

**НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ УКРАЇНИ
«КИЇВСЬКИЙ ПОЛІТЕХНІЧНИЙ ІНСТИТУТ
імені ІГОРЯ СІКОРСЬКОГО»
ФАКУЛЬТЕТ ІНФОРМАТИКИ І ОБЧИСЛЮВАЛЬНОЇ ТЕХНІКИ
Кафедра Інформаційних систем та технологій**

«На правах рукопису»
УДК 623.74, 62-52

До захисту допущено:
Завідувач кафедри
_____ Олександр РОЛІК
«__» _____ 20__ р.

**Магістерська дисертація
на здобуття ступеня магістра
за освітньо-науковою програмою «Інтегровані інформаційні системи»
зі спеціальності 126 «Інформаційні системи та технології»
на тему: «Система визначення значень параметрів руху об'єктів за
допомогою безпілотних літальних апаратів»**

Виконав:

студент VI курсу, групи ІА-01мн
Облаухов Владислав Юрійович _____

Керівник:

Доцент кафедри ІСТ, к.т.н., доцент
Репнікова Наталія Борисівна _____

Рецензент:

Комерційний директор ТОВ НВП «Мадек», к.т.н.,
Коломейко Дмитро Анатолійович _____

Засвідчую, що у цій магістерській
дисертації немає запозичень з праць
інших авторів без відповідних
посилань.

Студент (-ка) _____

Київ – 2022 року

Національний технічний університет України
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»
ФАКУЛЬТЕТ ІНФОРМАТИКИ І ОБЧИСЛЮВАЛЬНОЇ ТЕХНІКИ
Кафедра Інформаційних систем та технологій

Рівень вищої освіти – другий (магістерський)

Спеціальність – **126 «Інформаційні системи та технології»**

Освітньо-наукова програма **«Інтегровані інформаційні системи»**

ЗАТВЕРДЖУЮ

Завідувач кафедри

_____ Олександр РОЛІК

«__» _____ 20__ р.

ЗАВДАННЯ
на магістерську дисертацію студенту
Облаухову Владиславу Юрійовичу

1. Тема дисертації «Система визначення значень параметрів руху об'єктів за допомогою безпілотних літальних апаратів», науковий керівник дисертації Репнікова Наталія Борисівна, к.т.н., доцент, затверджені наказом по університету НС/88/2022 від 26.04.2022.
2. Термін подання студентом дисертації 08.06.2022.
3. Об'єкт дослідження безпілотний літальний апарат (БПЛА).
4. Предмет дослідження система визначення значень параметрів руху об'єктів за допомогою безпілотних літальних апаратів.
5. Перелік завдань, які потрібно розробити: аналіз сучасних питань використання БПЛА, методи визначення координат цілей з БПЛА, розроблення аналітичної моделі визначення координат цілей для нерухомого і рухомого стану з БПЛА, розроблення цифрової моделі керування двигуном, який повертає камеру в БПЛА.
6. Орієнтовний перелік графічного (ілюстративного) матеріалу: характеристики сучасних видів БПЛА, графічні (не рухомої та рухомої) моделі відстеження цілі за допомогою БПЛА, векторно-матричні моделі регулюючих пристроїв цифрової системи в пакеті Matlab/Simulink (3 досліджуваних методи), графіки перехідних процесів, таблиця порівняння розроблених регулюючих пристроїв.

7. Орієнтовний перелік публікацій: Облаухов В. Ю., Репнікова Н. Б. Система визначення параметрів руху об'єктів за допомогою безпілотників // Міжнародний науковий журнал "Інтернаука". — 2022. — №4

8. Дата видачі завдання 31.01.22.

Календарний план

№ з/п	Назва етапів виконання магістерської дисертації	Термін виконання етапів магістерської дисертації	Примітка
1	Огляд предметної області видів БПЛА	10.02.2022	
2	Огляд існуючих рішень відстеження цілей	21.02.2022	
3	Розроблення концепції нового методу відстеження	11.03.2022	
4	Рішення прикладу задачі за розробленим методом	20.03.2022	
5	Публікація статті	01.04.2022	
6	Розроблення математичної моделі системи керування поворотом камери та аналіз якості вхідної системи	15.04.2022	
7	Розроблення регулюючих пристроїв різними методами та аналіз якості врегульованих моделей систем керування	01.05.2022	
8	Оформлення роботи	25.05.2022	

Студент

Владислав ОБЛАУХОВ

Науковий керівник

Наталія РЕПНІКОВА

РЕФЕРАТ

Магістерська дисертація: 112 с., 56 рис., 5 табл., 2 додатки, 25 джерел.

Мета: підвищення точності визначення параметрів руху об'єктів за допомогою безпілотних літальних апаратів.

Об'єкт дослідження: безпілотний літальний апарат (БПЛА).

Предмет дослідження: система визначення значень параметрів руху об'єктів за допомогою безпілотних літальних апаратів.

Методи наукових досліджень – метод Гауса, метод простору станів, моделювання, експеримент.

Результати. Розглядається проблема пасивного визначення координат швидкості та напрямків рухомих об'єктів. Проведено аналіз видів існуючих БПЛА та проблеми розвідки з їх допомогою. Пропонується використання двох безпілотних літальних апаратів з тепловізійними камерами.

Розроблено метод обчислення параметрів руху цілей з використанням геометричної моделі та канонічних рівнянь прямої. Наводяться приклади рішення задачі.

Для підвищення точності визначення параметрів руху об'єктів запропоновано декілька методів синтезу регуляторів для керування швидкості повороту камери в БПЛА.

Всі експериментальні дослідження проводились шляхом моделювання систем в прикладному пакеті MatLab/Simulink 2018a.

Наукова новизна отриманих результатів. Основний науковий результат дисертації полягає в створенні нового методу пасивної розвідки за допомогою БПЛА, який забезпечує точне визначення параметрів руху цілей і їх координат.

Рекомендації щодо використання результатів роботи. Результати даної роботи рекомендується застосовувати для розвідки за допомогою БПЛА.

Ключові слова: БПЛА, РОЗВІДКА, ПАСИВНІ МЕТОДИ ВИЗНАЧЕННЯ КООРДИНАТ І ВІДСТАНІ, РЕГУЛЮЮЧИЙ ПРИСТРІЙ, МОДЕЛЬ ПРОСТОРУ СТАНІВ, МОДЕЛІ MATLAB.

ABSTRACT

Master's dissertation: 112 p., 56 fig., 5 tables, 2 additions, 25 sources.

Objective: To increase the accuracy of determining the movement parameters of objects using unmanned aerial vehicles (Drones).

Object of research: unmanned aerial vehicle (UAV).

Subject of research: a system for determining the parameters of the movement of objects using unmanned aerial vehicles.

Research methods - Gaussian method, state space method, modeling, experiment.

Results. The problem of passive determination of speed, coordinates and directions of moving objects is considered. The analysis of types of existing UAVs and problems of reconnaissance with their help is carried out. It is proposed to use two unmanned aerial vehicles with thermal imaging cameras.

A method for calculating the parameters of the movement of targets using a geometric model and canonical equations of the line. Examples of solving the problem are given.

To increase the accuracy of determining the parameters of the movement of objects, several methods of synthesis of regulators for controlling the speed of rotation of the camera in the UAV have been proposed.

All experimental studies were conducted by modeling systems in the MatLab / Simulink 2018a package.

Scientific novelty of the obtained results. The main scientific result of the dissertation is to create a new method of passive reconnaissance using UAVs, which provides accurate determination of the parameters of movement of targets and their coordinates.

The results of this work are recommended for reconnaissance with drones.

Key words: DRONES, RECONNAISSANCE, PASSIVE METHODS FOR DETERMINATION OF COORDINATES AND DISTANCES, CONTROL DEVICE, STATE SPACE MODEL, MATLAB MODELS.

ЗМІСТ

ПЕРЕЛІК СКОРОЧЕНЬ	8
ВСТУП	9
1 АНАЛІЗ СУЧАСНИХ ПИТАНЬ ВИКОРИСТАННЯ БПЛА.....	11
1.1 Види БПЛА.....	11
1.2 Застосування БПЛА в ЗСУ	15
1.3 Задачі та проблеми розвідки за допомогою БПЛА	21
2 МЕТОДИ ВИЗНАЧЕННЯ КООРДИНАТ ЦІЛЕЙ З БПЛА	24
2.1 Визначення координат цілі активними методами	24
2.2 Визначення координат цілі пасивними методами.....	27
2.3 Використання теплової камери для пасивного визначення напрямку на ціль.....	31
2.4 Висновки до розділу	33
3 АНАЛІТИЧНА МОДЕЛЬ ВИЗНАЧЕННЯ ПАРАМЕТРІВ РУХУ ЦІЛІ.....	34
3.1 Стеження за нерухомою ціллю.....	34
3.1.1 Постановка задачі 1.....	34
3.1.2 Теоретичне обґрунтування.	35
3.1.3 Приклад рішення задачі 1	40
3.2 Стеження за рухомою ціллю	45
3.2.1 Постановка задачі 2.....	45
3.2.2 Рішення задачі 2	47
3.3 Підсумки розробленого методу.....	54

4 РОЗРОБЛЕННЯ ЦИФРОВОЇ МОДЕЛІ КЕРУВАННЯ ДВИГУНОМ, ЯКИЙ ПОВЕРТАЄ КАМЕРУ В БПЛА.....	58
4.1 Аналіз вхідної системи	58
4.2 Синтез цифрових систем зі зворотнім зв'язком за станом (з розрахунком бажаних коренів характеристичного рівняння.....	67
4.3 Синтез цифрових систем з квантуванням та фіксацією.....	76
4.4 Синтез векторно-матричної моделі регулятора цифрової системи керування з підвищенням порядку астатизму	84
4.5 Аналіз отриманих результатів дослідження трьох методів синтезу векторно-матричних моделей цифрових регуляторів	96
ВИСНОВКИ	100
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ.....	101
ДОДАТОК А - ОПУБЛІКОВАНА СТАТТЯ.....	104
ДОДАТОК Б - СТРУКТУРНА СХЕМА СИСТЕМИ ВИЗНАЧЕННЯ ЗНАЧЕНЬ ПАРАМЕТРІВ РУХУ ОБ'ЄКТІВ ЗА ДОПОМОГОЮ БЕЗПЛОТНИКІВ	112

ПЕРЕЛІК СКОРОЧЕНЬ

БПЛА- безпілотний літальний апарат

ДПЛА – дистанційно пілотований літальний апарат

НЦ – наземна/надводна ціль

ОЕС – оптико-електронна система

РЛС – радіо-локаційна станція

РЕБ – радіо-електронна боротьба

ЛБХ – лампа бігучої хвилі

ЛВ – лінія візування

СК – система координат

ІЧ - інфрачервоний

ПТКР - протитанкова керована ракета

ФПП – фото приймальний пристрій

ЗСУ – Збройні сили України

ВСТУП

Актуальність даної роботи обумовлена тим, що в Україні з 2014 року йдуть військові дії, а з 24 лютого 2022 року - повномасштабна війна з російськими окупантами, саме тому покращення точності і ефективності розвідки за допомогою БПЛА є як ніколи важливим питанням.

Мета: підвищення точності визначення параметрів руху об'єктів за допомогою безпілотних літальних апаратів.

Об'єкт дослідження: безпілотний літальний апарат (БПЛА).

Предмет дослідження: система визначення значень параметрів руху об'єктів за допомогою безпілотних літальних апаратів.

Автономні робототехнічні комплекси, які називаються також «бойовими роботами», все частіше ставляться на озброєння в різних країнах світу і все частіше застосовуються на полі бою. Роботи зі створення, випробування та впровадження автономних систем ведуть не лише провідні держави та їх конкуренти, а й недержавні актори. Поява таких технологій змінює підходи до ведення воєнних дій та матиме серйозні наслідки для особового складу збройних сил, військової тактики та політики держав у цій галузі.

Розвиток IoT технологій та Smart технологій значно допомагає розвивати цю сферу та впроваджувати її додаткові функції для допомоги військовослужбовцям на полі бою: від виявлення цілей в реальному часі та повідомлення координат до прокладання маршрутів та планування тактичних дій.

Безпілотні літальні апарати, вони ж БПЛА, вони ж дрони, сьогодні не є чимось незвичним, особливо у військовій справі. Втім, варто розуміти, що під словом “безпілотник” ховається цілий ряд літальних апаратів, різниця між якими може бути величезна. Найменший військовий безпілотник солдат може носити в кишені, щоб “зазирнути”, припустимо, за ріг будинку. А найбільший, по суті, є повноцінним бойовим літаком, просто без кабіни пілота, який може

буквально цілодобово кружляти в повітрі, очікуючи нагоди виконати завдання.

Визнані лідери на цьому напрямку протягом багатьох років, США та Ізраїль, останнім часом відчувають зростаючу конкуренцію з боку країн, що розпочали розробку автономних систем військового призначення та включилися до технологічних перегонів. До них відносяться Росія, Китай, Іран, Туреччина, Україна та ряд менших держав. Усі вони ведуть активні дослідження, що спираються на вирішення завдань цивільного призначення у сфері високих технологій, інформатики, програмного забезпечення, оптики та інших галузях. Поява нових технологій робить неактуальними існуючі на даний момент норми та військову тактику і ставить безліч питань щодо того, як розгортатиметься конкуренція у військовій сфері у найближчому майбутньому.

БПЛА дедалі активніше використовуються для розвідки противника, наведення й координації вогню артилерії, здійснення автономних високоточних атак. Для цього необхідно мати відповідний комплект БПЛА різних класів в залежності від виду операції (бойових дій) та конкретних умов обстановки.

Таким чином потрібно створювати, розвивати та впроваджувати нові технології для застосування БПЛА, в тому числі вітчизняні, як засобів розвідки, передавання інформації та знищення цілей.

Публікація результатів дисертації. По результатам роботи опубліковано статтю:

Облаухов В. Ю., Репнікова Н. Б. Система визначення параметрів руху об'єктів за допомогою безпілотників // Міжнародний науковий журнал "Інтернаука". — 2022. — №4.

<https://www.inter-nauka.com/issues/2022/4/7972>

1 АНАЛІЗ СУЧАСНИХ ПИТАНЬ ВИКОРИСТАННЯ БПЛА.

1.1 Види БПЛА

Безпілотний літальний апарат (БЛА, БПЛА; у розмовній мові також «безпілотник»; дрон, від англ. drone - трутень) - літальний апарат без екіпажу на борту[1][2].

Визначення українського законодавства:

Безпілотний літальний апарат (БПЛА) - повітряне судно, призначене для виконання польоту без екіпажу на борту. Керування польотом такого літального засобу і контроль за ним здійснюються комп'ютерною програмою або спеціальною станцією керування, що не знаходиться у повітряному судні.

Безпілотний авіаційний комплекс (безпілотна авіаційна система) — повітряне судно або судна без пілота на борту, відповідні їм пункти дистанційного пілотування (станції наземного керування), необхідні лінії зв'язку і управління та інші елементи, вказані в затвердженому проекті типу цього комплексу. Цей комплекс може охоплювати декілька безпілотних літальних апаратів.

БПЛА можуть мати різний рівень автономності - від керованих дистанційно до повністю автоматичних, а також розрізнятися по конструкції, призначенню і безлічі інших параметрів. Управління БПЛА може здійснюватися епізодичним поданням команд або безперервно - в останньому випадку БПЛА називають дистанційно-пілотованим літальним апаратом (ДПЛА)[3].

Такі літальні апарати можуть вирішувати розвідувальні завдання (на сьогодні це основне їх призначення), застосовуватися для завдання ударів по наземних і морських цілях, перехоплення повітряних цілей, здійснювати постановку радіоперешкод, управління вогнем і цілевказівки, ретрансляції повідомлень і даних, доставки вантажів[4].

Основною перевагою БПЛА є істотно менша вартість їх створення та експлуатації (за умови рівної ефективності виконання поставлених завдань) — за експертними оцінками бойові БПЛА верхнього діапазону складності коштують від 5—6 млн дол., у той час як вартість винищувача-бомбардувальника F, що пілотується -35 становить близько 100 мільйонів доларів (плюс істотні витрати навчання пілота).

Важливою перевагою є те, що оператор військового БПЛА не ризикує своїм життям на відміну від пілота бойового літака. Недоліком БПЛА є вразливість систем дистанційного керування та захищеність каналів зв'язку, що є особливо важливим для БПЛА військового призначення[5].

Відсутність пілота на борту знімає з БПЛА ряд обмежень, характерних для пілотованої авіації, що може позначитися на їх конструкції:

- 1) Безпілотний літальний апарат можна виконати як завгодно малих розмірів, у той час як пілотований неможливо зробити легшим за масу людини;
- 2) БПЛА не має фізіологічних обмежень на навантаження при виконанні маневрів, що також може відбиватися на конструкції;
- 3) Для БПЛА можуть бути знижені вимоги до надійності, оскільки це не тягне за собою пряму загрозу життю людини;
- 4) Час польоту безпілотних апаратів не обмежений ресурсом систем життєзабезпечення льотчика. В даний час цілком реальні проекти безпосадкових БПЛА, що виробляють ресурс протягом одного польоту, який може тривати кілька років.

Таблиця 1.1 – Класифікація БПЛА за STANAG 4670

Клас	Категорія	Рівень воєнних дій та застосування	Максимальна висота застосування	Радіус дії	Приклад
3 (більше 600 кг)	Ударні	стратегічний	20000 м	необмежений	MQ-9 Reaper (Рисунок 1.1)
	HALE	стратегічний	20000 м	необмежений	RQ-4 Global Hawk
	MALE	оперативний	14000 м	необмежений	Bayraktar TB2
2 (150- 600 кг)	тактичні	тактичний	5500 м	До 200 км	Hermes 450
1 (до 150 кг)	Малі (від 15 кг)	тактичний	1500 м	До 50 км	Scan Eagle PD-2
	Міні (до 15 кг)	тактичний	900 м	До 25 км	Skylark
	Мікро (до 66 Дж)	тактичний	60 м	До 5 км	Black Widow

Ударні стратегічні БПЛА – експлуатанти, у яких такі безпілотні літальні апарати знаходяться на озброєнні, повинні дотримуватись вимог спільної місії за AP-3.3.7 (STANAG 4670) а сама безпілотна система повинна відповідати

нормам льотної придатності з урахуванням політичної доцільності та правовими наслідками її застосування (Рисунок 1.1)[6].



Рисунок 1.1 – Приклад ударного БПЛА США MQ-9 Reaper

High-altitude long endurance — висотний безпілотний літальний апарат далекої дії.

Medium-altitude long endurance — середньовисотний безпілотний літальний апарат далекої дії.

БПЛА з максимальною кінетичною енергією менше ніж 66 джоулів, ймовірно, не завдадуть значної шкоди життю або майну і їх не потрібно класифікувати.

Також існує класифікація безпілотних авіаційних систем (UAS), яку застосовано у документі Департаменту оборони США (DOD-USRM-2013 2013, р. 6). Згідно цього документу, виділяють п'ять груп UAS[7]:

Група 1 (мікро-, міні тактичні) — від 0 до 9 кг, до 300 метрів над ґрунтом, основний представник — «RQ-11 Raven».

Група 2 (малі тактичні) — від 9.5 до 25 кг; до 1000 метрів над ґрунтом, представник — «Scan Eagle».

Група 3 (тактичні) — менш, ніж 600 кг, представник — «RQ-7 Shadow».

Група 4 (оперативні) — більш, ніж 600 кг; представник — «MQ-1B Predator».

Група 5 (стратегічні) — більш, ніж 600 кг; представник — «MQ-9 Reaper».

1.2 Застосування БПЛА в ЗСУ

Як було вказано вище, Україна відстає від провідних країн світу у розробці військових БПЛА. Ми маємо власні розробки в цій сфері, але вони ще не стоять у виробництві і на озброєнні, скоріше проходять випробування чи на стадії проєкту.

З початку збройної агресії російської федерації на сході України і на Кримському півострові, виявилися дуже необхідними застосування військових БПЛА як для розвідки, так і для знищення противника.

З 2016 року в Україні почалися поставки військових БПЛА оперативно – тактичного рівня Bayraktar TB-2.

Байрактар ТВ2 (тур. Bayraktar TB2) - турецький ударний оперативно-тактичний середньовисотний БПЛА з двигуном внутрішнього згоряння і повітряним гвинтом типу, що штовхає (Рисунок 1.2)[8].



Рисунок 1.2 – Bayraktar TB-2 на озброєнні ЗСУ

Попередником Bayraktar TB2 був Bayraktar Çaldıran (Bayraktar TB1), що розробляли з 2007 року та поставили на озброєння турецької армії у 2011 році.

У червні та серпні 2014 року апарат TB2 побив світовий рекорд серед безпілотних літальних апаратів у класі тактичних середньовисотних БЛА за тривалістю польоту. Він перебував у небі на висоті 8 км 24 год. 34 хв.

Безпілотник отримав назву від прізвища засновника компанії Байкар Оздеміра Байрактара

Bayraktar TB2 з 4 керованими боеприпасами на підвісці може перебувати у повітрі від 12 до 24 годин. Максимальна дальність управління – до 150 км. Це дозволяє вести постійне чергування в повітрі і, після виявлення цілей, швидко висуватися до передової для пуску ракет (час реакції буде набагато менше, ніж в авіації, що дозволяє ефективно вражати цілі, доступні лише за короткий час). Розробка та виробництво – приватна компанія «Baykar Makina».

Після навчання фахівців, ці літальні апарати ефективно показали себе у боротьбі з загарбниками.

В 2019-2020 роках були замовлені нові поставки таких БПЛА з Туреччини. А зараз, під час повномасштабної війни України проти російської федерації, поставлена ще велика партія Bayraktar TB-2 для ЗСУ.

Нинішню війну в Україні взагалі називають "війною дронів", щодня ми бачимо, як ударні безпілотники "Байрактар" знищують техніку окупантів[9].

І у війні на території України зараз загалом також інша ідеологія війни, ніж на Заході. Інтегруються окремі сучасні технології, оскільки вони показали свою бойову ефективність. Але при цьому основний наголос робиться на те, щоб ці технології здешевити. І це логічно та правильно.

Важливо уточнити: у сьогодишню війну України та російської федерації дрони воюють не самі, тут основне застосування дронів - це не бойова зброя, а система наведення.

Тому що у російсько-українській війні, як і у Другій світовій, основну роль в ураженні ворожої живої сили та техніки відіграє артилерія. Але тут виникає нюанс: можна витратити мільйони снарядів, щоб покрити просто якусь площу, все знищивши, і на ній не залишилося нічого живої і жодної будови, а можна наводити артилерію та ракети якнайточніше і витратити мінімум снарядів, мінімум часу, швидко вразити саме ціль та мінімізувати руйнування. Ось саме це завдання вирішують БПЛА.

Саме тому, покращення, модернізація та розробка нових методів розвідки і визначення координат є як ніколи актуальною.

Bayraktar TB-2 - Це БПЛА літакового типу, інтегральний двобалковий низькоплан. Корпус БПЛА виконано з багатошарових композитних матеріалів та оснащено системою автоматичного зльоту та посадки.

У випадку, коли фюзеляж плавно переходить у крило, створюючи з ним єдину поверхню, що несе, говорять про **інтегральну компоновку**. Основною перевагою такого компонування є менший лобовий опір та можливість значно збільшити внутрішні обсяги. При цьому сильно змінюється розподіл обсягів за довжиною фюзеляжу, і у разі їх неоптимального використання може призвести до невиправданого збільшення загального перетину.

У разі інтегрального компонування фюзеляж може давати значний внесок у підйомну силу усім режимах польоту. Наприклад, МіГ-29 близько 40% своєї підйомної сили створює рахунок фюзеляжу, причому на кутах атаки понад 17° роль фюзеляжу і кореневих напливів значно зростає.

Кут атаки - кут між напрямком вектора швидкості потоку (рідини або газу), що набігає на тіло, і характерним поздовжнім напрямком, обраним на тілі, наприклад у крила літака хорда крила, у літака — поздовжня будівельна вісь, у снаряда чи ракети — їхня вісь симетрії[10].

Двобалковий літак (двохосний) - літак з хвостовим оперенням, встановленим на двох балках, які зазвичай паралельно йдуть від крила.

Причинами вибору такої конструкції може бути:

- Потреба в завантаженні із задніх дверей (C-82 Packet або Fairchild C-119 Flying Boxcar);
- створення літака з штовхаючим пропелером або реактивний літак з двигуном у хвостовій частині (Bell XP-52, De Havilland DH.100 Vampire, Bayraktar TB2);
- Поліпшення огляду та можливість стрільби із задньої півсфери (Focke-Wulf Fw 189 Uhu);
- Поліпшення аеродинамічної схеми для літаків із двома рядними двигунами (Lockheed P-38 Lightning або Northrop P-61 Black Widow);
- Одночасне збільшення жорсткості конструкції та внутрішнього об'єму (Вояджер або Virgin Atlantic GlobalFlyer);
- Забезпечення місця підвіски зовнішнього вантажу (AHRLAC).

Низькоплан – літак (моноплан), крило в якому проходить через нижню половину фюзеляжу. Багато моделей лінійних цивільних повітряних суден - низькоплани, наприклад Ту-154, Іл-62, Іл-86, А320.

При необхідності БПЛА може діяти у напівавтономному режимі польоту, без керування із землі. Хвіст у вигляді перевернутого V служить одночасно кермом напрямку та висоти.

БПЛА оснащено канадським двигуном внутрішнього згоряння Rotax 912 з гвинтом типу, що штовхає, потужністю 100 л. с. У жовтні 2020 року, у зв'язку з використанням БПЛА азербайджанською армією проти вірменських сил у Нагірному Карабаху під час Другої карабахської війни, постачання двигунів канадською компанією Bombardier Recreational Products до Туреччини було тимчасово припинено.

Опрацьовується можливість виробництва двигунів для БПЛА «Байрактар ТВ2» на українських підприємствах, які вже випускають двигуни для більшого ударного висотного БПЛА «Байрактар Акінжі».

Стандартне корисне навантаження БПЛА включає:

- 1) модульні електронно-оптичну та інфрачервону (ІЧ) камеру;
- 2) лазерний далекомір і лазерний цілевказник для керованих боєприпасів або функціональний АФАР радар;
- 3) на апарат також може встановлюватися модуль РЕБ для нейтралізації старих систем ППО.

БПЛА має захист від засобів РЕБ супротивника, автономну систему навігації, яка не залежить від GPS, і низьку ЕПР. Завдяки високоякісній оптико-електронній системі (використовується канадська станція повітряної розвідки CMX-15D Wescam) дрони Bayraktar можуть вражати цілі з висоти 7 км, перебуваючи за межами досяжності багатьох застарілих або низьковисотних ЗРК.

Кабіна управління піднімає гідравлікою поворотну спрямовану антену на висоту 12 метрів і захищена від зброї масового ураження за стандартами НАТО. У кабіні три робочі місця[11].

Стандартне озброєння: 2 керовані протитанкові ракети UMTAS з лазерним наведенням і дальністю пуску 0,5-8 км або 4 коректовані плануючі високоточні авіабомби Bozok, Roketsan MAM-C, MAM-L, здатні вражати нерухомі та рухомі об'єкти на відстані до 8 км

Технічні характеристики БПЛА Bayraktar TB-2:

- Довжина: 6,5 м;

- Розмах крила: 12 м;
- Максимальна злітна вага: 650 кг;
- двигун внутрішнього згоряння: Rotax 912 з гвинтом типу, що штовхає потужністю 100 л. с.;
- Паливо: 300 літрів бензину AI-95;
- Вантажопідйомність: до 150(боєприпасів — до 95) кг корисного навантаження, у тому числі 55 кг — стандартний модуль електронно-оптичної системи спостереження та лазерної цілікування Wescam CMX 15D канадського виробництва;
- Максимальна швидкість: 222 км/год;
- Крейсерська швидкість: 130 км/год;
- Радіус управління з наземної станції - 150 км;
- Стеля: 8200 м;
- Автономність: до 27 год;
- 4 точки підвіски для керованих боєприпасів з дальністю ураження до 8 км (МAM-L - 14 км при використанні GPS/ІНП);
- ПТКР UMTAS - 37,5 кг;
- коригована плануюча авіабомба МAM-С (з осколково-фугасною або бронебійно-запальною бойовою частиною) - 6,5 кг;
- коригована плануюча авіабомба МAM-L (з осколково-фугасною, бронебійною або термобаричною бойовою частиною) - 22 кг;
- коригувальна плануюча авіабомба Vozok вагою 16 кг.

Система, яка розроблюється в даній магістерській дисертації, може застосовуватися як на Bayraktar ТВ-2, яких переважна більшість в ЗСУ, так і на інших БПЛА подібного типу для високоточного визначення координат нерухомих і рухомих цілей.

1.3 Задачі та проблеми розвідки за допомогою БПЛА

Досвід застосування безпілотних літальних апаратів у локальних війнах і збройних конфліктах останніх десятиліть, а також наукових розробок військових фахівців провідних країн світу щодо перспектив їх подальшого розвитку та бойового застосування, дозволяє зробити наступні висновки:

1. Новим у веденні збройної боротьби в сучасних війнах стало масове використання невеликих за розміром, малопомітних і з відносно великою тривалістю польоту безпілотних літаків розвідників для отримання розвідувальної інформації з метою нанесення ударів по противнику, для ураження наземних, а в перспективі й повітряних об'єктів.

2. Військове керівництво більшості країн світу розглядає безпілотні авіаційні комплекси як один з важливих видів військової авіаційної техніки, що забезпечує суттєве підвищення бойових можливостей армійської авіації.

3. У збройних силах провідних країн НАТО безпілотна авіація стала складовою повітряної розвідувальної тріади поряд з космічною розвідкою та пілотованою розвідувальною авіацією, а також важливою складовою армій цих країн.

Власне безпілотний літальний апарат, що може бути планером або квадрокоптером (октокоптером), складається з:

- стійкого корпусу;
- двигунів (бензинових чи електричних);
- батареї чи системи подачі палива;
- блоку передачі одностороннього сигналу для керування (його кодування) (О -> БПЛА) – Transmitter;
- блоку прийому сигналу на БПЛА (можливо декодування) – Receiver;
- блоку передачі та перетворення сигналу від оператора в рухи рулів БПЛА – Servo та на мотори;
- блоку відслідковування апаратом свого місцезнаходження – GPS-модуль;

- блоку передачі одностороннього сигналу про місцезнаходження (БП -> O) – Transmitter;
- блоку прийому сигналу про місцезнаходження та позиціонування на карті – Receiver + Soft;
- відео-камери або записуючого пристрою;
- блоку передачі сигналу від відеокамери (БПЛА -> O) - Video Transmitter – Receiver;
- камери високої роздільної здатності з фокусуванням;
- блоку передачі сигналу управління/фокусування камери (O -> БПЛА): Transmitter – Receiver – Servos.

БПЛА можуть мати різний рівень автономності - від керованих дистанційно до повністю автоматичних, а також розрізнятися по конструкції, призначенню і безлічі інших параметрів. Управління БПЛА може здійснюватися епізодичним поданням команд або безперервно - в останньому випадку БПЛА називають дистанційно-пілотованим літальним апаратом (ДПЛА).

В даний час безпілотні літальні апарати (БПЛА) активно використовуються при вирішенні різноманітних військових та спеціальних завдань, від розвідки та радіоелектронної боротьби, до наведення високоточної зброї і навіть самостійного ураження цілей. Важливими складовими під час вирішення поставлених завдань є визначення дальності, відносних координат та параметрів руху наземних/надводних цілей (НЦ). Існують алгоритми визначення координат радіолокацією [12-14].

Основним недоліком радіолокаційних методів є громіздкість апаратури та антен, що реалізують ефективні діаграми спрямованості та алгоритми обробки інформації. Також до недоліків можна віднести те, що методи радіолокації є активними і носії даних пристроїв можуть бути легко виявлені і знищені.

Існуючі способи та методи пасивної радіолокації [15] призначені для пеленгування радіовипромінюючих об'єктів також мають низку технічних

обмежень. Основним їх недоліком є непридатність для невивипромінюючих цілей, якими можуть бути більшість об'єктів інтересу. Тому актуальне завдання підвищення точності та скритності визначення координат та параметрів руху НЦ.

Одним з технічних пристроїв, що дозволяють вести пасивне візування та координатометрію НЦ з борту БПЛА, є рухома гіростабілізована оптико-електронна система (ОЕС). Така ОЕС може включати до свого складу телевізійний та тепловізійні модулі формування якісних зображень, а також виконувати автоматичне захоплення та супровід НЦ з вимірюванням азимуту, кута місця та геометричної дальності.

Типові малогабаритні двоосьові гіростабілізовані ОЕС мають високі технічні показники [16, 17]: діапазон кутів розвороту по азимуту – 360° без обмеження, по кутку місця – від $+20^\circ$ до -100° , швидкість переміщення лінії візування (ЛВ) – до $80^\circ / \text{сек}$, точність стабілізації - 200 мкрад, вага - до 1,5 кг.

На даний момент, непомітні пасивні методи визначення координат НЦ є актуальним питанням, яке розглядається усіма передовими країнами світу.

2 МЕТОДИ ВИЗНАЧЕННЯ КООРДИНАТ ЦІЛЕЙ З БПЛА

2.1 Визначення координат цілі активними методами

Радіолокаційна станція (РЛС), радар (англ. radar від radio detection and ranging — радіовиявлення та вимірювання дальності) — радіотехнічна система для виявлення повітряних, морських та наземних об'єктів, а також для визначення їх дальності, швидкості та геометричних параметрів. Використовує метод радіолокації, що ґрунтується на випромінюванні радіохвиль та реєстрації їх відображень від об'єктів [18] (Рисунок 2.1).

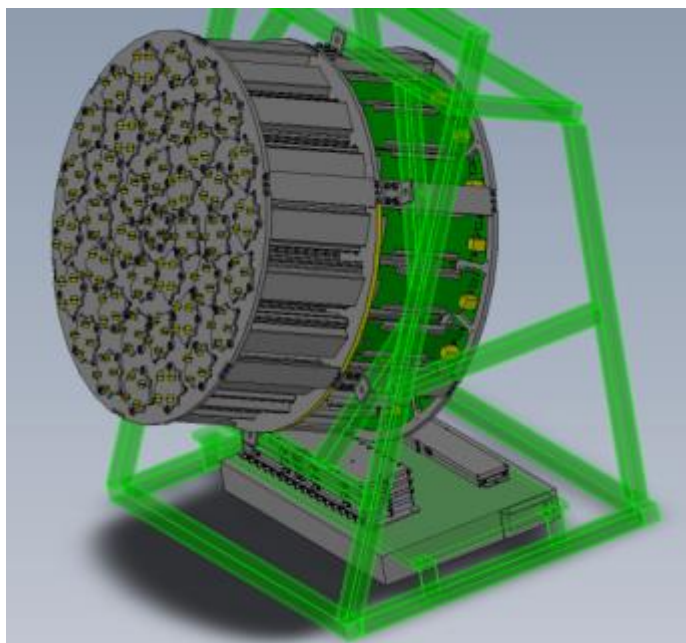


Рисунок 2.1 – Модель РЛС

Первинний (з пасивним відповіддю) радіолокатор, переважно, служить виявлення цілей, опромінюючи їх електромагнітної хвилею і потім приймаючи відбиття (ехо) від мети. Оскільки швидкість електромагнітних хвиль постійна (швидкість світла), стає можливим визначити відстань до мети, виходячи з вимірювання різних параметрів при поширенні сигналу.

В основі пристрою станції радіолокації лежать три компоненти: передавач, антена і приймач.

Передавач (передавальний пристрій) є джерелом електромагнітного сигналу. Він може бути потужним імпульсним генератором. Для імпульсних РЛС сантиметрового діапазону - зазвичай магнетрон або імпульсний генератор, що працює за схемою: генератор, що задає, - потужний підсилювач, що використовує як генератор найчастіше лампу хвилі (ЛБХ), що біжить, а для РЛС метрового діапазону часто використовують тріодну лампу.

РЛС, які використовують магнетрони, некогерентні або псевдокогерентні, на відміну від РЛС на основі ЛБХ. Залежно від способу вимірювання дальності, передавач працює або в імпульсному режимі, формуючи короткі потужні електромагнітні імпульси, що повторюються, або випромінює безперервний електромагнітний сигнал.

Антену виконує випромінювання сигналу передавача в заданому напрямку та прийом відбитого від мети сигналу. Залежно від реалізації прийом відбитого сигналу може здійснюватися або тією ж антенною, або інший, яка іноді може розташовуватися на значній відстані від передавальної. У випадку, якщо передача та прийом поєднані в одній антені, ці дві дії виконуються по черзі, а щоб потужний сигнал передавача не просочувався в приймач, перед приймачем розміщують спеціальний пристрій, що закриває вхід приймача в момент випромінювання сигналу зонду.

Приймач (приймальний пристрій) виконує посилення та обробку прийнятого сигналу. У найпростішому випадку результуючий сигнал подається на променеву трубку (екран), яка показує зображення синхронізоване з рухом антени.

Різні РЛС засновані на різних методах вимірювання параметрів відбитого сигналу.

1) Фазовий метод

Фазовий (когерентний) метод радіолокації заснований на виділенні та аналізі різниці фаз відправленого та відбитого сигналів, яка виникає через ефект Доплера, коли сигнал відображається від об'єкта, що рухається. При цьому передавальний пристрій може працювати безперервно, так і в

імпульсному режимі. В одночастотному режимі випромінювання основною перевагою даного методу є те, що він «дозволяє спостерігати тільки об'єкти, що рухаються, а це виключає перешкоди від нерухомих предметів, розташованих між приймальною апаратурою і метою або за нею»

Переваги:

- малопотужне випромінювання, оскільки генеруються незатухаючі коливання;
- точність залежить від доплерівського зсуву частоти відображення;
- досить простий пристрій.

Недоліки:

- відсутність дозволу по дальності (усувається рахунок використання багаточастотних сигналів);
- погіршення чутливості приймача внаслідок проникнення через антену в приймальний тракт випромінювання передавача, схильного до випадкових змін.

2) Імпульсний метод

Сучасні радары супроводу зазвичай побудовані як імпульсні радары. Імпульсний радар передає випромінюючий сигнал протягом дуже короткого часу, коротким імпульсом (тривалість порядку мікросекунд), після чого переходить у режим прийому і слухає ехо, відбите від мети, тоді як випромінюваний імпульс поширюється у просторі.

Оскільки імпульс йде далеко від радара з постійною швидкістю, між часом, що пройшов з моменту посилки імпульсу до моменту отримання ехо-відповіді, і відстанню до мети - пряма залежність. Наступний імпульс має сенс надіслати лише через деякий час, а саме після того, як попередній імпульс прийде назад (це залежить від дальності виявлення радара, потужності передавача, посилення антени, чутливості приймача). Якщо імпульс посилати раніше, то відлуння від попереднього імпульсу від віддаленої мети може бути помилково прийнято як відлуння від другого імпульсу від близької мети.

Переваги імпульсного методу вимірювання дальності:

- можливість побудови РЛЗ з однією антеною;
- простота індикаторного пристрою;
- зручність вимірювання дальності кількох цілей.

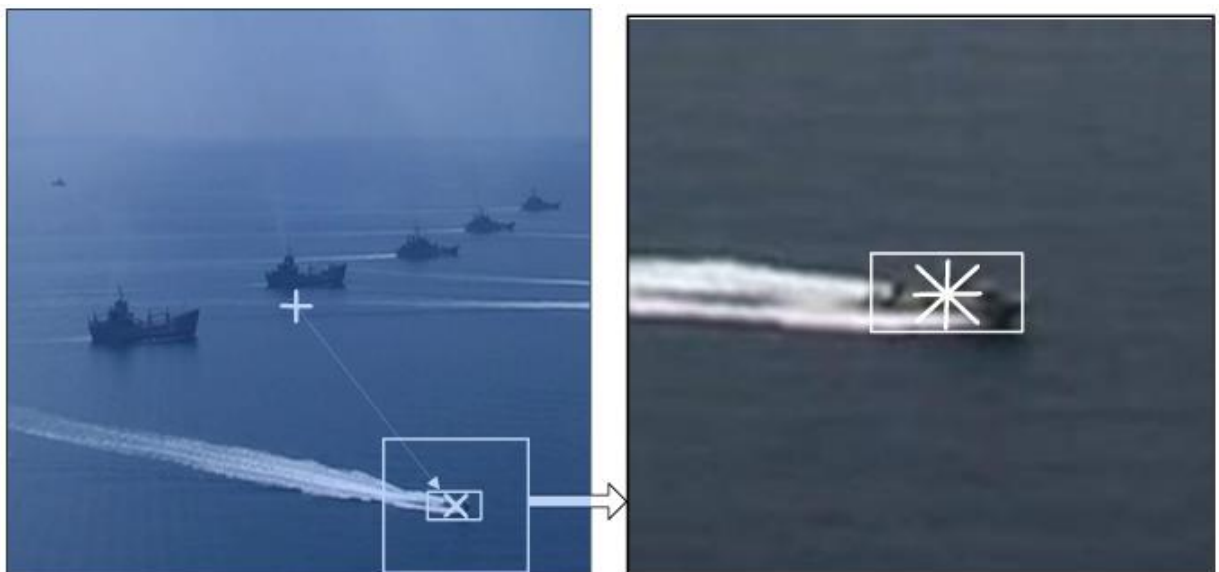
Недоліки:

- необхідність використання великих імпульсних потужностей передавача;
- неможливість вимірювання малих дальностей до мети через мертву зону.

2.2 Визначення координат цілі пасивними методами

Одним з методів пасивного визначення координат – є метод супровіду цілі з ОЕС на БПЛА (камери) в реальному часі.

У процесі польоту БПЛА виявляють задану НЦ на послідовності відеокадрів ОЕС [19]. Далі виконують центрування зображення НЦ на відеокадрі, для цього керують лінією візування (ЛВ) ОЕС таким чином, щоб центр зображення мети (×) завжди був у центрі відеокадру (+). На Рисунку 2.2 представлено приклад захоплення, центрування та супроводу мети на відеокадрі.



Тоді відносні координати НЦ визначаються так:

$$x'_{B1} = D_{r1AB} \cos \alpha'_1, \quad z'_{B1} = D_{r1AB} \sin \alpha'_1, \quad (1)$$

$$x'_{B2} = \bar{x}_{B2} + \Delta x' = D_{r2AB} \cos \alpha'_2 + \Delta x', \quad z'_{B2} = \bar{z}_{B2} + \Delta z' = D_{r2AB} \sin \alpha'_2 + \Delta z', \quad (2)$$

$$\Delta x' = S_A \sin \Psi'_A, \quad \Delta z' = S_A \cos \Psi'_A, \quad (3)$$

$$\Psi'_A = \begin{cases} 0 & \text{при } (x''_{A1} \leq x''_{A2} \wedge z''_{A1} = z''_{A2}), \\ \pi & \text{при } (x''_{A1} > x''_{A2} \wedge z''_{A1} = z''_{A2}), \\ \frac{\pi}{2} & \text{при } (x''_{A1} = x''_{A2} \wedge z''_{A1} < z''_{A2}), \\ \frac{3\pi}{2} & \text{при } (x''_{A1} = x''_{A2} \wedge z''_{A1} > z''_{A2}), \\ \left(\frac{\pi}{2} - \delta\right) & \text{при } (x''_{A1} < x''_{A2} \wedge z''_{A1} < z''_{A2}), \\ \left(\frac{\pi}{2} + \delta\right) & \text{при } (x''_{A1} > x''_{A2} \wedge z''_{A1} < z''_{A2}), \\ \left(\frac{3\pi}{2} - \delta\right) & \text{при } (x''_{A1} > x''_{A2} \wedge z''_{A1} > z''_{A2}), \\ \left(\frac{3\pi}{2} + \delta\right) & \text{при } (x''_{A1} < x''_{A2} \wedge z''_{A1} > z''_{A2}), \end{cases} \quad (4)$$

Де x та z - координати БПЛА відносно бази;

S_c – шлях бази;

S_a - земний шлях БПЛА.

У разі обертання квадрокоптера щодо осі ОУ необхідно враховувати кут повороту Φ за час t . На рисунку 2.4 показано відповідну геометричну модель такого переміщення.

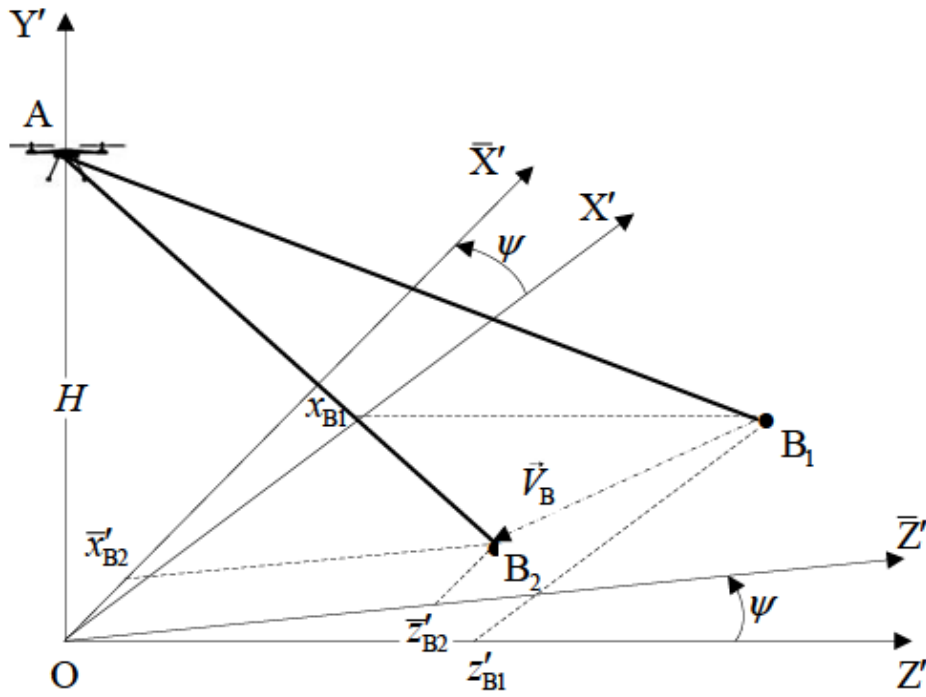


Рисунок 2.4 – Геометрична модель обертального руху квадрокоптера відносно ОУ осі.

Тоді координати:

$$x'_{B2} = \Delta x' + D_{r2AB} \sin \alpha'_2 \sin \psi - D_{r2AB} \cos \alpha'_2 \cos \psi, \quad (5)$$

$$z'_{B2} = \Delta z' + D_{r2AB} \sin \alpha'_2 \cos \psi + D_{r2AB} \cos \alpha'_2 \sin \psi. \quad (6)$$

$$x''_B = x''_A + \Delta_{AB}^x, \quad z''_B = z''_A + \Delta_{AB}^z,$$

$$\Delta_{AB}^x = \cos(\alpha' + \alpha'') D_{rAB}, \quad \Delta_{AB}^z = \sin(\alpha' + \alpha'') D_{rAB}.$$

Відстань НЦ відносно бази:

$$D_{rCB} = \sqrt{x_B''^2 + z_B''^2}.$$

Шлях НЦ:

$$S_B = \sqrt{D_{r1CB}^2 + D_{r2CB}^2 - 2D_{r1CB}D_{r2CB} \cos(\phi_2 - \phi_1)},$$

$$: \phi = \arccotg\left(\frac{x_B''}{z_B''}\right).$$

А швидкість НЦ:

$$V_B = \frac{S_B}{\Delta t}.$$

Розроблені алгоритми дозволяють здійснювати пасивну координатометрію НЦ за допомогою БПЛА типу «квадрокоптер» за умов взаємних переміщень БПЛА, ОЕС, НЦ та бази.

Для застосування розроблених алгоритмів за умов суші необхідна корекція перевищення/зниження НЦ над проекцією БПЛА на рельєф місцевості. Це може бути виконано за даними цифрової карти висот рельєфу місцевості.

Також запропоновані алгоритми не обмежуються застосуванням тільки для мультикоптерів, але і можуть бути поширені на інші БПЛА.

2.3 Використання теплової камери для пасивного визначення напрямку на ціль

Для роботи розробленого методу визначення координат цілі потрібно, щоб БПЛА могли визначати напрям на ціль – кути напрямку на ціль відносно осі польоту БПЛА.

Для цього пропонується використати інфрачервону (ІЧ) камеру (теплову камеру) для визначення напрямку на об'єкт відносно БПЛА.

Подібним чином виконується самонаведення протитанкових керованих ракет 3 покоління типу FGM-148 Javelin[20].

Інфрачервоне випромінювання - електромагнітне випромінювання, що охоплює спектральну область між червоною межею видимого світла з довжиною хвилі $\lambda = 700$ нм (частота близько 430 ТГц) та мікрохвильовим випромінюванням з довжиною хвилі $\lambda \sim 1$ мм (частота близько 300 ГГц).

Для виконання завдання наведення протитанкові керовані ракети оснащуються інфрачервоною головкою самонаведення. Вона представляє собою оптико-електронну систему, призначену для визначення цілі на навколишньому фоні і передачі в апаратуру управління сигналу відстеження, а також для вимірювання і видачі в автопілот сигналу кутової швидкості лінії візування.

Під час польоту, інфрачервоне випромінювання цілі попадає в оптику головки та на чутливі матриці. Якщо пляма зібраного випромінювання знаходиться не по центру матриці датчику сприйняття – виникають керуючі сигнали для повертання рулів.

На сучасних БПЛА є можливість розташування багатьох сенсорів та видів озброєння. В тому числі сенсори, які сприймають інфрачервоне випромінювання.

На БПЛА встановлюється подібний сенсор, який буде сприймати ІЧ випромінювання від цілі та передавати кути відхилення від осі польоту БПЛА.

Маючи координати БПЛА та кути відхилення – визначається напрямок на ціль, через рівняння прямої за координатами точки та кутовими коефіцієнтами (направляючими векторами).

Розташування в повітрі двох БПЛА дає рівняння двох прямих у просторі за наведеним методом, а обчислення їх точки перетину надасть координати цілі.

Для цього необхідно звести усі координати в одну систему. Тобто усі БПЛА, база, прямі та цілі в одній системі відліку.

Структурна схема такої системи наведена в **Додатку Б** і складається з таких основних елементів:

- Центр керування, який приймає дані GPS та кути повороту кожного БПЛА і обчислює координати цілей;
- БПЛА в якому:
 - Підсистема керування камерами;
 - Блок керування польотом;
 - Блок керування зброєю.

Таки чином вирішується багато наведених вище проблем:

- Непомітність при спостереженні;
- Точність обчислень висока через не складність;
- Можливість обчислення координат, швидкості та напрямку руху цілей;
- Спостереження одразу декількох цілей.

2.4 Висновки до розділу

Розглянуті методи мають свої переваги і недоліки.

Активне спостереження – більш просте і не потребує складних моделей та обчислень, але одразу виявляє БПЛА для цілі, яку він спостерігає.

Також існують методи боротьби з радіолокаційним спостереженням, такі як стелс-технології та електромагнітні перешкоди.

Пасивне спостереження є більш перспективним, оскільки є непомітним для цілі за визначенням, проте наведені існуючі методи є складними для обчислень та мають свої обмеження.

Тому актуальність розроблювальної в цій дисертації системи є дуже актуальною і корисною, особливо беручи до уваги активні бойові дії на території України.

3 АНАЛІТИЧНА МОДЕЛЬ ВИЗНАЧЕННЯ ПАРАМЕТРІВ РУХУ ЦІЛІ

3.1 Стеження за нерухомою ціллю

3.1.1 Постановка задачі 1.

Нехай існує ціль E , координати якої потрібно знайти (Рисунок 3.1).

Є початок координат точка O , та два БПЛА, позначені точками A та B .

$A_x, A_y, A_z, B_x, B_y, B_z$ – відповідно проекції точок A та B на осі координат в певний момент часу.

A_1, B_1 – проекції точок A та B на площину xOy .

Вектори $\overrightarrow{AA}$ та $\overrightarrow{BB}$ – напрямки руху БПЛА.

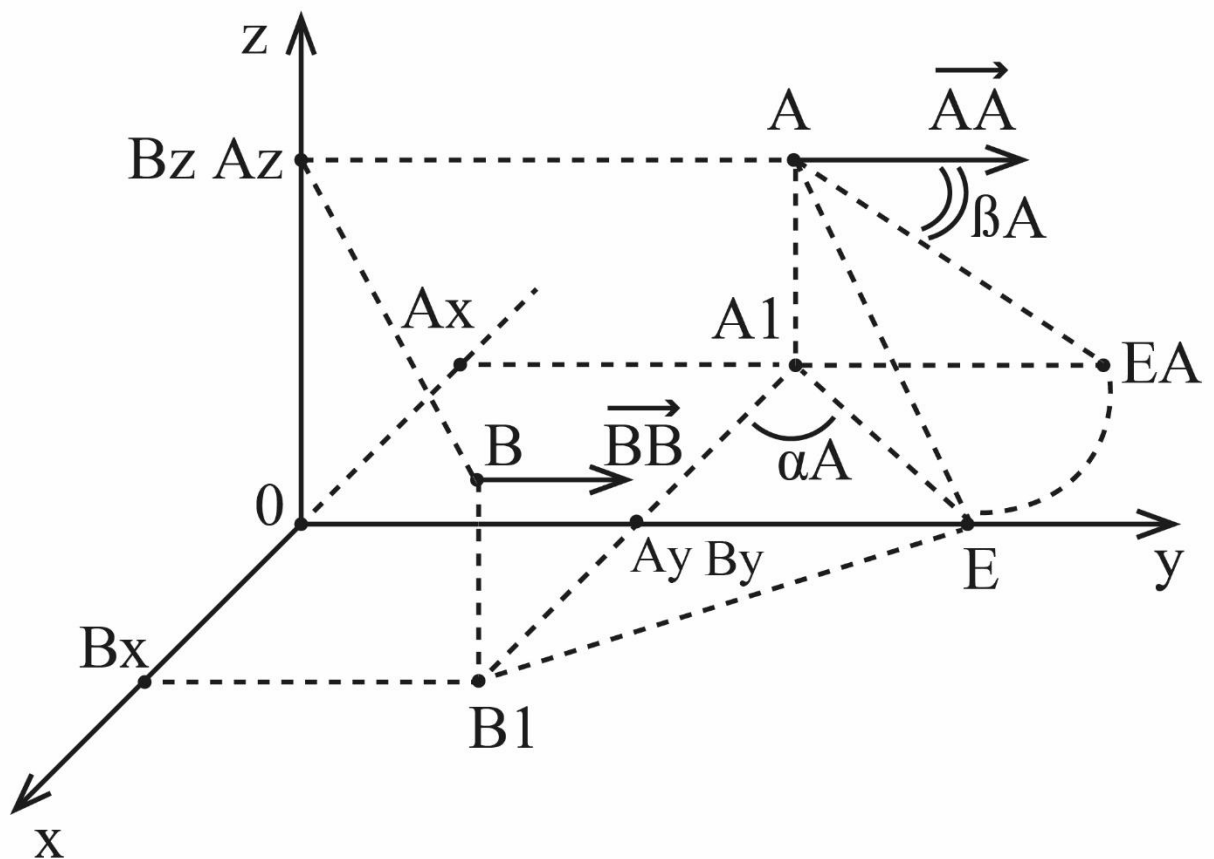


Рисунок 3.1 - Графічна модель відстеження точки E

В певний момент часу кожен БПЛА має свої координати $A(A_x, A_y, A_z)$, $B(B_x, B_y, B_z)$ від системи GPS та кути напрямку на ціль по горизонталі відносно осі X: α_A , α_B та по вертикалі відносно площини XOY: β_A , β_B від датчиків кутів повороту камери.

3.1.2 Теоретичне обґрунтування.

Для вирішення задачі, потрібно знайти рівняння прямих AE, BE та обчислити координати точки їх перетину.

Існує кілька способів, якими можливо визначити пряму у просторі. Для поставленої задачі підійде канонічний вигляд, який складається з точки та напрямного вектора прямої [21].

Точкою прямої приймемо координати БПЛА в певний момент часу.

Вектором напрямку приймемо напрямок від БПЛА до цілі E.

Направляючий вектор прямої - це будь-який ненульовий вектор, що лежить на даній прямій або паралельній до неї прямій [22].

З визначення напрямного вектора прямої випливає, що існує безліч напрямних векторів заданої прямої. Більше того, всі напрямні вектори прямої лежать або на цій прямій, або на прямій їй паралельній, тобто, всі напрямні вектори заданої прямої колінеарні.

Одиничний вектор – вектор, довжина якого дорівнює одиниці.

$$|\vec{a}| = 1;$$

Для вирішення задачі, знайдемо координати одиничного вектора, паралельного напрямку на ціль, тобто нехай:

$$|\overrightarrow{AE}| = 1;$$

Оскільки вектор $\overline{AA}$ паралельний до площини xOy , то кут AEA_1 дорівнює β_A , за теоремою про кути, які утворені двома паралельними прямими та січною:

Якщо дві паралельні прямі пересічені січною, кути, що лежать навхрест, рівні (Рисунок 3.2).

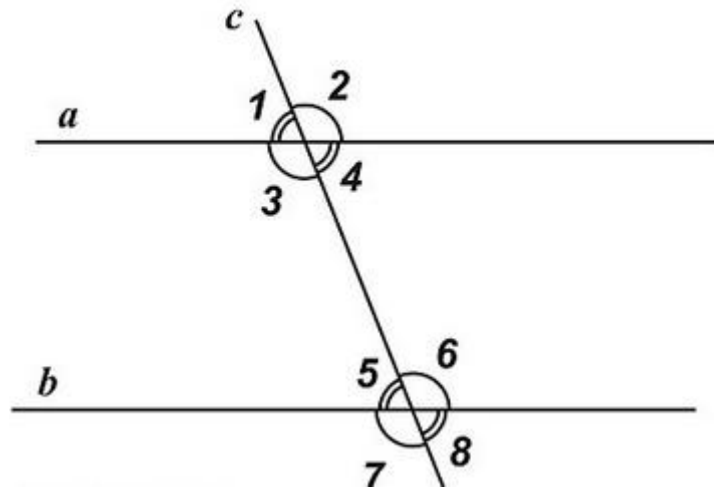


Рисунок 3.2 - Теорема про кути, які утворені двома паралельними прямими та січною

Тоді проекції $\overline{AE}$ на осі x, y, z , дорівнюють:

$$\overline{AE_z} = 1 * \sin(\beta_A);$$

$$\overline{AE_x} = 1 * \cos(\beta_A) * \cos(\alpha_A);$$

$$\overline{AE_y} = 1 * \cos(\beta_A) * \sin(\alpha_A);$$

Координати напрямного вектора прямої:

$$\overline{AE} = (\overline{AE_x}; \overline{AE_y}, \overline{AE_z})$$

Аналогічно для другого БПЛА:

$$\overline{BE_z} = 1 * \sin(\beta_B);$$

$$\overline{BE_x} = 1 * \cos(\beta_B) * \cos(\alpha_B);$$

$$\overline{BE_y} = 1 * \cos(\beta_B) * \sin(\alpha_B);$$

Координати напрямного вектора прямої:

$$\overline{BE} = (\overline{BE_x}; \overline{BE_y}, \overline{BE_z});$$

Канонічне рівняння прямої:

Якщо відома деяка точка простору, що належить прямій $M(x_0, y_0, z_0)$, і направляючий вектор даної прямої $\vec{p}(p_1, p_2, p_3)$, то канонічні рівняння цієї прямої виражаються формулами:

$$\frac{x - x_0}{p_1} = \frac{y - y_0}{p_2} = \frac{z - z_0}{p_3};$$

Підставимо значення для обох БПЛА в канонічне рівняння прямої та отримаємо рівняння прямих, що поєднують положення БПЛА з ціллю, яку вони відстежують:

$$\frac{x - A_x}{\overline{AE_x}} = \frac{y - A_y}{\overline{AE_y}} = \frac{z - A_z}{\overline{AE_z}};$$

$$\frac{x - B_x}{\overline{BE_x}} = \frac{y - B_y}{\overline{BE_y}} = \frac{z - B_z}{\overline{BE_z}};$$

Оскільки обидва БПЛА спостерігають одну й ту саму ціль, ці прямі повинні пересікатися – і точка їх перетину матиме координати цілі в момент спостереження в реальному часі.

Тепер знайдемо цю точку перетину прямих у просторі, заданих у канонічному вигляді.

Нехай створено декартову прямокутну система координат Охуz і нехай у цій системі координат задані прямі L1 та L2 (Рисунок 3.3).

$$\frac{x - x_1}{m_1} = \frac{y - y_1}{p_1} = \frac{z - z_1}{l_1};$$

$$\frac{x - x_2}{m_2} = \frac{y - y_2}{p_2} = \frac{z - z_2}{l_2};$$

Де:

$M_1(x_1, y_1, z_1)$ та $M_2(x_2, y_2, z_2)$ – точки, які належать прямим L1 та L2 відповідно;

$\overline{Q_1} = \overline{(m_1; p_1; l_1)}$ та $\overline{Q_2} = \overline{(m_2; p_2; l_2)}$ напрямні вектори прямих L1 та L2.

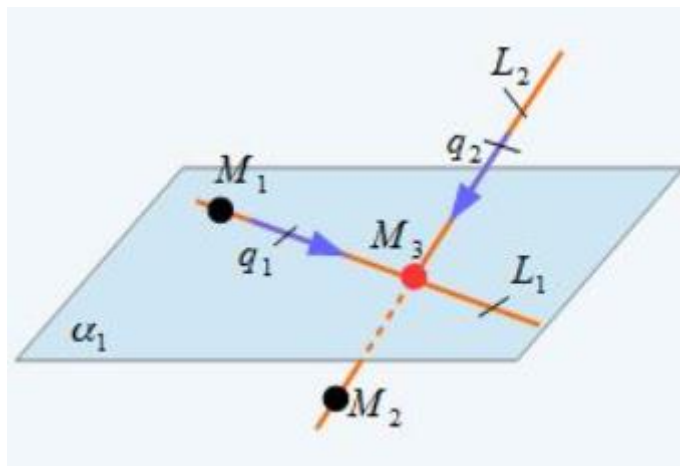


Рисунок 3.3 - Задана декартова система координат

Запишемо рівняння прямої L1 у вигляді системи з двох рівнянь:

$$\begin{cases} \frac{x - x_1}{m_1} = \frac{y - y_1}{p_1} \\ \frac{y - y_1}{p_1} = \frac{z - z_1}{l_1} \end{cases};$$

Кожне рівняння нахрест перемножимо:

$$\begin{cases} p_1 * (x - x_1) = m_1 * (y - y_1) ; \\ l_1 * (y - y_1) = p_1 * (z - z_1) ; \end{cases}$$

Розкриваємо дужки, усі члени зі змінними переносимо в ліві частини, а константи в праві:

$$\begin{cases} p_1 * x - m_1 * y = p_1 * x_1 - m_1 * y_1 ; \\ l_1 * y - p_1 * z = l_1 * y_1 - p_1 * z_1 ; \end{cases}$$

Аналогічні перетворення робимо з рівняннями прямої L2.

Записуємо рівняння прямої L2 у вигляді системи з двох рівнянь:

$$\begin{cases} \frac{x - x_2}{m_2} = \frac{y - y_2}{p_2} ; \\ \frac{y - y_2}{p_2} = \frac{z - z_2}{l_2} ; \end{cases}$$

Кожне рівняння навхрест перемножимо:

$$\begin{cases} p_2 * (x - x_2) = m_2 * (y - y_2) ; \\ l_2 * (y - y_2) = p_2 * (z - z_2) ; \end{cases}$$

Розкриваємо дужки, усі члени зі змінними переносимо в ліві частини, а константи в праві:

$$\begin{cases} p_2 * x - m_2 * y = p_2 * x_2 - m_2 * y_2 ; \\ l_2 * y - p_2 * z = l_2 * y_2 - p_2 * z_2 ; \end{cases}$$

Зведемо перетворені рівняння обох прямих до однієї системи з чотирьох рівнянь з трьома невідомими x,y,z. Запишемо її в матричному вигляді:

$$\begin{bmatrix} p1 & -m1 & 0 \\ 0 & l1 & -p1 \\ p2 & -m2 & 0 \\ 0 & l2 & -p2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x \\ y \\ z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} p1 * x1 - m1 * y1 \\ l1 * y1 - p1 * z1 \\ p2 * x2 - m2 * y2 \\ l2 * y2 - p2 * z2 \end{bmatrix};$$

Де:

$(x1, y1, z1)$ та $(x2, y2, z2)$ – координати БПЛА А та В;

$\overline{(m1; p1; l1)}$ та $\overline{(m2; p2; l2)}$ напрямні вектори прямих БПЛА-ціль, які обчислюються за формулами:

$$l1 = 1 * \sin(\beta A);$$

$$m1 = 1 * \cos(\beta A) * \cos(\alpha A);$$

$$p1 = 1 * \cos(\beta A) * \sin(\alpha A);$$

$$l2 = 1 * \sin(\beta B);$$

$$m2 = 1 * \cos(\beta B) * \cos(\alpha B);$$

$$p2 = 1 * \cos(\beta B) * \sin(\alpha B);$$

Для вирішення отриманої системи можна застосувати будь який з відомих методів вирішення СЛАР, наприклад метод Гауса. Якщо система виявиться несумісною – прямі не перетинаються і БПЛА спостерігають різні цілі, якщо система має безліч рішень – прямі співпадають (проте в заданій задачі така ситуація неможлива). Єдиний розв’язок системи дає точку перетину прямих і, відповідно, координати цілі.

3.1.3 Приклад рішення задачі 1

Нехай існує ціль Е, координати якої потрібно знайти (Рисунок 3.1).

Є початок координат точка 0, та два БПЛА, позначені точками А та В, які мають в певний момент часу спостереження координати:

БПЛА А: $A(-2; 2; 2\sqrt{2})$;

Та БПЛА В: В(2;2; $2\sqrt{2}$).

Кути, які видають датчики кутів повороту камери в БПЛА А: $\alpha_A=45^\circ$, $\alpha_B=135^\circ$, $\beta_A=-45^\circ$;

БПЛА В: $\alpha_B=135^\circ$, $\beta_B=-45^\circ$.

Знаходимо напрямні вектори прямих:

$$\overline{AE}_z = 1 * \sin(\beta_A) = 1 * \sin(-45^\circ) = -\frac{\sqrt{2}}{2};$$

$$\begin{aligned}\overline{AE}_x &= 1 * \cos(\beta_A) * \cos(\alpha_A) = 1 * \cos(-45^\circ) * \cos(45^\circ) = \\ &= \frac{\sqrt{2}}{2} * \frac{\sqrt{2}}{2} = \frac{2}{4} = \frac{1}{2};\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}\overline{AE}_y &= 1 * \cos(\beta_A) * \sin(\alpha_A) = 1 * \cos(-45^\circ) * \sin(45^\circ) = \\ &= \frac{\sqrt{2}}{2} * \frac{\sqrt{2}}{2} = \frac{2}{4} = \frac{1}{2};\end{aligned}$$

Координати напрямного вектора прямої:

$$\overline{AE} = \left(\frac{1}{2}; \frac{1}{2}, -\frac{\sqrt{2}}{2} \right)$$

Аналогічно для другого БПЛА:

$$\overline{BE}_z = 1 * \sin(\beta_B) = 1 * \sin(-45^\circ) = -\frac{\sqrt{2}}{2};$$

$$\begin{aligned}\overline{BE}_x &= 1 * \cos(\beta_B) * \cos(\alpha_B) = 1 * \cos(-45^\circ) * \cos(135^\circ) = \\ &= \frac{\sqrt{2}}{2} * \left(-\frac{\sqrt{2}}{2} \right) = -\frac{2}{4} = -\frac{1}{2};\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}\overline{BE}_y &= 1 * \cos(\beta_B) * \sin(\alpha_B) = 1 * \cos(-45^\circ) * \sin(135^\circ) = \\ &= \frac{\sqrt{2}}{2} * \frac{\sqrt{2}}{2} = \frac{2}{4} = \frac{1}{2};\end{aligned}$$

Координати напрямного вектора прямої:

$$\overline{BE} = \left(-\frac{1}{2}; \frac{1}{2}, -\frac{\sqrt{2}}{2}\right);$$

Тепер підставляємо координати БПЛА та напрямних векторів в канонічні рівняння прямих:

$$\begin{aligned} AE: \frac{x - Ax}{\overline{AEx}} &= \frac{y - Ay}{\overline{AEy}} = \frac{z - Az}{\overline{AEz}} = \\ &= \frac{x + 2}{\frac{1}{2}} = \frac{y - 2}{\frac{1}{2}} = \frac{z - 2\sqrt{2}}{-\frac{\sqrt{2}}{2}}; \end{aligned}$$

Та для другого БПЛА:

$$\begin{aligned} BE: \frac{x - Bx}{\overline{BEx}} &= \frac{y - By}{\overline{BEy}} = \frac{z - Bz}{\overline{BEz}} = \\ &= \frac{x - 2}{-\frac{1}{2}} = \frac{y - 2}{\frac{1}{2}} = \frac{z - 2\sqrt{2}}{-\frac{\sqrt{2}}{2}} \end{aligned}$$

Зводимо до однієї системи рівнянь:

$$\begin{bmatrix} p1 - m1 & 0 \\ 0 & l1 - p1 \\ p2 - m2 & 0 \\ 0 & l2 - p2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x \\ y \\ z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} p1 * x1 - m1 * y1 \\ l1 * y1 - p1 * z1 \\ p2 * x2 - m2 * y2 \\ l2 * y2 - p2 * z2 \end{bmatrix};$$

$$\begin{bmatrix} \frac{1}{2} & -\frac{1}{2} & 0 \\ 0 & -\frac{\sqrt{2}}{2} & -\frac{1}{2} \\ \frac{1}{2} & \frac{1}{2} & 0 \\ 0 & -\frac{\sqrt{2}}{2} & -\frac{1}{2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x \\ y \\ z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{1}{2} * (-2) - \frac{1}{2} * 2 \\ -\frac{\sqrt{2}}{2} * 2 - \frac{1}{2} * 2\sqrt{2} \\ \frac{1}{2} * 2 - (-\frac{1}{2}) * 2 \\ -\frac{\sqrt{2}}{2} * 2 - \frac{1}{2} * 2\sqrt{2} \end{bmatrix};$$

$$\begin{bmatrix} \frac{1}{2} & -\frac{1}{2} & 0 \\ 0 & -\frac{\sqrt{2}}{2} & -\frac{1}{2} \\ \frac{1}{2} & \frac{1}{2} & 0 \\ 0 & -\frac{\sqrt{2}}{2} & -\frac{1}{2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x \\ y \\ z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -2 \\ -2\sqrt{2} \\ 2 \\ -2\sqrt{2} \end{bmatrix};$$

Округлимо до 4 знаку після коми:

$$\begin{bmatrix} 0.5 & -0.5 & 0 \\ 0 & -0.7071 & -0.5 \\ 0.5 & 0.5 & 0 \\ 0 & -0.7071 & -0.5 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x \\ y \\ z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -2 \\ -2.8284 \\ 2 \\ -2.8284 \end{bmatrix};$$

Вирішимо методом Гауса:

$$\left[\begin{array}{cccc|c} 0.5 & -0.5 & 0 & 0 & -2 \\ 0 & -0.7071 & -0.5 & 0 & -2.8284 \\ 0.5 & 0.5 & 0 & 0 & 2 \\ 0 & -0.7071 & -0.5 & 0 & -2.8284 \end{array} \right];$$

1 рядок ділимо на 0.5:

$$\left[\begin{array}{cccc|c} 1 & -1 & 0 & 0 & -4 \\ 0 & -0.7071 & -0.5 & 0 & -2.8284 \\ 0.5 & 0.5 & 0 & 0 & 2 \\ 0 & -0.7071 & -0.5 & 0 & -2.8284 \end{array} \right];$$

Від 3 рядка віднімаємо 1, помножений на 0.5:

$$\left[\begin{array}{cccc|c} 1 & -1 & 0 & 0 & -4 \\ 0 & -0.7071 & -0.5 & 0 & -2.8284 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 4 \\ 0 & -0.7071 & -0.5 & 0 & -2.8284 \end{array} \right];$$

До 4 рядка додаємо 2 рядок:

$$\left[\begin{array}{cccc|c} 1 & -1 & 0 & 0 & -4 \\ 0 & -0.7071 & -0.5 & 0 & -2.8284 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 4 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{array} \right];$$

2 рядок ділимо на -0.7071 :

$$\left[\begin{array}{cccc|c} 1 & -1 & 0 & 0 & -4 \\ 0 & 1 & 0.5/0.7071 & 0 & 4 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 4 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{array} \right];$$

До 1 рядка додаємо 2, від 3 рядка віднімаємо 2:

$$\left[\begin{array}{cccc|c} 1 & 0 & 0.5/0.7071 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0.5/0.7071 & 0 & 4 \\ 0 & 0 & -0.5/0.7071 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{array} \right];$$

3 рядок ділимо на $0.5/0.7071$, до 1 та 2 рядків додаємо 3 рядок:

$$\left[\begin{array}{cccc|c} 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 4 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{array} \right];$$

Таким чином маємо відповідь:

$$\begin{bmatrix} x \\ y \\ z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ 4 \\ 0 \end{bmatrix};$$

Координати цілі $E(0;4;0)$.

3.2 Стеження за рухомою ціллю

3.2.1 Постановка задачі 2.

Нехай існує ціль E , напрямок та швидкість руху якої потрібно знайти (Рисунок 3.4).

Є початок координат точка O , та два БПЛА, позначені точками A та B .

$A_x, A_y, A_z, B_x, B_y, B_z$ – відповідно проекції точок A та B на осі координат в певний момент часу.

A_1, B_1 – проекції точок A та B на площину xOy .

Вектори $\overline{AA_1}$ та $\overline{BB_1}$ – напрямки руху БПЛА.

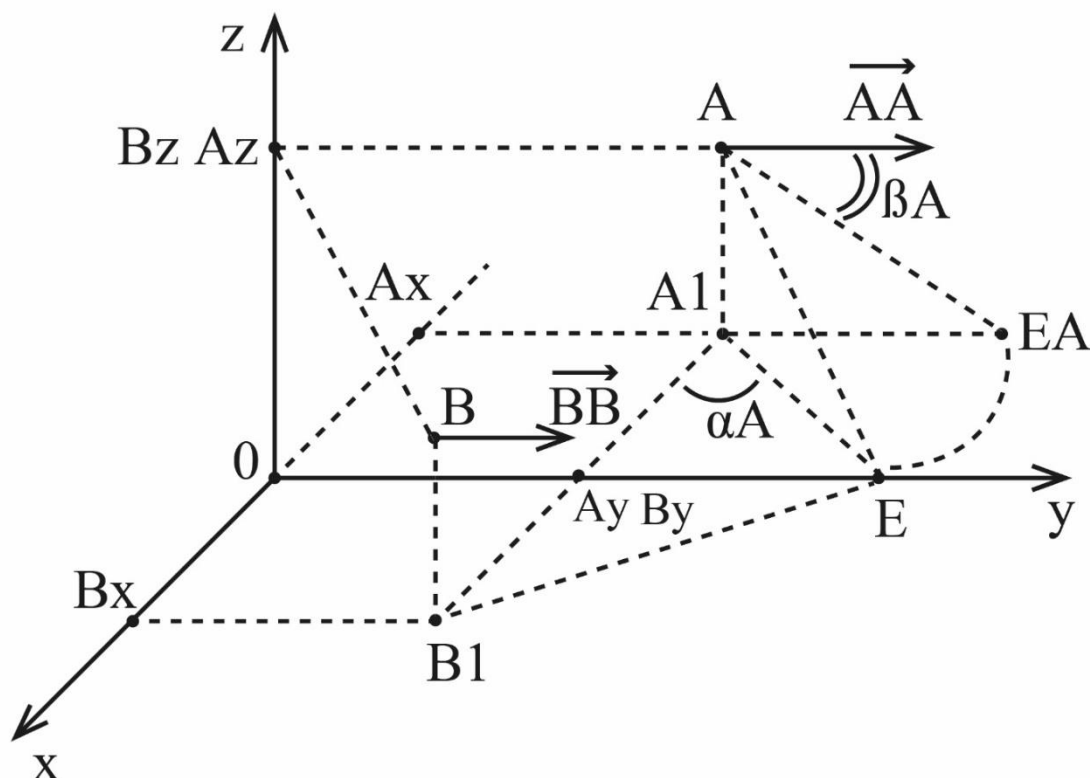


Рисунок 3.4 - Графічна модель відстеження рухомої точки E

Для реалістичності обчислень задачі, збільшимо масштаб з минулої задачі в 10 разів, тоді нехай координати виражаються в кілометрах.

Первинні координати позначимо індексом s, а вторинні e (start/end).

Є початок координат точка 0, та два БПЛА, позначені точками A та B, які мають в початковий момент часу спостереження координати: $A_s(-20;20;20\sqrt{2})$ та $B_s(20;20; 20\sqrt{2})$ та напрям польоту паралельно осі Y.

A_s, B_s, E_s – координати на початку спостереження.

A_e, B_e, E_e – координати в кінці спостереження.

Швидкість польоту обох БПЛА однакова і складає $V_{ay}=V_{by}=120$ км/год.

Час спостереження 1 хвилина.

В реальній ситуації кути видають датчики кутів повороту камери в БПЛА.

Проте зараз, при обчисленнях, доведеться визначити кути геометрично.

Початкові координати цілі $E_s(0;40;0)$, швидкість $V_{ey}=-60$ км/год (ці дані лише для визначення кутів і для інших обчислень не застосовуються).

3.2.2 Рішення задачі 2

Визначаємо вторинні координати БПЛА та цілі.

Рівняння координат:

$$A(A_{x1} + V_{ax} * t; A_{y1} + V_{ay} * t; A_{z1} + V_{az} * t);$$

$$B(B_{x1} + V_{bx} * t; B_{y1} + V_{by} * t; B_{z1} + V_{bz} * t);$$

$$E(E_{x1} + V_{ex} * t; E_{y1} + V_{ey} * t; E_{z1} + V_{ez} * t);$$

Де, A_{x1}, A_{y1}, A_{z1} - початкові координати БПЛА А по осям хуу,

B_{x1}, B_{y1}, B_{z1} - початкові координати БПЛА В,

E_{x1}, E_{y1}, E_{z1} – початкові координати цілі Е;

V_{ax}, V_{ay}, V_{az} – швидкості БПЛА А відносно осей координат,

V_{bx}, V_{by}, V_{bz} – швидкості БПЛА В відносно осей координат,

V_{ex}, V_{ey}, V_{ez} – швидкості цілі відносно осей координат.

Підставимо початкові координати та швидкості БПЛА та цілі в рівняння координат:

$$A(-20 + 0 * t; 20 + 120 * t; 20\sqrt{2} + 0 * t);$$

$$B(20 + 0 * t; 20 + 120 * t; 20\sqrt{2} + 0 * t);$$

$$E(0 + 0 * t; 40 - 60 * t; 0 + 0 * t);$$

Тоді вторинні координати виходять:

$$A_e(-20; 20+120*1/60; 20\sqrt{2}) = A_e(-20; 22; 20\sqrt{2})$$

$$B_e(20; 20+120*1/60; 20\sqrt{2}) = B_e(20; 22; 20\sqrt{2})$$

$$E_e(0; 40-60 \cdot 1/60; 0) = B_e(0; 39; 0).$$

Визначимо, які кути показують камери в БПЛА (З рисунка 3.4):

Початкові:

З трикутника A_1A_yE : A_1A_y дорівнює модулю координати x БПЛА A :
 $A_1A_y = 20$;

A_yE дорівнює різниці OE та OA_y , де OE -модуль координати y цілі E ,
 OA_y -модуль координати y БПЛА A :

$$A_yE_s = OE_s - OA_{ys} = 40 - 20 = 20;$$

Оскільки A_1A_y це перпендикуляр на вісь y , маємо прямокутний трикутник з рівними катетами - кут $\alpha_{As} = 45^\circ$.

З того самого трикутника A_1A_yE знаходимо гіпотенузу A_1E за теоремою Піфагора:

$$A_1E_s = \sqrt{A_1A_{ys}^2 + EA_{ys}^2} = \sqrt{20^2 + 20^2} = 20\sqrt{2}$$

Тепер з трикутника AA_1E : AA_1 перпендикуляр до площини XOY , отже він прямокутний.

AA_1 дорівнює координаті z БПЛА $A = 20\sqrt{2}$. Оскільки трикутник прямокутний та катети рівні, то кут $\beta_{As} = -45^\circ$. Мінус з'являється через протилежний напрямок до осі z .

Вторинні:

З трикутника A_1A_yE :

$$A_1A_{ye} = 20;$$

$$A_yE_e = OE_e - OA_{ye} = 39 - 22 = 17;$$

Тоді α_{Ae} знайдемо через зворотню функцію кута:

$$\alpha_{Ae} = \arctan\left(\frac{17}{20}\right) = \arctan(0,85) = 40.3645^\circ;$$

З того самого трикутника A_1AyE знаходимо гіпотенузу A_1E за теоремою Піфагора:

$$A_1E = \sqrt{A_1A_{ys}^2 + EA_{ys}^2} = \sqrt{20^2 + 17^2} = 26,2488;$$

Тепер з трикутника AA_1E :

$$AA_1e = 20\sqrt{2} = 28,2842;$$

Знаходимо кут A_1AE як зворотню функцію кута:

$$A_1AE = \arctan\left(\frac{26,2488}{28,2842}\right) = \arctan(0,928) = 42,8613^\circ;$$

Тоді β_{Ae} – суміжний з ним:

$$\beta_{Ae} = -(90^\circ - 42,8613^\circ) = -47,1387^\circ.$$

Аналогічно знаходимо кути для БПЛА В.

Первинні:

З трикутника B_1ByE : B_1By дорівнює модулю координати x БПЛА В:
 $B_1B_{ys} = 20;$

ByE дорівнює різниці OE та OB_{ys} , де OE -модуль координати y цілі Е,
 OB_{ys} -модуль координати y БПЛА В:

$$ByEs = OEs - OB_{ys} = 40 - 20 = 20;$$

Оскільки B_1B_y це перпендикуляр на вісь y , маємо прямокутний трикутник з рівними катетами - кут $EB_1B_{ys} = 45^\circ$.

Оскільки кут α_B рахується відносно осі x , то:

$$\alpha_{Bs} = 180^\circ - 45^\circ = 135^\circ;$$

З того самого трикутника B_1B_yE знаходимо гіпотенузу B_1E за теоремою Піфагора:

$$B_1Es = \sqrt{B_1By^2 + EBy^2} = \sqrt{20^2 + 20^2} = 20\sqrt{2}$$

Тепер з трикутника BB_1E : BB_1 перпендикуляр до площини XOY , отже він прямокутний. BB_1s дорівнює координаті z БПЛА $B = 20\sqrt{2}$.

Оскільки трикутник прямокутний та катети рівні, то кут $\beta_{Bs} = -45^\circ$. Мінус з'являється через протилежний напрямок до осі z .

Вторинні:

З трикутника B_1B_yE :

$$B_1Bye = 20;$$

$$ByEe = OEe - OBye = 39 - 22 = 17;$$

Тоді α_{Be} знайдемо як зворотню функцію кута:

$$EB_1B_{ys} = \arctan\left(\frac{17}{20}\right) = \arctan(0,85) = 40.3645^\circ;$$

Оскільки кут α_B рахується відносно осі x , то:

$$\alpha_{Be} = 180^\circ - 40,3645^\circ = 139,6355^\circ;$$

З того самого трикутника B1ByE знаходимо гіпотенузу B1E за теоремою Піфагора:

$$B1Ee = \sqrt{B1Bys^2 + EBys^2} = \sqrt{20^2 + 17^2} = 26,2488;$$

Тепер з трикутника BB1E:

$$BB1e = 20\sqrt{2} = 28,2842;$$

Знаходимо кут B1BE як зворотню функцію кута:

$$B1BE = \arctan\left(\frac{26,2488}{28,2842}\right) = \arctan(0,928) = 42.8613^\circ;$$

Тоді β_{Ae} – суміжний з ним:

$$\beta_{Ae} = -(90^\circ - 42.8613^\circ) = -47,1387^\circ;$$

Отже, кути які в реальній ситуації видають датчики кутів в БПЛА:

Початкові:

$\alpha_{As}=45^\circ$, $\beta_{As}=-45^\circ$ - в БПЛА А,

$\alpha_{Bs}=45^\circ$, $\beta_{Bs}=-45^\circ$ - в БПЛА В.

Вторинні:

$\alpha_{As}=40.3645^\circ$, $\beta_{As}=-47,1387^\circ$ - в БПЛА А,

$\alpha_{Bs}=139,6355^\circ$, $\beta_{Bs}=-47,1387^\circ$ - в БПЛА В.

В реальних умовах, ми маємо початкові та кінцеві координати обох БПЛА та кути спостереження цілі на початку та в кінці.

З цих даних по розробленому методу визначаємо координати цілі, її швидкість та напрямок руху, як в Задачі 1.

Початкові координати цілі:

БПЛА А має координати $A_s(-20;20;20\sqrt{2})$ та кути з датчиків $\alpha A_s=45^\circ$, $\beta A_s=-45^\circ$. БПЛА В - $B_s(20;20; 20\sqrt{2})$ та кути - $\alpha B_s=45^\circ$, $\beta B_s=-45^\circ$.

Як вже вище було обчислено в Задачі 1, початкові координати цілі виходять $E_s(0;40;0)$.

Вторинні координати цілі:

БПЛА А має координати $A_s(-20;22;20\sqrt{2})$ та кути з датчиків $\alpha A_s=40.3645^\circ$, $\beta A_s=-47,1387^\circ$.

БПЛА В - $B_s(20;22; 20\sqrt{2})$ та кути - $\alpha B_s=139,6355^\circ$, $\beta B_s=-47,1387^\circ$.

Знаходимо напрямні вектори прямих:

$$\overline{AE}_z = 1 * \sin(\beta A) = 1 * \sin(-47,1387^\circ) = -0,733 ;$$

$$\begin{aligned}\overline{AE}_x &= 1 * \cos(\beta A) * \cos(\alpha A) = 1 * \cos(-47,1387^\circ) * \cos(40,3645^\circ) = \\ &= 0,6802 * 0,7619 = 0,51824438;\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}\overline{AE}_y &= 1 * \cos(\beta A) * \sin(\alpha A) = 1 * \cos(-47,1387^\circ) * \sin(40,3645^\circ) = \\ &= 0,6802 * 0,6476 = 0,44049752;\end{aligned}$$

Координати напрямного вектора прямої:

$$\overline{AE} = (\overline{AE}_x; \overline{AE}_y; \overline{AE}_z) = (0,51824438; 0,44049752; -0,733)$$

Аналогічно для другого БПЛА:

$$\overline{BE}_z = 1 * \sin(\beta B) = 1 * \sin(-47,1387^\circ) = -0,733 ;$$

$$\begin{aligned}\overline{BE}_x &= 1 * \cos(\beta B) * \cos(\alpha B) = 1 * \cos(-47,1387^\circ) * \cos(139,6355^\circ) = \\ &= 0,6802 * (-0,7619) = -0,51824438;\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}\overline{BE}_y &= 1 * \cos(\beta B) * \sin(\alpha B) = 1 * \cos(-47,1387^\circ) * \sin(139,6355^\circ) = \\ &= 0,6802 * 0,6476 = 0,44049752;\end{aligned}$$

Координати напрямного вектора прямої:

$$\overline{BE} = (-0,51824438; 0,44049752; -0,733);$$

Підставляємо координати БПЛА та напрямних векторів в канонічні рівняння прямих:

$$\begin{aligned} AE: \frac{x - Ax}{\overline{AEx}} &= \frac{y - Ay}{\overline{AEy}} = \frac{z - Az}{\overline{AEz}} = \\ &= \frac{x + 20}{0,51824438} = \frac{y - 22}{0,44049752} = \frac{z - 28,2842}{-0,733}; \end{aligned}$$

Та для другого БПЛА:

$$\begin{aligned} BE: \frac{x - Bx}{\overline{BEx}} &= \frac{y - By}{\overline{BEy}} = \frac{z - Bz}{\overline{BEz}} = \\ &= \frac{x - 20}{-0,51824438} = \frac{y - 22}{0,44049752} = \frac{z - 28,2842}{-0,733} \end{aligned}$$

Зводимо в систему рівнянь:

$$\begin{aligned} \begin{bmatrix} p1 & -m1 & 0 \\ 0 & l1 & -p1 \\ p2 & -m2 & 0 \\ 0 & l2 & -p2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x \\ y \\ z \end{bmatrix} &= \begin{bmatrix} p1 * x1 - m1 * y1 \\ l1 * y1 - p1 * z1 \\ p2 * x2 - m2 * y2 \\ l2 * y2 - p2 * z2 \end{bmatrix}; \\ \begin{bmatrix} 0,44049752 - 0,51824438 & 0 \\ 0 & -0,733 & -0,44049752 \\ 0,44049752 & 0,51824438 & 0 \\ 0 & -0,733 & -0,44049752 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x \\ y \\ z \end{bmatrix} &= \\ = \begin{bmatrix} 0,44049752 * (-20) - 0,51824438 * 22 \\ (-0,733) * 22 - 0,44049752 * 28,2842 \\ 0,44049752 * 20 + 0,51824438 * 22 \\ (-0,733) * 22 - 0,44049752 * 28,2842 \end{bmatrix}; \end{aligned}$$

$$\begin{bmatrix} 0,44049752 & -0,51824438 & 0 \\ 0 & -0,733 & -0,44049752 \\ 0,44049752 & 0,51824438 & 0 \\ 0 & -0,733 & -0,44049752 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x \\ y \\ z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -20,21132676 \\ -28,58511995 \\ 20,21132676 \\ -28,58511995 \end{bmatrix};$$

Вирішимо методом Гауса:

$$\left[\begin{array}{ccc|c} 0,44049752 & -0,51824438 & 0 & -20,21132676 \\ 0 & -0,733 & -0,44049752 & -28,58511995 \\ 0,44049752 & 0,51824438 & 0 & 20,21132676 \\ 0 & -0,733 & -0,44049752 & -28,58511995 \end{array} \right];$$

Від 3 рядка віднімаємо 1 рядок:

$$\left[\begin{array}{ccc|c} 0,44049752 & -0,51824438 & 0 & -20,21132676 \\ 0 & -0,733 & -0,44049752 & -28,58511995 \\ 0 & 1,03648876 & 0 & 40,42265352 \\ 0 & -0,733 & -0,44049752 & -28,58511995 \end{array} \right];$$

1 рядок ділимо на 0,44049752:

$$\left[\begin{array}{ccc|c} 1 & -1,17649783 & 0 & -45,88295244 \\ 0 & -0,733 & -0,44049752 & -28,58511995 \\ 0 & 1,03648876 & 0 & 40,42265352 \\ 0 & -0,733 & -0,44049752 & -28,58511995 \end{array} \right];$$

2 рядок ділимо на -0.733:

$$\left[\begin{array}{ccc|c} 1 & -1,17649783 & 0 & -45,88295244 \\ 0 & 1 & 0,6009516 & 38,99743513 \\ 0 & 1,03648876 & 0 & 40,42265352 \\ 0 & -0,733 & -0,44049752 & -28,58511995 \end{array} \right];$$

До 1 рядка додаємо 2 рядок помножений на 1,17649783, від 3 рядка віднімаємо 2 рядок помножений на 1,03648876, до 4 рядка додаємо 2 рядок помножений на 0,733:

$$\left[\begin{array}{cccc|c} 1 & 0 & 0,70701825 & 0 & -0,00255432 \\ 0 & 1 & 0,6009516 & 0 & 38,99743513 \\ 0 & 0 & -0,62287957 & 0 & 0,00225034 \\ & 0 & 0 & 0 & 0 \end{array} \right];$$

3 рядок ділимо на -0,62287957:

$$\left[\begin{array}{cccc|c} 1 & 0 & 0,70701825 & 0 & -0,00255432 \\ 0 & 1 & 0,6009516 & 0 & 38,99743513 \\ & 0 & 0 & 1 & 0 \\ & 0 & 0 & 0 & 0 \end{array} \right];$$

Від 1 рядка віднімаємо 3 рядок помножений на 0,70701825, від 2 рядка віднімаємо 3 рядок помножений на 0,6009516:

$$\left[\begin{array}{cccc|c} 1 & 0 & 0 & 0 & 3,097 * 10^{-15} \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 38,9996 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0,0036128 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{array} \right];$$

Маємо похибку в 0,003, яка обумовлена округленнями тригонометричних функцій кутів повороту камер БПЛА до 4 знаку після коми.

Округлюємо результат і маємо вторинні координати цілі: $E_e(0;39;0)$.

Знаходимо **напрямок руху** як вектор різниці координат початку та кінця спостереження:

$$\overline{EE} = \overline{(0 - 0; 39 - 40; 0 - 0)} = \overline{(0; -1; 0)};$$

Щоб обчислити швидкість, використовуємо довжину вектора (його модуль) – квадратний корень із суми квадратів його координат, як пройдену відстань цілі та час спостереження – $t = 1$ хвилина = $\frac{1}{60}$ години:

$$|\overline{EE}| = \sqrt{0^2 + (-1)^2 + 0^2} = 1;$$

Тоді швидкість цілі:

$$V_E = \frac{|\overline{EE}|}{t} = \frac{1}{\frac{1}{60}} = 60 \text{ (км/год)}.$$

3.3 Підсумки розробленого методу

Маючи координати обох БПЛА у їх відносній системі координат та кути напрямку на ціль з датчиків, можна обчислити координати цілі за формулами, розв'язавши будь яким відомим методом СЛАР, наприклад методом Гауса:

$$\begin{bmatrix} p1 & -m1 & 0 \\ 0 & l1 & -p1 \\ p2 & -m2 & 0 \\ 0 & l2 & -p2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x \\ y \\ z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} p1 * x1 - m1 * y1 \\ l1 * y1 - p1 * z1 \\ p2 * x2 - m2 * y2 \\ l2 * y2 - p2 * z2 \end{bmatrix};$$

Де:

$(x1, y1, z1)$ та $(x2, y2, z2)$ – координати БПЛА А та В;

$(m1; p1; l1)$ та $(m2; p2; l2)$ напрямні вектори прямих БПЛА-ціль, які обчислюються за формулами:

$$l1 = 1 * \sin(\beta_A);$$

$$m1 = 1 * \cos(\beta_A) * \cos(\alpha_A);$$

$$p1 = 1 * \cos(\beta_A) * \sin(\alpha_A);$$

$$l_2 = 1 * \sin(\beta_B);$$

$$m_2 = 1 * \cos(\beta_B) * \cos(\alpha_B);$$

$$p_2 = 1 * \cos(\beta_B) * \sin(\alpha_B);$$

Для вирішення отриманої системи можна застосувати будь який з відомих методів вирішення СЛАР, наприклад метод Гауса. Якщо система виявиться несумісною – прямі не перетинаються і БПЛА спостерігають різні цілі, якщо система має безліч рішень – прямі співпадають (проте в заданій задачі така ситуація неможлива). Єдиний розв’язок системи дає точку перетину прямих і, відповідно, координати цілі.

Для визначення напрямку руху і швидкості цілі – робиться декілька (мінімум 2) розрахунки координат за наведеним методом та знаходиться різниця координат між ними. Таким чином буде знайдено координати цілі в певні моменти часу. Зайшовши відстань між ними і поділивши її на час спостереження отримується швидкість та напрямок руху цілі.

4 РОЗРОБЛЕННЯ ЦИФРОВОЇ МОДЕЛІ КЕРУВАННЯ ДВИГУНОМ, ЯКИЙ ПОВЕРТАЄ КАМЕРУ В БПЛА

4.1 Аналіз вхідної системи

В розробленому в Розділі 3 методі використовуються координати БПЛА та кути повороту камери з датчиків повороту. Точність і швидкість повороту камери впливає на якість та точність обчислення координат цілі.

Блок камер Bayraktar TB2 наведено на Рисунку 4.1. Він містить інфрачервону, нічну та звичайну камери високої роздільної здатності, за допомогою яких є можливість спостерігати за цілями на відстані десятки кілометрів.



Рисунок 4.1 – Блок камер БПЛА Bayraktar TB2

Для керування такими блоками по вертикалі і горизонталі використовуються електродвигуни постійного струму.

Щоб збільшити швидкість і точність повороту блоку камер, розробимо регулюючий пристрій декількома відомими методами з Сучасної Теорії Керування і порівняємо їх якість та оберемо найкращий.

Передавальна функція - математичний опис динамічної системи. Використовується в теорії управління, зв'язку та цифрової обробки сигналів. Являє собою диференціальний оператор, що виражає зв'язок між входом та виходом лінійної стаціонарної системи. Знаючи вхідний сигнал системи та передавальну функцію, можна відновити вихідний сигнал[23].

У теорії управління передавальна функція безперервної системи є відношенням перетворення Лапласа вихідного сигналу до перетворення Лапласа вхідного сигналу за нульових початкових умов.

Оскільки передавальна функція системи повністю визначає її динамічні властивості, то початкова задача розрахунку системи автоматичного керування зводиться до визначення її передавальної функції.

Перетворення Лапласа — інтегральне перетворення, що пов'язує функцію $F(s)$ комплексної змінної (зображення) з функцією $f(x)$ матеріальної змінної (оригінал). З його допомогою досліджуються властивості динамічних систем та вирішуються диференціальні та інтегральні рівняння [24].

Однією з особливостей перетворення Лапласа, які визначили його широке поширення в наукових та інженерних розрахунках, є те, що багатьом співвідношенням та операціям над оригіналами відповідають простіші співвідношення над їхніми зображеннями. Так, згортка двох функцій зводиться у просторі зображень до операції множення, а лінійні диференціальні рівняння стають алгебраїчними.

Передавальна функція електродвигуна, який використовується в розглянутому БПЛА має наступний вигляд:

$$W = \frac{1,49}{0,1s^3 + 0,24s^2 + s};$$

Дискретною передавальною функцією називається відношення дискретно-перетворених по Лапласу (z-зображень) вихідної величини, до вхідної величини за нульових початкових умов.

Z-перетворенням (перетворенням Лорана) називають згортання вихідного сигналу, заданого послідовністю дійсних чисел у часовій області, в аналітичну функцію комплексної частоти. Якщо сигнал представляє імпульсну характеристику лінійної системи, то коефіцієнти Z-перетворення показують відгук системи на комплексні експоненти, тобто на гармонійні осциляції з різними частотами та швидкостями наростання/загасання.

За допомогою програмного пакету MATLAB (R2018a) задаємо передавальну функцію та знаходимо до неї дискретну передавальну функцію шляхом z-перетворення (Рисунок 4.2):

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

w =

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

Continuous-time transfer function.

>> wz=c2d(w, 0.1)

wz =

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

Sample time: 0.1 seconds
Discrete-time transfer function.
```

Рисунок 4.2 – Виконання z-перетворення в пакеті MATLAB

Промодельюємо отримані передавальні функції та визначимо адекватність моделей (Рисунки 4.3-4.4):

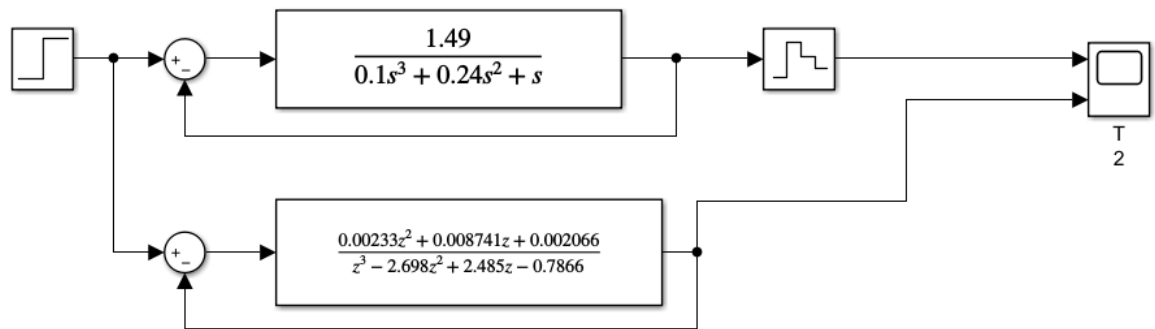


Рисунок 4.3 – Аналіз адекватності розрахованих моделей цифрових систем

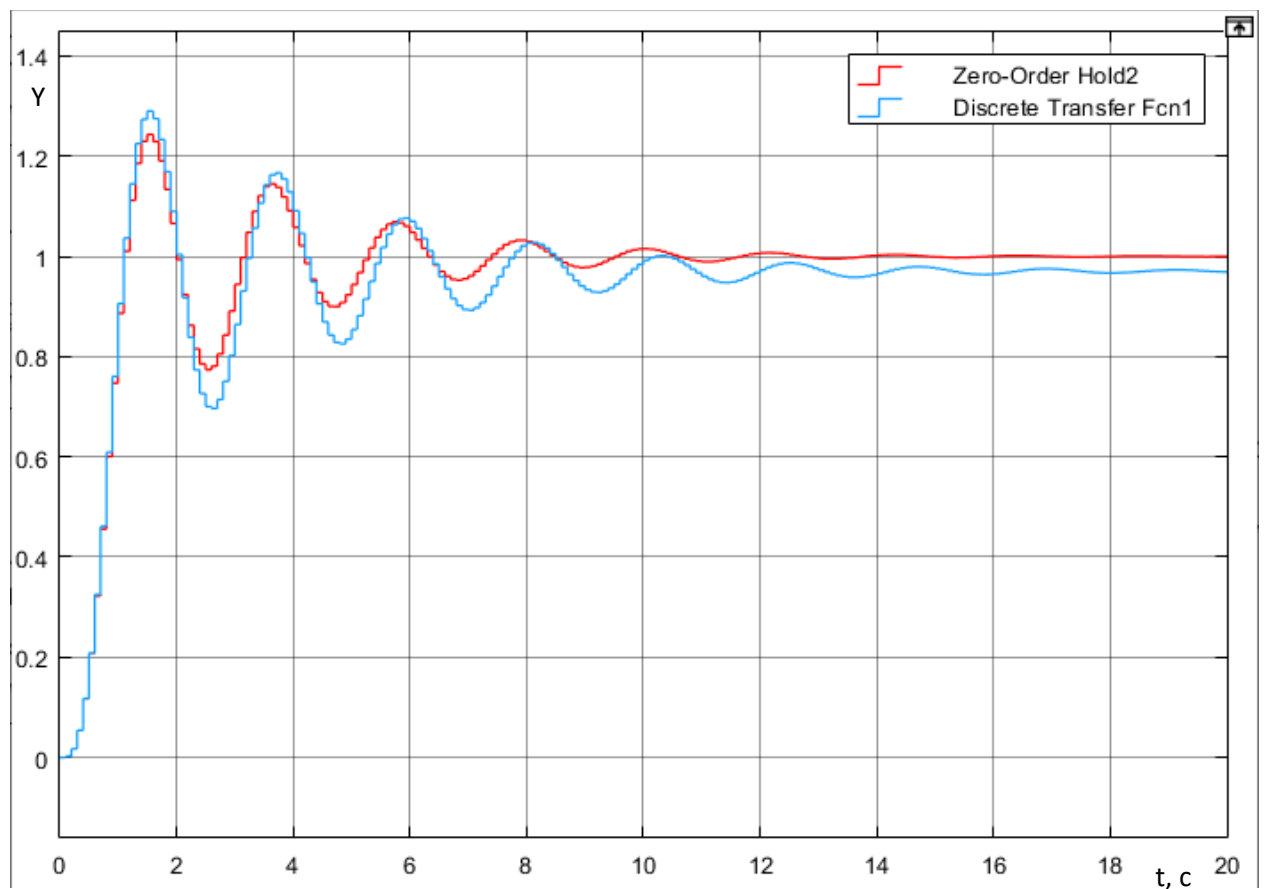


Рисунок 4.4 – Графіки перехідних процесів цифрових систем

Як видно з графіків перехідних процесів, модель цифрової системи, яка визначена за допомогою пакету Matlab, має усталено помилку. Це обумовлено тим, що розрахунки за допомогою пакету Matlab виконуються без урахування астатизму досліджуваних систем.

Астатизм – наявність інтегруючої ланки в системі, тобто наявність в знаменнику передавальної функції кореня рівного нулю.

Простір станів — в теорії управління один із основних методів опису поведінки динамічної системи. Рух системи у просторі станів відбиває зміна її станів.

Стани системи – абстрактні змінні, які відображають поведінку системи.

У просторі станів створюється модель динамічної системи, що включає набір змінних входу, виходу та стану, пов'язаних між собою диференціальними рівняннями першого порядку, що записуються в матричній формі. На відміну від опису у вигляді передавальної функції та інших методів частотної області, простір станів дозволяє працювати не тільки з лінійними системами та початковими нульовими умовами.

$$\dot{x} = A(t) * x(t) + B(t) * u(t);$$

$$y = C(t) * x(t) + D(t) * u(t);$$

Де, x - вектор стану, елементи якого називають станами системи

y - вектор виходу,

u - вектор управління,

A - матриця системи,

B - матриця управління,

C - матриця виходу,

D - матриця прямого зв'язку.

Часто матриця D є нульовою, це означає, що в системі немає явного прямого зв'язку.

Далі виконуємо перехід в простір станів для отриманої дискретної передавальної функції (рисунок 4.5), для отримання матриць:

```
>> 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

Sample time: 0.1 seconds
Discrete-time state-space model.
```

Рисунок 4.5 – Отримані матриці простору станів

Виконаємо аналіз керованості та спостережуваності для досліджуваної системи.

Керованість - одна з найважливіших властивостей системи управління та об'єкта управління, що описує можливість перевести систему з одного стану в інший. Дослідження системи управління на керованість одна із важливих кроків у синтезі управляючих контролерів.

Лінійна система з диференціальним рівнянням вважається повністю керованою, тоді і тільки тоді, коли вона може бути переведена з будь-якого початкового стану $x(t_0)$ в будь-який кінцевий стан $x(T)$ за кінцевий час $T-t_0$.

Система керована тоді, коли матриця керованості P ненульова та має n лінійно незалежних стовпців, де n – порядок системи:

$$P = [B \ AB \ A^2B \ \dots \ A^{(n-1)}B];$$

Де A та B матриці простору станів системи.

Визначаємо керованість отриманої системи (рисунок 4.6):

```
>> P=[ssz.B ssz.A*ssz.B ssz.A*ssz.A*ssz.B]

P =

    0.1250    0.3373    0.5996
         0    0.2500    0.6746
         0         0    0.1250

>> det(P)

ans =

    0.0039
```

Рисунок 4.6 – Визначення матриці керованості системи

Оскільки матриця P містить n лінійно незалежних стовпців (визначник не дорівнює нулю) – система є повністю керованою.

Спостережуваність системи.

Часто при інженерному підході до синтезу систем зі зворотним зв'язком неможливо реально виміряти компоненти вектора $X(t)$ (деякі з них можуть не мати фізичного змісту). У цих умовах виникає необхідність за

спостереженнями виходу об'єкта $y(t)$ і його входом у певний кінцевий момент часу відновити початковий стан об'єкта $x(t_0)$. Можливість такого відновлення називається спостережуваністю.

Якщо кожен стан $x(t)$ у будь-який момент часу є спостережуваним, то об'єкт за Калманом називається повністю спостережуваним.

Проблема спостережуваності найбільш просто вирішується для лінійних стаціонарних систем.

Із цією метою на підставі рівнянь стану і виходу складається матриця спостережуваності:

$$H = [C^T \ A^T C^T \ A^{T^2} C^T \ \dots \ A^{T(n-1)} C^T]^T;$$

Об'єкт є спостережуваним тоді і тільки тоді, коли матриця спостережуваності ненульова та має n лінійно незалежних стовпців де n – порядок системи.

Дослідимо систему на спостережуваність, визначивши матрицю спостережуваності (Рисунок 4.7):

```
>> H=transp([transp(ssz.C) transp(ssz.A)*transp(ssz.C) transp(ssz.A)*transp(ssz.A)*transp(ssz.C)])  
H =  
  
    0.0186    0.0350    0.0165  
    0.1202   -0.0149    0.0147  
    0.2946   -0.1421    0.0946  
  
>> det(H)  
ans =  
  
-4.4367e-04
```

Рисунок 4.7 – Визначення матриці керованості системи

Оскільки матриця H містить n лінійно незалежних стовпців (визначник не дорівнює нулю) – система є повністю спостережуваною.

Тепер порівняємо отриману модель простору станів з передавальними функціями (Рисунки 4.8-4.9):

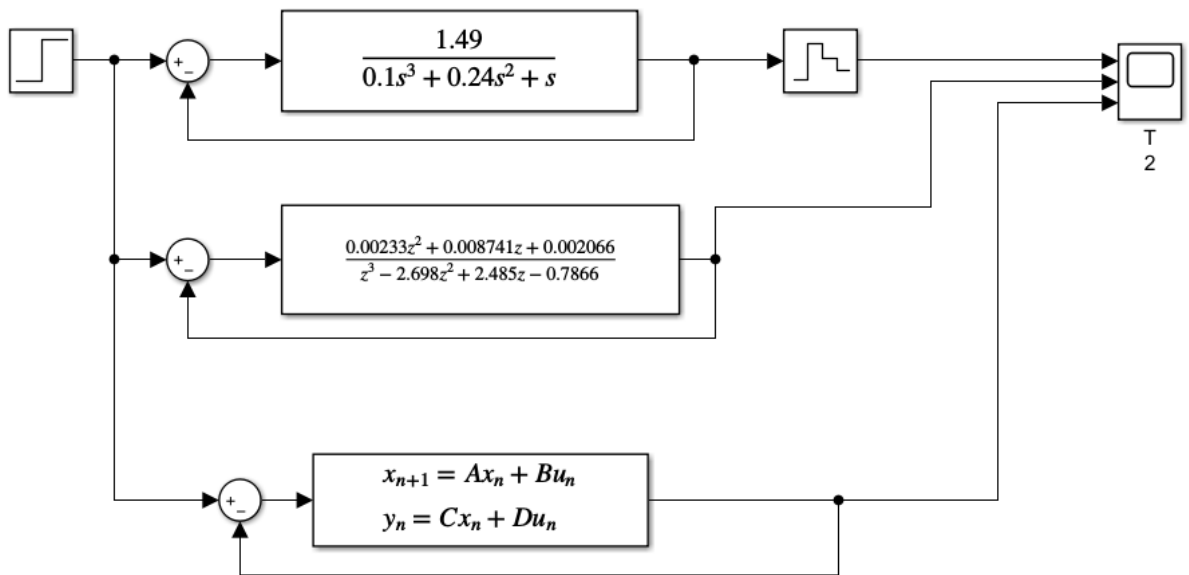


Рисунок 4.8 – Порівняння моделі простору станів з передавальними функціями

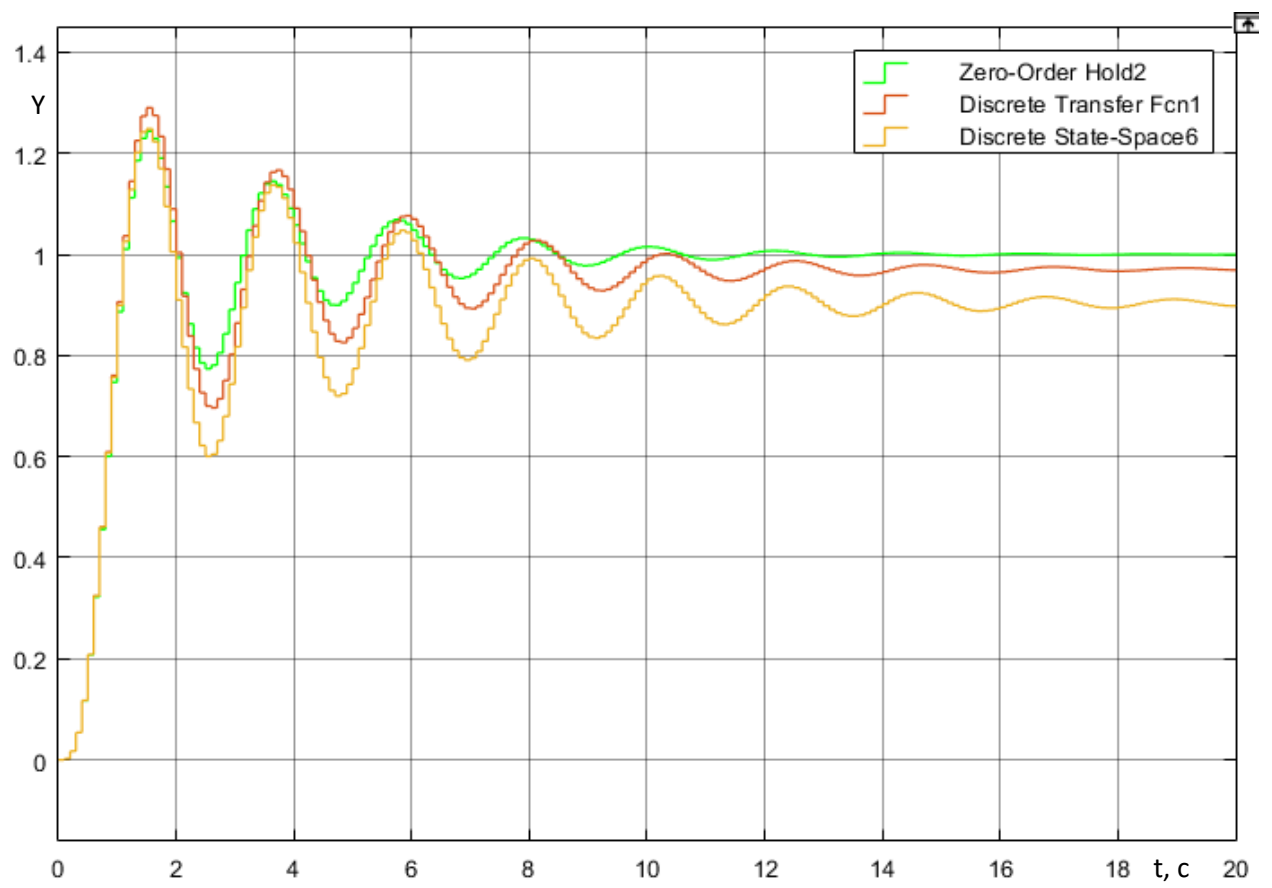


Рисунок 4.9 - Графіки перехідних процесів порівнюваних систем

4.2 Синтез цифрових систем зі зворотнім зв'язком за станом (з розрахунком бажаних коренів характеристичного рівняння.

Бажане характеристичне рівняння має вигляд[25]:

$$\begin{aligned}(z - d)(z - e)(z - f) &= (z - d)(z^2 - (e + f)z + ef) \\&= z^3 - (e + f)z^2 + efz - dz^2 + (e + f)dz - def \\&= z^3 - (d + e + f)z^2 + (ef + de + df)z - def;\end{aligned}$$

Визначимо коефіцієнти бажаного характеристичного рівняння. Для цього залишимо чисельник дискретної передавальної функції, а в знаменнику підберемо коефіцієнти за допомогою MATLAB Simulink (Рисунки 4.10-4.11):

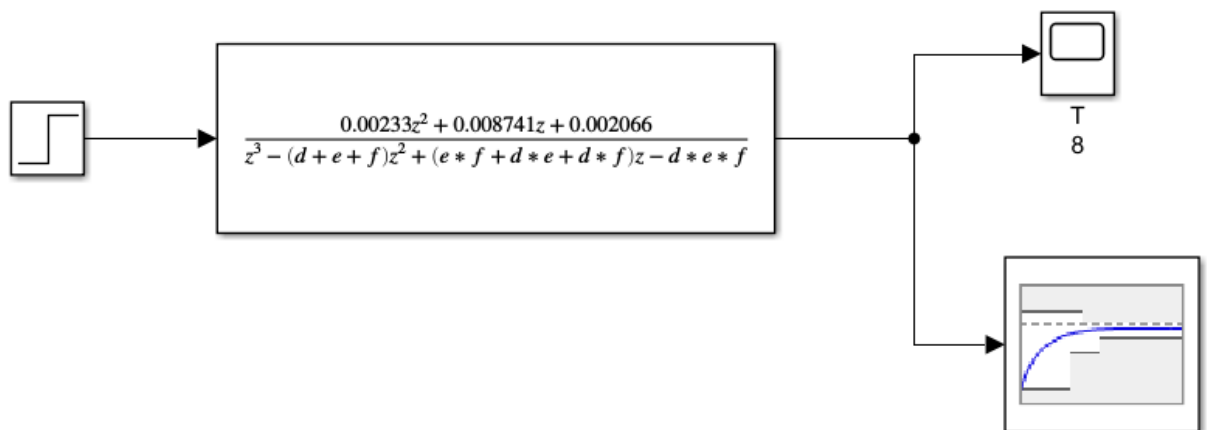


Рисунок 4.10 – Модель визначення бажаних коефіцієнтів характеристичного рівняння

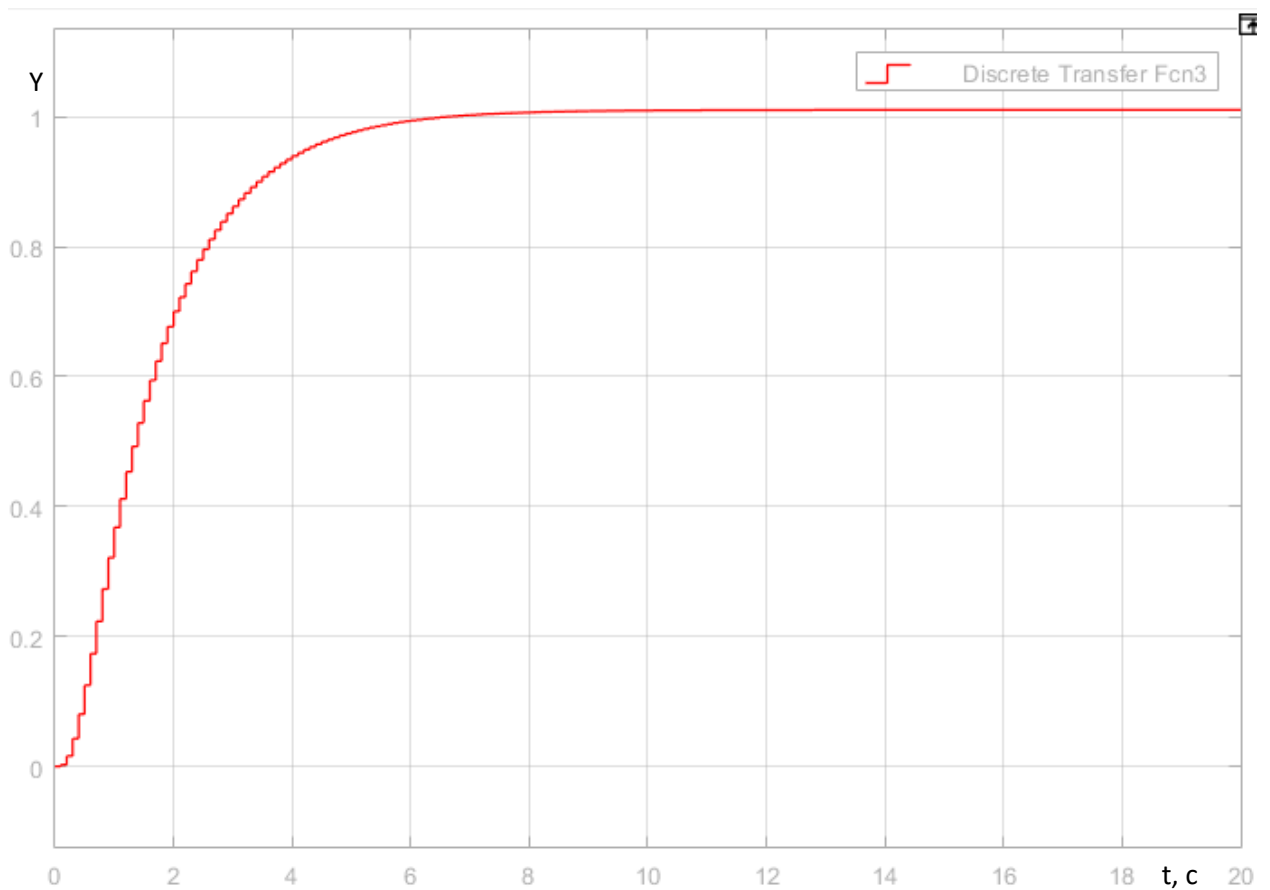


Рисунок 4.11 – Бажаний перехідний процес

Отримані бажані корені:

$$d = 0,5114;$$

$$e = 0,6257;$$

$$f = 0,9289;$$

Бажане характеристичне рівняння має вигляд:

$$\begin{aligned} (z - 0,5114)(z - 0,6257)(z - 0,9289) \\ = z^3 - 2,066z^2 + 1,37623517z - 0,297232190122; \end{aligned}$$

Тепер визначимо реальне характеристичне рівняння системи (Рисунок 4.12):

$$D = ZE - A + BK;$$

$$ZE = z * E(n);$$

Де, A та B – матриці простору станів,

E(n) – одинична матриця порядку n.

```
>> D=Z-A+BK

D =

[ k1/8 + z - 3038196432986675/1125899906842624, k2/8 + 5595921523277391/4503599627370496, k3/8 - 7085313
[
-2,
z,
[
0,
-1/2,
```

```
>> det(D)

ans =

k3/8 + (5595921523277391*z)/2251799813685248 + (k2*z)/4 + (k1*z^2)/8 - (3038196432986675*z^2)/1125899906
```

Рисунок 4.12 – Отримання характеристичного рівняння

Таким чином маємо:

$$D(z) = z^3 + (0.125k_1 - 2,6984605065886624331028542655986)z^2 + (0.25k_2 + 2,4850883676552153467298467148794)z + (0.125k_3 - 0,78662786106655302464929491179646);$$

Прирівняємо коефіцієнти в бажаному та реальному характеристичних рівняннях та визначимо коефіцієнти зворотнього зв'язку:

$$\begin{cases} 0.125k_1 - 2,6984605065886624331028542655986 = -2,066; \\ 0.25k_2 + 2,4850883676552153467298467148794 = 1,37623517; \\ 0.125k_3 - 0,78662786106655302464929491179646 = -0,297232190122; \end{cases}$$

$$\begin{cases} 0.125k_1 = 0,6324605065886624331028542655986; \\ 0.25k_2 = -1,1088531976552153467298467148794; \\ 0.125k_3 = 0,48939567094455302464929491179646; \end{cases}$$

$$\begin{cases} k1 = 5,0596840527092994648228341247888; \\ k2 = -4,4354127906208613869193868595176; \\ k3 = 3,9151653675564241971943592943717; \end{cases}$$

Використаємо отримані коефіцієнти зворотнього зв'язку в системі керування та порівняємо з бажаною системою (Рисунки 4.13-4.14):

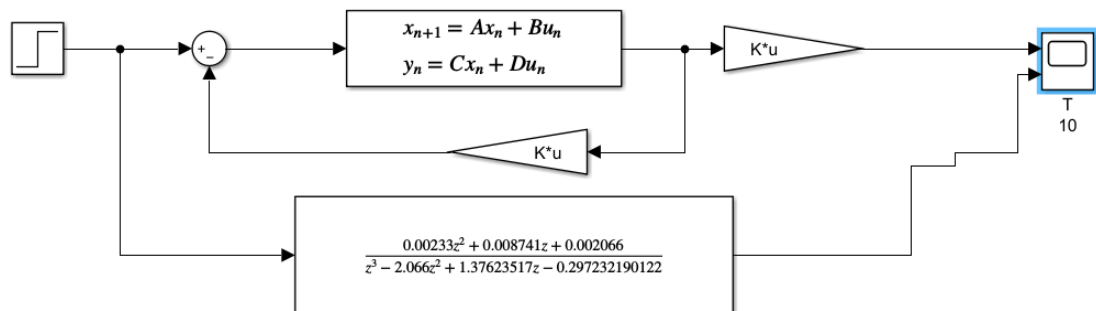


Рисунок 4.13 – Модель порівняння системи керування з бажаною системою

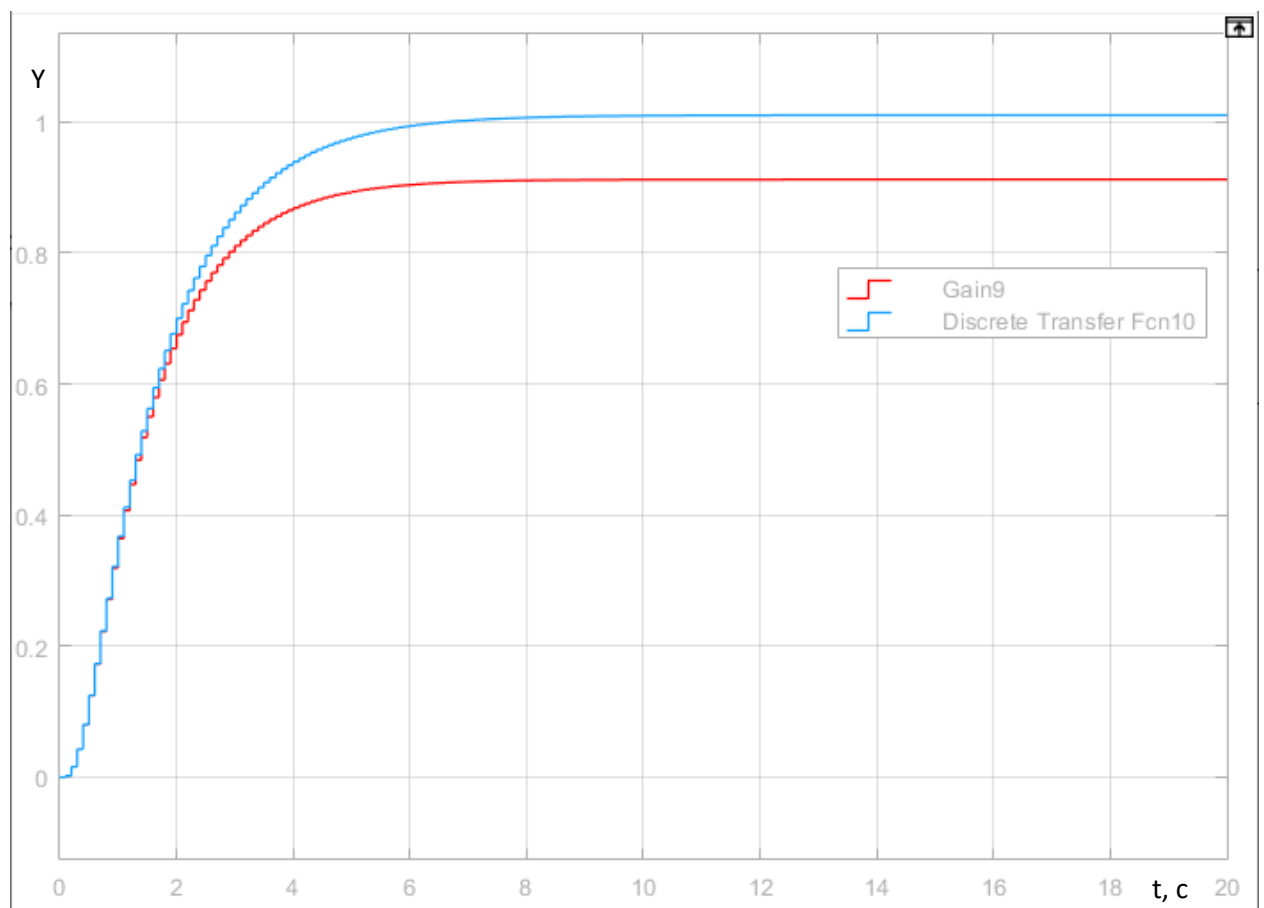


Рисунок 4.14 – Графіки порівняння перехідних процесів отриманої системи та бажаної

Як видно з графіків перехідних процесів, синтезована цифрова система хоча і дає нульове перерегулювання та заданий час регулювання, але спостерігається помилка системи, яка дорівнює 0,1.

Якщо всі змінні стану об'єкта являють собою фізичні сигнали, які можна виміряти, то синтез замкненої системи із заданим розподілом коренів не створює проблем.

Однак у більшості випадків доступна до вимірювання лише частина складових вектора станів. Крім того, використання вимірювальних приладів не завжди є можливим. Деякі прилади описуються складними рівняннями, що істотно ускладнюють і міняють структуру об'єкта управління.

Це, у свою чергу, породжує труднощі вирішення проблеми про розміщення коренів замкнутої системи в необхідні положення.

Всі ці обставини вказують на необхідність способів, які дозволили б побічно оцінити змінні стану, мало доступні або зовсім недоступні прямому вимірюванню.

Такі способи існують і засновані на використанні рівнянь руху об'єкта. При конструюванні ці рівняння припускаються відомими.

Пристрої для виміру координат об'єкта, в основу яких покладені рівняння цього об'єкта називаються спостерігаючими пристроями.

Визначимо матрицю коефіцієнтів спостерігаючого регулюючого пристрою за формулою (Рисунок 4.15):

$$H = (\text{place}(A^T, C^T, P))^T;$$

Де A , C – матриці простору станів системи,

P – матриця коренів бажаного характеристичного рівняння зі зворотніми знаками.

```
>> H=transp(place(transp(ssz.A),transp(ssz.C),[-d,-e,-f]))
```

H =

106.6622

77.0722

4.9402

Рисунок 4.15 – Визначення коефіцієнтів спостерігаючого регулюючого пристрою

Тепер розрахуємо регулюючий пристрій за формулами:

$$\begin{cases} x_p[k+1] = A_p * x_p[k] + B_p * u_p[k] \\ u_p[k] = C_p * x_p[k] + D_p * u_p[k] \end{cases};$$

Де x_p – вектор станів регулюючого пристрою

u_p – вектор виходу

Матриці A_p , B_p , C_p , D_p :

$$\begin{cases} A_p = [A - H * C - B * K_p] \\ B_p = [B \ H] \\ C_p = [-K_p] \\ D_p = [1 \ 0] \end{cases};$$

$$K_p = [k_1 \ k_2 \ k_3]$$

Де A , B , C , D – матриці простору станів системи (Рисунок 4.16):

```
>> Ap=ssz.A-H*ssz.C-ssz.B*[5.0596840527092994648228341247888 -4.4354127906208613869193868595176 3.9151616!

Ap =

    0.0780    -4.4175    -1.4656
    0.5635    -2.6948    -1.2738
   -0.0921     0.3273    -0.0817

>> Bp=[ssz.B H]

Bp =

    0.1250   106.6622
         0    77.0722
         0     4.9402

>> Cp=[-5.0596840527092994648228341247888  4.4354127906208613869193868595176 -3.915165367556424197194359!

Cp =

   -5.0597    4.4354   -3.9152
```

Рисунок 4.16 – Розрахунок матриць регулюючого пристрою

Розробимо модель об'єднаної цифрової системи, яка у регуляторі виконує функції і спостереження і керування. Модель представлена на Рисунок 4.17 і відповідно перехідний процес на Рисунок 4.18.

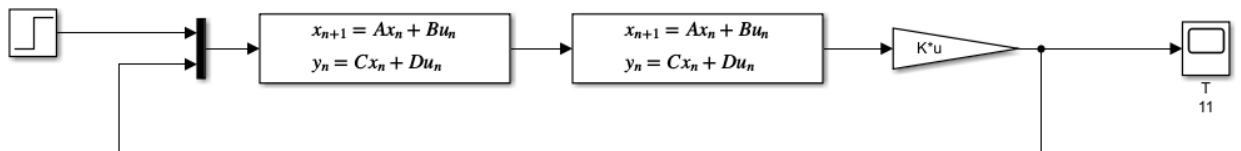


Рисунок 4.17 – Модель об'єднаної цифрової системи

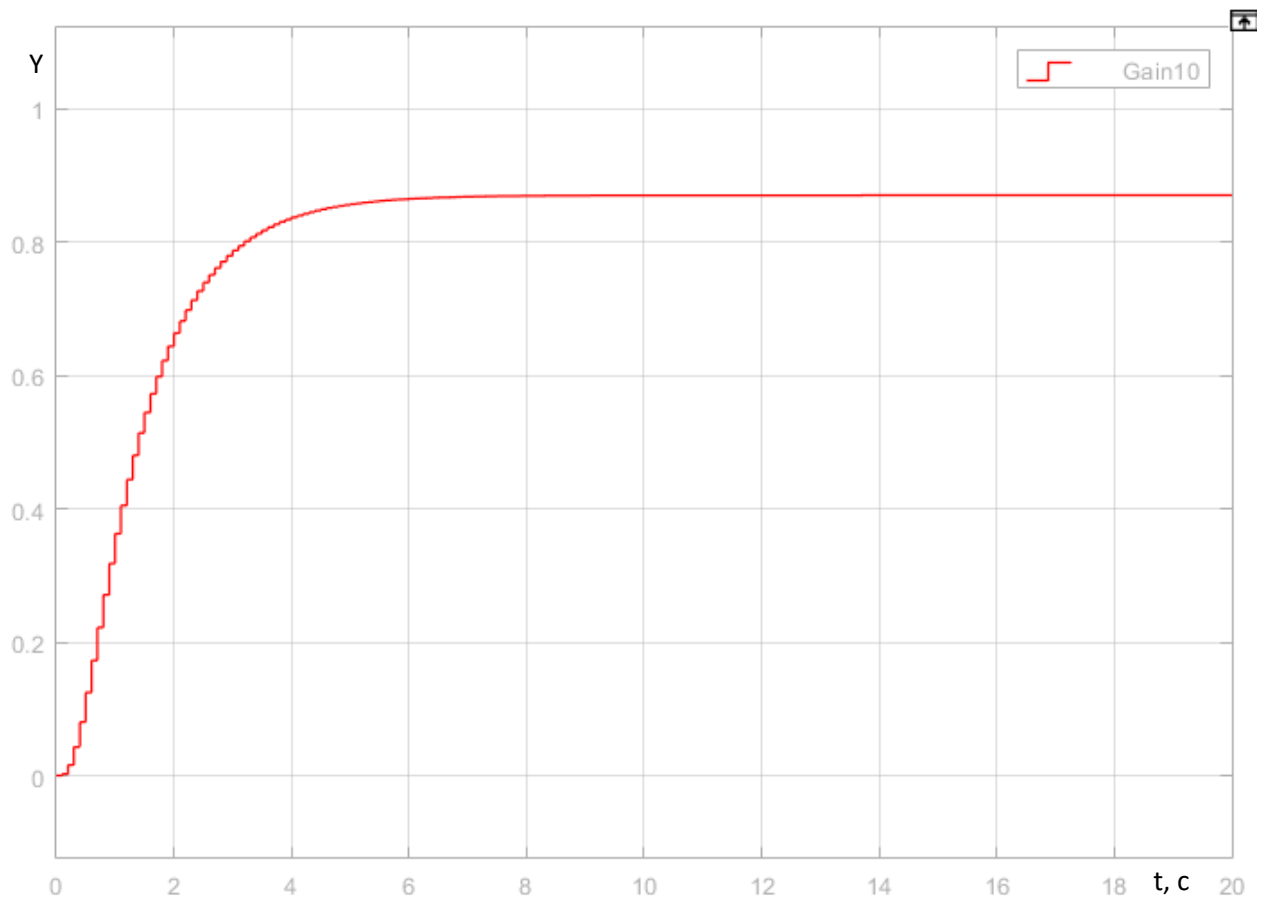


Рисунок 4.18 – Графік перехідного процесу системи з регулятором

Як бачимо, система працює без перерегулювання, але з усталеною похибкою. Для її прибирання додамо підсилювач (Рисунок 4.19-4.20):

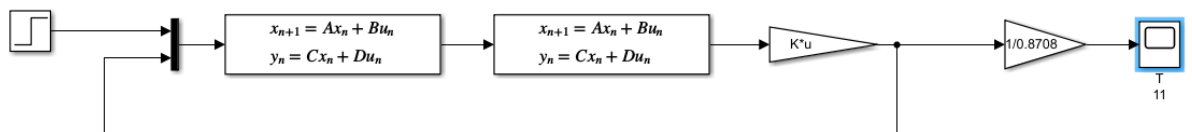


Рисунок 4.19 – Покращена модель розробленої системи

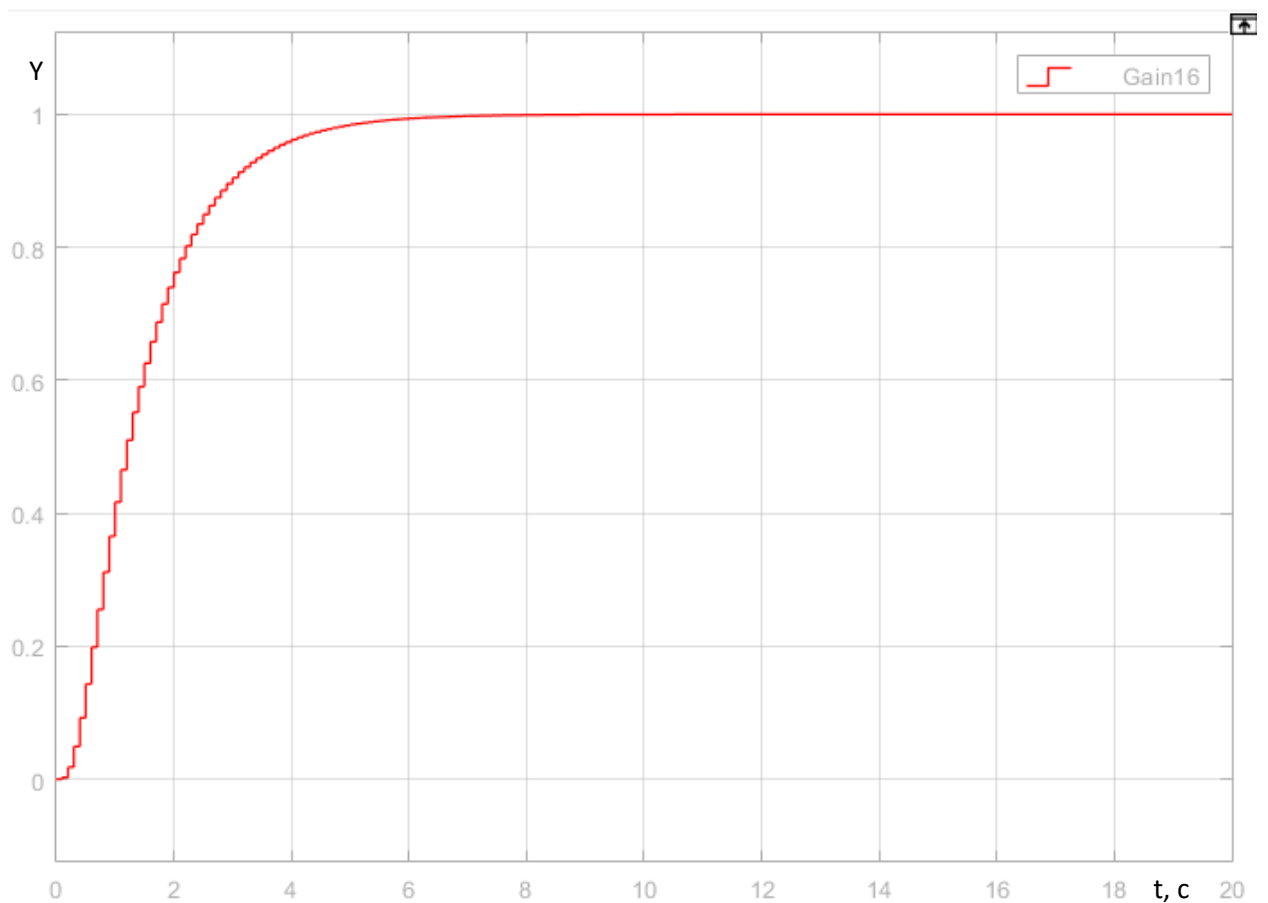


Рисунок 4.20 – Графік перехідного процесу розробленої системи

В отриманій системі:

Похибка 0%;

Перерегулювання 0%;

Час перехідного процесу 3,8 секунди.

Таким чином виходить, що на 1 радіан (приблизно 57 градусів) камера повертається за 3,8 секунди, що є прийнятним часом для такої системи.

4.3 Синтез цифрових систем з квантуванням та фіксацією

Розглянемо ще один метод синтезу цифрового регулятора з використанням методу простору станів. Маємо передавальну функцію безперервної системи (Рисунок 4.21):

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

Continuous-time transfer function.

Рисунок 4.21 – Передавальна функція безперервної системи

Представимо цей об'єкт керування у векторно-матричному вигляді, використовуючи командне вікно програмного пакету MatLab (Рисунок 4.22):

```
>> w3=ss(w)

w3 =

A =
      x1      x2      x3
x1 -2.4 -2.5  0
x2  4  0  0
x3  0  0.5  0

B =
      u1
x1  2
x2  0
x3  0

C =
      x1      x2      x3
y1  0  0  3.725

D =
      u1
y1  0
```

Рисунок 4.22 - Матриці A , B , C , D неперервного об'єкту керування

Тепер знаходимо дискретну передавальну функцію (Рисунок 4.23):

```
>> wz3=c2d(w,0.1)

wz3 =

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

Рисунок 4.23 – Дискретна передавальна функція

Та знаходимо до неї цифрову векторно - матричну модель (Рисунок 4.24):

```
>> wzz3=ss(wz3)

wzz3 =

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

Sample time: 0.1 seconds
Discrete-time state-space model.
```

Рисунок 4.24 - Матриці A, B, C, D дискретної моделі об'єкту керування

Проаналізувавши графіки перехідних процесів отриманих моделей, можна стверджувати, що виконані розрахунки є вірними, хоча і присутня усталена похибка, викликана округленнями при обчисленнях.

Раніше вже були обчислені бажані корені характеристичного рівняння:

$$z_{16} = 0,5114;$$

$$z_{26} = 0,6257;$$

$$z_{36} = 0,9289;$$

Бажане характеристичне рівняння має вигляд:

$$\begin{aligned} (z - 0,5114)(z - 0,6257)(z - 0,9289) \\ = z^3 - 2,066z^2 + 1,37623517z - 0,297232190122; \end{aligned}$$

Далі розраховуємо перехідну фундаментальну матрицю (Рисунок 4.25):

$$F(t) = L^{-1}\{(sE - A)^{-1}\};$$

Де L^{-1} - умовне позначення зворотнього перетворення Лапласа,

E – одинична матриця,

A – матриця простору станів безперервної моделі системи.

```

>> FF1=SE-w3.A

FF1 =

[ s + 12/5, 5/2, 0]
[      -4,   s, 0]
[      0, -1/2, s]

>> FF=inv(FF1)

FF =

[ (5*s)/(5*s^2 + 12*s + 50), -25/(2*(5*s^2 + 12*s + 50)), 0]
[ 20/(5*s^2 + 12*s + 50), (5*s + 12)/(5*s^2 + 12*s + 50), 0]
[ 10/(5*s^3 + 12*s^2 + 50*s), (5*s + 12)/(2*(5*s^3 + 12*s^2 + 50*s)), 1/s]

>> F=ilaplace(FF,0.1)

F =

    0.7443    -0.2186         0
    0.3497     0.9541         0
    0.0092     0.0492     1.0000

```

Рисунок 4.25 – Обчислення матриці F

Наступний крок синтезу – розрахунок матриці Q (Рисунок 4.26):

$$Q(t) = L^{-1}\{(sE - A)^{-1} * B * s^{-1}\};$$

Де B - матриця простору станів безперервної моделі системи.

```

BS =

    2/s
     0
     0

>> QQ=(inv(SE-w3.A))*BS

QQ =

    10/(5*s^2 + 12*s + 50)
    40/(s*(5*s^2 + 12*s + 50))
    20/(s*(5*s^3 + 12*s^2 + 50*s))

>> Q=ilaplace(QQ,0.1)

Q =

    0.1749
    0.0367
    0.0006

```

Рисунок 4.26 – Обчислення матриці Q

Знаходимо характеристичний поліном (Рисунок 4.27):

```

>> DD=ZE-F

DD =

[ z - 7443/10000,    1093/5000,    0]
[   -3497/10000, z - 9541/10000,    0]
[    -23/2500,    -123/2500, z - 1]

>> det(DD)

ans =

z^3 - (3373*z^2)/1250 + (49699621*z)/20000000 - 15731621/20000000

```

Рисунок 4.27 – Обчислення характеристичного поліному

Розраховуємо значення характеристичного полінома при підстановці в нього бажаних коренів характеристичного рівняння:

$$\Delta 16 = -0.0877;$$

$$\Delta 26 = -0.0432;$$

$$\Delta 36 = -0.0051;$$

Розраховуємо матрицю K:

$$K = \text{Adj}^T[zE - F] * Q;$$

Де Adj – умовне позначення матриці алгебраїчних доповнень.

Знаходимо матрицю алгебраїчних доповнень до характеристичної матриці (Рисунок 4.28):

```
>> AZEF=[(((10000*z - 9541)*(z - 1))/10000) (3497/10000 - (3497*z)/10000) ((23*z)/2500 + 3292/390625); (
AZEF =
[ ((10000*z - 9541)*(z - 1))/10000,      3497/10000 - (3497*z)/10000,      (23*z)/2500 + 12145336298130
[      (1093*z)/5000 - 1093/5000, ((10000*z - 7443)*(z - 1))/10000,      1391816928424551/36028797018
[      0,      0, z^2 - (2123*z)/1250 + 708489224735
```

Рисунок 4.28 – матриця алгебраїчних доповнень

Далі транспонуємо її та множимо на матрицю Q, отримавши матрицю Kz:

$$Kz = (1749*(10000*z - 9541)*(z - 1))/1000000000 - (401131*z)/500000000 + 401131/500000000;$$

$$(6116253*z)/1000000000 + (367*(10000*z - 7443)*(z - 1))/1000000000 - 6116253/1000000000;$$

$$\begin{aligned}
 & (5768665806730451*z^2)/9223372036854775808 + \\
 & (16951352309013860991167*z)/7205759403792793600000000 + \\
 & 5692694539690685230978074352988717/10384593717069655257060992658440 \\
 & 192000;
 \end{aligned}$$

Розраховуємо матриці K1, K2 та K3 підставляючи в матрицю Kz значення коренів бажаного характеристичного рівняння:

$$\begin{aligned}
 K1 &= \begin{bmatrix} 0.0418 \\ -0.0257 \\ 0.0019 \end{bmatrix}; \\
 K2 &= \begin{bmatrix} 0.0245 \\ -0.0213 \\ 0.0023 \end{bmatrix}; \\
 K3 &= \begin{bmatrix} 0.00088378 \\ -0.0048 \\ 0.0033 \end{bmatrix};
 \end{aligned}$$

Таким чином матриця K:

$$K = \begin{bmatrix} 0.0418 & 0.0245 & 0.00088378 \\ -0.0257 & -0.0213 & -0.0048 \\ 0.0019 & 0.0023 & 0.0033 \end{bmatrix};$$

Обчислюємо матрицю коефіцієнтів зворотнього зв'язку G:

$$\begin{aligned}
 G &= -[\Delta 16 \Delta 26 \Delta 36] * K^{-1}; \\
 G &= -[-0.0877 \ -0.0432 \ -0.0051] * \text{inv}([0.0418 \ 0.0245 \ 0.00088378; -0.0257 - \\
 & \ 0.0213 \ -0.0048; 0.0019 \ 0.0023 \ 0.0033]); \\
 G &= [3.1649 \ 2.0020 \ 3.6099];
 \end{aligned}$$

Перевіряємо правильність розрахунків отриманого цифрового регулятора для неперервного об'єкту управління, виконавши моделювання системи (Рисунки 4.29-4.30):

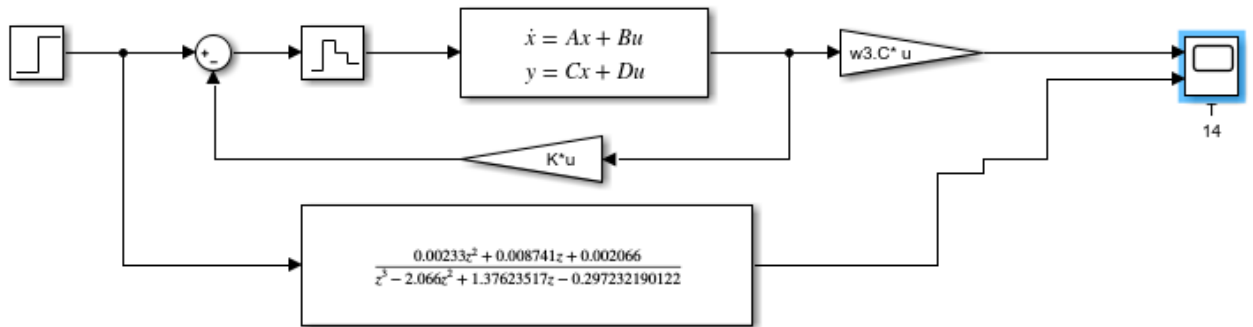


Рисунок 4.29 - Схема моделі системи з регулюючим пристроєм

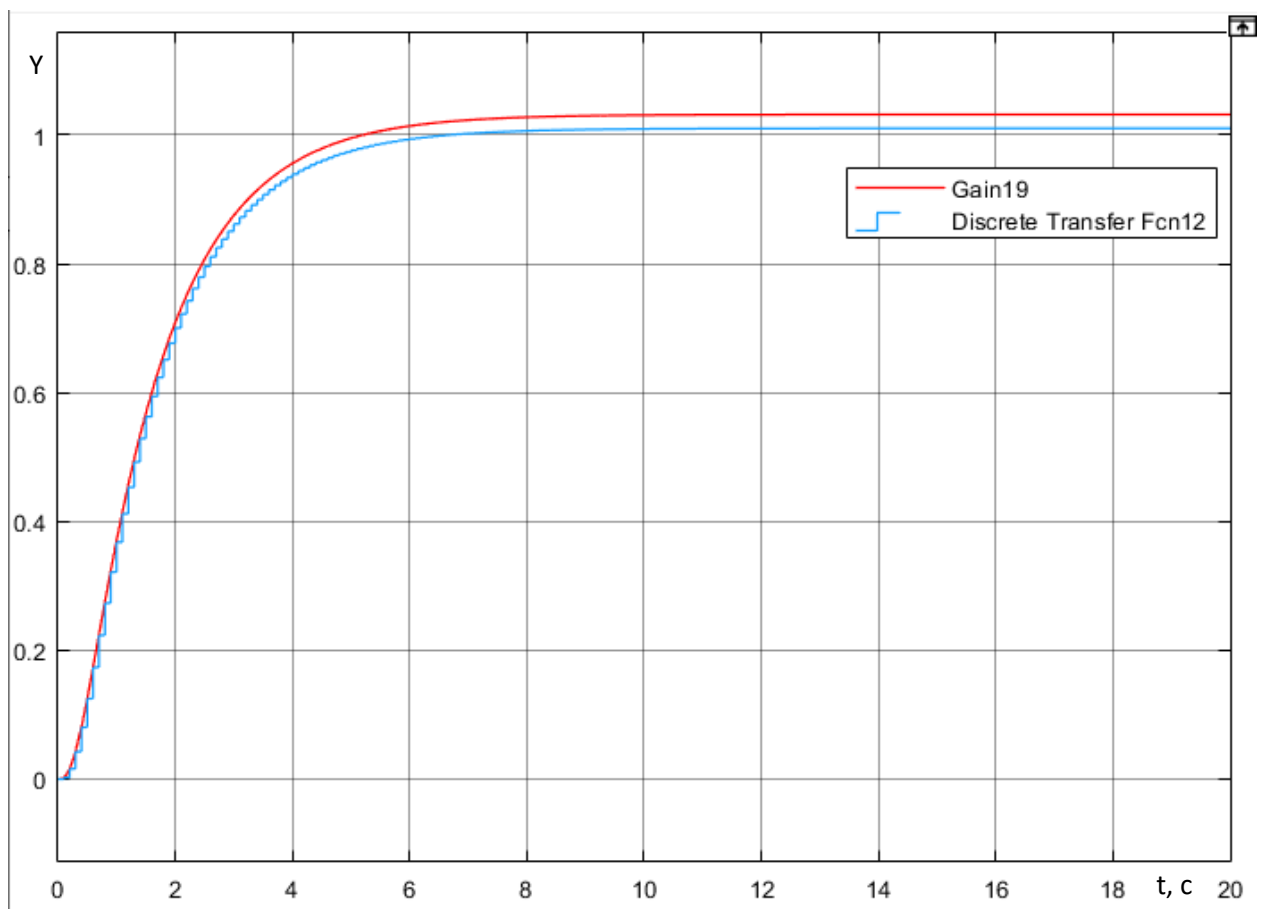


Рисунок 4.30 – Графік перехідного процесу системи з регулятором

Як видно з графіка перехідних процесів синтезованої цифрової системи за методом квантування та фіксації, отримані наступні показники якості:

- перерегулювання 0%;
- час перехідного процесу 3.7с.;
- усталена похибка 0.05.

4.4 Синтез векторно-матричної моделі регулятора цифрової системи керування з підвищенням порядку астатизму

Розглянемо ще один метод синтезу цифрового регулятора для досліджуваної системи керування кутом повороту камери в БПЛА для кінцевого визначення кращого методу синтезу, який забезпечить показники якості, оговорені у завданні на магістерську дисертацію.

З обчислень вище, маємо цифрову передавальну функцію та матриці простору станів (Рисунок 4.31):

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

Continuous-time transfer function.

```
>> w3=ss(w)

w3 =

A =
      x1      x2      x3
x1 -2.4   -2.5      0
x2  4      0      0
x3  0     0.5      0

B =
      u1
x1  2
x2  0
x3  0

C =
      x1      x2      x3
y1  0      0  3.725

D =
      u1
y1  0
```

Рисунок 4.31 – Цифрова передавальна функція та метод простору станів для об'єкту

Далі знаходимо корені бажаного характеристичного рівняння на 1 порядок більшого за порядок системи за допомогою Matlab Simulink 2018a (Рисунок 4.32):

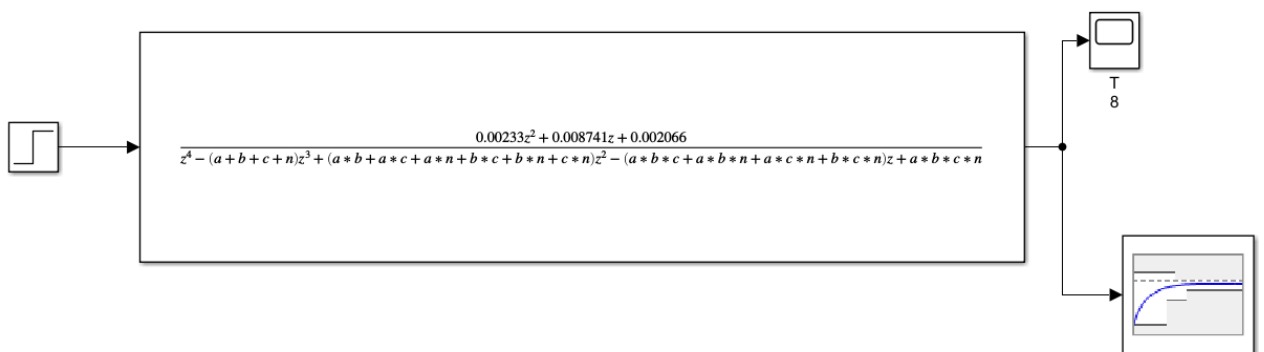


Рисунок 4.32 – Визначення коренів бажаного характеристичного рівняння

Обчислені корені бажаного характеристичного рівняння:

$$a = 0.4903 ;$$

$$b = 0.5527 ;$$

$$c = 0.8876 ;$$

$$n = 0.4903 ;$$

Тоді саме бажане характеристичне рівняння приймає вигляд:

$$\begin{aligned} z^4 - (a + b + c + n)z^3 + (a * b + a * c + b * c + n * a + n * b + n * \\ c)z^2 - (a * b * c + a * b * n + a * c * n + b * c * n)z + a * b * c * n = \\ = z^4 - 2,4209 * z^3 + 2,14332879 * z^2 - 0,827298943339 * z + \\ 0,1179316961007668; \end{aligned}$$

Знаходимо матрицю керованості P2 і перевіряємо систему на керованість (Рисунок 4.33):

```
>> P2=[AE wzz3.B; wzz3.C wzz3.D]
```

```
P2 =
```

1.6985	-1.2425	0.7866	0.1250
2.0000	-1.0000	0	0
0	0.5000	-1.0000	0
0.0186	0.0350	0.0165	0

```
>> det(P2)
```

```
ans =
```

```
-0.0131
```

Рисунок 4.33 – Перевірка керованості нової системи

Оскільки визначник матриці керованості не дорівнює нулю (ранг матриці дорівнює порядку системи) – система повністю керована.

Отже з цього можна вважати, що повністю керованою являється і Пара матриць A2 та B2 (Рисунок 4.34):

```
>> A2=[wzz3.A [0; 0; 0]; wzz3.C 1]

A2 =

    2.6985   -1.2425    0.7866         0
    2.0000         0         0         0
         0    0.5000         0         0
    0.0186    0.0350    0.0165    1.0000

>> B2=[wzz3.B;wzz3.D]

B2 =

    0.1250
         0
         0
         0
```

Рисунок 4.34 – Визначення матриць A2 та B2

Далі знаходимо характеристичне рівняння (Рисунок 4.35):

```
>> XP=ZE-A2+B2*[g1 g2 g3 g4]

XP =

[ g1/8 + z - 3038196432986675/1125899906842624, g2/8 + 5595921523277391/4503599627370496, g3/8 - 708531
[
[ -2, z,
[ 0, -1/2,
[ -5372068499764631/288230376151711744, -5038965580104831/144115188075855872, -47637807

>> det(XP)

ans =

(4763780796408751*g4)/2305843009213693952 - g3/8 - (29468999977066721*z)/9007199254740992 - (g2*z)/4 +
```

Рисунок 4.35– Визначення характеристичного рівняння

Зводимо до нормального вигляду:

$$\begin{aligned}
& 0.0021 * g^4 - 0.125 * g^3 - 3.2717 * z - 0.25 * g^2 * z + 0.125 * g^3 * z \\
& + 0.0087 * g^4 * z - 0.125g * 1 * z^2 + 0.125g^1 * z^3 + 0.25 * g^2 \\
& * z^2 + 0.0023 * g^4 * z^2 + 5.1835 * z^2 - 3.6985 * z^3 + z^4 \\
& + 0.7866 ;
\end{aligned}$$

Зводимо коефіцієнти при однакових степенях z :

$$\begin{aligned}
& z^4 + (0.125g^1 - 3.6985) * z^3 + (-0.125g^1 + 0.25g^2 + 0.0023g^4 + \\
& 5.1835) * z^2 + (-3.2717 - 0.25g^2 + 0.125g^3 + 0.0087g^4) * z + \\
& (0.0021g^4 - 0.125g^3 + 0.7866) ;
\end{aligned}$$

Тепер потрібно прирівняти коефіцієнти при однакових степенях z в бажаному і реальному характеристичних рівняннях і визначити коефіцієнти g :

$$\begin{cases}
0,125g^1 - 3,6985 = -2,4209 ; \\
-0,125g^1 + 0,25g^2 + 0,0023g^4 + 5,1835 = 2,14332879 ; \\
-3,2717 - 0,25g^2 + 0,125g^3 + 0,0087g^4 = -0,827298943339 ; \\
0,0021g^4 - 0,125g^3 + 0,7866 = 0,1179316961007668 ;
\end{cases}$$

$$\begin{cases}
0,125g^1 = 1,2776 ; \\
-0,125g^1 + 0,25g^2 + 0,0023g^4 = -3,04017121 ; \\
-0,25g^2 + 0,125g^3 + 0,0087g^4 = 2,444401056661 ; \\
0,0021g^4 - 0,125g^3 = -0,6686683038992332 ;
\end{cases}$$

Вирішимо отриману систему методом Гауса:

$$\left[\begin{array}{cccc|c}
0,125 & 0 & 0 & 0 & 1,2776 \\
-0,125 & 0,25 & 0 & 0,0023 & -3,04017121 \\
0 & -0,25 & 0,125 & 0,0087 & 2,444401056661 \\
0 & 0 & -0,125 & 0,0021 & -0,6686683038992332
\end{array} \right] ;$$

До 2 рядку додаємо 1 рядок, 1 рядок ділимо на 0,125:

$$\left[\begin{array}{cccc|c} 1 & 0 & 0 & 0 & 10,2208 \\ 0 & 0,25 & 0 & 0,0023 & -1,76257121 \\ 0 & -0,25 & 0,125 & 0,0087 & 2,444401056661 \\ 0 & 0 & -0,125 & 0,0021 & -0,6686683038992332 \end{array} \right];$$

До 3 рядку додаємо 2 рядок, 2 рядок ділимо на 0.25:

$$\left[\begin{array}{cccc|c} 1 & 0 & 0 & 0 & 10,2208 \\ 0 & 1 & 0 & 0,0092 & -7,05028484 \\ 0 & 0 & 0,125 & 0,011 & 0,681829846661 \\ 0 & 0 & -0,125 & 0,0021 & -0,6686683038992332 \end{array} \right];$$

До 4 рядку додаємо 3 рядок, 3 рядок ділимо на 0.125:

$$\left[\begin{array}{cccc|c} 1 & 0 & 0 & 0 & 10,2208 \\ 0 & 1 & 0 & 0,0092 & -7,05028484 \\ 0 & 0 & 1 & 0,088 & 5,454638773288 \\ 0 & 0 & 0 & 0,0131 & 0,0131615427617668 \end{array} \right];$$

4 рядок ділимо на 0.0131:

$$\left[\begin{array}{cccc|c} 1 & 0 & 0 & 0 & 10,2208 \\ 0 & 1 & 0 & 0,0092 & -7,05028484 \\ 0 & 0 & 1 & 0,088 & 5,454638773288 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 1,00469792 \end{array} \right];$$

Від 2 рядка віднімаємо 4 рядок помножений на 0,0092, від 3 рядка віднімаємо 4 рядок помножений на 0,088:

$$\left[\begin{array}{cccc|c} 1 & 0 & 0 & 0 & 10,2208 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & -7,059528 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 5,366225 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 1,00469792 \end{array} \right];$$

Таким чином, маємо наступні коефіцієнти g:

$$g1 = 10,2208 ;$$

$$g2 = - 7,059528 ;$$

$$g3 = 5,366225 ;$$

$$g4 = 1,00469792 ;$$

Зведемо отриману синтезовану систему до схеми моделі в середовищі Matlab Simulink (Рисунки 4.36-4.37):

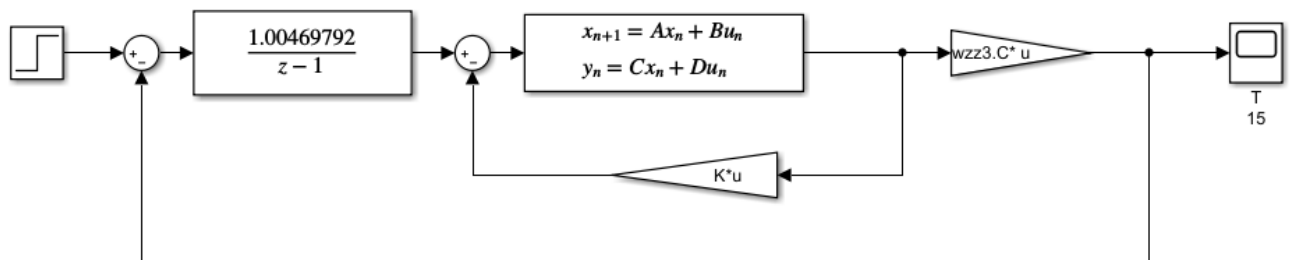


Рисунок 4.36 – Синтезована цифрова система

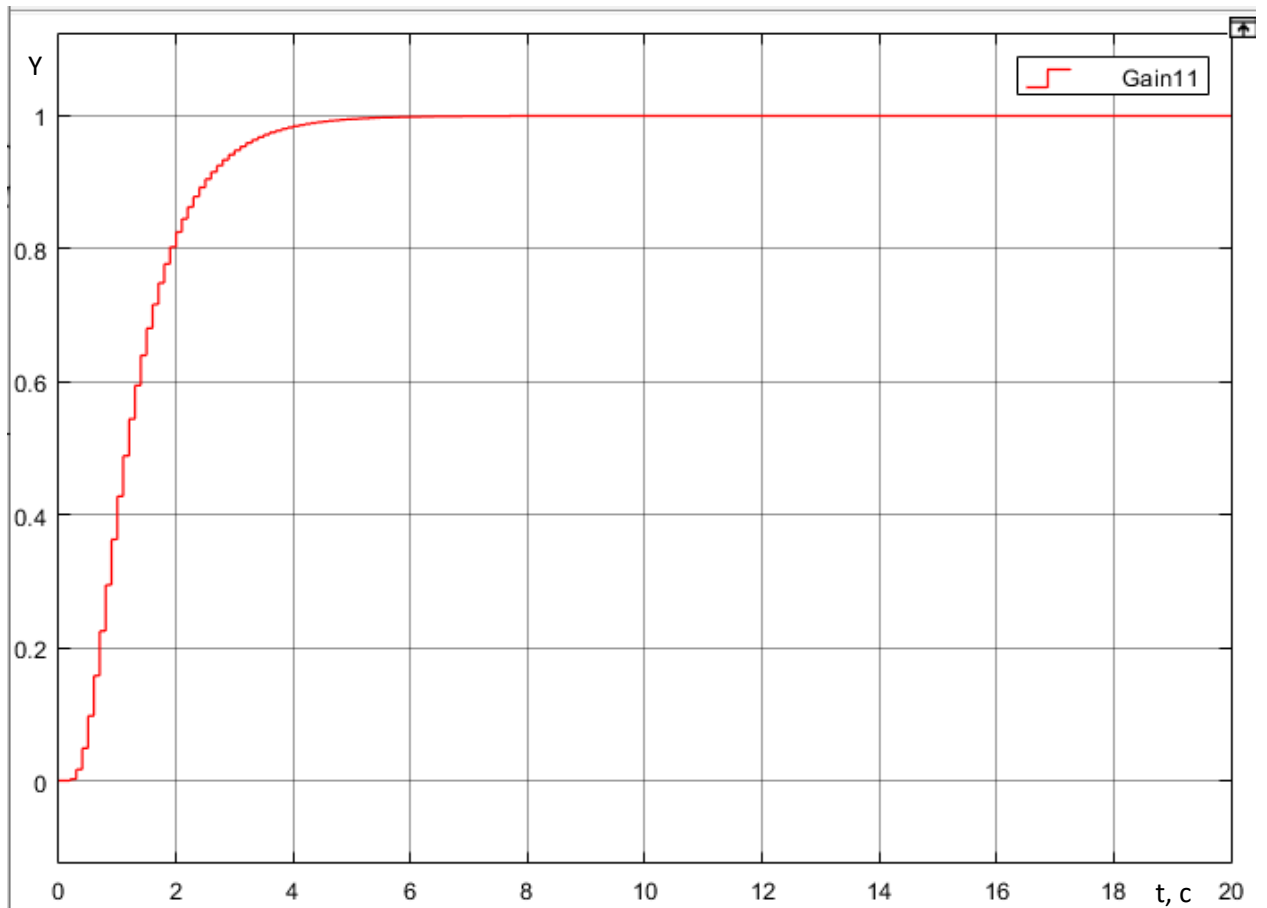


Рисунок 4.37 – Перехідний процес цифрової системи за методом підвищення порядку астатизму

З графіку перехідного процесу розраховуємо основні показники якості:

- час перехідного процесу 3.1с;
- перерегулювання 0%;
- похибка 0.

Для того щоб завершити синтез цифрового регулятора, потрібно виконати розрахунок спостерігаючого пристрою.

Обчислюємо матрицю коефіцієнтів спостерігаючого пристрою (Рисунок 4.38):

```
>> H=transp(place(transp(wzz3.A), transp(wzz3.C), [-d,-e,-f]))

H =

106.6622
77.0722
4.9402
```

Рисунок 4.38 - Обчислення матриці коефіцієнтів спостерігаючого пристрою

Обчислюємо матриці спостерігаючого пристрою (Рисунок 4.39):

```
>> Asp=wzz3.A-H*wzz3.C

Asp =

0.7105    -4.9720   -0.9763
0.5635    -2.6948   -1.2738
-0.0921     0.3273   -0.0817

>> Bsp=[B H]

Bsp =

0.1250   106.6622
         0    77.0722
         0     4.9402

>> Csp=[1 0 0; 0 1 0; 0 0 1]

Csp =

1     0     0
0     1     0
0     0     1

>> Dsp=[0 0; 0 0; 0 0]

Dsp =

0     0
0     0
0     0
```

Рисунок 4.39 – Матриці спостерігаючого пристрою

Для відновлення вектора станів виконаємо моделювання розрахованого спостерігаючого пристрою (Рисунок 4.40-4.42):

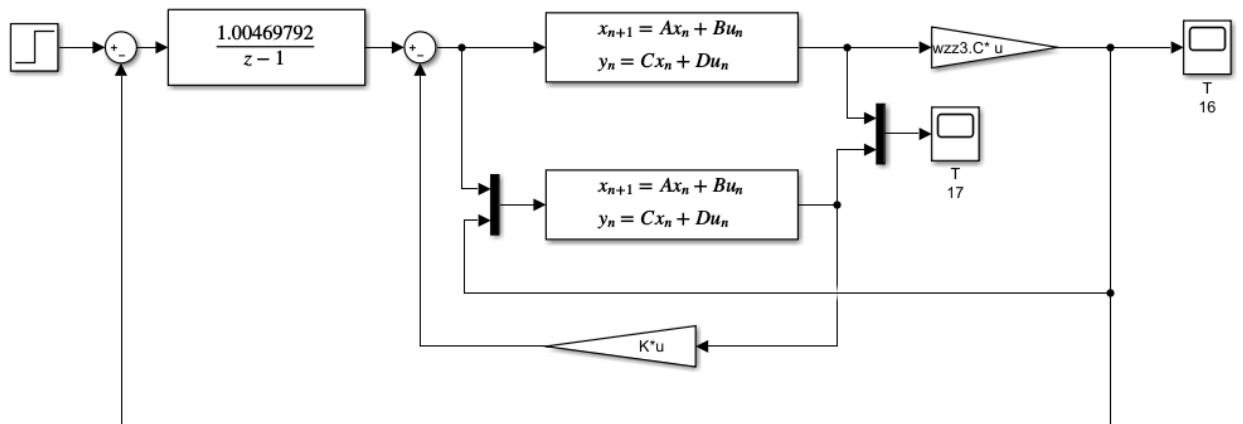


Рисунок 4.40 – Модель системи з інтегрованим спостерігаючим пристроєм

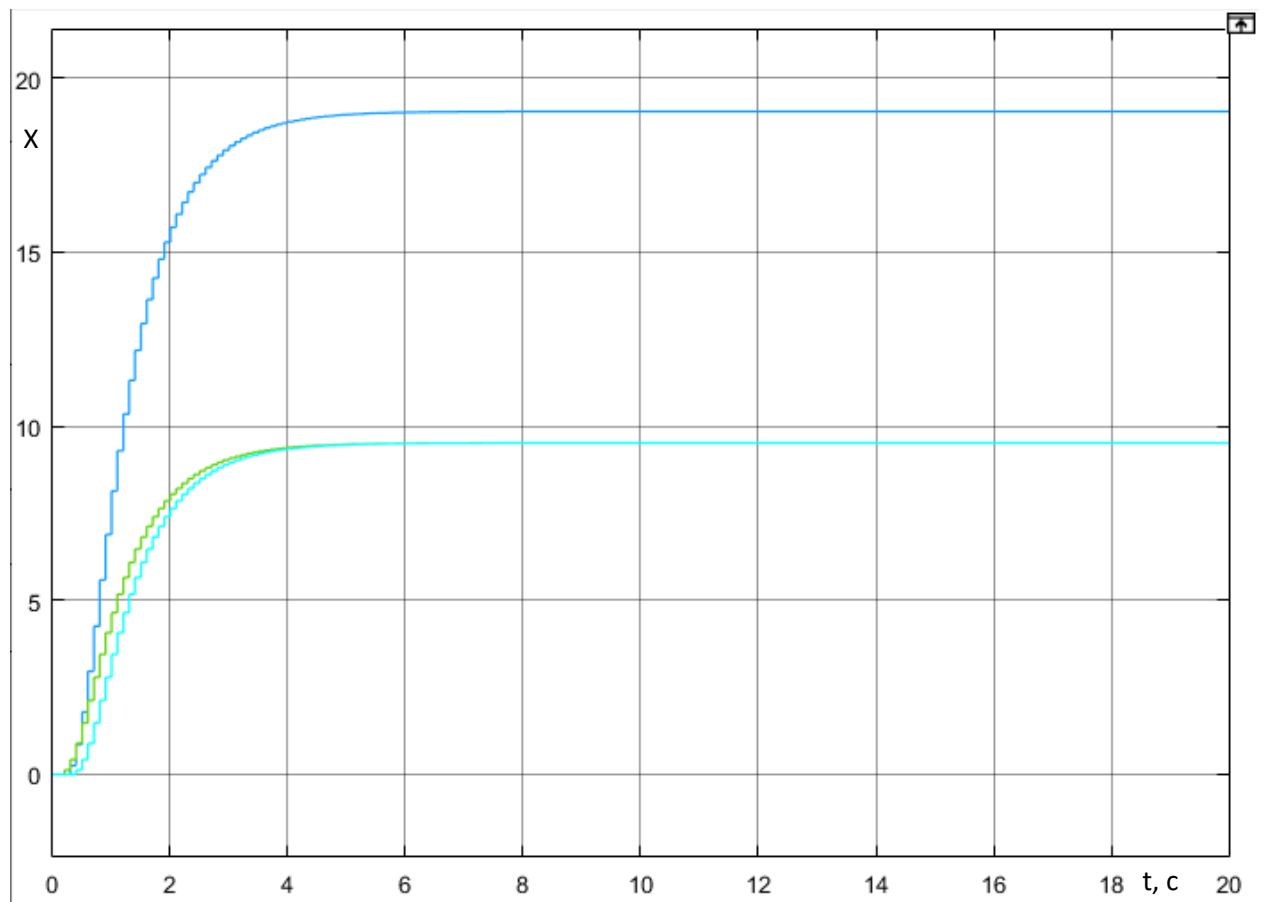


Рисунок 4.41 – Графіки перехідних процесів x_1 , x_2 та x_3

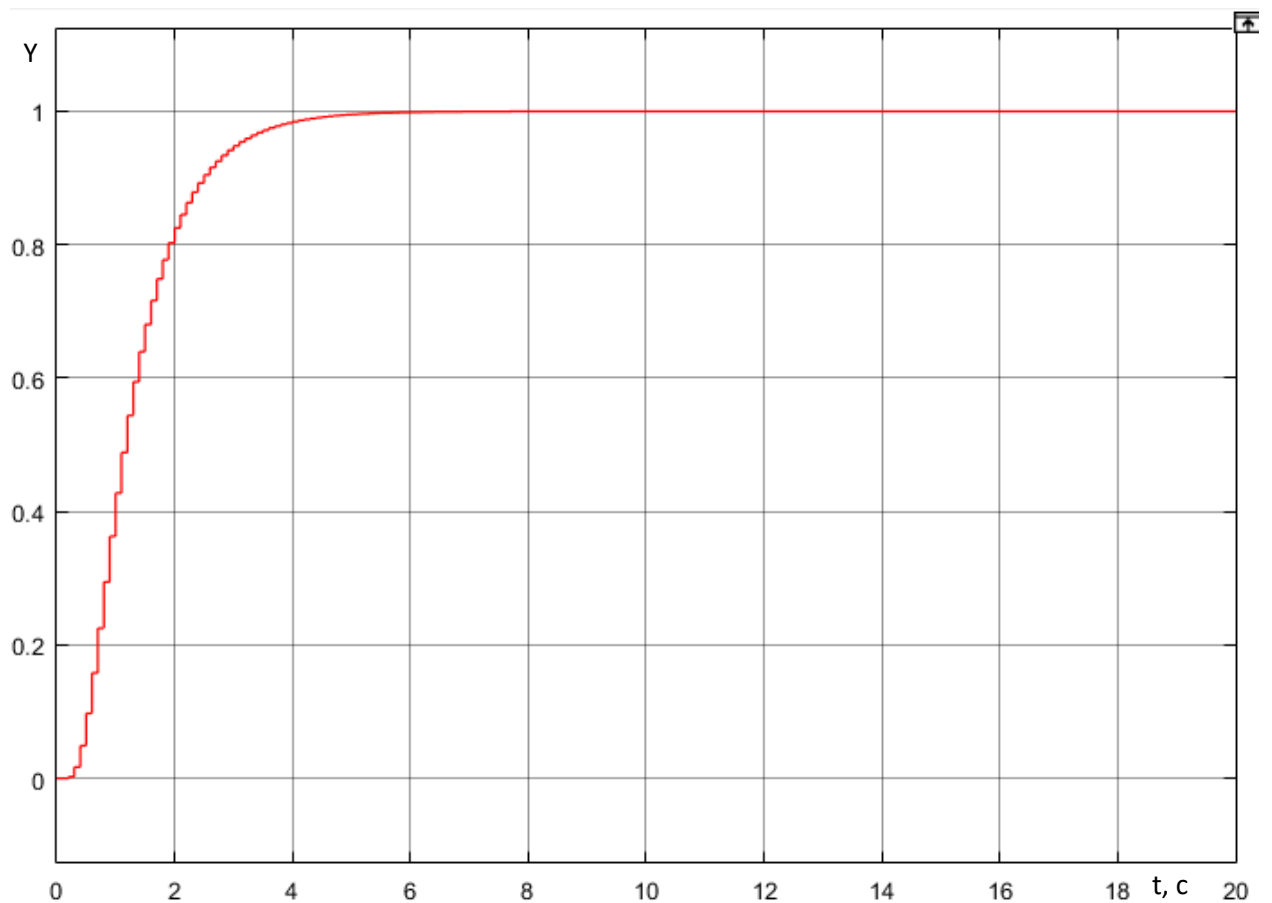


Рисунок 4.42 – Графік перехідного процесу системи

Як видно з Рисунку 4.41 – усі три стани відновлюються спостерігаючим пристроєм і співпадають з реальними.

Розрахуємо цифровий регулятор, який об'єднує функцію спостереження та керування, для цього розрахуємо векторно-матричну модель такого регулятора та виконаємо дослідження якості з використанням прикладного пакету Matlab/Simulink 2018a (Рисунок 4.43):

```

>> Arp=(wzz3.A - H*wzz3.C - wzz3.B*[10.2208 -7.059528 5.366225]) wzz3.B; [0 0 0] 1]

Arp =

    -0.5671    -4.0895    -1.6470     0.1250
     0.5635    -2.6948    -1.2738         0
    -0.0921     0.3273    -0.0817         0
         0         0         0     1.0000

>> Brp=[wzz3.B H; 1.00469792 -1.00469792]

Brp =

     0.1250    106.6622
         0     77.0722
         0      4.9402
     1.0047    -1.0047

>> Crp=[[-10.2208  7.059528 -5.366225] 1]

Crp =

    -10.2208     7.0595    -5.3662     1.0000

>> Drp=[0 0]

Drp =

     0     0

```

Рисунок 4.43 – Визначення матриць регулюючого пристрою

Тепер побудуємо модель системи з регулятором і порівняємо з відокремленим пристроєм спостереження (Рисунки 4.44-4.45):

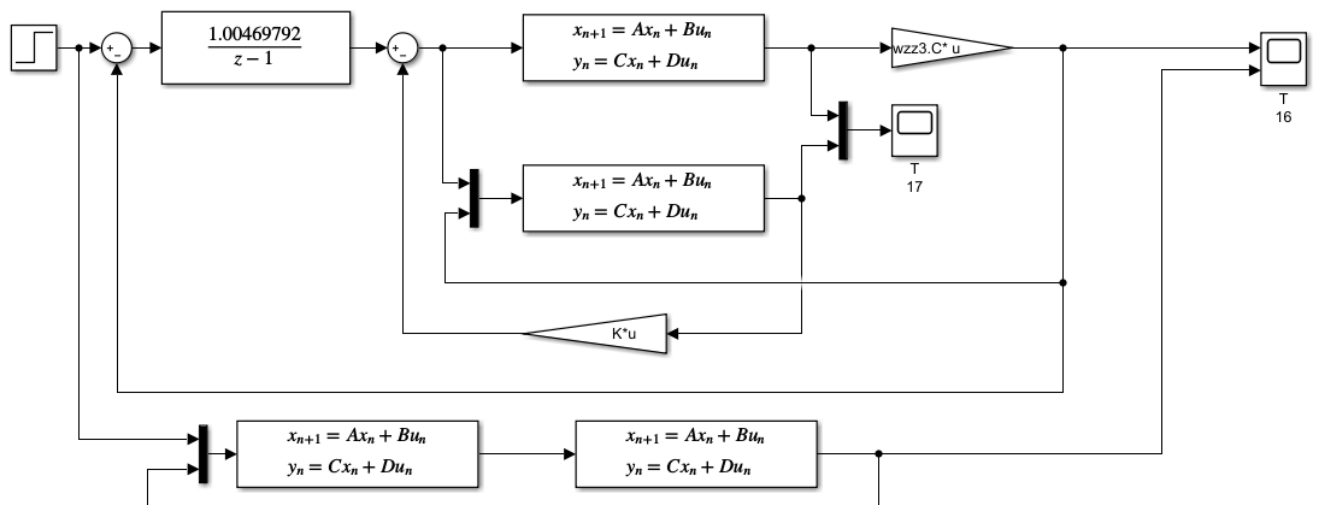


Рисунок 4.44 – Модель системи з регулюючим пристроєм

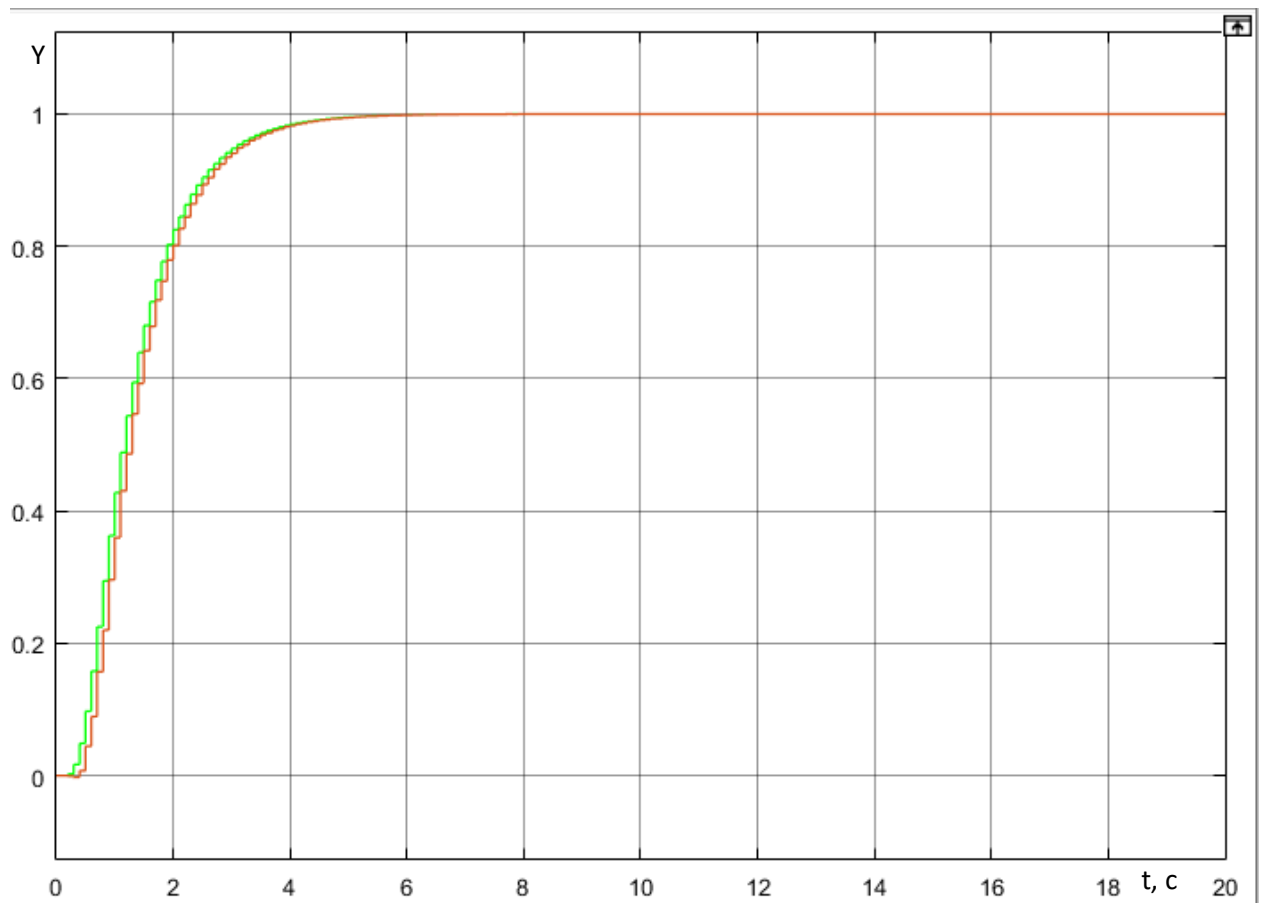


Рисунок 4.45 – Графіки перехідних процесів систем з спостерігаючим пристроєм та з об'єднаним регулятором

4.5 Аналіз отриманих результатів дослідження трьох методів синтезу векторно-матричних моделей цифрових регуляторів

Зведемо усі розроблені пристрої регулювання в одну схему та порівняємо якість (Рисунки 4.46-4.47):

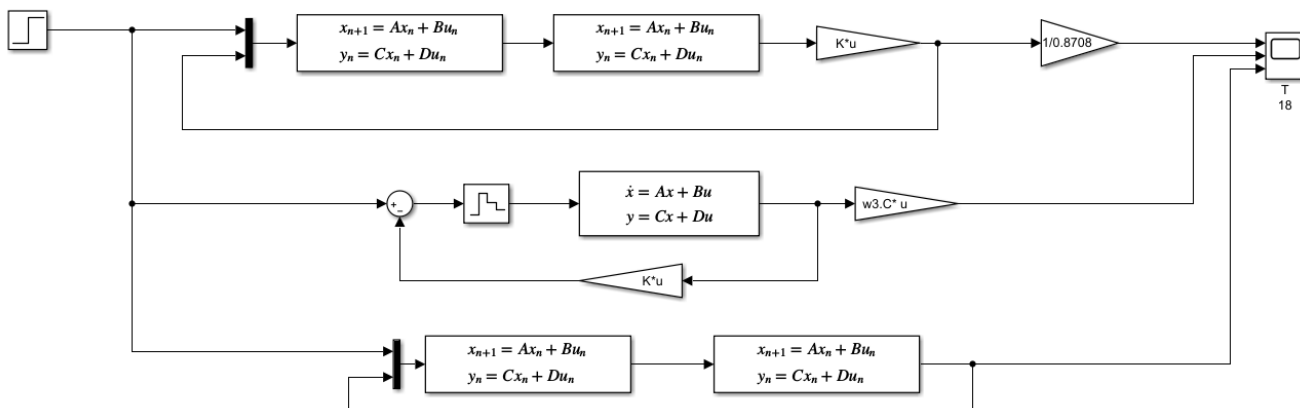


Рисунок 4.46 – Модель порівняння розроблених регуляторів системи керування

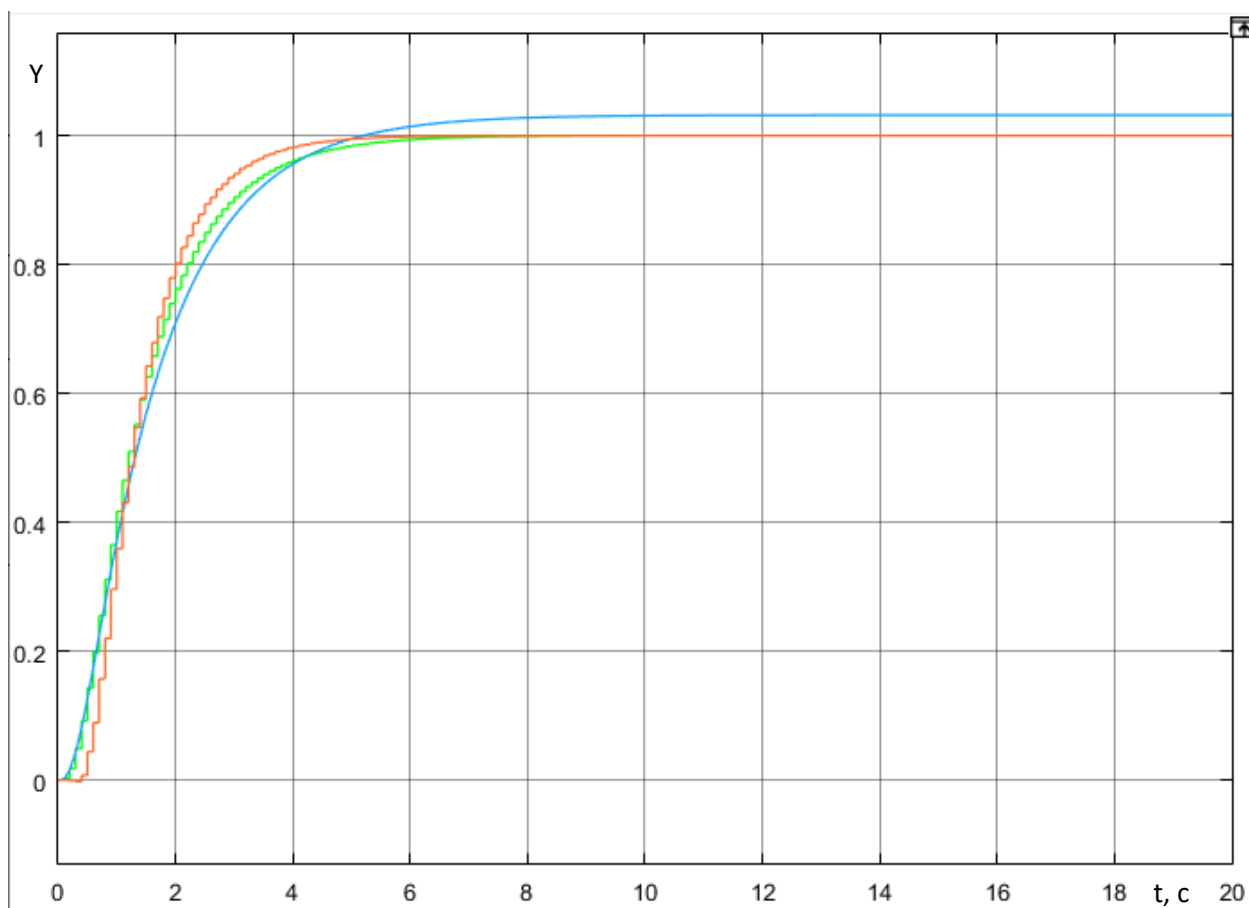


Рисунок 4.47 – Графіки перехідних процесів розроблених регуляторів (Жовтий – перший, Синій – другий, Червоний – третій)

Зробимо аналіз показників якості (Таблиця 4.1):

Таблиця 4.1 – Порівняння показників якості розроблених регуляторів

Показник	1 регулятор	2 регулятор	3 регулятор
Перерегулювання	0%	3%	0%
Похибка	0%	3%	0%
Час перехідного процесу	3,7 с	3,7 с	3,1 с

Таким чином, підсумовуючи аналіз, можна стверджувати, що третій регулятор є найкращим і слід використовувати його.

Тепер порівняємо врегульовану систему з початковою (Рисунки 4.48-4.49):

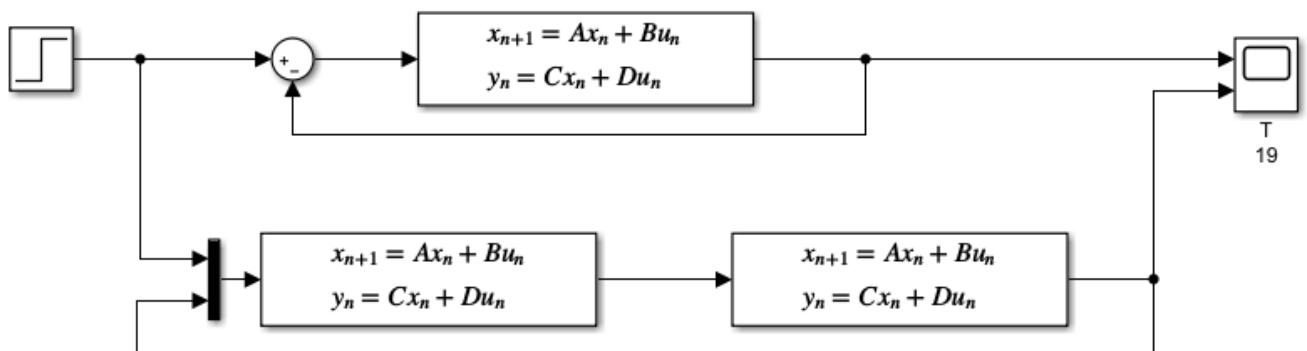


Рисунок 4.48 – Порівняння моделей вхідної системи та врегульованої обраним регулятором

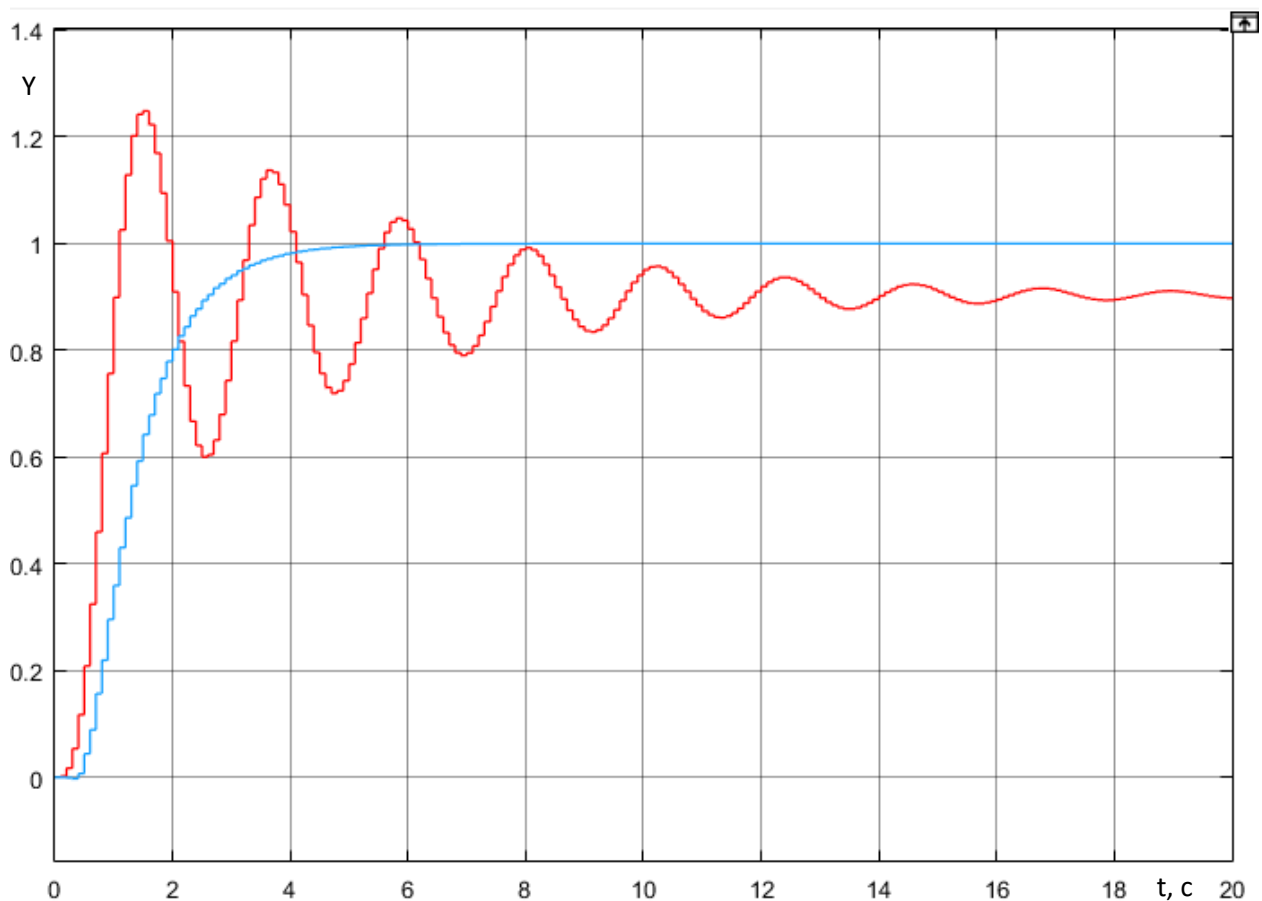


Рисунок 4.49 – Порівняння графіків перехідних процесів вхідної системи та врегульованої обраним регулятором

Таблиця 4.2 – Порівняння показників якості розроблених регуляторів

Показник	Без регулювання	З регулюванням
Перерегулювання	25%	0%
Похибка	9%	0%
Час перехідного процесу	13,4 с	3,1 с

Отже отримана система керування з регулюванням повертає камеру на 1 радіан(57 градусів) за 3,1с без перерегулювання і похибки, що є досить прийнятною якістю для системи, що розглядається.

ВИСНОВКИ

Метою магістерської дисертації було підвищення точності визначення параметрів руху об'єктів за допомогою безпілотних літальних апаратів.

Для досягнення цієї мети було проведено аналіз предметної області: розглянуто види та типи існуючих БПЛА. Розглянуто види розвідки за допомогою БПЛА, їх переваги та недоліки.

Було розроблено новий метод пасивного непомітного спостереження за цілями за допомогою двох БПЛА з використанням геометричної моделі та канонічних рівнянь прямих, який дозволяє відстежувати координати нерухомої цілі та також координати, швидкість і напрямок руху рухомої цілі з рухомих і нерухомих БПЛА.

Наведено приклади вирішення поставлених задач.

В магістерській дисертації розроблені векторно-матричні моделі регулюючих пристроїв для керування кутом повороту камери трьома різними методами та досліджено оптимальний варіант, а саме метод підвищення порядку астатизму з використанням простору станів.

Метод забезпечує наступні показники якості керування кутом повороту інфрачервоної камери безпілотного літального апарату: нульове перерегулювання, нульову усталену помилку та час керування 3,1 секунди.

Всі експериментальні дослідження у дисертації виконувались за допомогою прикладного пакету MATLAB /Simulink

За результатами магістерської дисертації була опублікована стаття:

Облаухов В. Ю., Репнікова Н. Б. Система визначення параметрів руху об'єктів за допомогою безпілотників // Міжнародний науковий журнал "Інтернаука". — 2022. — №4

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. 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
2. Повітряний кодекс України від 19.05.2011 № 3393-VI (Редакція від 19.02.2022)
3. Правила виконання польотів безпілотними авіаційними комплексами державної авіації України затверджені Наказом Міністерства оборони України від 08.12.2016 № 661
4. Слюсар, Вадим. (2010). Передача данных с борта БПЛА: стандарты НАТО.. Электроника: наука, технология, бизнес. – 2010. - № 3. с. С. 80 – 86.
5. Reg Austin. UNMANNED AIRCRAFT SYSTEMS UAVS DESIGN, DEVELOPMENT AND DEPLOYMENT. — John Wiley and Sons, 2010.— ISBN 9780470058190.
6. NATO STANDARD AJP-3.3. web.archive.org
7. Department of Defense. Unmanned Aircraft System Airspace Integration Plan
8. Bayraktar TB2 Tactical UAV
9. На що здатні турецькі БПЛА Bayraktar TB2 і як їх використовує Україна у війні з рашистами | Defense Express. defence-ua.com
- 10.«Variable Incidence» // Flight. — 1946. — 25 апреля. — С. 409.
- 11.Bayraktar TB2. www.baykartech.com
- 12.Белоцерковский Г.Б. Основы радиолокации и радиолокационные устройства / Г.Б. Белоцерковский. М.: Советское радио, 1975. 336 с.
- 13.Радиолокационные системы воздушной разведки, дешифрирование радиолокационных изображений / под ред. Л.А. Школьного. М.: ВВИА им. проф. Н.Е. Жуковского, 2008. 531 с.

- 14.Авиационные системы радиоуправления. Радиоэлектронные системы самонаведения / под ред. А.И. Канащенкова, В.И. Меркулова. М.: Радиотехника, 2003. 389 с.
- 15.Дрогалин В.В., Дудник П.И., Канащенков А.И. и др. Определение координат и параметров движения источников радиоизлучения по угломерным данным в однопозиционных бортовых радиолокационных системах // Зарубежная радиоэлектроника. Успехи современной радиоэлектроники. 2002. № 3. С. 64–93.
- 16.Гиростабилизированные тепловизионные системы [Электронный ресурс]. Режим доступа: <http://www.m.pergam.ru/catalog/cctv/gyrostabilised> / (дата обращения 21.10.2019 г.).
- 17.Гиростабилизированные подвесы [Электронный ресурс]. Режим доступа: http://www.general-optics.ru/catalog/?SECTION_ID=15. (дата обращения 21.10.2019 г.).
18. Radio detection and ranging. TheFreeDictionary.com. Дата обращения: 30 декабря 2015.
- 19.Методы автоматического обнаружения и сопровождения объектов. Обработка изображений и управление / Б.А. Алпатов, П.В. Бабаян, О.Е. Балашов, А.И. Степашкин., М.: Радиотехника, 2008. 176 с.
- 20.Headquarters, Department of the Army, Field Manual Javelin: Close Combat Missile System. - Washington, DC, 20 March 2008.
- 21.Рівняння прямої в просторі http://mathprofi.ru/uravnenija_pryamoi_v_prostranstve.html [Электронный ресурс].
- 22.Д.В.Клетеник "Сборник задач по аналитической геометрии". М., Наука, Физматлит, 1998.
- 23.Дорф Р. Современные системы управления/ Р. Дорф, Р. Бишоп
Современные системы управления – М.: Лаборатория базовых знаний, 2002 – 831с. – Бібліогр. : 3000 екз. ISBN 5-93208-119-8

- 24.Репнікова Н.Б.Теорія автоматичного керування: класика та сучасність/
Н.Б. Репнікова. Теорія автоматичного керування :класика та сучасність.
– Київ «Політехніка», 2011.-327с. – Бібліогр.: 1000 екз. ISBN 978-966-
622- 436-4
- 25.Методичні вказівки до виконання лабораторних робіт з дисципліни за
вибором (освітній компонент 5) «Моделі простору станів в сучасній
теорії керування» для студентів спеціальності 126 «Інформаційні
системи та технології» ОПП та ОНП «Інтегровані інформаційні
системи»Уклад.: Н.Б. Репнікова, А.В. Писаренко.- К.:«КПІ ім. Ігоря
Сікорського», 2020.

ДОДАТОК А – ОПУБЛІКОВАНА СТАТТЯ

Технічні науки

УДК 623.74

Репнікова Наталія Борисівна

к.т.н., доцент, викладач факультету інформатики та обчислювальної техніки Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

Репникова Наталия Борисовна

к.т.н., доцент, преподаватель факультета информатики и вычислительной техники Национального технического университета Украины «Киевский политехнический институт имени Игоря Сикорского»

Nataliya Repnikova

PhD, associated professor of the Faculty of Informatics and Computer Science of the National Technical University of Ukraine “Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute”

Облаухов Владислав Юрійович

студент 6 курсу факультету інформатики та обчислювальної техніки Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

Облаухов Владислав Юрьевич

студент 6 курса факультета информатики и вычислительной техники Национального технического университета Украины «Киевский политехнический институт имени Игоря Сикорского»

Vladyslav Oblaukhov

student of the 6th year Faculty of Informatics and Computer Science of the National Technical University of Ukraine “Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute”

СИСТЕМА ВИЗНАЧЕННЯ ПАРАМЕТРІВ РУХУ ОБ'ЄКТІВ ЗА ДОПОМОГОЮ БЕЗПІЛОТНИКІВ

SYSTEM FOR DETERMINING MOVEMENT PARAMETERS OF OBJECTS WITH THE HELP OF DRONES

***Анотація.** Розглядається проблема пасивного визначення координат, швидкості та напрямку рухомих об'єктів. Пропонується використання двох безпілотних літальних апаратів з тепловізійними камерами для пасивного непомітного спостереження за рухомими цілями і визначення параметрів їх руху. Розроблено метод обчислення параметрів руху цілей. Приведено результати розрахунків за розробленим методом.*

***Ключові слова:** безпілотники, пасивне спостереження цілей, визначення координат і швидкості цілей.*

***Аннотация.** Рассматривается проблема пассивного определения координат, скорости и направления движущихся объектов. Предлагается использование двух беспилотных летательных аппаратов с тепловизионными камерами для незаметного пассивного наблюдения за движущимися целями и определения параметров их движения. Разработан метод вычисления параметров движения целей. Приведены результаты расчетов по разработанному методу.*

***Ключевые слова:** беспилотники, пассивное наблюдение целей, определение координат и скорости целей.*

***Summary.** Considered the problem of passive determination of coordinates, speed and direction of moving objects. It is proposed to use two unmanned aerial vehicles with thermal imaging cameras for passive invisible observation of moving targets and determine the parameters of their movement. The method of calculation of parameters of movement of the purposes is developed. The results of calculations by the developed method are given.*

***Key words:** drones, passive observation of targets, determination of coordinates and speed of targets.*

Вступ

Безпілотні літальні апарати, вони ж БПЛА, вони ж дрони, сьогодні не є чимось незвичним, особливо у військовій справі. Втім, варто розуміти, що під словом “безпілотник” ховається цілий ряд літальних апаратів, різниця між якими може бути як між велосипедом і танком. Найменший військовий безпілотник солдат може носити в кишені, щоб “зазирнути”, припустимо, за ріг будинку. А найбільший, по суті, є повноцінним бойовим літаком, просто без кабіни пілота, який може буквально цілодобово кружляти в повітрі, очікуючи нагоди враження цілі.

Активні бойові дії на сході України, зумовлені російською агресією, продемонстрували потребу не лише у застосуванні на полі бою БПЛА для корегування артилерії та збору розвідувальних даних, а й ударних, здатних вражати броньовані та важкодоступні цілі противника.

Для виконання поставлених задач, потрібно чітко визначення параметрів руху цілей: координат, швидкості та напрямку.

Наразі існують активні та пасивні методи спостереження. В активних методах використовується електромагнітне випромінювання, яке відбивається від цілі і сприймається датчиками для визначення відстані [1]. Але такий метод має недоліки: ціль може мати датчики для виявлення такого опромінення і визначення напрямку звідки воно надходить [2]. Таким чином ціль може сховатися або знищити БПЛА.

Пасивні методи – це спостереження за середовищем, без впливу на нього, таким чином значно покращується непомітність та ціль не має уявлення про те, що її виявили. Але наявні пасивні методи спостереження мають складні обчислення для адекватної точності розрахунків[3].

Основна частина

В розробленому методі пропонується використання одразу двох БПЛА для точного та простого обчислення параметрів руху цілей. Завдяки інфрачервоній камері, визначається напрямок на ціль відносно кожного БПЛА. Маючи координати БПЛА завдяки GPS та напрямок на ціль, можна

скласти рівняння прямих, які поєднують кожен БПЛА з ціллю. Обчисливши координати їх перетину – визначимо координати цілі.

Нехай існує ціль E , координати якої потрібно знайти (Рис.1).

Є початок координат точка O , та два БПЛА, позначені точками A та B .

$A_x, A_y, A_z, B_x, B_y, B_z$ – відповідно проекції точок A та B на осі координат в певний момент часу.

A_1, B_1 – проекції точок A та B на площину xOy .

Вектори $\overrightarrow{AA_1}$ та $\overrightarrow{BB_1}$ – напрямки руху БПЛА.

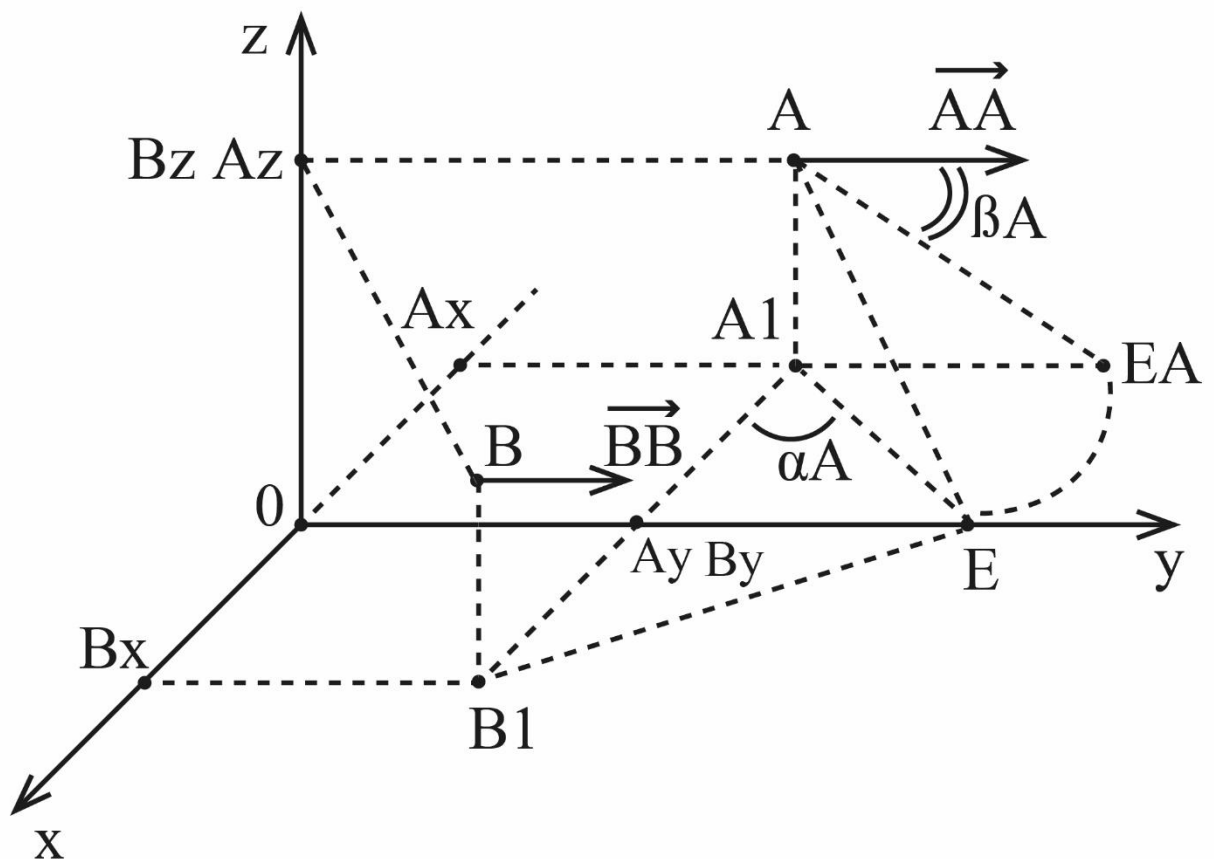


Рис.1. Графічна модель відстеження точки E

Джерело: авторська розробка.

В певний момент часу кожен БПЛА має свої координати $A(x_1, y_1, z_1)$, $B(x_2, y_2, z_2)$ від системи GPS та кути напрямку на ціль по горизонталі відносно

осі X: α_A, α_B та по вертикалі відносно площини xy : β_A, β_B від датчиків кутів повороту камери.

Тоді можна скласти рівняння прямих [4]:

$$\frac{x - x_1}{m_1} = \frac{y - y_1}{p_1} = \frac{z - z_1}{l_1};$$

$$\frac{x - x_2}{m_2} = \frac{y - y_2}{p_2} = \frac{z - z_2}{l_2};$$

Де проекції напрямних векторів:

$$m_1 = \overline{AE}_z = 1 * \sin(\beta_A);$$

$$p_1 = \overline{AE}_x = 1 * \cos(\beta_A) * \cos(\alpha_A);$$

$$l_1 = \overline{AE}_y = 1 * \cos(\beta_A) * \sin(\alpha_A);$$

$$m_2 = \overline{BE}_z = 1 * \sin(\beta_B);$$

$$p_2 = \overline{BE}_x = 1 * \cos(\beta_B) * \cos(\alpha_B);$$

$$l_2 = \overline{BE}_y = 1 * \cos(\beta_B) * \sin(\alpha_B);$$

Далі зведемо рівняння обох прямих до однієї системи з чотирьох рівнянь з трьома невідомими x, y, z . Запишемо її в матричному вигляді:

$$\begin{bmatrix} p_1 & -m_1 & 0 \\ 0 & l_1 & -p_1 \\ p_2 & -m_2 & 0 \\ 0 & l_2 & -p_2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x \\ y \\ z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} p_1 * x_1 - m_1 * y_1 \\ l_1 * y_1 - p_1 * z_1 \\ p_2 * x_2 - m_2 * y_2 \\ l_2 * y_2 - p_2 * z_2 \end{bmatrix};$$

Для вирішення отриманої системи можна застосувати будь який з відомих методів вирішення СЛАР, наприклад метод Гауса. Якщо система виявиться несумісною – прямі не перетинаються і БПЛА спостерігають різні цілі, якщо система має безліч рішень – прямі співпадають (проте в заданій

задачі така ситуація неможлива). Єдиний розв'язок системи дає точку перетину прямих і, відповідно, координати цілі.

Якщо ціль рухається, потрібно виконати двічі цю операцію з певним інтервалом часу. Маючи 2 точки цілі і час можна обчислити швидкість і напрямок руху.

Приклад вирішення задачі

Є початок координат точка 0, та два БПЛА, позначені точками А та В, які мають в певний момент часу спостереження координати: А(-2;2;2√2) та В(2;2; 2√2).

Кути, які видають датчики кутів повороту камери в БПЛА: αА=45°, αВ=135°, βА=-45°, βВ=-45°.

Тоді за розробленим методом:

Підставляємо координати БПЛА та напрямних векторів в канонічні рівняння прямих:

$$\begin{aligned} \text{АЕ: } \frac{x - A_x}{\overline{AE_x}} &= \frac{y - A_y}{\overline{AE_y}} = \frac{z - A_z}{\overline{AE_z}} = \\ &= \frac{x + 2}{\frac{1}{2}} = \frac{y - 2}{\frac{1}{2}} = \frac{z - 2\sqrt{2}}{-\frac{\sqrt{2}}{2}}; \end{aligned}$$

Та для другого БПЛА:

$$\begin{aligned} \text{ВЕ: } \frac{x - B_x}{\overline{BE_x}} &= \frac{y - B_y}{\overline{BE_y}} = \frac{z - B_z}{\overline{BE_z}} = \\ &= \frac{x - 2}{-\frac{1}{2}} = \frac{y - 2}{\frac{1}{2}} = \frac{z - 2\sqrt{2}}{-\frac{\sqrt{2}}{2}} \end{aligned}$$

Зводимо до однієї системи рівнянь:

$$\begin{bmatrix} p1 & -m1 & 0 \\ 0 & l1 & -p1 \\ p2 & -m2 & 0 \\ 0 & l2 & -p2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x \\ y \\ z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} p1 * x1 - m1 * y1 \\ l1 * y1 - p1 * z1 \\ p2 * x2 - m2 * y2 \\ l2 * y2 - p2 * z2 \end{bmatrix};$$

$$\begin{bmatrix} \frac{1}{2} & -\frac{1}{2} & 0 \\ 0 & -\frac{\sqrt{2}}{2} & -\frac{1}{2} \\ \frac{1}{2} & \frac{1}{2} & 0 \\ 0 & -\frac{\sqrt{2}}{2} & -\frac{1}{2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x \\ y \\ z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{1}{2} * (-2) - \frac{1}{2} * 2 \\ -\frac{\sqrt{2}}{2} * 2 - \frac{1}{2} * 2\sqrt{2} \\ \frac{1}{2} * 2 - (-\frac{1}{2}) * 2 \\ -\frac{\sqrt{2}}{2} * 2 - \frac{1}{2} * 2\sqrt{2} \end{bmatrix};$$

В результаті вирішення методом Гауса отримаємо:

$$\left[\begin{array}{cccc|c} 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 4 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{array} \right];$$

$$\begin{bmatrix} x \\ y \\ z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ 4 \\ 0 \end{bmatrix};$$

Координати цілі E(0;4;0).

Висновки

В даній науковій роботі запропоновано новий підхід пасивного методу спостереження за рухомими об'єктами, який забезпечує визначення їх координат та швидкості з використанням інфрачервоних камер двох БПЛА.

В цілому, отримані у ході даного дослідження теоретичні та практичні результати можуть використовуватися надалі у якості методологічної бази підвищення ефективності враження броньованих та важкодоступних цілей противника.

Література

1. Белоцерковский Г.Б. Основы радиолокации и радиолокационные устройства / Г.Б. Белоцерковский. М.: Советское радио, 1975. 336 с.

2. Дрогалин В.В., Дудник П.И., Канащенков А.И. и др. Определение координат и параметров движения источников радиоизлучения по угломерным данным в однопозиционных бортовых радиолокационных системах // Зарубежная радиоэлектроника. Успехи современной радиоэлектроники. 2002. № 3. С. 64–93.
3. Методы автоматического обнаружения и сопровождения объектов. Обработка изображений и управление / Б.А. Алпатов, П.В. Бабаян, О.Е. Балашов, А.И. Степашкин., М.: Радиотехника, 2008. 176 с.
4. Рівняння прямої в просторі
http://mathprofi.ru/uravnenija_pryamoi_v_prostranstve.html [Електронний ресурс].

ДОДАТОК Б – СТРУКТУРНА СХЕМА СИСТЕМИ ВИЗНАЧЕННЯ ЗНАЧЕНЬ ПАРАМЕТРІВ РУХУ ОБ'ЄКТІВ ЗА ДОПОМОГОЮ БЕЗПІЛОТНИКІВ

