

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: Аналіз системи управління літального апарату

Виконавець: студент групи СУ-403 Мисенко Андрій Сергійович

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 «Комп'ютеризовані системи управління та автоматика»

ЗАТВЕРДЖУЮ

Завідувач кафедри

_____ Мельник Ю.В.

« _____ » _____ 2024 р.

ЗАВДАННЯ

на виконання кваліфікаційної роботи

Мисенка Андрія Сергійовича

1. Тема кваліфікаційної роботи: Аналіз системи управління літального апарату.
Затверджена наказом ректора від «01» квітня 2024 р. № 511/ст.
2. Термін виконання роботи: з 13.05.2024 по 16.06.2024
3. Вихідні дані до роботи: модель безпілотного літального апарату, задана в просторі станів матрицями A,B,C,D
4. Зміст пояснювальної записки: Розділ 1 Огляд безпілотних літальних апаратів та їх застосування; Розділ 2 Структурний синтез системи управління з використанням фільтра неповного порядку; Розділ 3 Растосування методу структурного синтезу системи управління з використанням фільтра неповного порядку;
5. Перелік ілюстративного матеріалу презентації: система моделювання у графічному середовищі MATLAB/Simulink, результати моделювання

6. Календарний план-графік

№ пор.	Завдання	Термін виконання	Відмітка про виконання
1.	Вступ	13.05.2024- 15.05.2024	виконано
2.	Особливості БПЛА як об'єкта дослідження. Визначення проблеми	16.05.2024- 20.05.2024	виконано
3.	Підготовка та оформлення розділу 1 кваліфікаційної роботи	21.05.2024- 27.05.2024	виконано
4.	Підготовка та оформлення розділу 2 кваліфікаційної роботи	28.05.2024- 31.05.2024	виконано
5.	Підготовка та оформлення розділу 3 кваліфікаційної роботи	01.06.2024- 08.06.2024	виконано
6.	Висновки	09.06.2024- 16.06.2024	виконано

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

Керівник кваліфікаційної роботи _____ Абрамович.О.О.

Завдання прийняв до виконання _____ Мисенко А.С.

РЕФЕРАТ

Текстова частина роботи: 60 стор., 36 рис., 1 табл.

Об'єкт дослідження - системи управління безпілотним літальним апаратом

Предмет дослідження – методи та алгоритми проектування систем управління для широкого класу об'єктів, зокрема для БПЛА

Мета роботи – структурний синтез системи управління з використанням фільтра неповного порядку

Методи дослідження ґрунтуються на основі сучасних методів аналізу, синтезу і моделювання систем управління

Результати. У кваліфікаційній роботі розглянуто структурний синтез систем управління для безпілотного літального апарату

Ключові слова: БПЛА, ДРОН, ВАУРАКТАР

ЗМІСТ

ВСТУП	7
РОЗДІЛ 1.ОГЛЯД БЕЗПЛОТНИХ ЛІТАЛЬНИХ АПАРАТІВ ТА ЇХ ЗАСТОСУВАННЯ	8
1.1. Безпілотні літальні апарати	8
1.2. Класифікація БПЛА	10
1.2.1. Класифікація за розміром	10
1.2.2. Класифікація за дальністю польоту та витривалістю в повітрі	17
1.3.Застосування БПЛА в ЗСУ	18
1.4.Баурактар ТВ2 як об'єкт дослідження	20
1.4.1. Історія	20
1.4.2. Ефективність дрона Баурактар ТВ2 в Україні	21
1.4.3. Технічні характеристики	23
1.4.4. Конструкція	24
РОЗДІЛ 2. СТРУКТУРНИЙ СИНТЕЗ СИСТЕМИ УПРАВЛІННЯ З ВИКОРИСТАННЯМ ФІЛЬТРА НЕПОВНОГО ПОРЯДКУ	28
2.1. Види спостерігачів в теорії управління	28
2.2. Загальний принцип побудови оптимального детермінованого регулятора для неперервних систем у пакеті програм MATLAB	30
2.3. Спостерігачі повного та неповного порядку	33
2.4. Теорема розподілу	39
РОЗДІЛ 3. ЗАСТОСУВАННЯ МЕТОДУ СТРУКТУРНОГО СИНТЕЗУ СИСТЕМИ УПРАВЛІННЯ З ВИКОРИСТАННЯМ ФІЛЬТРА НЕПОВНОГО ПОРЯДКУ	43
3.1. Відновлення вектора стану системи при неповних вимірах за допомогою спостерігача неповного порядку (фільтра Люенбергера)	43
3.2. Оптимальний лінійний стохастичний регулятор при неповних вимірах. Теорема розділення	52
ВИСНОВКИ	59
СПИСОК БІБЛІОГРАФІЧНИХ ПОСИЛАНЬ ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ	60

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ ТА СКОРОЧЕНЬ

БПЛА - безпілотний літальний апарат

СНП – спостерігач неповного порядку

СПП – спостерігач повного порядку

ЗСУ – Збройні сили України

ДПЛА - дистанційно пілотовані літальні апарати

ВМ – виконавчий механізм

ВСТУП

Безпілотні літальні апарати перетворились на невід'ємну частину сучасного технологічного світу, відкриваючи нові горизонти у військовій, цивільній та комерційній сферах. Ці інноваційні пристрої, позбавлені людського екіпажу на борту, демонструють широкий спектр можливостей та переваг, підвищуючи ефективність та безпеку численних операцій.

В умовах російської агресії проти України, БПЛА відіграють неоціненну роль у зборі розвідувальних даних, моніторингу територій та наданні критично важливої інформації для прийняття стратегічних рішень. Їхня здатність проникати у важкодоступні зони, забезпечувати високоякісну візуалізацію цілей та оперативно передавати дані робить їх незамінним активом у протидії ворогу.

Проте, поряд з очевидними перевагами, використання БПЛА ставить нові виклики перед інженерами та розробниками. Забезпечення стабільності, точності та ефективності управління цими безпілотними системами вимагає ретельного аналізу та синтезу передових алгоритмів керування. Оптимізація траєкторій польоту, врахування змінних зовнішніх умов, автономність прийняття рішень та інтеграція з іншими технологіями є ключовими аспектами, що потребують ґрунтовного дослідження.

Отже, подальший розвиток безпілотних літальних апаратів та вдосконалення систем їх управління є стратегічно важливим завданням, яке має безпосередній вплив на підвищення обороноздатності держави, ефективність цивільних та комерційних операцій, а також розкриває нові перспективи для наукових досліджень та інновацій.

РОЗДІЛ 1
ОГЛЯД БЕЗПЛОТНИХ ЛІТАЛЬНИХ АПАРАТІВ ТА ЇХ
ЗАСТОСУВАННЯ

1.1. Безпілотні літальні апарати

Безпілотний літальний апарат (БПЛА) - це літальний апарат, на борту якого немає пілота або пасажирів, вони можуть бути повністю або частково автономними, але частіше керуються дистанційно людиною-пілотом.

Безпілотні літальні апарати відомі під кількома назвами, серед яких: безпілотні літальні апарати (БПЛА) та дистанційно пілотовані літальні апарати (ДПЛА). Частіше за все такі пристрої називають дронами.

Дронами можна керувати дистанційно або слідувати за попередньо запрограмованим курсом. Вони використовуються військовими з часів Другої світової війни, тоді як цивільне використання дронів розквітло на початку 21-го століття. Наприкінці Другої світової війни деякі дрони використовували як мішені. Так, ВМС США запускають легкі радіокеровані дрони в Тихому океані для артилерійських стрільб.

Великі плюси дронів в тому, що без екіпажу вони набагато легші за традиційні літаки. Вони не потребують систем життєзабезпечення і безпеки пілотів. Таким чином, військові дрони можуть бути надзвичайно ефективними, пропонуючи значно більший радіус дії і тривалість польоту, ніж пілотовані літаки, що виконують ту ж саму роботу.

Дрони змінювалися в міру вдосконалення систем навігації, обчислювальної техніки і керування польотом.

Кафедра АКСУ				ПОЯСНЮВАЛЬНА ЗАПИСКА			
Виконав	Мисенко А.С.			<i>БПЛА та їх застосування</i>		Аркуш	Аркушів
Керівник	Абрамович О.О.					8	60
					№ 151-403-СУ		
Н-контр.	Дивнич М.П.						
Зав.каф.	Мельник Ю.В.						

У 1980-х роках військові дрони стали використовувати як інструменти спостереження, вони надавали цінну інформацію про позиції противника з висоти пташиного польоту. Деякі з них могли "вказувати" лазером, щоб вказувати союзникам на важливі цілі. Інші несли електронні передавачі, які глушили ворожий зв'язок.

На початку 21 століття БПЛА почали використовуватись не лише у військовій сфері, а й для цивільних потреб приватних компаній, державних організацій та звичайних ентузіастів. Ці дрони оснащені горизонтальними пропелерами для польоту, керуються оператором з землі та працюють від акумуляторних батарей.

Дрони допомагають досліджувати погодні умови та стан навколишнього середовища, наприклад, брати проби води. Вони дозволяють знімати з повітря видовищні події. Безпілотники стають у нагоді у віддалених чи небезпечних місцях, як-от активні вулкани, куди вони супроводжують дослідників.

У більш буденному застосуванні державні служби використовують дрони для відлякування птахів та тварин від чутливих зон, наприклад аеропортів. Вони здійснюють точне обприскування та моніторинг сільгоспугідь, забезпечують бездротовий інтернет та телефонний зв'язок.

Використання дронів правоохоронцями викликало жваве обговорення та суперечки. Багато хто визнає, що безпілотники допомагають поліції виявляти порушників ПДР та стежити за небезпечними злочинцями. Однак є побоювання, що органи влади можуть зловживати цією технологією для відстеження законослухняних громадян.

Тим часом дрони продовжують удосконалюватись. Від примітивних споживчих іграшок до смертоносної зброї - безпілотники охопили широкий спектр використання.

1.2. Класифікація БПЛА

Не існує єдиного стандарту, коли мова йдеться про класифікацію БПЛА, але більшість класифікують їх за такими ознаками, як вага, розмір, тривалість і висота польоту, швидкість та навантаження на крило.

1.2.1. Класифікація за розміром

Для класифікації за розміром можна виділити наступні підкласи:

- Дуже малі БПЛА(Мікро або нано)
- Малі БПЛА
- Середні БПЛА
- Великі БПЛА

Згідно з класифікацією Міністерства оборони США, БПЛА поділяються на п'ять категорій, як показано в Таблиці 1:

Категорія	Розмір	Максимальна злітна маса(кг)	Нормальна робоча висота(м)	Швидкість польоту(м/с)
Група 1	Малий	0-9	<365	< 51.44
Група 2	Середній	9.5-25	<1067	< 128.61
Група 3	Великий	<600	<5486	< 128.61
Група 4	Більший	>600	<5486	> 128.61
Група 5	Найбільший	>600	>5486	> 128.61

Таблиця 1. Класифікація БПЛА Міністерства оборони США

Дуже малі БПЛА:

До класу дуже малих БПЛА відносяться БПЛА з розмірами до 30-50 см завдовжки. Комахоподібні БПЛА з крилами, що махають або обертаються, є популярним мікродизайном. Вони надзвичайно малі за розміром, дуже легкі і можуть використовуватися для шпигунства.

Прикладами дуже маленьких БПЛА є: ізраїльський IAI Malat Mosquito (з розмахом крила 35 см і тривалістю польоту 40 хвилин), американський Aurora Flight Sciences Skate (з розмахом крила 60 см і довжиною 33 см), австралійський Cyber Technology CyberQuad Mini (з квадратом 42x42 см). Див. Рис. 1.1-1.3 нижче.



Рис.1.1. IAI Malat Mosquito



Рис.1.2. Aurora Flight Sciences Skate



Рис.1.3. Cyber Technology CyberQuad Mini

Малі БПЛА:

До класу малих БПЛА відносяться ті, які мають хоча б одну вісь більше 50 см і не більше 4 метрів. Багато конструкцій цієї категорії базуються на моделі з фіксованим крилом, і більшість з них запускаються вручну шляхом підкидання в повітря.

Прикладами представників цього класу малих БПЛА є:

1-метровий RQ-11 Raven компанії US Aero Vironment з розмахом крил 1,4 м(Рис.1.4.);

RQ-7 Shadow (Рис.1.5) з розмахом крил 3,89 м.



Рис.1.4. RQ-11 Raven



Рис.1.5 RQ-7 Shadow

Середні БПЛА:

До середнього класу БПЛА відносяться БПЛА, які занадто важкі, щоб їх могла переносити одна людина, але все ще менші за легкі літаки. Зазвичай вони мають розмах крил близько 5-10 м і можуть нести корисне навантаження від 100 до 200 кг.

Прикладами середніх БПЛА з фіксованим крилом є: ізраїльсько-американський Hunter (Рис.1.6) з розмахом крил 10,57 м і корисним навантаженням 90 кг, а також британський Watchkeeper (Рис.1.7) розмах крил якого становить 10,9 м.



Рис.1.6 IAI RQ-5



Рис.1.7 Watchkeeper WK450

Великі БПЛА:

До класу великих БПЛА відносяться великі БПЛА, що використовуються переважно для бойових операцій військовими.

Прикладами таких великих БПЛА є: американський RQ-4 Global Hawk(Рис.1.8), розмах крил якого становить близько 40 метрів, та MQ-1 Predator (Рис.1.9) зі злітною масою 1020 кг та розмахом крила 15 м



Рис.1.8 RQ-4 Global Hawk



Рис.1.9 MQ-1 Predator

1.2.2. Класифікація за дальністю польоту та витривалістю в повітрі

БПЛА також можна класифікувати за дальністю польоту та витривалістю в повітрі, використовуючи наступні підкласи, розроблені американськими військовими:

- Дуже дешеві БПЛА найближчої дальності

До цього класу належать БПЛА з дальністю польоту до 5 км, часом витривалості від 20 до 45 хвилин

- БПЛА ближнього радіусу дії

До цього класу відносяться БПЛА з дальністю польоту до 50 км і часом витривалості від 1 до 6 годин. Зазвичай їх використовують для розвідки та спостереження.

- БПЛА малої дальності

До цього класу належать БПЛА з дальністю польоту 150 км і більше та часом автономної роботи від 8 до 12 годин. Як і БПЛА ближнього радіусу дії, вони в основному використовуються для розвідки і спостереження.

- БПЛА середньої дальності

До класу БПЛА середньої дальності належать БПЛА, які мають надвисоку швидкість і робочий радіус 650 км. Вони також використовуються для розвідки і спостереження, а також для збору метеорологічних даних.

- Витривалі БПЛА

До класу витривалості відносяться БПЛА, які мають тривалість польоту 36 годин і робочий радіус 300 км. Цей клас БПЛА може працювати на висоті близько 9000 метрів. Вони також використовуються для розвідки і спостереження.

1.3. Застосування БПЛА в ЗСУ

З початком широкомасштабного вторгнення в лютому 2022 року українські військові зіткнулися з нагальною потребою у розвідувальних та ударних безпілотниках для протидії агресору. БПЛА дозволяють ефективно вести спостереження, коригувати вогонь артилерії, завдавати точкових ударів та виконувати інші завдання з мінімальним ризиком для пілотів. Застосування сучасних БПЛА стало одним із ключових факторів, що допомогло ЗСУ завдати значних втрат ворогу та зірвати плани швидкого захоплення території.

Тож розгляд різних видів БПЛА, що активно застосовуються підрозділами ЗСУ, їх характеристики та можливості є вкрай важливим для розуміння сучасного збройного конфлікту.

Безпілотні літальні апарати можна умовно поділити на чотири класи. Вони відрізняються за характеристиками та цільовим призначенням.

- 1 клас - це мікродрони, призначені переважно для цивільного використання. В Україні найбільшою популярністю користуються моделі від китайського виробника DJI та американської компанії Autel. Вони компактні, прості у керуванні та доступні широкому колу споживачів.
- 2 клас - середньодистанційні безпілотники, які використовуються для розвідки на тактичному рівні. Серед них - розробки українських виробників "Лелека-100" та "Фурія", спеціально створені для військових цілей. Їх тривалість польоту сягає до 3 годин.
- 3 клас - це оперативно-тактичні БПЛА, здатні безперервно літати до 10 годин, з більшим радіусом дії. Вони застосовуються для спостереження за противником та планування бойових операцій. Представниками цього класу є українські безпілотники PD-2 та Raybird-3.

- 4 клас - стратегічні або ударні БПЛА, такі як турецький Bayraktar TB-2. Крім розвідувальних функцій та можливості нести керовані бомби, вони здатні перебувати у повітрі до 24 годин без дозаправлення.

Безпілотники стали активними учасниками бойових дій в Україні після початку конфлікту на Донбасі у 2014 році. Вітчизняні виробники почали активно розробляти і випускати різноманітні моделі БПЛА для потреб армії. На ринку з'явилися відомі бренди "Атлон-Авіа", Skyeton, DeViRo, Ukrspecsystems та UA Dynamics.

Зараз Збройні Сили мають у своєму розпорядженні широкий асортимент українських безпілотників - "Лелека-100", Punisher, PD-2, "Валькірія" та інші. Вони призначені для розвідки, коригування вогню артилерії і нанесення ударів.

Наприклад, "Фурія" від "Атлон Авіа" - це комплекс розвідки з радіусом дії 200 км і тривалістю польоту до 3 годин.

"Лелека-100" здатна літати на відстань до 100 км зі швидкістю 120 км/год і перебувати в повітрі 2,5 години.

PD-2 - багатоцільовий безпілотник з крейсерською швидкістю 100 км/год, який може нести бомбове навантаження і літати до 12 годин на відстань 1000 км.

"Валькірія" призначена для моніторингу, розвідки та коригування вогню вдень і вночі. Її максимальна швидкість - 108 км/год, висота польоту - до 2000 метрів.

1.4. Bayraktar TB2 як об'єкт дослідження

Bayraktar TB2 (Taktik Blok 2) - турецький ударний оперативно-тактичний середньовисотний БПЛА з великою тривалістю польоту, здатний виконувати як дистанційно керовані так і повністю автономні польоти. (Див. Рис.1.10)



Рис.1.10 Bayraktar TB2

1.4.1. Історія

Компанія Baykar, заснована в 1984 році Оздеміром Байрактаром, спочатку спеціалізувалася на виробництві автомобільних запчастин. Потім Сельчук Байрактар, другий син засновника, а нині технічний директор компанії, змістив фокус на дрони, створивши Bayraktar Mini-UAV у 2004 році невеликий дрон ручного запуску.

У 2007 році, коли турецькі збройні сили розпочали програму тактичних безпілотників, в якому Baykar виграла тендер зі своїм TB1, який використовувався для спостережних місій. Саме він і став основою для TB2, який в свою чергу вже мав непоганий ударний потенціал.

Нова модель під назвою Bayraktar TB2 піднялася в повітря наприкінці літа 2014 року. У червні та серпні 2014 року Bayraktar TB2 побив світовий рекорд серед безпілотних літальних апаратів у класі тактичних середньовисотних БПЛА за тривалістю польоту: він знаходився у небі на висоті 8 км 24 години 34 хвилини. Після тривалих льотних випробувань з борту дрона вперше запустили керовану ракету. Відео цієї події з'явилося в Інтернеті 18 грудня 2015 року. Відтоді турецька армія отримала власний ударний БПЛА з високоточною зброєю для "хірургічних ударів".

У 2017 році шість безпілотників і три станції управління було продано Катару, у 2019 дванадцять дронів і три станції - Україні.

У жовтні 2020 року було заявлено, що Україна розглядає можливість купівлі або спільного складання ще 48 дронів; контракт укладено у вересні 2021 року. Наприкінці грудня 2021 року Андрій Єрмак офіційно повідомив про запуск української збірки Bayraktar TB2, які планувалося оснащувати двигунами українського виробництва

1.4.2. Ефективність дрона в Україні

Bayraktar TB2 привернув значну увагу в останні роки завдяки його успішному розгортанню в різних зонах конфлікту. TB2, розроблений турецьким оборонним підрядником Baykar Makina, зіграв помітну роль в українському конфлікті. З моменту першого запуску TB2 зазнавав постійних удосконалень у своїх можливостях, включаючи кращу витривалість, збільшену вантажопідйомність та вдосконалені системи зв'язку.

В Україні розгортання безпілотників TB2 змінило динаміку конфлікту. Збройні сили України використовували безпілотник для збору розвідданих, ведення спостереження та нанесення точних авіаударів по цілях ворога.

Відео в режимі реального часу та можливості відстеження цілей TB2 значно підвищили ситуаційну обізнаність та оперативні можливості українських військових. Його здатність залишатися в повітрі протягом тривалого часу та виконувати місії за несприятливих погодних умов була критично важливою для забезпечення постійної повітряної підтримки наземних сил.

Можливості точного наведення на ціль Bayraktar'у дозволили українським силам нейтралізувати важливі цілі, зокрема танки, бронетехніку та системи протиповітряної оборони противника. Ударні можливості безпілотної на великій відстані фактично порушили лінії постачання сепаратистів та інфраструктуру командування та управління.

Незважаючи на свої успіхи, Bayraktar TB2 не позбавлений обмежень. Однією з головних проблем є його вразливість для систем протиповітряної оборони противника. TB2 покладається на зв'язок прямої видимості з наземними станціями управління, що створює ризик перехоплення або збою. Наявність передових протиповітряних систем може потенційно обмежити ефективність TB2.

Як виявилось, найбільшу ефективність ці дрони продемонстрували у боротьбі з Реактивними системами залпового вогню (РСЗВ) та танками, знищивши понад 120 одиниць важких бойових машин та понад 280 ракетних пускових установок, хоча на рахунку безпілотної є навіть бойові літаки та вертольоти.

Згідно зі статистикою, опублікованою ресурсом Oryxspioenkop, на 02.09.2022 підтверджено знищення турецькими дронами Bayraktar TB2 856 цілей. Кількість таких може бути й набагато більшою, проте йдеться виключно про підтвержені випадки, коли в ударах був задіяний сам БПЛА.

Як впливає з представленої статистики, за допомогою БПЛА Bayraktar TB2 було знищено понад 420 одиниць транспортних засобів, понад 280 ракетних пускових установок і РСЗВ, понад 120 танків, не менше 5 гелікоптерів і навіть 3 винищувачі-бомбардувальники Су-22 та ін.

Відомо про те, що офіційна статистика цілей турецьким виробником не ведеться, проте, враховуючи недавню заяву про те, що на сьогоднішній день у Туреччині є замовлення на виробництво цих дронів на три роки вперед, логічно припустити, що ефективність застосування подібних БПЛА є дуже високою.

Природа війни вимагає постійних удосконалень для протидії новим загрозам і вразливостям. Для Baykar Makina вкрай важливо продовжувати інвестувати в дослідження та розробки, щоб розширити можливості TB2 і усунути його недоліки.

У подальшому ефективність Bayraktar TB2 в Україні та інших зонах конфлікту залежатиме від його адаптивності, стійкості до контрзаходів і здатності долати виклики, що виникають.

1.4.3. Технічні характеристики

- | | |
|---------------------------|------|
| • Довжина, м | 6,5 |
| • Розмах крил, м | 12 |
| • Макс. злітна вага, кг | 650 |
| • Запас палива, л | 300 |
| • Макс. шв., км/год | 222 |
| • Крейсерська шв., км/год | 130 |
| • Автономність, год | 27 |
| • Макс. висота польоту, м | 8200 |

- Радіус управління з наземної станції, км 150
- оновлена версія, км до 300
- Вантажопідйомність, кг 150

(боєприпасів - до 95кг, 55 кг - стандартний модуль електроннооптичної системи спостереження та лазерної цілівказання Wescam CMX 15D канадського виробництва)

- двигун внутрішнього згоряння(Rotax 912), к. с. 100
- 4 точки кріплення для керованих боєприпасів

Може нести протитанкові ракети та авіаційні бомби. А саме:

- інтелектуальні боєприпаси МАМ: керовані МАМ-С (осколково-фугасні) і МАМ-L (термобаричні);
- протитанкові ракети UMTAS дальньої дії;
- ракети Roketsan Cirit (70 mm);
- лазерно керовані ракети TUBITAK-SAGE BOZOK;
- бомби TUBITAK-SAGE TOGAN (81 mm);
- модульні боєприпаси TUBITAK-SAGE KUZGUN.

1.4.4. Конструкція

БПЛА літакового типу, двобалковий низькоплан.

Корпус виконаний з композитних матеріалів (в основному вуглепластик).

Такий підхід дозволив суттєво знизити вагу машини і збільшити її вантажопідйомність. Апарат оснащений системою автоматичного зльоту і посадки. За необхідності він може діяти в автоматичному та напівавтомному режимі.

Ваурактар оснащений канадським двигуном внутрішнього згоряння Rotax 912 з гвинтом штовхаючого типу.

Розташований гвинт між задніми балками, так що створюваний ним потік повітря потрапляє на хвостове оперення, що має збільшувати керованість і маневреність.

Rotax 912 це чотирициліндровий двигун внутрішнього згоряння, що працює на бензині з октановим числом 95 і вище. Потужність мотора всього 100 кінських сил при об'ємі в 1211,2 см³. Паливо зберігається в гнучких резервуарах. Для зниження обертів двигун обладнується редуктором. Охолодження циліндрів - рідинне.

Оперення безпілотного літального апарату побудовано за двобалковою схемою. Кілі розміщені зі зворотнім нахилом і з'єднані у верхній частині, утворюючи єдину конструкцію, яка врівноважує носову частину машини і водночас виконує роль стабілізатора.

Шасі БПЛА має 3 опори, що не прибираються, передня - повертається і застосовується під час рулювання. Колеса забезпечені гідравлічними гальмами.

Ваурактар ТВ2 керується з наземної станції(Рис.1.11), яка перевозиться автомобілем. Її оснащено стелажними шафами, блоком кондиціонування повітря, системою фільтрації повітря, блоками живлення, системами бездротового зв'язку та системами внутрішнього зв'язку.



Рис.1.11 Наземна станція управління

Станції здатні перехоплювати керування безпілотниками одна одної, що дозволяє швидко змінювати тактику. Оперативний радіус дії дронів рахується не від точки старту, а від найближчої станції керування і контролю або від ретранслятора сигналів

Габарити літального апарату показані на Рис.1.12

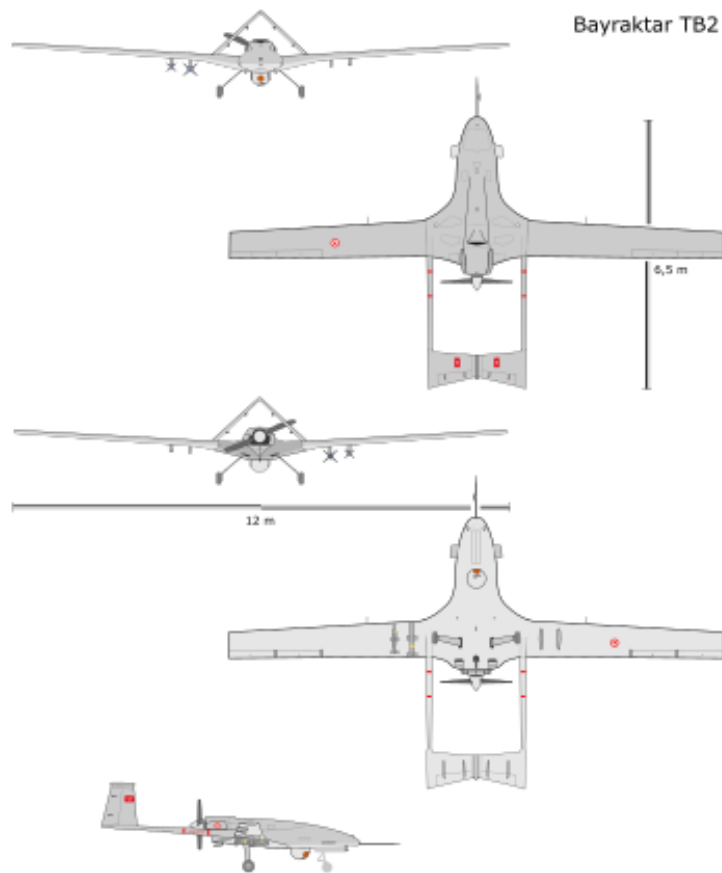


Рис.1.12 Габарити Bayraktar TB2

Завдяки високоякісній оптико-електронній системі (використовується канадська станція повітряної розвідки CMX-15D Wescam).

Наявність індексу D означає, що станція базової моделі оснащена лазерним цілевказівником для наведення високоточних боєприпасів із лазерними головками самонаведення.

Дрони Bayraktar можуть вражати цілі з висоти 8 км, перебуваючи поза межами досяжності багатьох застарілих або низьковисотних зенітно-ракетних комплексів (ЗРК). Wescam дає змогу розрізняти наземну техніку на відстані до 50 км, і здійснювати цілевказівку на відстані до 20 км.

РОЗДІЛ 2

СТРУКТУРНИЙ СИНТЕЗ СИСТЕМИ УПРАВЛІННЯ З ВИКОРИСТАННЯМ ФІЛЬТРА НЕПОВНОГО ПОРЯДКУ

2.1. Види спостерігачів в теорії управління

Спостерігачі в теорії управління використовуються для оцінки внутрішнього стану динамічної системи на основі вхідних і вихідних сигналів. Класифікувати спостерігачів можна за різними критеріями:

1. За повнотою інформації про стан системи:
 - Спостерігачі повного порядку
 - Спостерігачі неповного порядку (зменшеного)
2. За типом моделі системи:
 - Спостерігачі для лінійних систем
 - Спостерігачі для нелінійних систем
3. За способом реалізації:
 - Детерміновані спостерігачі (наприклад, спостерігач Люенбергера)
 - Стохастичні спостерігачі (фільтри Калмана)
4. За типом оцінювання стану:
 - Спостерігачі з оцінюванням поточного стану
 - Спостерігачі з прогнозуванням майбутнього стану

Кафедра АКСУ				ПОЯСНЮВАЛЬНА ЗАПИСКА			
Виконав	Мисенко А.С.			<i>Структурний синтез системи управління з використанням фільтра неповного порядку</i>		Аркуш	Аркушів
Керівник	Абрамович О.О.					28	60
					№ 151-403-СУ		
Н-контр.	Дивнич М.П.						
Зав.каф.	Мельник Ю.В.						

5. За спеціальними властивостями:

- Робастні спостерігачі (стійкі до збурень)
- Адаптивні спостерігачі (здатні підлаштовуватись під зміни в системі)

Спостерігачі, які часто використовуються:

Фільтр Калмана, відомий також як лінійно-квадратичне оцінювання - це алгоритм, що використовує послідовності вимірювань протягом часу, які містять шум (випадкові відхилення) та інші неточності, й видає оцінки невідомих змінних, що є потенційно точнішими за базовані на самих лише вимірюваннях. Він працює рекурсивно на потоках зашумлених вхідних даних, і видає статистично оптимальну оцінку базового стану системи.

Фільтр Калмана належить до класу рекурсивних фільтрів оптимальної оцінки і має дві основні частини:

- Рівняння прогнозу стану - використовується для прогнозування поточного стану системи на основі попередньої оцінки стану.
- Рівняння оновлення стану - коригує прогнозовану оцінку стану шляхом включення нового вимірювання з деяким коефіцієнтом підсилення.

Головною перевагою такого спостерігача є те, що він здатен оптимально оцінювати стан системи навіть за наявності шумів в моделі системи та вимірювальних даних.

Льюенбергерівський спостерігач, або фільтр Льюенбергера основна ідея якого полягає в побудові моделі динаміки системи за допомогою системи рівнянь у просторі станів. Ця модель використовується для оцінки поточного стану системи на основі доступних вимірювань входів та виходів.

Фільтр Льюенбергера має кілька переваг порівняно з іншими спостерігачами станів:

- Він не вимагає наявності шуму вимірювання чи збурень у моделі системи.
- Він забезпечує асимптотичну сходимость оцінки стану до фактичного стану за умови коректного проектування матриці спостерігача.
- На відміну від фільтра Калмана, він простіший в реалізації та обчисленнях.

2.2. Загальний принцип побудови оптимального детермінованого регулятора для неперервних систем у пакеті програм MATLAB

У цьому прикладі буде розглядатись поздовжній рух малого безпілотного літального апарата. Необхідно визначити його моделі динаміки у просторі станів. Вважається, що швидкість $V_t = 250$ км/год відповідає номінальній моделі. На вхід регулятора поздовжнього каналу надходять сигнали від датчиків висоти h , тангажу Θ і кутової швидкості за тангажем q , тобто вектор вимірюваних координат має вигляд $y = [h, \Theta, q]^T$. Вектор стану для поздовжнього каналу є таким: $x = [\alpha, \Theta, q, h, \delta e]$, Де α – це кут атаки літального апарата, а δe - це відхилення рулів висоти (елеронів) від нейтрального положення.

Тепер для заданого об'єкта будується оптимальний детермінований регулятор для неперервних систем у пакеті програм MATLAB.

1. Задаємо матриці для поздовжнього руху об'єкта у просторі станів $[A_0, B_0, C_0, D_0]$, причому C_0 – одинична матриця, а D_0 – нульова.

2. Виконавчий механізм (руль висоти) представлений передавальною функцією $W_{ac}(s) = 1/(T_a * s + 1)$. У просторі станів він описується четвіркою матриць $[A_{ac}, B_{ac}, C_{ac}, D_{ac}]$, які в цьому конкретному прикладі системи першого порядку вироджуються в скаляри: $A_{ac} = -1/T_a$, $B_{ac} = 1/T_a$, $C_{ac} = 1$, $D_{ac} = 0$ і $T_a = 0,5$ - стала часу виконавчого механізму.

В MATLAB моделі виконавчого механізму та БПЛА створюються командами:

```
sysac = ss(-1/Ta,1/Ta,1,0);
```

```
sysair = ss(A0,B0,C0,D0).
```

3. Синтез оптимального детермінованого регулятора здійснюється для послідовного з'єднання об'єкта і ВМ. Тому необхідно послідовно з'єднати ВМ і об'єкт (Рис.2.1) за допомогою оператора `series`:

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

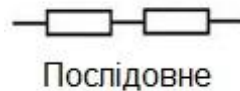


Рис.2.1 Послідовне з'єднання

4. Виділяються матриці простору станів отриманого з'єднання за допомогою оператора `ssdata` (оператор, зворотний оператору `ss`).

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

5. Розмірність системи збільшилася на один стан (параметр виконавчого механізму), тому нам необхідно розширити спостереження системи (доповнити матриці `C` і `D`).

```
Cse1 = [Cse; zeros(1,5) 1] ;
```

```
Dse1 = zeros(6,1);
```

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

6. Аналітичне конструювання оптимального регулятора здійснюється за допомогою оператора `lqr`. Для цього необхідно задати діагональні матриці вагових коефіцієнтів `Q` і `R`.

$$[F, P, E] = \text{lqr}(A_{se}, B_{se}, Q, R).$$

У результаті синтезу оптимального регулятора одержуємо F - коефіцієнти підсилення оптимального детермінованого регулятора, P - розв'язок рівняння Ріккати, E - власні числа замкненої системи.

7.Замикаємо об'єкт синтезованим регулятором (Рис. 2.2) за допомогою оператора *feedback*. У разі додатного зворотного зв'язку також необхідно ставити одиницю

```
clsys = feedback(sysser1,F,1));
```

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

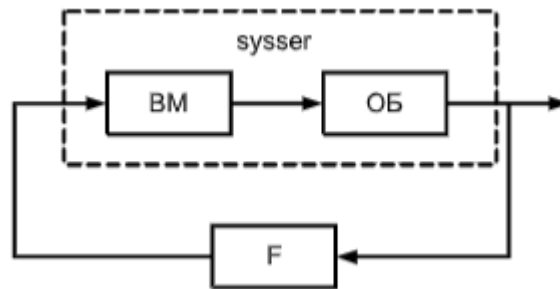


Рис. 2.2 Структурна схема замкненої системи

8. Для оцінювання якості системи визначаємо H_2 -норму системи:

```
[Acl,Bcl,Ccl,Dcl] = ssdata(clsys);
```

```
BB=Bcl * Bcl';
```

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

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


2.3. Спостерігачі повного та неповного порядку

Спостерігачі повного порядку (СПП) - системи або алгоритми, що можуть точно відновлювати стан динамічної системи на основі її вхідних та вихідних даних, а також можуть визначати повний вектор стану системи, навіть якщо безпосередньо всі компоненти цього стану не вимірюються. Такі спостерігачі мають порядок, що дорівнює порядку системи, яку вони оцінюють.

Спостерігачі часто використовуються для реалізації зворотного зв'язку, коли пряме вимірювання всіх станів системи є неможливим або не вигідним. Найвідомішим прикладом є **фільтр Калмана**, який є оптимальним спостерігачем для лінійних систем з Гауссівським шумом.

Гауссівським шум - статистичний шум, амплітуди якого розподілені згідно з нормальним (гаусівським) розподілом (Рис.2.3), тобто значення шуму підкоряються закону нормального розподілу з середнім значенням μ і стандартним відхиленням σ . Щільність ймовірності такого шуму описується функцією:

$$P(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma^2}} * \exp\left(-\frac{(x - \mu)^2}{2\sigma^2}\right)$$

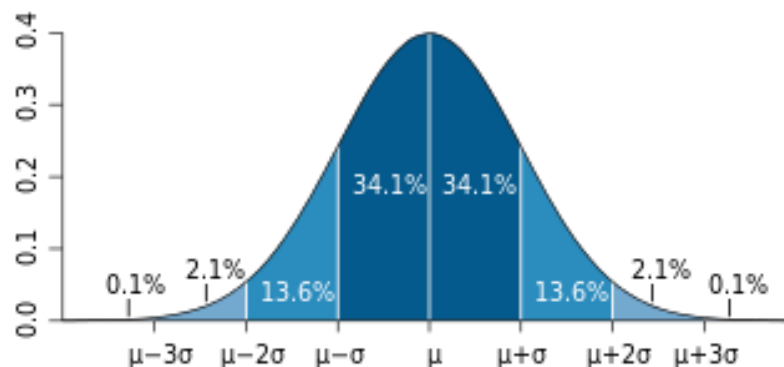


Рис.2.3 Нормальний (Гаусівський) розподіл

Розподіл із $\mu = 0$ і $\sigma^2 = 1$ називають стандартним нормальним розподілом.

Як приклад, нехай для системи $\dot{\hat{x}} = Ax + Bu$ можна виміряти тільки деяку лінійну комбінацію змінних стану, що позначається через $y = Cx$, причому величина $y \in l$ - вимірним вектором, де l менше розмірності n вектора стану x .

Виникає задача побудувати такий оператор F , що має визначити оцінку \hat{x} вектора стану x за вимірами компонент вектору y :

$$\hat{x} = F(y)$$

Цей оператор називають спостерігачем n -вимірного вектору стану x динамічної системи, що базується на вимірюванні l - вимірного вектору y ($l < n$). Після відновлення вектору можна застосовувати закони управління, описані вище, замінюючи реальний стан на відновлений.

Спостерігачем повного порядку називають модель динаміки об'єкта, що коригується сигналом помилки між реальною та спостережуваною системами. На вхід такої моделі подаються вхідні та вихідні сигнали спостережуваної системи, при цьому розмірність стану спостерігача відповідає розмірності стану системи. Якщо ж розмірність стану спостерігача менша розмірності системи, то такий спостерігач є спостерігачем пониженого порядку.

Розглянемо об'єкт, на який впливає шум w (вплив навколишнього середовища), а його вимірювання є неточними через обмежену точність вимірювальних приладів. Позначимо шум, спричинений неточністю вимірювання, як v . У такій ситуації виникає завдання відновлення стану об'єкта на основі наявних вимірів для подальшого управління ним.

Це завдання вирішується за допомогою створення спостерігача, який на виході надає повний вектор стану без шумів і похибок вимірювання.

Таким чином, вхідними величинами спостерігача є вхідна змінна системи u та спостережувана змінна стану системи y , а вихідною величиною є змінна \hat{x} . Диференціальне рівняння для вихідної змінної матиме такий вигляд:

$$\dot{\hat{x}} = A\hat{x} + Bu + K(y - C\hat{x})$$

Де $y - \hat{y} = y - C\hat{x}$ - сигнал похибки між виходами реального об'єкта та спостерігача.

З виразу, вказаного вище, випливає, що спостерігач повного порядку описується таким рівнянням у просторі станів:

$$\dot{\hat{x}} = (A - KC)\hat{x} + Bu + Ky$$

де K - матриця коефіцієнтів підсилення спостерігача.

Помилка відновлення стану визначається з рівняння:

$$e = x - \hat{x}$$

Рівняння динаміки помилки спостерігача:

$$\dot{e} = (A - KC)e$$

Синтез оптимального спостерігача передбачає визначення такої матриці коефіцієнтів підсилення K , при якій помилка відновлення стану буде мінімальною.

Для коректної роботи спостерігача, його матриця стану $(A - KC)$ повинна бути гурвіцевою, тобто матриця коефіцієнтів підсилення K має бути обраною таким чином, щоб власні числа матриці $(A - KC)$ знаходилися в лівій півплощині.

Спостерігач неповного порядку(СНП) - це тип спостерігача, який має нижчий порядок, ніж порядок системи, яку він оцінює, тобто він використовує менше змінних стану для оцінки стану системи, ніж спостерігач повного порядку.

Такий спостерігач оцінює лише ті компоненти вектора стану, які безпосередньо необхідні для реалізації зворотного зв'язку чи управління.

СНП нерідко простіший у реалізації ніж спостерігач повного порядку. Для прикладу якщо у вас є система третього порядку (з трьома змінними стану), то спостерігач повного порядку буде оцінювати всі три змінні стану, тоді як спостерігач неповного порядку може оцінювати лише одну або дві з цих змінних, залишаючи інші без змін.

Для прикладу, нехай об'єкт, який необхідно спостерігати, описується системою рівнянь:

$$\begin{cases} \dot{x} = Ax + Bu \\ y = Cx \end{cases}$$

Де розмірність стану x дорівнює n , а розмірність вимірювання змінної y дорівнює l . Відомо, що $l < n$. Оскільки рівняння вимірів $y = Cx$ дає l лінійних рівнянь для невідомого стану x , необхідно відновити тільки $(n - l)$ лінійних комбінацій компонентів стану.

Отже, на першому етапі задаємо матриці стану системи $[A,B,C,D]$, причому розмірність матриці C менша розмірності матриці A .

Матриця D є нульовою матрицею відповідної розмірності.

Введемо такий $(n - l)$ - вимірний вектор p

$$p = C'x$$

де C' - матриця змінних стану, які необхідно відновити зі співвідношень:

$$y = Cx$$

$$p = C'x$$

З вище вказаного випливає, що повний стан системи x описується виразом:

$$x = \begin{pmatrix} C \\ C' \end{pmatrix}^{-1} \begin{pmatrix} y \\ p \end{pmatrix}$$

Для зручності можна записати:

$$\begin{pmatrix} C \\ C' \end{pmatrix} = (L1, L2)$$

Тоді рівняння має вигляд:

$$x = L1y + L2p$$

Вектор p можна визначити, з огляду на те, що він задовольняє такому диференціальному рівнянню:

$$\dot{p} = C' Ax + C' Bu,$$

$$\text{або } \dot{p} = C' AL2p + C' AL1y + C' Bu$$

В цьому рівнянні y і u є вхідними змінними. Для того щоб знайти спостерігача для вектора p з характеристиками, що задовольняють умови стійкості, необхідно обрати полюси спостерігача в лівій півплощині на певній відстані від уявної осі. Проте, оскільки вимірювання вектора y не містять інформації про компоненти вектора p , оцінити вектор \hat{p} за допомогою вимірів y неможливо. Щоб уникнути цієї проблеми, введемо нову змінну q , яка залежатиме від \hat{p} наступним чином:

$$q = \hat{p} - Ky$$

де K – коефіцієнт підсилення спостерігача Люенбергера.

Використовуючи 2 попередніх рівняння визначимо, що q задовольняє диференціальному рівнянню:

$$\dot{q}(t) = [C'AL2 - KCAL2]q(t) + [C'AL2K + C'AL1 - KCAL1 - KCAL2K]y(t) + [C'B - KCB]u(t)$$

Тоді відновлений стан системи \hat{x} визначається через q за допомогою виразу:

$$\hat{x} = L2q + (L1 + L2K)y$$

Саме останні 2 рівняння описують спостерігач пониженого порядку.

Схему з'єднання об'єкта зі спостерігачем пониженого порядку подано на Рис.2.4

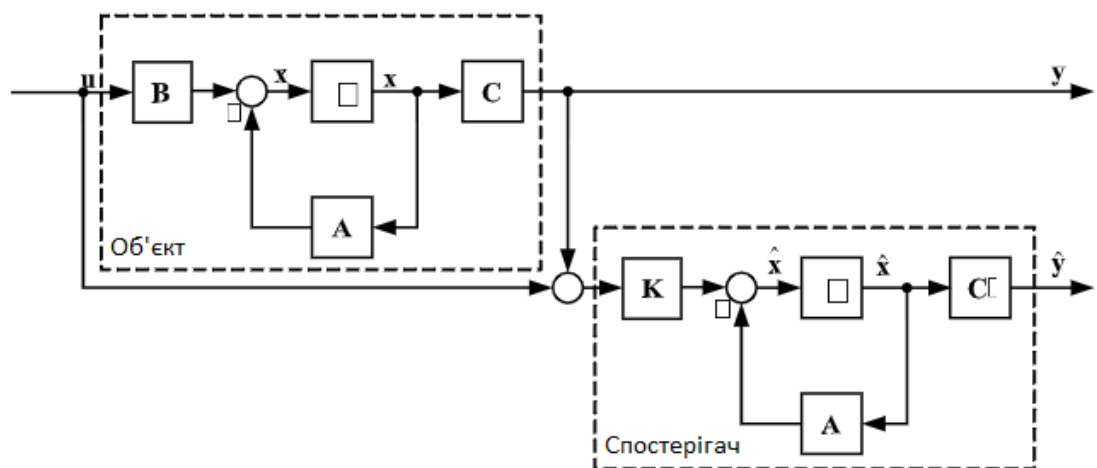


Рис.2.4 Схеми з'єднання об'єкта з спостерігачем неповного порядку

Матриці простору стану спостерігача A_{est} , B_{est} мають вигляд:

$$A_{est} = [C'AL2 - KCAL2]$$

$$B_{est} = [By Bu],$$

$$\text{Де } By = [C' AL2K + C' AL1 - K CAL1 - K CAL2K],$$

$$Bu = [C' B - KCB]$$

Отже, для синтезу спостерігача пониженого порядку на другому етапі необхідно задати матрицю C' у такий спосіб, щоб вона доповнювала матрицю вимірів C , а потім віднайти матриці $L1$ та $L2$.

2.4. Теорема розподілу

Теорема розподілу, відома також як центральна гранична теорема (ЦГТ) стверджує, що сума деякої кількості незалежних випадкових змінних, кожна з яких має однаковий розподіл із скінченною середньою та дисперсією, наближається до нормального (гаусівського) розподілу. Це працює незалежно від початкового розподілу змінних.

Іншими словами, отримано вибірку, в якій міститься велика кількість спостережень, кожне з яких було отримано випадковим чином і вони не повинні залежати від інших спостережень. На основі значень цих спостережень розраховують арифметичне середнє. Теорема розподілу говорить про те, що якщо цю процедуру повторити багато разів то що розраховані середні значення будуть мати нормальний розподіл.

Простим прикладом цього є багаторазове підкидання монети при яких імовірність випадіння заданої кількості гербів у всій послідовності подій буде наближатися до нормальної кривої, із середнім, що знаходитиметься по середині від загальної кількості випадань монети на кожную сторону (близько 50%).

Дисперсія - відхилення значень випадкової величини від центру розподілу

Для прикладу розглянемо задачу оптимального лінійного управління, коли спостереження системи є неповними і неточними, тобто коли виміряти повний вектор стану не можна, а доступні виміри містять шум. Крім того, передбачається, що на систему діють збурення, які змінюються випадково.

Розглянемо систему рівнянь:

$$\dot{x} = Ax + Bu + w$$

$$y = Cx + v$$

Де $w(t)$ - вектор білого шуму, що збуджує стан об'єкта, з коваріаційною матрицею Q та $v(t)$ – білий шум вимірів з коваріаційною матрицею R .

Задача стохастичного лінійного оптимального управління зі зворотним зв'язком за вихідною змінною є задачею відшукування такого оператора

$$u = f(y), \text{ при якому критерій}$$

$$J = M\left\{\int_0^{\infty} [\hat{x}^T R_1 \hat{x} + u^T R_2 u] dt\right\} \text{ досягає мінімуму.}$$

Тут R_1, R_2 - симетричні вагові матриці

Розв'язком цієї задачі є комбінація розв'язків задачі детермінованого оптимального управління і задачі оптимального стохастичного відновлення.

Цей результат відомий як **теорема розподілу**

Опишемо докладніше розв'язання задачі стохастичного лінійного управління зі зворотним зв'язком за вихідною змінною. Для вхідної змінної маємо закон управління:

$$u = -F_0 \hat{x}$$

Де F_0 - матриця оптимальних коефіцієнтів підсилення регулятора:

$$F_0 = \arg \min J(F) = R_2^{-1} B^T P^*$$

В даному рівнянні P^* - це розв'язок алгебричного рівняння Ріккати для регулятора

$$A^T P^* + P^* A - P^* B R_2^{-1} B^T P^* + Q_w = 0$$

Для закону управління вхідної змінної, \hat{x} отримано як розв'язок рівняння оптимального стохастичного спостерігача:

$$\dot{\hat{x}} = A \hat{x} + B u + K(y - C \hat{x})$$

Де K - матриця оптимальних коефіцієнтів підсилення спостерігача і розраховується за формулою:

$$K = Q_{ob} C^T R_v^{-1}$$

Коваріаційна матриця Q_{ob} є розв'язком алгебричного рівняння Ріккати для спостерігача:

$$0 = A Q_{ob} + Q_{ob} A^T + Q_w - Q_{ob} C^T R_v^{-1} C Q_{ob}$$

Підставивши вираз для закону управління у рівняння спостерігача одержимо рівняння регулятора у вигляді

$$\begin{aligned} \dot{\hat{x}} &= (A - B F_0 - K C) \hat{x} + K y \\ u &= -F_0 \hat{x} \end{aligned}$$

Замкнена система, одержана в результаті з'єднання об'єкта з регулятором, являє собою лінійну систему розмірності $2n$, де n - розмірність стану x , яку можна описати рівнянням:

$$\begin{pmatrix} \dot{x} \\ \dot{\hat{x}} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} A & -B F_0 \\ K C & A - B F_0 - K C \end{pmatrix} \begin{pmatrix} x \\ \hat{x} \end{pmatrix}$$

Саме так, відповідно до теореми розподілу, на **першому етапі** створюється оптимальний стохастичний спостерігач. Вхідними даними для цього процесу є збурений (розширений) об'єкт і матриці коваріацій шумів. У результаті отримуємо модель спостерігача в просторі станів.

На **другому етапі** відбувається синтез оптимального детермінованого регулятора. Вхідними даними для цього синтезу є матриця стану розширеного об'єкта, частина матриці управління (обираються тільки ті стовпці, що відповідають керованим входам), а також матриці вагових коефіцієнтів. У результаті отримуємо коефіцієнти підсилення регулятора.

Для отримання спрощеного регулятора на **третьому етапі** поєднуємо спостерігач з регулятором.

РОЗДІЛ 3
ЗАСТОСУВАННЯ МЕТОДУ СТРУКТУРНОГО СИНТЕЗУ СИСТЕМИ
УПРАВЛІННЯ З ВИКОРИСТАННЯМ ФІЛЬТРА НЕПОВНОГО
ПОРЯДКУ

3.1. Відновлення вектора стану системи при неповних вимірах за допомогою спостерігача неповного порядку (фільтра Люенбергера)

Блок камер Ваурактар ТВ2 наведено на Рисунку 3.1.



Рис. 3.1.1 – Блок камер БПЛА Ваурактар ТВ2

Для керування таким блоком по вертикалі і горизонталі використовується електродвигун постійного струму.

Передавальна функція електродвигуна, який використовується в Ваурактар ТВ 2 має наступний вигляд:

Кафедра АКСУ				ПОЯСНЮВАЛЬНА ЗАПИСКА			
Виконав	Мисенко А.С.			<i>Застосування методу структурного синтезу системи управління з використанням фільтра неповного порядку</i>		Аркуш	Аркушів
Керівник	Абрамович О.О.					43	60
					№ 151-403-СУ		
Н-контр.	Дивнич М.П.						
Зав.каф.	Мельник Ю.В.						

$$W = \frac{1.49}{0.1s^3 + 0.24s^2 + s}$$

Передавальна функція являє собою диференціальний оператор, який виражає зв'язок(залежність) між входом та виходом системи. Знаючи вхідний сигнал та передавальну функцію, можна обчислити вихідний сигнал системи.

Дискретна передавальна функція є співвідношенням між z-перетвореннями (перетвореннями Лорана) вихідного та вхідного сигналів лінійної дискретної системи за нульових початкових умов.

Z-перетворення є способом представлення дискретного сигналу, заданого послідовністю дійсних чисел у часовій області, у вигляді аналітичної функції комплексної частоти. Воно є аналогом перетворення Лапласа для безперервних систем.

За допомогою програмного пакету MATLAB (R2014a) задаємо передавальну функцію та знаходимо до неї дискретну передавальну функцію шляхом z-перетворення(Рис. 3.1.2):

```
>> w=tf([1.49],[0.1 0.24 1 0])
wz=c2d(w,0.1)

w =

          1.49
-----
0.1 s^3 + 0.24 s^2 + s

Continuous-time transfer function.

wz =

0.00233 z^2 + 0.008741 z + 0.002066
-----
z^3 - 2.698 z^2 + 2.485 z - 0.7866
```

Рис. 3.1.2 z-перетворення в пакеті MATLAB

Далі виконуємо перехід в простір станів для отриманої дискретної передавальної функції для отримання матриць(Рис. 3.1.3):

```
>> SSz=ss(wz)

SSz =

a =

      x1      x2      x3
x1  2.698  -1.243  0.7866
x2      2      0      0
x3      0      0.5      0

b =

      u1
x1  0.125
x2      0
x3      0

c =

      x1      x2      x3
y1  0.01864  0.03496  0.01653

d =

      u1
y1      0
```

Рис. 3.1.3 Матриці простору станів

Після отримання матриць запишемо їх у програму:

```
A0=[2.698 -1.243 0.7866;2 0 0;0 0.5 0];
```

```
B0=[0.125;0;0];
```

```
C0=[0.01864 0.03496 0.01653];
```

```
D0=[0];
```

Тепер в просторі стану треба задати четвірку матриць виконавчого механізму і зробити послідовне з'єднання виконавчого механізму та об'єкту.

Після цього ми зможемо отримати четвірку матриць з'єднання (Рис. 3.1.4):

```
>> Ta=0.5;
sysac=ss(-1/Ta,1/Ta,1,0);
sysai=ss(A0,B0,C0,D0);
sysser=series(sysac, sysai);
[Ase,Bse,Cse,Dse]=ssdata(sysser)

Ase =

    2.6980   -1.2430    0.7866    0.1250
    2.0000         0         0         0
         0    0.5000         0         0
         0         0         0   -2.0000

Bse =

    0
    0
    0
    2

Cse =

    0.0186    0.0350    0.0165         0

Dse =

    0
```

Рис. 3.1.4 Матриці отриманого з'єднання

Для синтезу спостерігача пониженого порядку задаємо матрицю C' (Csh), так щоб матриця C мала повний ранг. Також необхідно задати вектор P_k бажаних власних чисел спостерігача(Рис. 3.1.5):

```
>> Csh=[1 0 0 0 ; 0 1 0 0 ;0 0 0 1];
C=[Cse;Csh]
L=inv(C);
L1=L(:,1);
L2=L(:,2:4);
Ak=Csh*Ase*L1;
Bk=Cse*Ase*L2;
Aksht=(Csh*Ase*L2)';
Bksht=(Cse*Ase*L2)';
Pk=[-3.39 -1.0254 -0.1]
```

C =

0.0186	0.0350	0.0165	0
1.0000	0	0	0
0	1.0000	0	0
0	0	0	1.0000

Pk =

-3.3900	-1.0254	-0.1000
---------	---------	---------

Рис. 3.1.5 Вектор P_k бажаних власних чисел

4. За допомогою оператора `place` знаходимо коефіцієнти підсилення K такі, щоб власні числа синтезуемого спостерігача дорівнювали P_k (Рис. 3.1.6):

```
>> Kksht=place(Aksht,Bksht,Pk);
K=Kksht'
```

K =

52.0765
1.9291
-422.3866

Рис. 3.1.6 Коефіцієнти підсилення K

Знаходимо матриці простору стану спостерігача [Aest,,Best,Cest,Dest]

(Рис. 3.1.7):

```
>> Aest=[(Csh*Ase*L2-K*Cse*Ase*L2)];  
By=(Csh*Ase*L2*K+Csh*Ase*L1-K*Cse*Ase*L1-K*Cse*Ase*L2*K);  
Bu=(Csh*Bse-K*Cse*Bse);  
Best=[By Bu];  
Cest=L2([1:2 4],:);  
D1=(L1+L2*K);  
D2=D1([1:2 4],:);  
Dest=[D2 zeros(3,1)];  
est=ss(Aest,Best,Cest,Dest)
```

est =

A =

	x1	x2	x3
x1	-3.588	-0.5156	0.003662
x2	1.8	0.08858	-0.004495
x3	43.79	-19.39	-1.016

B =

	u1	u2
x1	-188	0
x2	94.1	0
x3	3047	2

C =

	x1	x2	x3
y1	1	0	0
y2	0	1	0
y3	0	0	1

D =

	u1	u2
y1	52.08	0
y2	1.929	0
y3	-422.4	0

Рис. 3.1.7 Матриці простору стану спостерігача

На спостерігач подаються змінні із виходу об'єкта, що вимірюються, а також управління, що подається і на об'єкт. Це складне з'єднання задається за допомогою оператора *connect*. Спочатку за допомогою паралельного з'єднання подаємо управління на спостерігач та на об'єкт. За допомогою матриці Q вказуємо на які входи системи(перший стовпчик) які виходи (другий стовпчик) ми подаємо. Також необхідно вказати, які входи будуть входами системи (*inputs*=[2] – вхід управління), та які виходи будуть виходами системи (*outputs*=[1 2 3]) (Рис.3.1.8).

```
>> syspar=parallel(est,sysai,1,1,[],[]);
Q=[1 3;2 4];
inputs=[2];
outputs=[1 2 3];
sysest=connect(syspar,Q,inputs,outputs);
[Asf,Bsf,Csf,Dsf]=ssdata(sysest)
```

Asf =

-3.5881	-0.5156	0.0037	-3.5044	-6.5726	-3.1077
1.8000	0.0886	-0.0045	1.7539	3.2896	1.5554
43.7917	-19.3936	0.9842	41.0466	76.9844	36.4002
0	0	0	2.7003	-1.2386	0.7887
0	0	0	2.0000	0	0
0	0	0	0	0.5000	0

Bsf =

```
1.0e+03 *
-0.1880
0.0941
2.2021
0.0001
0
0
```

Csf =

1.0000	0	0	0.9707	1.8206	0.8608
0	1.0000	0	0.0360	0.0674	0.0319
0	0	1.0000	-7.8733	-14.7666	-6.9821

Dsf =

```
52.0765
1.9291
-422.3866
```

Рис.3.1.8 Матриці простору стану з'єднаної системи

Коли відновлено повний вектор стану, можна приміняти закони синтезу оптимального детермінованого регулятора(Рис.3.1.9).

```
>> R1=[1 4 8 25];
R1=diag(R1);
R2=1;
[P,S,E]=lqr(Ase,Bse,R1,R2)

P =

    278.4904   -23.5662    81.2838    6.7982

S =

    1.0e+04 *

    1.4557   -0.0248    0.4195    0.0139
   -0.0248    0.5052   -0.0065   -0.0012
    0.4195   -0.0065    0.6987    0.0041
    0.0139   -0.0012    0.0041    0.0003

E =

   -0.8620 + 0.2565i
   -0.8620 - 0.2565i
   -0.9763 + 0.0000i
  -10.1980 + 0.0000i
```

Рис.3.1.9 Закони синтезу оптимального детермінованого регулятора

Замикаємо систему з відновленим станом синтезованим детермінованим регулятором(Рис.3.1.10).

```
>> sysest=ss(Asf,Bsf,[Csf;zeros(1,6)],[Dsf;0]);
cl=feedback(sysest,P);
[Acl,Bcl,Ccl,Dcl]=ssdata(cl)

Acl =

   -6.2225   -0.2926   -0.7652    0.0002    0.0003    0.0002
    3.1185   -0.0230    0.3803   -0.0001   -0.0002   -0.0001
   74.6476  -22.0046    9.9901   -0.0021   -0.0039   -0.0018
    0.0018   -0.0001    0.0005    2.6980   -1.2430    0.7866
         0         0         0    2.0000         0         0
         0         0         0         0    0.5000         0
```

```

Bc1 =
    0.0095
   -0.0047
   -0.1108
   -0.0000
         0
         0

Cc1 =
    1.7297   -0.0617    0.2130   -0.0000   -0.0001   -0.0000
    0.0270    0.9977    0.0079   -0.0000   -0.0000   -0.0000
   -5.9186    0.5008   -0.7275    0.0004    0.0007    0.0004
         0         0         0         0         0         0

Dc1 =
   -0.0026
   -0.0001
    0.0213
         0

```

Рис.3.1.10 Замкнена система з регулятором

Якість синтезованої системи оцінюємо за допомогою H_2 – норми(Рис.3.1.11).

```

>> BB=Bc1 * Bc1';
G=lyap(Ac1,BB);
H2=trace(Cc1*G*Cc1')

H2 =

    3.6243e-04

```

Рис.3.1.11 H_2 – норма

3.2. Оптимальний лінійний стохастичний регулятор при неповних вимірах. Теорема розділення

1. В просторі стану задаємо четвірку матриць об'єкта, а також задаємо матрицю Bg_0 для входу збурень (Рис.3.2.1):

```
>> A0=[2.698 -1.243 0.7866;2 0 0;0 0.5 0];  
B0=[0.125;0;0];  
Bg0=[2.698 -1.243 0.7866;2 0 0]';  
C0=[0.01864 0.03496 0.01653];  
D0=[0];
```

Рис.3.2.1 Матриці в просторі стану

2. В просторі стану задаємо четвірку матриць виконавчого механізму. Робимо послідовне з'єднання виконавчого механізму та об'єкта. Отримуємо четвірку матриць з'єднання (Рис.3.2.2):

```
>> Ta=0.5;  
sysac=ss(-1/Ta,1/Ta,1,0);  
sysai=ss(A0,B0,C0,D0);  
sysh2=series(sysac,sysai)  
  
sysh2 =  
  
A =  
  
      x1      x2      x3      x4  
x1  2.698  -1.243  0.7866  0.125  
x2      2      0      0      0  
x3      0      0.5      0      0  
x4      0      0      0      -2  
  
B =  
  
      u1  
x1  0  
x2  0  
x3  0  
x4  2
```

```

C =
      x1      x2      x3      x4
y1  0.01864  0.03496  0.01653  0

D =
      u1
y1  0

```

Рис.3.2.2 Матриці з'єднання виконавчого механізму та об'єкту

3.Задаємо четвірку матриць формуючого фільтру(по моделі Драйдена)(Рис.3.2.3):

```

>> ag=[-0.12 0 0; 0 0 1; 0 -0.0143 -0.2394];
bg=[0.5522 0; 0 0; 0 1];
cg=[1 0 0; 0 6.7e-4 0.0097; 0 1.39e-4 1.65e-3];
dg=[0 0; 0 0; 0 -0.0097];
formsys=ss(ag,bg,cg,dg)

formsys =

A =
      x1      x2      x3
x1  -0.12      0      0
x2      0      0      1
x3      0 -0.0143 -0.2394

B =
      u1      u2
x1  0.5522      0
x2      0      0
x3      0      1

C =
      x1      x2      x3
y1      1      0      0
y2      0  0.00067  0.0097
y3      0  0.000139  0.00165

D =
      u1      u2
y1      0      0
y2      0      0
y3      0 -0.0097

```

Рис.3.2.3 Четвірка матриць формуючого фільтру

4. Включаємо формуючий фільтр в структуру об'єкта(Рис.3.2.4):

```
>> Dex=zeros(1,3);
Bex=[B0,Bg0];
aircex=ss(A0,Bex,C0,Dex);
stsys=series(formsys,aircex);
[Ast,Bst,Cst,Dst]=ssdata(stsys)

Ast =

    2.6980    -1.2430     0.7866     0.1250     0.0021     0.0295
    2.0000         0         0         0    -0.0008    -0.0121
         0     0.5000         0         0     0.0005     0.0076
         0         0         0    -0.1200         0         0
         0         0         0         0         0     1.0000
         0         0         0         0    -0.0143    -0.2394

Bst =

         0    -0.0194
         0         0
         0         0
    0.5522         0
         0         0
         0     1.0000

Cst =

    0.0186    0.0350    0.0165         0         0         0

Dst =

         0         0
```

Рис.3.2.4 Додавання формуючого фільтру в структуру об'єкта

5. Синтез фільтру Калмана(Рис.3.2.5):

```
>> V1=eye(2);
V=[0.25];
V2=diag(V);
[kest,l,p]=kalman(stsys,V1,V2);
[Aest,Best,Cest,Dest]=ssdata(kest)
```

Aest =

0.2669	-5.8026	-1.3693	0.1250	0.0021	0.0295
0.4778	-2.8549	-1.3499	0	-0.0008	-0.0121
-0.1241	0.2673	-0.1100	0	0.0005	0.0076
-0.0003	-0.0005	-0.0002	-0.1200	0	0
-0.0016	-0.0030	-0.0014	0	0	1.0000
-0.0002	-0.0003	-0.0001	0	-0.0143	-0.2394

Best =

130.4239
81.6633
6.6564
0.0142
0.0861
0.0089

Cest =

0.0186	0.0350	0.0165	0	0	0
1.0000	0	0	0	0	0
0	1.0000	0	0	0	0
0	0	1.0000	0	0	0
0	0	0	1.0000	0	0
0	0	0	0	1.0000	0
0	0	0	0	0	1.0000

Dest =

0
0
0
0
0
0
0

Рис.3.2.5 Синтез фільтру Калмана

6. Після того, як стан системи відновлено, приміняємо закони синтезу оптимального детермінованого регулятора(Рис.3.2.6):

```

>> R1=[0.1 0.1 1.5 0.01 1 0.1];
R1=diag(R1);
R2=0.1;
[K,S,E]=lqr(Ast,Bst(:,1),R1,R2)

K =

    237.5379   -85.2001    69.8664    10.1600     0.1786     2.5599

S =

    1.0e+03 *

    1.2904   -0.3302     0.3093     0.0430     0.0007     0.0095
   -0.3302     0.1581    -0.0950    -0.0154    -0.0003    -0.0038
    0.3093    -0.0950     0.0979     0.0127     0.0002     0.0034
    0.0430    -0.0154     0.0127     0.0018     0.0000     0.0005
    0.0007    -0.0003     0.0002     0.0000     0.0105     0.0350
    0.0095    -0.0038     0.0034     0.0005     0.0350     0.1464

E =

   -0.1144 + 0.0000i
   -0.1250 + 0.0000i
   -0.5627 + 0.1354i
   -0.5627 - 0.1354i
   -0.9534 + 0.1771i
   -0.9534 - 0.1771i

```

Рис.3.2.6 Синтез оптимального детермінованого регулятора

7. Поєднання оптимального стохастичного спостерігача (фільтра Калмана) та оптимального детермінованого регулятора здійснюється за допомогою оператора `lqgreg`(Рис.3.2.7):

```

>> F=lqgreg(kest,K);
[Ar,Br,Cr,Dr]=ssdata(F);
Br1=[1 0 0 0 0 0]';
F1=ss(Ar,Br1,Cr,Dr)

```


F1 =

A =

	x1	x2	x3	x4	x5	x6
x1	-3.098e+04	1.111e+04	-9114	-1325	-23.3	-333.8
x2	-1.94e+04	6955	-5707	-829.7	-14.59	-209.1
x3	-1581	567.4	-465.2	-67.63	-1.189	-17.03
x4	-3.376	1.21	-0.9933	-0.2644	-0.002539	-0.03639
x5	-20.45	7.332	-6.016	-0.8747	-0.01538	0.7796
x6	-2.119	0.7596	-0.6233	-0.09062	-0.01589	-0.2622

B =

	u1
x1	1
x2	0
x3	0
x4	0
x5	0
x6	0

C =

	x1	x2	x3	x4	x5	x6
y1	-237.5	85.2	-69.87	-10.16	-0.1786	-2.56

D =

	u1
y1	0

Рис.3.2.7 Поеднання фільтра Калмана та оптимального детермінованого регулятора

8. Замикаємо об'єкт регулятором, подаючи управління на вхід 1, а на регулятор подаємо 1 вихід об'єкта. Так як мінус зворотного зв'язку враховується при з'єднанні спостерігача з детермінованим регулятором, ми замикаємо систему додатнім зворотнім зв'язком (Рис.3.2.8):

```
>> cl=feedback(stsys,F1,1,1,1);
[Acl,Bcl,Ccl,Dcl]=ssdata(cl)
```

Acl =

1.0e+04 *

```
0.0003 -0.0001 0.0001 0.0000 0.0000 0.0000 0 0 0 0 0 0
0.0002 0 0 0 -0.0000 -0.0000 0 0 0 0 0 0
0 0.0001 0 0 0.0000 0.0000 0 0 0 0 0 0
0 0 0 -0.0000 0 0 -0.0131 0.0047 -0.0039 -0.0006 -0.0000 -0.0001
0 0 0 0 0 0.0001 0 0 0 0 0 0
0 0 0 0 -0.0000 -0.0000 0 0 0 0 0 0
0.0000 0.0000 0.0000 0 0 0 -3.0980 1.1106 -0.9114 -0.1325 -0.0023 -0.0334
0 0 0 0 0 0 -1.9398 0.6955 -0.5707 -0.0830 -0.0015 -0.0209
0 0 0 0 0 0 -0.1581 0.0567 -0.0465 -0.0068 -0.0001 -0.0017
0 0 0 0 0 0 -0.0003 0.0001 -0.0001 -0.0000 -0.0000 -0.0000
0 0 0 0 0 0 -0.0020 0.0007 -0.0006 -0.0001 -0.0000 0.0001
0 0 0 0 0 0 -0.0002 0.0001 -0.0001 -0.0000 -0.0000 -0.0000
```

Bcl =

```
0 -0.0194
0 0
0 0
0.5522 0
0 0
0 1.0000
0 0
0 0
0 0
0 0
0 0
0 0
```

Ccl =

```
0.0186 0.0350 0.0165 0 0 0 0 0 0 0 0 0
```

Dcl =

```
0 0
```

Рис.3.2.8 Об'єкт, замкнутий регулятором

9. Розрахунок H2-норми системи(Рис.3.2.9):

```
>> BB=Bcl * Bcl';
G=lyap(Acl,BB);
H2=trace(Ccl*G*Ccl')
```

H2 =

9.7607e-06

Рис.3.2.9 H2-норма системи

ВИСНОВКИ

У кваліфікаційній роботі завершено структурний синтез системи управління з використанням фільтра неповного порядку. Початковими даними для синтезу є матриці простору станів об'єкта.

Для вирішення проблеми структурного проектування системи управління БПЛА на першому етапі був розроблений синтез спостерігача пониженого порядку (фільтр Люенбергера) і знайдено його матриці простору стану. Відновлено повний вектор стану, використані закони синтезу оптимального детермінованого регулятора. Замкнув систему з відновленим станом синтезованим детермінованим регулятором і якість синтезованої системи оцінив за допомогою H_2 -норми в пакеті програм MATLAB.

На другому етапі роботи відновив вектор стану системи при стохастичних збуреннях та неповних вимірах, використовувати теорему розділення. Спершу задав четвірку матриць формуючого фільтру (по моделі Драйдена) і включив його в структуру об'єкта. Синтезував фільтр Калмана і після того, як стан системи відновлено, примінив закони синтезу оптимального детермінованого регулятора. Поєднав оптимальний стохастичний спостерігач (фільтра Калмана) та оптимальний детермінований регулятор і замкнув об'єкт регулятором, подаючи управління на вхід 1, а на регулятор подав вихід 1 об'єкта. Якість системи оцінив за допомогою H_2 -норми в пакеті програм MATLAB.

СПИСОК БІБЛІОГРАФІЧНИХ ПОСИЛАНЬ ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Reg Austin, Unmanned Aircraft Systems: UAVS Design, Development and Deployment, 2010, p.332
2. Paul G. Fahlstrom and Thomas J. Gleason, Introduction to UAV Systems, 2012, p.312
3. Офіційний сайт Baykar Makina (виробник Bayraktar TB2) [Електронний ресурс] // – Режим доступу : <https://www.baykartech.com/en/>
4. Rogelio Lozano, Unmanned Aerial Vehicles: Embedded Control, 2010, p.352
5. Richard C. Dorf and Robert H. Bishop, Modern Control Systems, 2008, p. 1018
6. H. González-Jorge, J. Martínez-Sánchez, and M. Bueno, Unmanned aerial systems for civil applications: A review, 2017, vol.1, p. 2
7. Галагуз Т. А., Тимошенко Н. А., Гарбар І. П. Порівняльна характеристика систем керування, що містять у структурі спостерігачі Люенбергера та Калмана. – Електроніка та системи керування, № 1, 2005, ст. 40 – 45.
8. Dr. Maziar Arjomandi, “CLASSIFICATION OF UNMANNED AERIAL VEHICLES” A review, 2019.
9. Туник А.А., Абрамович Е.А., Галагуз Т.А., Сюй Гуо-Дун. Современные методы синтеза робастных систем управления полётом беспилотных летательных аппаратов. – Інформаційні технології та комп’ютерна інженерія. Міжнародний науково-технічний журнал, №3, 2005, ст. 134-140.
10. Bento M. Unmanned aerial vehicles: An overview [Електронний ресурс] / Maria Bento // Inside GNSS. – 2008.