матриць – A , B , C , D .

Для забезпечення послідовного з'єднання об'єкта та виконавчого механізму необхідно створити регулятор. Це обумовлено тим, що динаміка руху літака та керування керуванням описується різними системами рівнянь.

Другий етап полягає у вирішенні задачі побудови детермінованого оптимального регулятора

$$J = \int_{t_0}^{t_1} [x^T R_1 x + u^T R_2 u] dt + x^T P_1 x$$

де R_1, R_2, P_1 - невід'ємно визначені симетричні матриці.

$R_1 = C^T R_3 C$, де R_3 - додатна визначена симетрична матриця.

Корінь квадратний із цього рівняння називається H_2 - нормою. Оскільки розглядається випадок, коли параметри системи незмінні в часі, тобто A, B, C, R_1, R_2 постійні, то можна представити інтегральний квадратичний критерій у вигляді:

$$J = \int_0^{\infty} [x^T R_1 x + u^T R_2 u] dt$$

Для мінімізації критерію необхідно вирішити рівняння Ріккати. Рішення P , що встановилось, для даного випадку постійне і є рішенням алгебраїчного рівняння Ріккати

$$C^T R_3 C - P B R_2^{-1} B^T P + A^T P + P A = 0$$

Для цього рівняння отримаємо закон управління

$$u = -F x, \text{ де } F = R_2^{-1} B^T P$$

Таким чином, на другому етапі синтезу мінімізується інтегральний квадратичний показник якості. Для цього задаються вагові коефіцієнти R_1 та R_2 , які враховують значення кожного з параметрів при управленні, та рішається алгебраїчне рівняння Ріккати.

В результаті синтезу отримуємо регулятор у вигляді вектору з коефіцієнтами F , при яких показник якості буде мати мінімальне значення.

2.2.3. Суть параметричного синтезу

Один із ефективних способів розв'язання задачі підвищення якості системи управління - це процедура параметричного синтезу. Цей метод дозволяє знайти оптимальні значення параметрів, які максимізують якість системи управління, враховуючи задані обмеження.

Параметричний синтез полягає у виборі параметрів настроювання регуляторів при фіксованій структурі системи управління. Основною метою є мінімізація показника якості, який відображає бажані характеристики системи, такі як точність, швидкодія та стабільність. Цей підхід застосовується у випадках, коли структура системи вже відома на основі попереднього досвіду або літературних джерел.

Параметричний синтез зосереджений на оптимізації параметрів регулятора при заданій структурі системи управління. Завдання полягає у виборі таких параметрів, які забезпечували б мінімізацію складного показника якості системи.

Цей метод використовується, коли структура системи управління відома з попереднього досвіду, і необхідно лише налаштувати її параметри для досягнення бажаної продуктивності. Наприклад, параметричний синтез може застосовуватися для налаштування параметрів регуляторів польоту літальних апаратів.

Переваги та недоліки параметричного синтезу вказані в таблиці 2.2.

Таблиця 2.2

Переваги	Недоліки
<ul style="list-style-type: none">• Простота у застосуванні при відомій структурі системи.• Можливість швидкої оптимізації параметрів для досягнення необхідної якості управління.	<ul style="list-style-type: none">• Не враховує зміну структури, що може бути необхідно для забезпечення робастності.• Менш ефективний для систем з невідомою або недостатньо дослідженою структурою.

Параметричний синтез дозволяє налаштовувати параметри систем для досягнення оптимальної продуктивності та ефективності. Цей метод знайшов своє застосування у багатьох сферах, що робить його незамінним. Наприклад, у системах управління польотом літальних апаратів використання параметричного синтезу дозволяє забезпечити стійкість та надійність управління в умовах турбулентності та інших зовнішніх впливів.

Параметричний синтез широко використовується в автоматичних системах управління. Наприклад, у промислових роботах цей метод дозволяє оптимізувати рух та керування, що значно підвищує продуктивність та точність виконання завдань. В авіації та космонавтиці налаштування параметрів автопілотів та систем стабілізації є ключовим для забезпечення безпечних та стабільних польотів.

Не менш важливим є застосування параметричного синтезу в електроніці та зв'язку. Оптимізація характеристик електронних фільтрів, антен та передавачів сприяє покращенню якості сигналу та зменшенню завад. Це особливо актуально в умовах стрімкого розвитку бездротових технологій та мереж зв'язку.

У галузі мехатроніки та робототехніки параметричний синтез дозволяє налаштовувати системи управління роботами-маніпуляторами та автономними транспортними засобами. Це забезпечує високу точність і надійність у виконанні складних завдань, таких як збірка компонентів або навігація в міських умовах.

Автомобільна промисловість також активно використовує параметричний синтез для налаштування систем активної безпеки та електронних блоків управління. Оптимізація параметрів ABS, ESP та інших систем підвищує безпеку і ефективність роботи автомобілів.

Крім того, у секторі енергетики параметричний синтез сприяє стабільному та ефективному розподілу електроенергії, а також оптимізації роботи відновлюваних джерел енергії, таких як вітряні турбіни та сонячні електростанції.

У медичній сфері параметричний синтез допомагає налаштовувати параметри для хірургічних роботів та систем моніторингу, що забезпечує високу точність і надійність медичних процедур.

Таким чином, параметричний синтез є потужним інструментом, який широко застосовується у різних галузях. Його ефективність роблять його незамінним для оптимізації та покращення продуктивності сучасних систем.

Параметричний синтез широко застосовується в різних галузях, включаючи авіаційну, автомобільну та промислову автоматику. Завдяки цьому методу вдається досягти високої точності та стабільності систем управління, що є критично важливим для безпеки та ефективності експлуатації складних технічних систем.

2.2.4. Алгоритм параметричного синтезу

1. Спочатку створюється модель літального апарату в просторі станів, використовуючи дані про швидкість, висоту та інші параметри. Потім формується модель послідовного зв'язку виконавчого механізму і ЛА, що завершується розробкою моделі розімкненої системи управління.

Точність моделі динаміки ЛА в просторі станів, представленій матрицями A , B , C , D , значно впливає на якість роботи системи управління.

Чим точніше модель описує реальну поведінку ЛА, тим краще система зможе керувати ним

Модель літального апарату в просторі станів визначається рівняннями:

$$\begin{aligned}\dot{x} &= Ax + Bu \\ y &= Cx + Du\end{aligned}$$

де:

- x - вектор змінних стану;
- u - вектор вхідних сигналів;
- y - вектор вихідних сигналів;
- \dot{x} - похідна вектора стану.

Виконавчий механізм описується у вигляді станового простору:

$$\begin{aligned} \dot{x}_M &= A_M x_M + B_M u_M \\ y_M &= C_M x_M + D_M u_M \end{aligned}$$

Матриці мають наступні значення:

A : матриця системи, що описує взаємозв'язок змінних стану;

B : матриця входів, що визначає вплив вхідних сигналів на систему;

C : матриця виходів, що визначає зв'язок змінних стану з вихідними сигналами;

D : матриця прямого зв'язку, що враховує безпосередній вплив вхідних сигналів на вихідні.

Далі динаміка літального апарату та виконавчого механізму об'єднуються, утворюючи систему з більшою кількістю станів та входів/виходів. Це робиться за допомогою методу послідовного з'єднання, який описує, як керуючі сигнали впливають на ЛА через виконавчий механізм.

Формуємо модель послідовного зв'язку виконавчого механізму і ЛА (рис 2.2).

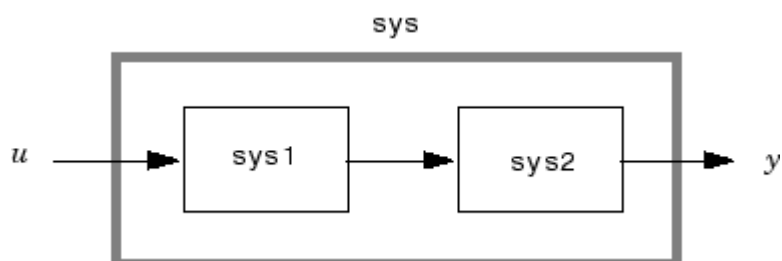


Рис 2.2. Схема послідовного з'єднання двох систем

2. Другий етап полягає у створенні моделі замкненої системи «об'єкт + регулятор» (рис 2.3), яка використовується для оптимізації та оцінювання.

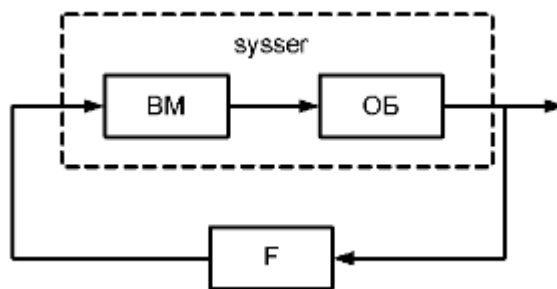


Рис 2.3. Схема замкненої системи «об'єкт + регулятор (ВМ)»

3. На третьому етапі визначаються початкові значення параметрів автопілота з урахуванням запасу стійкості замкненої системи. Розраховуються полюси замкненої системи, щоб оцінити мінімальні і максимальні значення їхніх дійсних частин, а також максимальне значення відношення

$$K = \max |Im_i / Re_i|, i = 1, 2 \dots n,$$

де n — кількість полюсів замкненої системи, Im_i , Re_i — уявні та дійсні частини. Ці розрахунки потрібні для побудови штрафної функції.

Штрафна функція (розділ 2.3) в оптимізації систем використовується для забезпечення стійкості, додаючи штраф до показника якості, якщо система не відповідає заданим критеріям. Це гарантує, що знайдене рішення буде стійким до збурень. Для неперервних систем штраф зростає, коли полюси системи наближаються до границі або виходять за межі лівої півплощини, а для дискретних систем - коли полюси наближаються до границі або виходять за межі кола одиничного радіуса.

4. Розраховується H_2 показник якості системи.

На цьому етапі перевіряється, чи зможе система управління ЛА витримувати вплив зовнішніх збурень та помилок у вимірюваннях, не втрачаючи своїх працездатних властивостей.

Для цього використовуються методи теорії стійкості, такі як метод характеристичних рівнянь або метод Ляпунова.

Ці методи дозволяють дослідити поведінку системи при різних вхідних впливах та початкових умовах, оцінюючи її стійкість до відхилень від заданого режиму роботи.

Важливо, щоб система управління ЛА була стійкою, адже це гарантує її безпечну та надійну експлуатацію в реальних умовах.

H_2 норма розраховується за наступною формулою:

$$J = \|q^T e\|_2 + \|r^T u\|_2 + PF,$$

де PF — штрафна функція, що під час виконання процедури оптимізації утримує нулі та полюси системи в зоні стійкості;

Для обчислення показників якості робастних систем управління використовується H_2 -норма,

5. Наступним етапом є створення програми для виконання процедури оптимізації, тобто пошуку мінімуму функції.

Створюється програма, яка буде використовуватися для пошуку мінімуму цільової функції. У практичній частині роботи будемо виконувати оптимізацію за методом Нелдера-Міда (розділ 2.4).

6. Виконується сама процедура оптимізації.

7. Завершальним етапом є виконання програми оцінювання.

Після того, як програма оптимізації знайшла оптимальні значення параметрів, виконується програма оцінювання. Ця програма використовує модель замкненої системи, створену на другому етапі, для симуляції поведінки системи управління з оптимальними параметрами.

Програма оцінювання дозволяє перевірити, чи відповідають показники якості заданим вимогам, оцінити стійкість системи до збурювань, а також дослідити вплив шуму та інших факторів на її поведінку. Завдяки цьому можна зробити висновки про загальну ефективність системи управління та внести необхідні поправки.

2.3. Штрафна функція

Невід'ємною частиною застосування параметричної оптимізації для ЛА є штрафна функція.

Штрафна функція - це додатковий компонент до показника якості, який використовується для забезпечення стійкості замкнених систем, як неперервних, так і дискретних, для всіх можливих варіацій параметрів регулятора. Її завданням є розміщення всіх полюсів замкненої системи у лівій півплощині комплексної площини у випадку неперервних систем, або в колі одиничного радіуса - для дискретних систем. Область визначення штрафних функцій на комплексній площині коренів відрізняється для неперервних і дискретних систем.

У методі штрафних функцій значення штрафних коефіцієнтів, зазвичай, можуть збільшуватися необмежено. Наприклад метод точних штрафних функцій дозволяє знаходити оптимальні розв'язки вже при скінченних значеннях штрафних коефіцієнтів. Це значно послаблює проблему поганої обумовленості,

характерну для методу штрафних функцій, який зазвичай використовують для отримання лише наближених розв'язків. Однак метод точних штрафних функцій дає змогу отримувати точні розв'язки початкових задач.

В загальному суть штрафної функції полягає в тому що на кожній ітерації k методу, збільшуємо штрафний коефіцієнт (наприклад, у 10 разів), розв'язуємо необмежену задачу та використовуємо розв'язок як початкове припущення для наступної ітерації. Розв'язки послідовних задач без обмежень збігатимуться до розв'язку початкової задачі з обмеженнями.

Штрафна функція є функцією, що мінімізує відстань від полюсів номінальної та збуреної систем до кожної з границь області M . Штрафна функція представлена на рисунку 2.4.

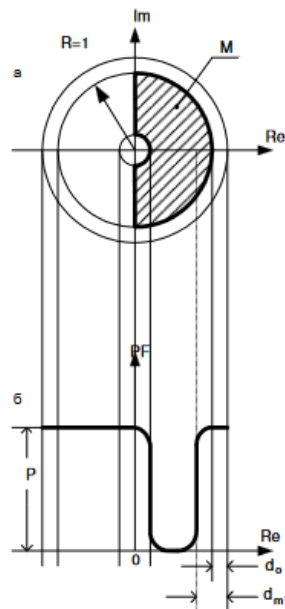


Рисунок 2.4 – Штрафна функція зображена на комплексній площині

Область визначення штрафної функції для дискретних систем, яка показана на рисунку 2.4, обмежує розміщення полюсів замкненої системи всередині певної області M на комплексній площині. Ця область обмежена двома напівжирними колами. Перше коло з великим радіусом визначає запас стійкості (відстань d_{m1} до кола з одиничним радіусом). Друге коло з малим радіусом визначає максимальну смугу пропускання замкненої системи. Щоб уникнути виникнення високочастотних коливань з частотою Найквіста, всі полюси замкненої системи повинні розміщуватися всередині правого одиничного півкола.

Штрафна функція PF для неперервних систем визначається виразом:

$$\text{PF}(d_m) = \begin{cases} 0, & \text{якщо } d_m \leq d_{m2}; \\ \frac{P}{2} \left[1 + \cos \left(\frac{\pi \cdot (d_m - d_{m1})}{(d_{m2} - d_{m1})} \right) \right]; & \text{якщо } d_{m1} > d_m > d_{m2}; \\ P, & \text{якщо } d_m \geq d_{m1}, \end{cases}$$

де P є досить великою величиною ($P = 10^4 - 10^6$)

Штрафні функції відіграють важливу роль у процедурі оптимізації, оскільки вони забезпечують контроль за стійкістю системи. Якщо виникає навіть невелике порушення умов стійкості, оптимізаційний процес припиняється негайно, оскільки норма встановлена лише для стійких систем.

2.4. Метод Нелдера-Міда

Важливою частиною параметричного синтезу є застосування методу Нелдера-Міда при процедурі оптимізації. Цей метод є надійним і використовується для параметричної оптимізації як неперервних, так і дискретних систем управління. У практичній частині роботи оптимізація буде виконана за допомогою оператора MATLAB *fminsearch* алгоритм якої заснований за методом Нелдера-Міда.

В загальному, метод Нелдера-Міда, відомий також як метод симплексного спуску, є чисельним методом, що застосовується для пошуку мінімуму або максимуму цільової функції в просторі високих вимірів.

В основу методу деформованого багатогранника (симплекса) покладена побудова послідовності $k = 1, 2, \dots$ систем точок $x^i(k)$, $i = 1, \dots, n+1$, які є вершинами опуклого багатогранника. Точки системи $x^i(k+1)$ співпадають з точками системи $x^i(k)$, крім точки $x^h(k)$, яка є найгіршою в системі $x^i(k)$, і яку на $k + 1$ ітерації замінюють по спеціальним правилам (рисунок 2.5).

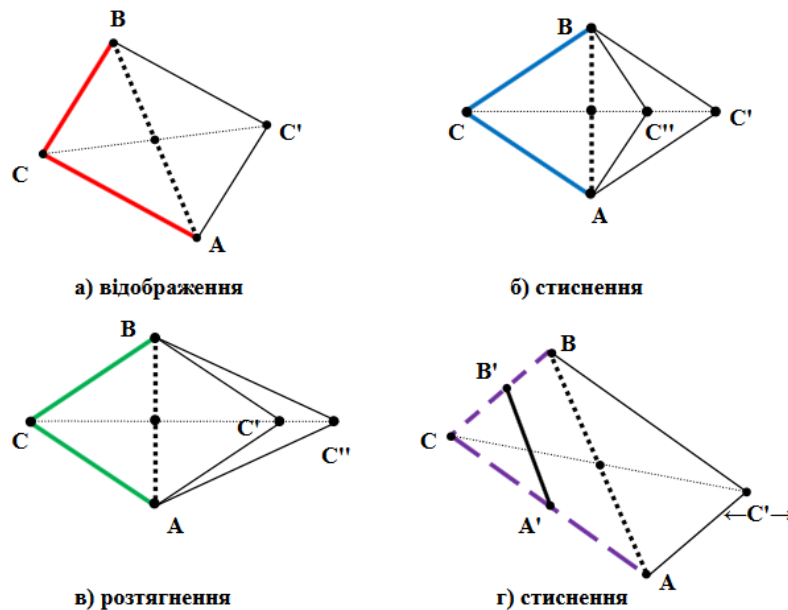


Рис. 2.5. Графічна ілюстрація операцій над симплексами

У процесі виконання цих правил багатогранник змінює свої розміри, що і обумовило назву методу. Побудова послідовності закінчується, коли значення функції у вершинах поточного багатогранника відрізняються від значення функції в центрі симплексу не більше, ніж на деяку задану величину.

Метод спадання симплекса виконує серію кроків, більшість з яких полягають у переміщенні точки симплекса, де функція набуває найбільшого значення "найвища точка", через протилежну сторону симплекса до нижчої точки. Ці кроки називаються відбиттями і спрямовані на збереження обсягу симплекса, таким чином запобігаючи його виродженню. Коли це можливо, метод розширює симплекс в певному напрямку для виконання більших кроків. Після досягнення "найнижчої точки" метод починає рух у поперечному напрямку, намагаючись просунути вздовж лінії спадання. У випадках, коли симплекс стикається з вузьким "проходом", він стискається в усіх напрямках, зосереджуючись навколо своєї найнижчої (найкращої) точки.

Початковий симплекс має велике значення. Надто малий початковий симплекс може обмежити пошук локальними мінімумами, що призведе до швидкої зупинки методу. Тому розмір симплексу повинен відповідати специфіці задачі. У первинній статті пропонується, щоб початкова точка x_1 була обрана, а інші точки генеруються з фіксованим кроком по кожному виміру по черзі. Через це метод чутливий до масштабування змінних, що складають вектор x .

Алгоритм методу Нелдера-Міда:

1. Визначаємо значення функції у вершинах симплексу. Симплекс - це фігура, обмежена площинами, кількість вершин якої на одиницю більша за розмірність простору, в якому задається цей симплекс.

2. Обираємо ту вершину симплексу, у якій значення функції є максимальним, та відображаємо симплекс дзеркально відносно цієї точки.

3. Повторюємо кроки 1 і 2. Симплекс перекладається, доки не накриє екстремум. У процесі руху до екстремуму обсяг симплексу зменшується (стискується), щоб забезпечити накриття екстремуму з максимальною точністю.

До переваг алгоритму можна віднести: простота обчислень; низькі вимоги до пам'яті комп'ютера, оскільки використовується мала кількість параметрів: координати початкової точки, коефіцієнти відображення, стиснення і розтягу, параметри закінчення пошуку. Ці фактори роблять метод пошуку за симплексом дуже корисним для проведення обчислень в реальному часі. Однак є також кілька недоліків: алгоритм працює досить повільно, оскільки інформація, отримана на попередніх ітераціях, не використовується для прискорення пошуку; відсутність простого способу розширення симплексу, який не потребує перерахунку значень цільової функції у всіх точках; можливість зациклювання алгоритму.

Висновки

Аналіз методу параметричного синтезу систем управління, проведений у другому розділі, дозволив виявити ключові переваги та недоліки цього підходу. Параметричний синтез є потужним інструментом для оптимізації характеристик систем управління безпілотних літальних апаратів. Він дозволяє знаходити оптимальні параметри, які забезпечують найкращі показники стабільності, точності та ефективності системи управління.

Дослідження показало, що застосування методів параметричного синтезу дозволяє враховувати різноманітні вимоги та обмеження, характерні для систем управління БПЛА. Це включає в себе як динамічні характеристики літака, так і зовнішні фактори, що впливають на його політ. Завдяки цьому підходу можна досягти більш високої точності управління та покращити загальну продуктивність БПЛА.

Аналіз методів параметричного синтезу показав їхню здатність до адаптації в реальному часі. Це особливо важливо для безпілотних літальних апаратів, які працюють в умовах змінного середовища та можуть стикатися з непередбачуваними ситуаціями.

Незважаючи на численні переваги, метод параметричного синтезу має і свої обмеження. Наприклад, складність математичних моделей та обчислювальних алгоритмів може вимагати значних ресурсів для реалізації та налаштування систем управління. Крім того, не всі аспекти поведінки БПЛА можуть бути точно змодельовані, що може впливати на ефективність синтезованих параметрів.

Загалом, аналіз методу параметричного синтезу систем управління показав його високу ефективність та перспективність для застосування у безпілотних

літальних апаратах. Використання цього методу дозволяє досягти значних поліпшень у продуктивності та надійності систем управління, роблячи БПЛА більш автономними та ефективними в умовах реального світу. Подальші дослідження та вдосконалення цього методу будуть сприяти ще більшому розширенню його можливостей та сфер застосування.

РОЗДІЛ 3

ЗАСТОСУВАННЯ ПАРАМЕТРИЧНОГО СИНТЕЗУ В ПРОЕКТУВАННІ СИСТЕМИ УПРАВЛІННЯ ДЛЯ БПЛА

3.1. Виконання структурно-параметричної та параметричної оптимізації над системою управління БПЛА

У попередніх розділах цієї роботи було детально розглянуто теоретичні основи БПЛА та проаналізовано методи параметричного синтезу для систем управління. Теоретичні аспекти параметричної оптимізації демонструють її потенціал у підвищенні ефективності та надійності систем управління БПЛА. Наступним кроком є практичне застосування цих методів у реальних умовах, що і буде розглянуто в цьому розділі.

Застосування параметричного синтезу в проектуванні систем управління для БПЛА дозволяє створювати більш стабільні та адаптивні системи. У цьому розділі буде описано процес проектування, оптимізації та тестування систем управління БПЛА з використанням методів параметричного синтезу.

Важливою складовою даного розділу є комп'ютерне моделювання в середовищі розробки MATLAB та експериментальні дослідження, які підтверджують ефективність застосованих методів. Моделювання дозволяє провести численні тестування та варіації параметрів без необхідності фізичного тестування, що значно знижує витрати та час на розробку. Експериментальні дослідження, у свою чергу, забезпечують реальні дані, які підтверджують або спростовують результати моделювання.

Цей розділ також включає аналіз результатів, отриманих в ході експериментів та моделювання. У розділі будуть розглянуті можливі обмеження та труднощі, з якими можна зіткнутися при застосуванні параметричного синтезу.

Кафедра АКСУ				ПОЯСНЮВАЛЬНА ЗАПИСКА			
Виконав	Романюк Т.А.			Застосування параметричного синтезу в проектуванні системи управління для БПЛА			Аркушів
Керівник	Абрамович О.О.						58
Н-контр.	Дивнич М.П.						
Зав.каф.	Мельник Ю.В.						
					№ СУ-403Б		

Щоб досягти цілі, а саме застосувати параметричний синтез над БПЛА, потрібно мати вхідні дані системи управління які описуються матрицями **A**, **B**, **C**, **D**, де

A – динамічна матриця або матриця системи. Визначає як поточний стан системи впливає на її зміну. Вона описує взаємозв'язок між змінними стану в часі, тобто, як поточний стан впливає на швидкість зміни стану. У контексті СУ БПЛА матриця описує динаміку системи БПЛА у просторі станів. Конкретні значення відображають коефіцієнти, що відображають вплив різних станів системи на їхні зміни з часом. Наприклад, перший рядок може відповідати за зміни швидкості, другий - за зміни позиції, третій - за зміни кутової швидкості.

B – матриця входів. Описує, як вхідні сигнали системи впливають на її стан. Вона визначає, як керуючі дії змінюють стан системи;

C – матриця виходів (спостереження). Описує як стан системи впливає на її виходи. Вона визначає, як змінні стану відображаються у вихідні змінні;

D – пряма передавальна матриця. Визначає пряму залежність виходу від вхідного сигналу. Зазвичай вона нульова.

Разом ці матриці формують рівняння простору станів, що використовуються для моделювання та аналізу динамічних систем.

В нашому випадку ми вибрали модель стану системи БПЛА з такими матрицями:

$A =$

$$\begin{matrix} 2.6980 & -1.2430 & 0.7866 \\ 2.0000 & 0 & 0 \\ 0 & 0.5000 & 0 \end{matrix}$$

$B =$

$$\begin{matrix} 0.1250 \\ 0 \\ 0 \end{matrix}$$

$C =$

$$0.0186 \quad 0.0350 \quad 0.0165$$

$D = 0$

Згідно до алгоритму параметричної оптимізації згаданого в розділі 2 проводимо параметричний синтез системи управління для БПЛА.

Параметрична оптимізація ПІД-регулятора буде відбуватися за методом Нелдера-Міда в середовищі розробки **MATLAB** версії 'R2014b'.

При параметричному синтезі структура регулятора повинна бути задана. Для цього потрібно її визначити:

1. Задати четвірку матриць які описують об'єкт.

$$A = [2.698 \ -1.243 \ 0.7866; 2 \ 0 \ 0; 0 \ 0.5 \ 0];$$

$$B = [0.125; 0; 0];$$

$$C = [0.01864 \ 0.03496 \ 0.01653];$$

$$D = [0];$$

2. Задати четвірку матриць A_{ac} , B_{ac} , C_{ac} , D_{ac} , які описують виконавчий механізм.

$$T_a = 0.5;$$

$$A_{ac} = -1 / T_a;$$

$$B_{ac} = 1 / T_a;$$

$$C_{ac} = 1;$$

$$D_{ac} = 0;$$

3. Представити в просторі стану модель об'єкта та виконавчого механізму за допомогою оператора *ss*.

$$sys = ss(A, B, C, D);$$

$$sysac = ss(A_{ac}, B_{ac}, C_{ac}, D_{ac});$$

4. Зробити послідовне з'єднання об'єкта та виконавчого механізму за допомогою оператора *series*.

$$sysser = series(sysac, sys);$$

5. Виділити четвірку матриць отриманого сполучення за допомогою оператора *ssdata*. Та отримуємо матриці послідовного з'єднання:

$$[A_{se}, B_{se}, C_{se}, D_{se}] = ssdata(sysser);$$

6. Оскільки розмірність системи збільшилась то необхідно розширити матриці $Cse1$ та $Dse1$:

```
Cse1 = [Cse; zeros(3,1) eye(3)];  
Dse1 = zeros(4,1);  
sysser1 = ss(Ase, Bse, Cse1, Dse1);
```

7. Побудувати оптимальний детермінований регулятор, використовуючи оператор lqr . Для цього необхідно задати діагональну матрицю вагових коефіцієнтів Q та R .

```
W = [0.01 1 3 1.5];  
Q = diag(W);  
R = 0.5;  
[F, P, E] = lqr(Ase, Bse, Q, R)
```

Після виконання, побудований регулятор виглядає так:

F =

```
144.9071 -23.4997 42.4136 3.7025
```

P =

```
1.0e+03 *
```

```
2.0378 -0.1242 0.5698 0.0362  
-0.1242 0.4403 -0.0336 -0.0059  
0.5698 -0.0336 0.6153 0.0106  
0.0362 -0.0059 0.0106 0.0009
```

E =

```
-4.0003 + 0.0000i  
-0.8677 + 0.2685i  
-0.8677 - 0.2685i  
-0.9714 + 0.0000i
```

8. Замикаємо об'єкт синтезованим регулятором за допомогою оператора $feedback$. На першому місці – система, на другому – регулятор.

```
clsys = feedback(sysser1, F);
```

9. Рахуємо H_2 показник якості для дискретних систем.

```
[Ao, Bo, Co, Do] = ssdata(clsys);
```

```
BB = Bo*Bo';
```

```
G = lyap(Ao, BB);
```

```
H2 = trace(Co*G*Co')
```

H2 =

0.2607

10. Побудувати перехідну характеристику отриманої замкненої системи за допомогою оператора *step*.

```
step(clsys), grid on
```

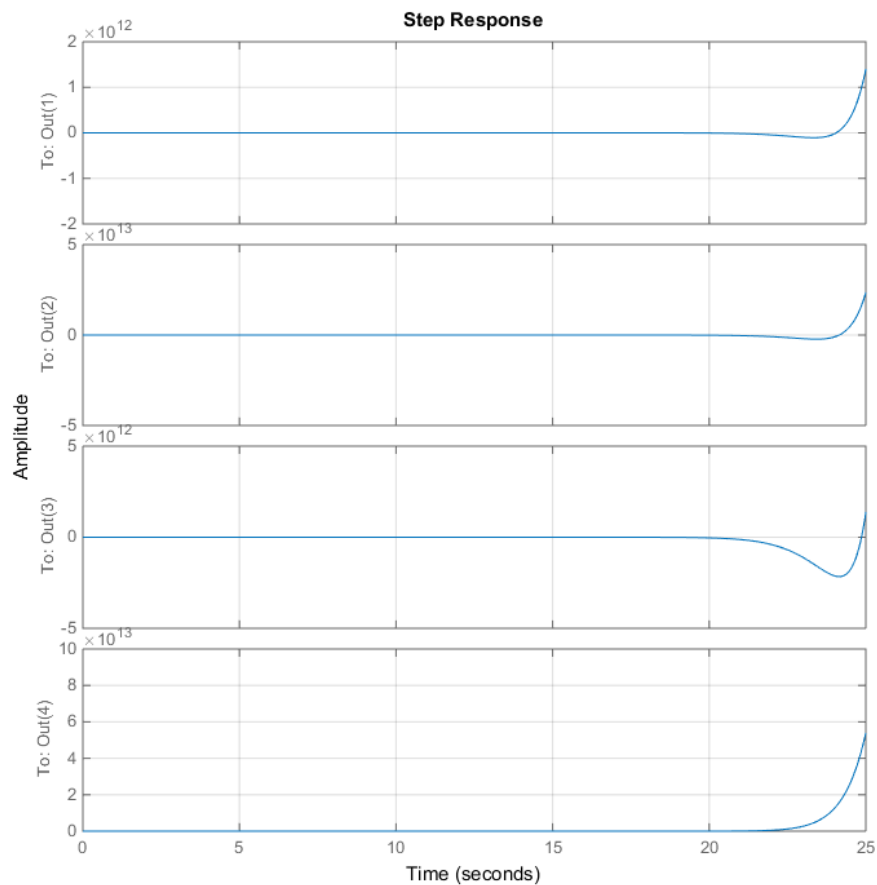


Рисунок 3.1 – Графік перехідних характеристик замкненої системи синтезованої детермінованим регулятором

Аналіз процедури структурно-параметричного синтезу в проектуванні системи управління для БПЛА.

Матриця F оптимальних коефіцієнтів підсилення регулятора описує, як керуючі сигнали u генеруються на основі поточних станів системи x .

Великі значення в матриці F 144.9071 вказують на те, що відповідний стан або похідна стану має значний вплив на керуючі сигнали. Та значення знака в матриці F -23.4997, 42.4136 вказують на те, як змінюються керуючі сигнали у відповідь на зміни станів або похідних станів.

Матриця P , що є рішенням рівняння Ріккати, використовується в алгоритмі LQR для розрахунку матриці зворотного зв'язку K . Її значення не використовується напряду в алгоритмі керування, але є важливою проміжною величиною в процесі розрахунку.

Вектор E , що містить власні числа матриці станів замкненої системи $A-BF$: Цей вектор описує динамічну поведінку замкненої системи, тобто те, як система буде реагувати на керуючі сигнали. Аналізуючи власні числа, можна оцінити стійкість, швидкість відстеження та інші характеристики системи.

Негативні значення реальної частини вектору E свідчать про те, що система стійка і всі стани з часом зійдуться до нуля. Та невеликі значення уявної частини свідчать про те, що колювання системи незначні.

Значення $H_2 = 0.2607$ є відносно невеликим, що свідчить про те, що система стійка і має хорошу продуктивність.

В інших випадках якщо:

1. H_2 значно більше 1:
 - Високий рівень збурень. Система може бути дуже чутливою до збурень, що призводить до значних відхилень у вихідному сигналі.
 - Погана демпфірувальна здатність. Система неефективно знижує вплив збурень, що може свідчити про недостатню демпфірувальну здатність.
 - Нестабільність. У крайніх випадках це може бути ознакою нестабільності системи, особливо якщо H_2 надто високе.
2. H_2 близьке до 0:
 - Висока ефективність управління. Система дуже добре контролює збурення, що призводить до мінімальних відхилень у вихідному сигналі.
 - Мала енергія виходу. Вихідний сигнал має низьку енергію, що свідчить про ефективне використання енергії системою.
 - Висока точність. Система має високу точність управління і добре справляється зі своїми завданнями.

3. В інших випадках потрібно обрати інші початкові параметри.

Перехідна характеристика показує, як система реагує на збурення. На графіку видно, що система швидко сходиться до заданого значення з мінімальними коливаннями. Це свідчить про те, що система має хорошу стійкість до збурювань.

Застосування параметричного синтезу

Тепер необхідно застосувати параметричний синтез.

1. Створюємо модель літального апарату в просторі станів, використовуючи початкові дані. Формуємо модель послідовного зв'язку виконавчого механізму і ЛА, що завершується розробкою моделі розімкненої системи управління.

Для початку необхідно створити файл під умовною назвою 'pidop.m' в середині якого задаємо функцію $J=pidop(p)$ яку будемо мінімізувати (додаток 1). Записуємо алгоритм мінімізації:

Вводимо наші матриці A, B, C, D:

$$A = [2.698 \ -1.243 \ 0.7866; 2 \ 0 \ 0; 0 \ 0.5 \ 0];$$

$$B = [0.125; 0; 0];$$

$$C = [0.01864 \ 0.03496 \ 0.01653];$$

$$D = [0];$$

Вводимо матриці виконавчого механізму A_{ac} , B_{ac} , C_{ac} , D_{ac} :

$$T_a = 0.5;$$

$$A_{ac} = -1 / T_a;$$

$$B_{ac} = 1 / T_a;$$

$$C_{ac} = 1;$$

$$D_{ac} = 0;$$

Перетворюємо матриці БПЛА та виконавчого механізму у модель простору станів

$$sys = ss(A, B, C, D);$$

$$sysac = ss(A_{ac}, B_{ac}, C_{ac}, D_{ac});$$

2. Другий крок полягає у створенні моделі замкненої системи «об'єкт + регулятор».

За допомогою оператора *series* робимо послідовне з'єднання цих об'єктів:

```
sysser = series(sysac, sys);
```

Тепер отримаємо матриці послідовного з'єднання

```
[Ase, Bse, Cse, Dse] = ssdata(sysser);
```

При операції з'єднання розмірність системи змінилася, тому необхідно розширити матрицю спостереження системи

```
Cse1 = [Cse; zeros(3,1) eye(3)];  
Dse1 = zeros(4,1);  
sysser1 = ss(Ase, Bse, Cse1, Dse1);
```

3. На третьому етапі визначаються початкові значення параметрів автопілота з урахуванням запасу стійкості замкненої системи.

Коефіцієнти регулятора заданої з параметрів даної функції зберігатимуться у змінній F . Вони будуть задані в іншій програмі.

```
F = [p(1), p(2), p(3), p(4)];
```

Замикаємо розширену систему та регулятор за допомогою оператора *feedback*:

```
clsys = feedback(sysser1, F);
```

4. Розраховується H_2 показник якості системи за наступною формулою:

$$J = \|q^T e\|_2 + \|r^T u\|_2 + PF,$$

Після цього отримуємо матриці простору стану та рахуємо H_2 показник якості для дискретних систем наступним чином:

```
[Ao, Bo, Co, Do] = ssdata(clsys);  
BB = Bo*Bo';  
G = lyap(Ao, BB);  
H2 = trace(Co*G*Co')
```

Вводимо штрафну функцію


```

R=eig(Ao);
d=max(real(R));
if d <=-0.01
    PF=0;
elseif d >-0.01
    PF=100000;
end;

```

Реалізуємо складний показник якості за даною формулою:

$$J = \lambda \cdot H_2 + PF$$

де λ - ваговий коефіцієнт; PF - штрафна функція.

$$J = H_2 + PF + \text{norm}(p)$$

5. Наступним етапом є створення програми для виконання процедури оптимізації, тобто пошуку мінімуму функції.

Тепер потрібна програма яка повинна виконувати процедуру оптимізації. Для цього обираємо початкові параметри регулятора

```
p=[0.1, 0.1, 0.1, 0.003];
```

та передаємо ці параметри як аргумент оператора *fminsearch*, за допомогою якого відбуватиметься оптимізація:

```
p=fminsearch('pidop',p)
```

Також для подальшої оцінки на правильність синтезу можна побудувати перехідні характеристики регулятора за допомогою оператора *step*. Щоб це зробити потрібно ввести глобальну змінну *clsys* між програмою, в якій задана наша функція та самою оптимізаційною програмою. Змінна *clsys* – це і є наша система регулятора, тоді щоб її вивести потрібно виконати наступні дії:

В основному файлі оптимізації оголошуємо глобальну змінну та відображаємо перехідні характеристики:

```

global clsys;
...
figure(1)
step(clsys), grid on

```

В файлі 'pidop.m' потрібно просто оголосити глобальну змінну:

```
function J=pidop(p)
global clsys;
...
```

6. Виконується сама процедура оптимізації.

Після виконання даної програми у командному вікні для виведення (Command Window) ми отримали H_2 норму та кінцеві після мінімізації параметри регулятора.

$$H_2 = 0.9622$$

$$p = [0.0007 \quad 0.0115 \quad 0.0028 \quad 0.0388]$$

Графік виглядатиме наступним чином:

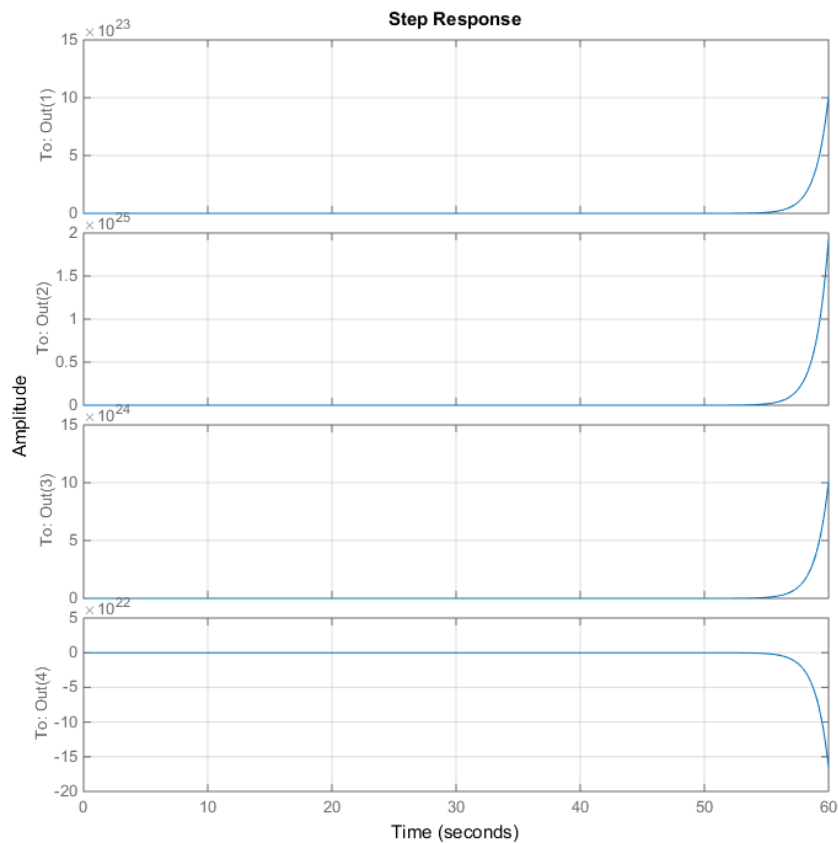


Рисунок 3.2 – Графік перехідних характеристик замкненої системи

7. Завершальним етапом є виконання програми оцінювання.

Тепер потрібно перевірити результат виконання на якість. Для цього слід створити новий програмний файл (додаток 2).

В даному файлі задаємо початкові матриці БПЛА, вводимо матриці виконавчого механізму A_{ac} , B_{ac} , C_{ac} , D_{ac} , перетворюємо їх в моделі простору станів та застосовуємо паралельне з'єднання. Одержуємо матриці послідовного з'єднання, та таким самим чином розширюємо матрицю спостереження системи.

$$Ta = 0.5;$$

$$A = [2.698 \ -1.243 \ 0.7866; 2 \ 0 \ 0; 0 \ 0.5 \ 0];$$

$$B = [0.125; 0; 0];$$

$$C = [0.01864 \ 0.03496 \ 0.01653];$$

$$D = [0];$$

$$Aac = -1 / Ta;$$

$$Bac = 1 / Ta;$$

$$Cac = 1;$$

$$Dac = 0;$$

$$sys = ss(A, B, C, D);$$

$$sysac = ss(Aac, Bac, Cac, Dac);$$

$$sysser = series(sysac, sys);$$

$$[Ase, Bse, Cse, Dse] = ssdata(sysser);$$

$$Cse1 = [Cse; zeros(3,1) \ eye(3)];$$

$$Dse1 = zeros(4,1);$$

$$sysser1 = ss(Ase, Bse, Cse1, Dse1);$$

На даний момент потрібно замкнути простір станів *sysser1* з отриманими параметрами регулятора. Тобто це повинно виглядати так:

$$F = [0.0007 \ 0.0115 \ 0.0028 \ 0.0388];$$

$$clsys = feedback(sysser1, F);$$

Так само отримуємо матриці простору стану та рахуємо показник якості для дискретних систем

```
[Ao, Bo, Co, Do] = ssdata(clsys);  
BB = Bo*Bo';  
G = lyap(Ao,BB);  
H2 = trace(Co*G*Co')
```

Та виводимо графік перехідних характеристик замкненої системи (рисунок 1.3)

```
figure(2)  
step(clsys), grid on
```

Маємо такий результат:

$H2 = 0.9622$

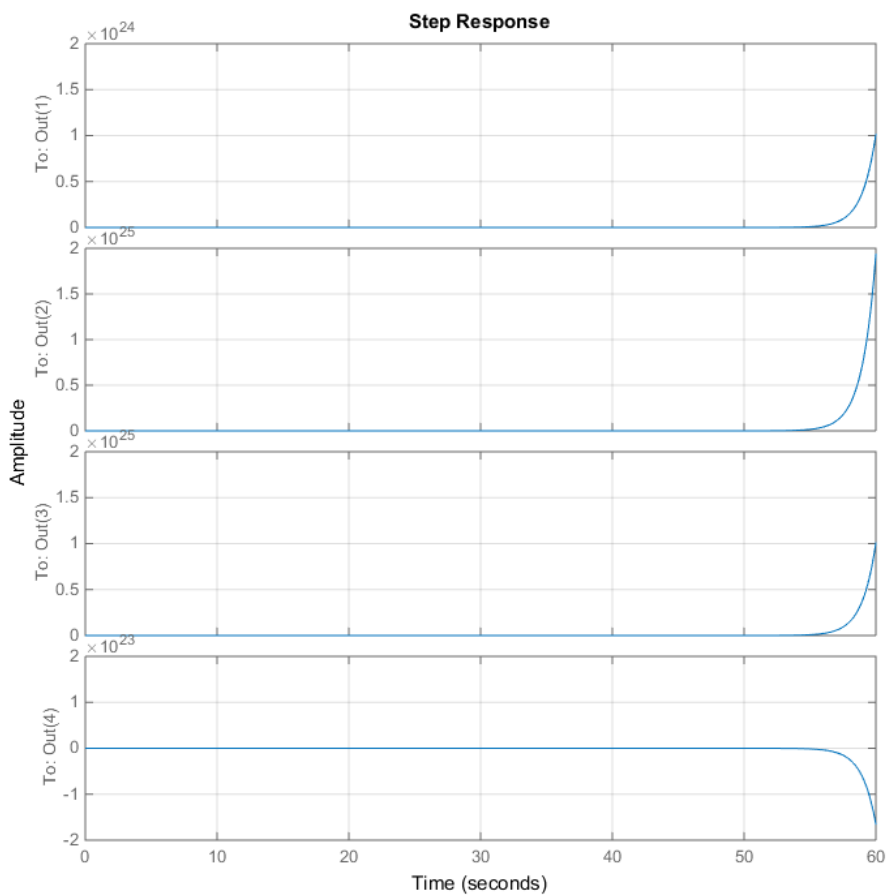


Рисунок 3.3 – Графік перехідних характеристик замкненої системи при оцінюванні якості

Аналіз процедури синтезу в проектуванні системи управління для БПЛА.

Якщо під час параметричної оптимізації регулятора H_2 -норма дорівнювала 0.9622, і після підставлення параметрів цього регулятора оцінка оптимізації H_2 -норма також показала 0.9622, та перехідні характеристики на всіх виходах є ідентичні це означає, що результати оптимізації були коректно розраховані, і сам процес оптимізації був успішним. Це свідчить про те, що алгоритм оптимізації працював правильно і знайшов оптимальні параметри, які мінімізують H_2 -норму системи.

Отримане значення $H_2 = 0.9622$ свідчить про те, що вибрана система управління БПЛА добре справляється зі своїми завданнями, демонструючи ефективність та стійкість. Вона має низьку енергію виходу при збуреннях, що є позитивним показником якості управління.

ПІДСУМОК

У ході виконання даної кваліфікаційної роботи було проведено комплексне дослідження методів синтезу систем управління для безпілотних літальних апаратів розглянуто історичний розвиток, сучасний стан технологій БПЛА та їхні актуальні застосування у військовій, цивільній та комерційній сферах. Акцент зроблено на важливості автономних систем управління для підвищення ефективності та безпеки виконання завдань у різних умовах.

Перший розділ роботи висвітлив основи безпілотних літальних апаратів як об'єктів управління, їхні характеристики та застосування. Показано, що БПЛА мають значні переваги перед традиційними пілотованими літальними апаратами, такі як висока автономність, здатність працювати в різних умовах та економічна ефективність. Це підтверджує актуальність подальших досліджень та вдосконалення систем управління для БПЛА.

Другий розділ був присвячений аналізу методу параметричного синтезу систем управління. Розглянуті різні підходи до оптимізації параметрів, які забезпечують найкращі показники стабільності, точності та ефективності. Показано, що параметричний синтез дозволяє адаптувати системи управління до змінних умов експлуатації та використовувати алгоритми штучного інтелекту для автоматизації процесу налаштування.

У третьому розділі було детально описано практичне застосування параметричного синтезу для проектування систем управління БПЛА. Виконано комп'ютерне моделювання, яке підтвердило ефективність запропонованих методів. Результати досліджень показали, що застосування параметричної оптимізації дозволяє значно покращити характеристики управління, забезпечуючи більш високу точність та стабільність польоту БПЛА. І загалом оптимізація за допомогою структурно-параметричного синтезу та параметричного синтезу була успішно виконана на що вказує аналіз по зробленій роботі.

Практичні експерименти підтвердили, що методи параметричного синтезу дозволяють адаптувати системи управління в реальному часі, що є критично важливим для виконання завдань у змінних та непередбачуваних умовах. Це робить БПЛА більш надійними та ефективними, знижуючи ризики та підвищуючи загальну продуктивність.

Загалом, результати роботи свідчать про ефективність параметричного синтезу для розробки систем управління безпілотними літальними апаратами. Використання цього методу дозволяє досягти поліпшень у роботі БПЛА, роблячи їх більш автономними та здатними виконувати завдання з високою точністю.

ЛІТЕРАТУРА

1. Kettering Bug | daviddarling.info [Електронний ресурс] // – Режим доступу : https://web.archive.org/web/20141223203215/http://www.daviddarling.info/encyclopedia/K/Kettering_Bug.html
2. Palik M. Brief History Of Uav Development. *Repüléstudományi Közlemények*. 2019. С. 155–163.
3. А. А. Саковський, С. М. Науменко, С. І. Кравченко, І. М. Єфіменко та ін. Київ: Нац. акад. внутр. справ. 2022. 72 с.
4. Ту-141 «Стриж»: історія успіху безпілотної авіабазы в рф (фото, відео) | Chas.News. *chas.news*. URL: <https://chas.news/current/tu-141-strizh-istoriya-uspihu-bezpilotnika-yakii-atakue-aviabazi-v-rf-foto-video>
5. МВС України "Інструкція із застосування військовослужбовцями Національної гвардії України технічних приладів і технічних засобів, що мають функції фото- і кінозйомки, відеозапису, засобів фото- і кінозйомки, відеозапису" від 13.01.2021.
6. Повітряний кодекс України від 19.05.2011 № 3393-VI від 19.02.2022.
7. Amazon запускає доставку товарів дронами. Експерти кажуть, що вона небезпечна - Хмарочос. *Хмарочос*. URL: <https://hmarochos.kiev.ua/2022/06/14/amazon-zapuskaye-dostavku-tovariv-dronamy-eksperty-kazhut-shho-vona-nebezpechna/>.
8. Joint Doctrine Note 2/11. The UK Approach to Unmanned Aircraft Systems. London : Development, Concepts and Doctrine Centre, 2011. 102 p.
9. Особливості застосування безпілотної літальної апаратури органами та підрозділами поліції: метод. рек. / А. А. Саковський, С. М. Науменко, С. І. Кравченко, І. М. Єфіменко та ін. Київ: Нац. акад. внутр. справ. 2022. 72 с.
10. Protector RG Mk 1 (MQ-9B) | Royal Air Force [Електронний ресурс] // – Режим доступу : <https://www.raf.mod.uk/aircraft/protector-rg-mk-1-mq-9b/>
11. MQ-9 REAPER fact sheet | US Air Force [Електронний ресурс] // – Режим доступу : <https://www.af.mil/About-Us/Fact-Sheets/Display/Article/104470/mq-9-reaper/>
12. MQ-9A "Reaper". ga-asi.com. [Електронний ресурс] // – Режим доступу : <https://www.ga-asi.com/remotely-piloted-aircraft/mq-9a>

ДОДАТОК 1 ПРОГРАМА ФУНКЦІЇ ДЛЯ МІНІМІЗАЦІЇ

```
function J=pidop(p)
global clsys;
Ta = 0.5;

A=[2.698 -1.243 0.7866;2 0 0;0 0.5 0];
B=[0.125;0;0];
C=[0.01864 0.03496 0.01653];
D=[0];

Aac = -1 / Ta;
Bac = 1 / Ta;
Cac = 1;
Dac = 0;

sys = ss(A, B, C, D);
sysac = ss(Aac, Bac, Cac, Dac);

sysser = series(sysac, sys);

[Ase, Bse, Cse, Dse] = ssdata(sysser);

Cse1 = [Cse; zeros(3,1) eye(3)];
Dse1 = zeros(4,1);
sysser1 = ss(Ase, Bse, Cse1, Dse1);

F = [p(1), p(2), p(3), p(4)];

clsys = feedback(sysser1, F);

[Ao, Bo, Co, Do] = ssdata(clsys);
BB = Bo*Bo';
G = lyap(Ao, BB);
H2 = trace(Co*G*Co')

R=eig(Ao);
d=max(real(R));
if d <=-0.01
    PF=0;
elseif d >-0.01
    PF=100000;
end;
J=H2+PF+norm(p)
```


ДОДАТОК 2
ПРОГРАМА ОЦІНЮВАННЯ РЕЗУЛЬТАТІВ ВИКОНАННЯ
ОПТИМІЗАЦІЙНОЇ ПРОЦЕДУРИ

```
Ta = 0.5;

A=[2.698 -1.243 0.7866;2 0 0;0 0.5 0];
B=[0.125;0;0];
C=[0.01864 0.03496 0.01653];
D=[0];

Aac = -1 / Ta;
Bac = 1 / Ta;
Cac = 1;
Dac = 0;

sys = ss(A, B, C, D);
sysac = ss(Aac, Bac, Cac, Dac);

sysser = series(sysac, sys);

[Ase, Bse, Cse, Dse] = ssdata(sysser);

Cse1 = [Cse; zeros(3,1) eye(3)];
Dse1 = zeros(4,1);
sysser1 = ss(Ase, Bse, Cse1, Dse1);

F = [0.0007 0.0115 0.0028 0.0388];

clsys = feedback(sysser1, F);

[Ao, Bo, Co, Do] = ssdata(clsys);
BB = Bo*Bo';
G = lyap(Ao, BB);
H2 = trace(Co*G*Co')

figure(2)
step(clsys), grid on
```