

Міністерство освіти і науки України
Харківський національний університет радіоелектроніки

Факультет Електронної та біомедичної інженерії
(повна назва)
Кафедра Мікроелектроніки. Електронних приладів та пристроїв
(повна назва)

КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА Пояснювальна записка

рівень вищої освіти другий (магістерський)

Аналіз структурної та функціональної електричної схеми бортової частини лінії
радіоуправління БПЛА
(тема)

Виконав:

студент 2 курсу, групи ЕЕПм-22-1
Гришков С.В.
(прізвище, ініціали)

Спеціальність 171 «Електроніка»
(код і повна назва спеціальності)

Тип програми освітньо-професійна
(освітньо-професійна або освітньо -наукова)

Освітня програма «Електроні прилади та
пристрої»
(повна назва освітньої програми)

Керівник доц. каф. МЕЕПП Глухов О.В.
(посада, прізвище, ініціали)

Допускається до захисту

Зав. кафедри _____
(підпис)

Бондаренко І.М.
(прізвище, ініціали)

2023 р.
Харківський національний університет радіоелектроніки

Факультет Електронної та біомедичної інженерії
(повна назва)
Кафедра Мікроелектроніки. Електронних приладів та пристроїв
(повна назва)
Рівень вищої освіти другий (магістерський)
Спеціальність 171 «Електроніка»
(код і повна назва)
Тип програми освітньо-професійна
(освітньо-професійна або освітньо-наукова)
Освітня програма «Електроніка. Електронні прилади та пристрої»
(повна назва)

ЗАТВЕРДЖУЮ:

Зав. кафедри _____

(підпис)

« _____ » _____ 20 ____ р.

ЗАВДАННЯ НА КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ

студентові Гришкову Святославу В'ячеславовичу
(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема роботи «Аналіз структурної та функціональної електричної схеми бортової частини лінії радіоуправління БПЛА»
затверджена наказом університету від 20 11 2023 р. № 1369 Ст.
 2. Термін подання студентом роботи до екзаменаційної комісії _____ 2023 р.
 3. Вихідні дані до роботи: MATLAB
 4. Перелік питань, що потребують опрацювання у ході роботи
 - 1) Особливості радіоуправління БПЛА
 - 2) Розроблення структурної та функціональної електричної схеми бортової частини лінії радіоуправління БПЛА
 - 3) Розроблення прототипу комп'ютерної моделі лінії радіоуправління БПЛА отриманих результатів.
 5. Перелік графічного матеріалу із зазначенням креслеників, схем, плакатів, комп'ютерних ілюстрацій (слайдів)
- Ілюстраційний матеріал – 11 шт.

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№	Назва етапів роботи	Терміни виконання етапів роботи	Примітка
1	Аналіз технічного завдання	10.10.23	
2	Аналітичний огляд	16.10.23	
3	Дослідження особливостей радіоуправління БПЛА	15.11.23	
4	Розроблення структурної та функціональної електричної схеми бортової частини лінії радіоуправління БПЛА	29.11.23	
5	Розроблення прототипу комп'ютерної моделі лінії радіоуправління БПЛА отриманих результатів	26.12.23	
6	Опис отриманих результатів	29.12.23	
7	Оформлення пояснювальної записки	02.01.24	
8	Рецензування, нормоконтроль	05.01.24	
9	Захист роботи	11.01.24	

Дата видачі завдання ____ _____ 2023 р.

Студент _____

(підпис)

Керівник роботи _____

(підпис)

(посада, прізвище, ініціали)

РЕФЕРАТ

Пояснювальна записка кваліфікаційної роботи: 54 сторінок, 23 рисунків, 12 посилань, 1 додаток.

БПЛА, БОРТОВА ЦОФРОВА ОБЧИСЛЮВАЛЬНА МАШИНА, ЛІНІЯ РАДІОУПРАВЛІННЯ, РАДІОЛОКАТОР, ШИРОТНО - ІМПУЛЬСНА МОДУЛЯЦІЯ

Об'єкт дослідження – структурна та функціональна електричні схеми бортової частини лінії радіоуправління БПЛА.

Предмет дослідження – бортова частина лінії радіоуправління БПЛА.

Мета роботи – розробка прототипу комп'ютерної моделі бортової частини лінії радіоуправління БПЛА.

Метод дослідження – теоретично-дослідницький, з використанням сучасних програмних засобів.

Актуальність – сьогодні індустрія безпілотних літальних апаратів зростає з кожним днем. Дрони мають широкий спектр застосування. Наразі вони використовуються в системах безпеки, рятувальних операціях, пожежогасінні, доставці посилок, відео- та фотозйомці, кінозйомці та багато іншого. Дрони значно полегшують роботу людини.

Автоматизовані системи управління дронами актуальні тому, що ці апарати поступово починають замінювати людей і переходять в автоматизований режим роботи.

Дипломний проєкт включає розробку прототипу комп'ютерної моделі бортової частини лінії радіоуправління БПЛА, яка може використовуватися для навчального дослідження радіоуправління БПЛА.

ABSTRACT

Explanatory note of qualification work: 54 pages: 23 pictures, 12 references, 1 appendix.

UAV, ON-BOARD COMPUTER, RADIO CONTROL LINE, RADAR, PULSE WIDTH MODULATION

The object of research is structural and functional electrical diagrams of the onboard part of the UAV radio control line.

The subject of research is on-board part of the UAV radio control line.

The purpose of the work is development of a prototype computer model of the onboard part of the UAV radio control line.

Research method is theoretical and research, using modern software tools.

Relevance - Today, the unmanned aerial vehicle industry is growing every day. Drones have a wide range of applications. Currently, they are used in security systems, rescue operations, firefighting, parcel delivery, video and photography, filming, and much more. Drones make human work much easier.

Automated drone control systems are relevant because these devices are gradually starting to replace people and switch to an automated mode of operation.

The diploma project includes the development of a prototype computer model of the onboard part of the UAV radio control line, which can be used for educational research on UAV radio control.

ЗМІСТ

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ, СИМВОЛІВ, ОДИНИЦЬ, СКОРОЧЕНЬ І ТЕРМІНІВ	7
ВСТУП	8
1 ОСОБЛИВОСТІ РАДІОКЕРУВАННЯ БПЛА	9
1.1 Керовані об'єкти.	9
1.2 Види радіоуправління	10
1.3 Загальна характеристика систем радіоуправління.	18
1.4 Основні завдання розроблення систем радіоуправління	21
2 РОЗРОБЛЕННЯ СТРУКТУРНОЇ ТА ФУНКЦІОНАЛЬНОЇ ЕЛЕКТРИЧНОЇ СХЕМИ БОРТОВОЇ ЧАСТИНИ ЛІНІЇ РАДІОУПРАВЛІННЯ БПЛА	26
2.1 Розроблення структурної схеми бортової частини ЛРУ БПЛА у складі загальної схеми	26
2.2 Розробка функціональної схеми бортової частини ЛРУ БПЛА	27
2.3 Принцип роботи функціональної електричної схеми бортової частини лінії радіоуправління БПЛА	35
3. РОЗРОБЛЕННЯ ПРОТОТИПУ КОМП'ЮТЕРНОЇ МОДЕЛІ ЛІНІЇ РАДІОУПРАВЛІННЯ БПЛА	36
3.1 Програмне забезпечення і його опис	36
3.2 Розробка комп'ютерної моделі ЛРУ	37
3.3 Дослідження перехідних процесів	41
3.4 Дослідження динамічних процесів у ЛРУ БПЛА	48
3.5 Стохастичне дослідження каналу управління	49
ВИСНОВКИ	51
ПЕРЕЛІК ДЖЕРЕЛ ПОСИЛАННЯ	53
ДОДАТОК А	55
ДОДАТОК Б	56

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ, СИМВОЛІВ, ОДИНИЦЬ, СКОРОЧЕНЬ І
ТЕРМІНІВ

БПЛА – Безпілотний літальний апарат

БЦОМ – Бортова цифрова обчислювальна машина

КП – Командний пункт

ЛА – Літальний апарат

ШІМ – Широтно-імпульсна модуляція

ВСТУП

Метою дипломного проекту є проектування лінії радіокерування безпілотного літального апарата та її комп'ютерної моделі. Це обґрунтовано тим, що на сьогоднішній день, все більшого значення набуває використання безпілотних літальних апаратів, як у військових, так і в мирних цілях, таких, наприклад, як аерофотозйомка, геологічна розвідка, фотографування місць пожеж і зон екологічних катастроф. Значну допомогу безпілотні літальні апарати можуть надати під час екологічних досліджень зон радіоактивних заражень, таких як "Чорнобиль", і при цьому контактування людини з радіоактивними матеріалами буде зведено до мінімуму. Також величезну роль безпілотні літальні апарати (БПЛА) грають в аерокосмічній промисловості.

Головним завданням радіотехнічних комплексів управління є забезпечення руху літального апарата (ЛА) за заданим законом, тобто за заданою траєкторією. Вплив органів і апаратури керування на ЛА в процесі польоту має призводити до ліквідації його відхилень від заданої траєкторії. Зазвичай на радіотехнічний комплекс управління додатково покладається також здійснення керування режимом роботи встановлених на борту ЛА різних приладів і пристроїв шляхом автоматичного перемикання радіоелектронних і електромеханічних ланцюгів.

Виконання покладених на радіотехнічний комплекс управління завдань майже завжди вимагає комплектування у його складі радіотехнічних і нерадіотехнічних систем, які є разом із самим об'єктом ланками контуру із самим об'єктом ланками контуру керування.

Комплекси керування, в яких радіотехнічні системи абсолютно не застосовуються або, навпаки, є домінуючими, нині трапляються досить рідко.

1 ОСОБЛИВОСТІ РАДІОКЕРУВАННЯ БПЛА

1.1 Керовані об'єкти.

Сучасні автоматично керовані рухомі об'єкти, що рухаються, за своїм призначенням можуть бути розділені на такі класи:

а) апарати мирного застосування:

- літаки цивільної авіації при управлінні польотом за приладами, особливо при так званій "сліпій посадці";

- метеорологічні та дослідницькі ракети;

- керовані багатоступінчасті ракетні комплекси, що містять кілька ступенів ракет-носіїв для виведення штучних супутників Землі на орбіту, а також метеорологічні та дослідницькі штучні супутники Землі і супутники-ретранслятори для ліній радіо- і телевізійного зв'язку;

- керовані багатоступінчасті ракетні комплекси для виведення космічних апаратів на задану траєкторію і самі космічні апарати, причому останні можна поділити на апарати "середнього космосу" (місячні) і "далекого" (міжпланетні).

б) апарати військового застосування:

- бойові літаки за напіваавтоматичного наведення на ціль;

- керовані безпілотні літальні апарати.

Для виконання покладеного на ЛА завдання необхідно здійснити зліт, політ за траєкторією до місця призначення і, залежно від призначення ЛА, посадку, стикування або знищення цілі.

Зліт ЛА проводиться з пускового майданчика: аеродрому для літаків, стартової позиції для безпілотних апаратів.

Пілотовані літаки як транспортні, так і бойові часто приводяться до місця посадки за радіокомандами з командного пункту, які приймаються або пілотом, або автоматичною бортовою апаратурою. У першому випадку має місце

напіваавтоматичне наведення, причому пілот є ланкою контуру управління, що описується своєю передавальною функцією; у другому - автоматичне.

1.2 Види радіоуправління

Контроль орієнтації відіграє або підпорядковану, або самостійну роль. У випадках, коли орієнтація має самостійне значення, вона здійснюється переважно нерадіотехнічними засобами. Тому при розгляді питань радіоуправління найбільший інтерес представляє управління польотом. Отже, нижче основна увага приділяється саме цьому виду управління, а під управлінням розуміється управління польотом.

Розрізняють такі основні види управління:

- автономне управління;
- самонаведення;
- телеуправління;
- комбіноване управління.

Автономне управління польотом - це управління польотом БПЛА без використання енергії з КП (командного пункту).

Тут і далі під КП розуміється точка, з якої здійснюється запуск БПЛА; роль КП в процесі управління різна для різних типів управління.

При автономному управлінні контрольна точка використовується тільки для контролю запуску БПЛА і не бере участі в подальшому процесі управління. Оскільки під час польоту БПЛА не пов'язаний ні з КП, ні з ціллю, автономне керування підходить тільки для керування БПЛА проти нерухомих цілей, про які відомо, що вони нерухомі, або проти цілей, які рухаються за стабільними і відомими траєкторіями.

Самонаведенням називається автоматичне наведення БПЛА на ціль із використанням енергії P_2 , що йде від цілі до БПЛА. Такою енергією можуть

бути випромінювані або відбиті метою радіохвилі, світлові або теплові промені тощо.

Залежно від характеру використовуваної енергії самонаведення може бути радіотехнічним, тепловим, світловим, акустичним [1].

Залежно від місця розташування первинного джерела енергії самонаведення підрозділяється на пасивне, активне і напівактивне.

За пасивного самонаведення енергія P_2 створюється джерелами, розташованими на самій цілі, або природними опромінювачами цілі (Сонцем, Місяцем). Отже, при пасивному самонаведенні енергія P_2 отримується без спеціального опромінення цілі енергією будь-якого виду.

У разі активного самонаведення ціль опромінюється первинним джерелом енергії P_1 , установленим на БПЛА, і для самонаведення використовується відбита від цілі енергія P_2 .

У разі напівактивного самонаведення ціль опромінюється первинним джерелом енергії P_1 , розташованим поза ціллю і БПЛА. Зазвичай це джерело поміщається на КП. Для самонаведення використовується відбита від цілі енергія P_2 .

Під час самонаведення, як і під час автономного управління, командний пункт не бере участі в управлінні БПЛА. (При напівактивному самонаведенні на КП може розміщуватися джерело первинної енергії P_1 , однак і в цьому разі КП відіграє лише суто пасивну роль).

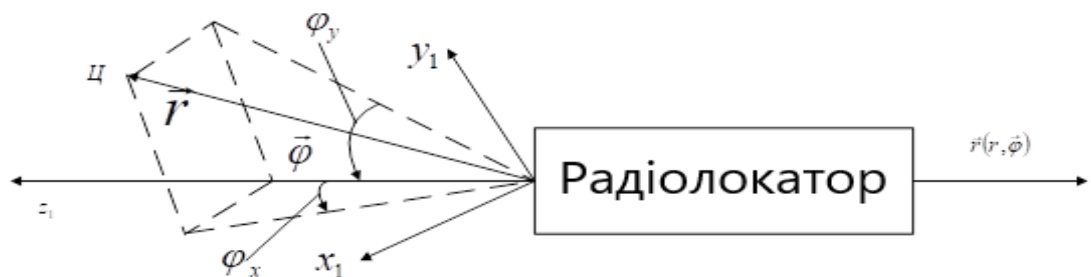


Рисунок. 1.1 - Координати радіолокатора

Але на відміну від автономного правління тут є зв'язок між БПЛА і метою. Використання цього зв'язку дає можливість виявляти відхилення БПЛА від правильного польоту на ціль.

Для визначення цих відхилень на БПЛА встановлюють кутомір (пеленгатор) або радіолокатор цілі (під кутоміром тут і надалі розуміють прилад, що вимірює тільки кутові координати, а під радіолокатором - прилад, здатний вимірювати не тільки кутові, а й інші координати).

Для спільності надалі вважатимемо, що на БПЛА встановлюється радіолокатор. Він вимірює просторову кутову координату цілі φ в деякій системі координат x_1, y_1, z_1 (рис. 1.1). Крім того, радіолокатор визначає дальність до цілі r .

Координати цілі φ та r (або φ_x, φ_y і r) використовуються для управління, що забезпечує наведення БПЛА на ціль.

Телеуправлінням називається управління БПЛА, здійснюване з командного пункту. Це управління може здійснюватися за допомогою рукоятки управління, що приводиться в рух оператором, який перебуває на КП, або повністю автоматично.

У першому випадку телекерування називається ручним або напіваавтоматичним, а в другому - автоматичним.

Для вироблення команд управління повинні виявлятися (вимірюватися) відхилення БПЛА від правильного польоту на ціль.

Залежно від методу вимірювання цих відхилень системи телекерування можна розбити на два види:

- а) телекерування першого виду - з безпосереднім контролем цілі;
- б) телекерування другого виду - з контролем цілі за допомогою апаратури, розташованої на БПЛА.

Принцип телекерування першого виду - з безпосереднім контролем цілі - показано на рис. 1.2.

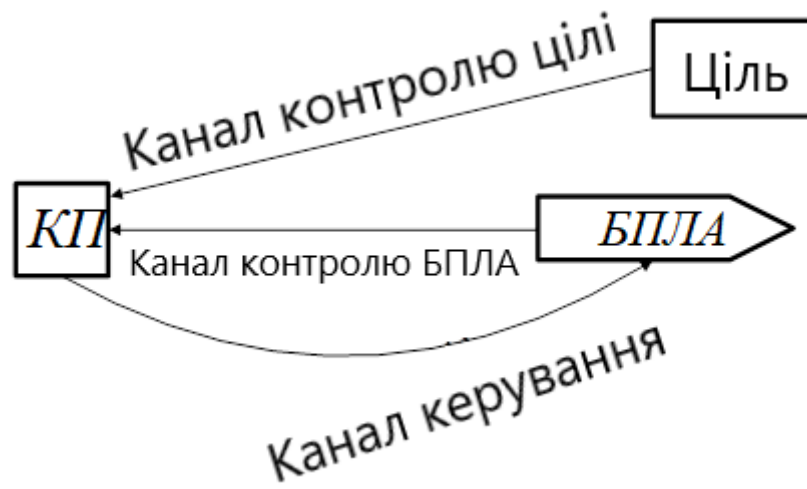


Рисунок. 1.2 - Телеуправління з безпосереднім контролем цілі

У КП здійснюється моніторинг цілі (через канал управління ціллю) та БПЛА (через канал управління БПЛА).

На основі порівняння даних цілі та БПЛА визначається відхилення цілі від правильного польоту до цілі та подаються відповідні команди на руль БПЛА для усунення цього відхилення [3]. Ці команди передаються на БПЛА по каналу управління.



Рисунок. 1.3 - Телекерування з контролем цілі за допомогою бортової апаратури

Принцип другого типу телекерування - з контролем цілі за допомогою бортової апаратури - показаний на рис. 1.3. У цьому випадку відхилення БПЛА від правильного польоту до цілі фіксуються встановленою на БПЛА вимірювальною апаратурою (канал моніторингу цілі) і передаються з БПЛА на КП по каналу передачі даних управління. У цьому випадку політ безпілота до цілі контролюється не безпосередньо на КП, а за допомогою обладнання, встановленого на безпілотнику. На основі даних, отриманих по каналу управління ціллю, блок управління формує команди управління, які передаються безпілотнику по каналу управління.

Найпростіший приклад першого типу дистанційного керування (керування за методом виявлення цілі) показаний на рис. 1.4.

На КП встановлюється радіолокатор, що дає змогу визначити просторовий кут $\varphi \rightarrow$ між напрямками на ціль і БПЛА. Величина і напрямок цього кута відображаються на екрані електроннопроменевої трубки у вигляді відрізка ОЦ, що з'єднує центр екрана О з плямою, що світиться, Ц. Команди управління виробляються оператором за допомогою рукоятки управління РУ і передаються по радіо на борт БПЛА. Оператор повертає рукоятку керування так, щоб світну пляму Ц, що світиться, поєднати з центром екрана, тобто зробити $\varphi = 0$.

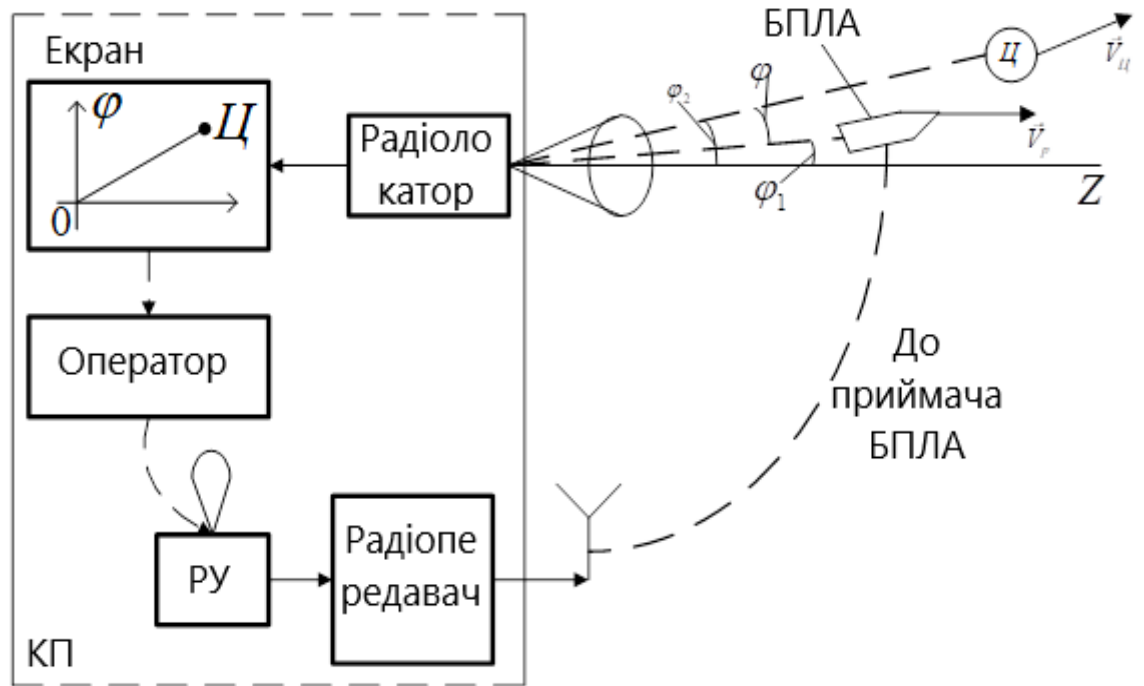


Рисунок. 1.4 - Схема керування найпростішого виду

Це означає, що при правильному управлінні весь час буде $\varphi \approx 0$, тобто БПЛА буде перебувати на лінії візування цілі, як би накриваючи собою мету (якщо дивитися з КП), звідки і пішла назва "метод накриття цілі". Оскільки БПЛА летить у напрямку до цілі, то, залишаючись увесь час на лінії візування цілі, вона має влучити в ціль [4].

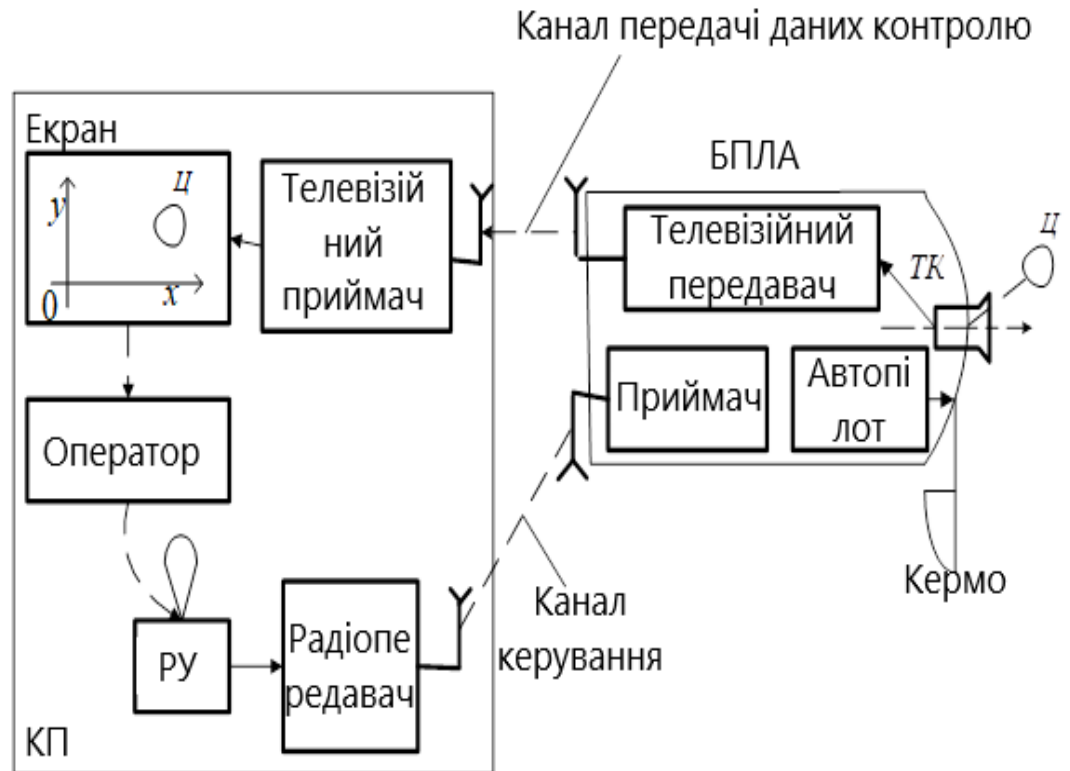


Рисунок. 1.5 - Схема управління за допомогою бортової апаратури

Прикладом телекерування з контролем цілі за допомогою бортової апаратури (рис. 1.5) може слугувати керування за допомогою телевізійної головки.

На БПЛА встановлюється телевізійний передавач; об'єktiv телекамери (ТК) сприймає зображення цілі. Це зображення відтворюється на екрані телевізійного приймача, встановленого на КП (зображення Ц на рис. 1.5). Команди управління виробляються оператором, який спостерігає за екраном, за допомогою рукоятки управління РУ, і передаються на БПЛА через радіопередавач на КП і радіоприймач на БПЛА.

Оператор керує рукояткою таким чином, щоб центр зображення цілі Ц збігався з центром екрана. Оскільки БПЛА летить у напрямку до цілі, то збереження зображення цілі в центрі екрана забезпечує наведення БПЛА на ціль.

Комбінованим керуванням називається комбінація кількох видів керування. Комбінування може бути послідовним або паралельним.

Послідовне комбінування - це комбінація, в якій БПЛА перемикається з одного режиму керування на інший під час польоту. Прикладом послідовної комбінації є поєднання трьох режимів керування: автономного, дистанційного та самонаведення.

На першій ділянці траєкторії польоту, після вертикального зльоту, дрон виходить на потрібний курс за запрограмованою кривою, заданою системою автономного керування. Після цього змінюється режим керування і подальший політ безпілота контролюється за допомогою першого типу пульта (з прямим наведенням на ціль). Коли БПЛА наближається до цілі на відстань, достатню для виявлення цілі системою самонаведення, управління перемикається з першого типу пульта на самонаведення, і БПЛА наводиться на останню ділянку траєкторії польоту.

Така комбінація дозволяє поєднати більшу дальність (телевізійне наведення першого типу) з більшою точністю (самонаведення), але система управління стає складнішою.

Паралельне керування - це комбінована система керування, в якій одночасно використовується більше одного типу керування. Одним із прикладів є поєднання інерційного керування та радіопеленгації. Інерційне керування, тип автономного керування, базується на вимірюванні та інтегруванні прискорень центру мас БПЛА. На нього не впливають організовані перешкоди, але він призводить до накопичення помилок (під час польоту БПЛА), спричинених неточними вимірюваннями прискорень. У випадку радіопеленгації організовані завади можуть мати сильний вплив, але накопичення помилок не відбувається. Тому використання даних радіолокаційної головки самонаведення для корекції інерціальної системи керування може значно покращити якість керування.

1.3 Загальна характеристика систем радіоуправління.

Розвиток техніки радіоуправління привів останніми роками до створення великих систем радіоуправління - системи управління ППО, системи управління повітряним рухом, системи управління навігаційними супутниками Землі тощо.

Ми розглядатимемо, як правило, лише більш приватні системи радіоуправління, які можуть входити до складу великих систем або функціонувати самостійно.

До системи радіоуправління (і тим більше - до складу великої системи) може входити кілька радіоліній, що працюють на різних несучих радіочастотах. Наприклад, до складу системи комбінованого радіоуправління БПЛА можуть входити такі радіолінії:

- а) радіолінія контролю цілі з КП (канал контролю цілі на рис. 1.2);
- б) радіолінія контролю БПЛА з КП (канал контролю БПЛА на рис. 1.2);
- в) радіолінія передавання команд керування з КП на БПЛА (канал керування на рис. 1.2);
- г) радіолінія передачі даних з КП на БПЛА для забезпечення переходу з телекерування на самонаведення;
- д) радіолінія контролю цілі з БПЛА в процесі самонаведення.

Для зменшення вартості, ваги і габаритів апаратури в низці випадків виявляється доцільним об'єднати кілька радіоліній в одну радіолінію, що виконує одночасно дві або більше різних функцій і називається тому комплексною радіолінією [5]. Наприклад, у випадку, що розглядається, найпростіше й найдоцільніше об'єднати радіолінії і передавати з КП на БПЛА всі необхідні дані на одній і тій самій несучій частоті, використовуючи для цього звичайні принципи багатоканального передавання повідомлень.

Основними складовими частинами системи радіоуправління є:

- а) радіолокатори;

- б) радіолінії передачі інформації;
- в) машини управління (обчислювальні).

Радіолокатори та радіолінії залежно від виконуваних ними функцій можна поділити на дві категорії:

а) радіолокатори і радіолінії, які є, по суті, , що входять до складу замкнутого контуру управління літальним апаратом.

- б) інші радіолокатори та радіолінії.

Оскільки основною метою є з'ясування особливостей роботи радіозасобів у складі замкнутих систем автоматичного керування, то далі розглядаються, як правило, радіолокатори і радіолінії лише першої категорії.

Машини управління, які є частиною систем радіоуправління, поділяються на наземні та повітряні (на борту повітряного судна) залежно від їхнього розташування. У випадках, коли машина, яка є частиною системи радіоуправління, надає свої дані людині, а не автоматичному обладнанню управління літаком, вона називається комп'ютером, а не керуючою машиною. Таким чином, керуюча машина є ланкою закритої автоматичної системи управління, тоді як комп'ютер є ланкою закритої або відкритої системи управління, в якій управління здійснюється за безпосередньої (активної) участі людини. Керуючі машини (комп'ютери), які є частиною систем управління, часто також називають лічильними пристроями або пристроями, що приймають рішення.

Залежно від принципу дії машини поділяються на безперервні (аналогові) та дискретні (цифрові). Цифрові машини, в свою чергу, можуть бути універсальними або спеціалізованими. Як правило, спеціалізовані машини використовуються серед аналогових машин.

Універсальні цифрові машини в основному використовуються в наземних системах.

У бортових установках до останніх років застосовували, як правило, аналогові обчислювальні машини, бо цифрові машини мали занадто великі вагу, габарити і вартість. Складність застосування на борту цифрових машин

ускладнювало також і тим, що більшість датчиків інформації (радіолокатори, гіроскопічні прилади, акселерометри та ін.) видавали цю інформацію не в цифровій, а в аналоговій формі, тобто у вигляді безперервних величин і безперервних функцій часу. Тому на борту доводилося ставити цілу низку перетворювачів аналог-код, що перетворюють цю безперервну інформацію в цифровий код. Крім того, були потрібні зазвичай і перетворювачі виду код-аналог, бо цифрова машина видає інформацію у вигляді цифрового коду, а рульові машини, що керують літальними апаратами, працюють, як правило, в безперервному режимі [6].

В останні роки, все більше і більше цифрових комп'ютерів використовуються в бортових системах, головним чином через їхню більшу точність. При достатній кількості розрядів, що використовуються в машині, точність практично обмежується не помилками самого комп'ютера, а помилками аналого-кодових і кодово-аналогових перетворювачів. Але навіть з урахуванням похибок цих перетворювачів загальна похибка керування в цьому випадку набагато менша, ніж в аналогових машинах.

Впровадження цифрових машин управління, по-друге, зумовлене тим, що останніми роками створено цілу низку типів датчиків, які видають інформацію у вигляді цифрового коду. Це, з одного боку, підвищує точність цих датчиків, а з іншого - усуває необхідність застосування перетворювачів аналог-код.

У низці випадків кермові машини працюють не в безперервному режимі, а в релейному режимі "увімкнено-вимкнено". При цьому сполучення керуючої машини з рульовими машинами значно спрощується. Нарешті, бурхливий розвиток техніки електронних обчислювальних машин призвів останніми роками до різкого скорочення їхньої ваги, габаритів, споживаної потужності, вартості та до збільшення надійності їхньої дії.

Керуючі машини, розташовані на борту літального апарата, часто називають автопілотами. Надалі для стислості, ми будемо також називати бортову керуючу машину автопілотом.

1.4 Основні завдання розроблення систем радіоуправління

Апаратура радіоуправління має забезпечити наведення БПЛА на ціль (або виведення її на задану орбіту) відповідно до обраного кінематичного методу наведення. Тут під кінематичним методом розуміють обраний закон руху БПЛА, який розглядають як матеріальну точку. Цей закон може обиратися з різних міркувань, наприклад, виходячи з вимоги отримання мінімальної кривизни траєкторії БПЛА, мінімальної витрати палива, простоти технічної реалізації тощо. Оскільки різним кінематичним методам наведення відповідають різні складність і вартість апаратури керування, то остаточний вибір методу наведення може бути зроблено лише з урахуванням вимог до апаратури керування, які висуваються тим чи іншим методом. Тому під час проектування керованих апаратів може знадобитися розгляд особливостей побудови системи керування за різних варіантів кінематичних методів наведення.

Для кожного кінематичного методу має бути, насамперед, складено функціональну схему системи керування, тобто визначено склад апаратури керування та функції, які має виконувати та чи інша частина апаратури для забезпечення заданого (або обраного) кінематичного методу наведення.

Така функціональна схема у збільшеному вигляді зображена, наприклад, на рис. 1.5.

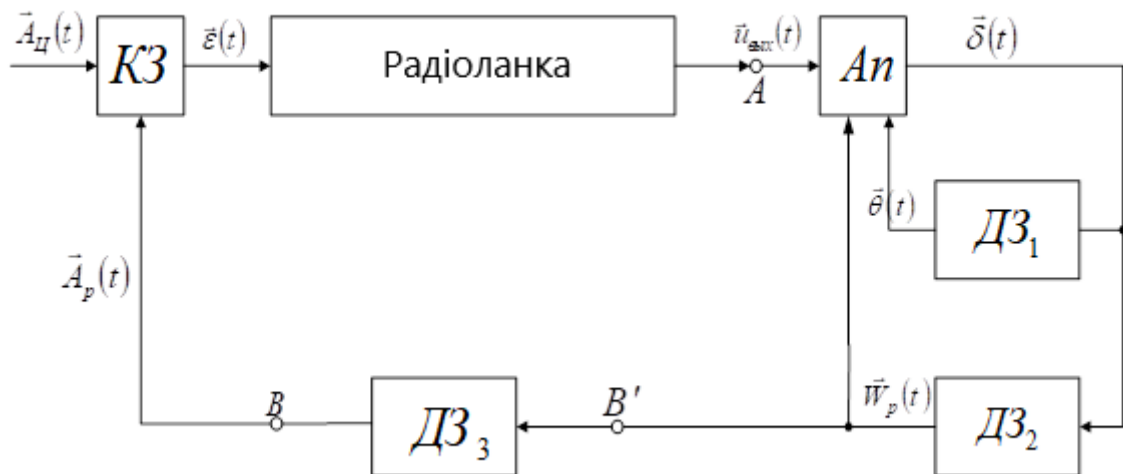


Рисунок. 1.6 - Структурна схема системи самонаведення

На цій схемі прийнято такі позначення:

$A_{Ц} \rightarrow (t)$. - переміщення центру мас цілі;

$A_p \rightarrow (t)$. - переміщення центру мас БПЛА;

$W_p \rightarrow (t)$. - прискорення БПЛА;

$\theta \rightarrow (t)$. - кут повороту корпусу БПЛА навколо її центру мас;

$\varepsilon \rightarrow (t)$. - параметр, що характеризує відхилення фактичної траєкторії БПЛА від заданої;

$U_{вих} \rightarrow (t)$. - напруга на виході радіозв'язку системи управління;

$\delta \rightarrow (t)$. - відхилення керма (рулів) БПЛА.

Стрілки над відповідними величинами означають, що ці величини є векторами, які мають кілька (дві або три) скалярних складових уздовж осей координат. Наприклад, переміщення БПЛА, $A_p \rightarrow (t)$, має в загальному випадку три складові: $A_{xp} \rightarrow (t)$, $A_{yp} \rightarrow (t)$, $A_{zp} \rightarrow (t)$ - уздовж осей x, y, z земної або будь-якої іншої обраної системи координат. Напруга $U_{вих} \rightarrow (t)$ може мати дві складові: $U_{1вих} \rightarrow (t)$ і $U_{2вих} \rightarrow (t)$, які відповідно слугують для утворення команд на рулі, що керують переміщеннями БПЛА у вертикальній і в горизонтальній площинах.

КЛ - кінематична ланка, тобто ланка, що відображає математичне співвідношення між відхиленням $\varepsilon \rightarrow (t)$, що вимірюється радіоланкою, і переміщеннями в просторі центрів мас БПЛА і цілі, $A_p \rightarrow (t)$ і $A_{ц} \rightarrow (t)$; радіоланкою, що відображає дію радіоапаратури, призначеної для вимірювання відхилення $\varepsilon \rightarrow (t)$; Ап - автопілот, тобто пристрій, що перетворює напругу $U_{вих} \rightarrow (t)$ у відповідні відхилення $\delta \rightarrow (t)$ рулів БПЛА [7].

При утворенні відхилення керма автопілотом враховуються також дані про кути повороту корпусу БПЛА $\theta \rightarrow (t)$, прискорення БПЛА $W_p \rightarrow (t)$ і деякі інші параметри, що вводяться в автопілот по ланцюгах зворотних зв'язків. ДЛ1, ДЛ2 і ДЛ3 - динамічні ланки, що враховують математичні співвідношення між відхиленням керма $\delta \rightarrow (t)$, поворотами БПЛА навколо центру мас $\theta \rightarrow (t)$, переміщеннями центру мас $A_p \rightarrow (t)$ і прискоренням БПЛА $W_p \rightarrow (t)$. Закон перетворення напруги $U_{вих} \rightarrow (t)$ у відхилення керма $\delta \rightarrow (t)$ називається законом керування. Закон керування обирають у такий спосіб, щоб реальна траєкторія БПЛА виявлялася якомога ближчою до заданої кінематичної траєкторії (за таких характеристик кінематичної ланки, радіоланцюга і динамічних ланок). Цей закон керування і має бути реалізований автопілотом.

З рис. 1.6 видно, що система керування є системою автоматичного регулювання, що містить кілька замкнутих контурів (ланцюгів, петель). Один із цих контурів замикається через кінематичну ланку (через ціль) і називається зовнішнім контуром, а решта контурів називаються внутрішніми.

У цій системі регулювання радіо-ланцюг являє собою вимірювальний (чутливий) елемент, що вимірює відхилення руху БПЛА від заданого.

Під час аналізу впливу характеристик радіоланцюга (радіоапаратури) на якість керування часто виявляється зручним замінити частину схеми, розташовану правіше від точок А і В, єдиним блоком, званим ланкою автопілот-БПЛА (рис. 1.7).

У деяких випадках під ланкою автопілот-БПЛА зручніше розуміти не всю частину схеми рис. 1.6 правіше від точок АВ, а лише ту її частину, що розташована правіше від точок АВ', тобто зберігати динамічну ланку ДЛ3 у

вигляді самостійної ланки. При цьому структурна схема рис. 1.6 набуває вигляду, зображеного на рис. 1.8. Як видно з порівняння рис. 1.7 і 1.8, ланка автопілот-БПЛА в першому випадку (рис. 1.7) характеризує зв'язок між i , а в другому випадку (рис. 1.8) - зв'язок між i .

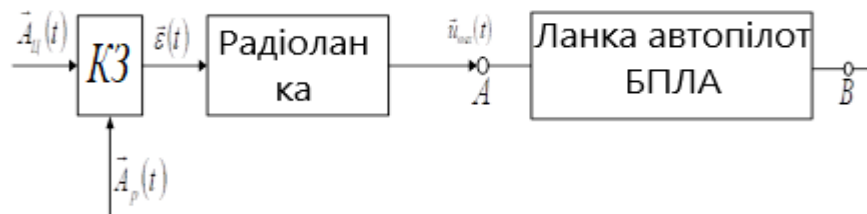


Рисунок. 1.7 - Структурна схема системи самонаведення

Під час розроблення систем керування доводиться розв'язувати завдання аналізу та синтезу систем. Під час аналізу для заданих (або обраних) параметрів БПЛА й апаратури керування мають бути визначені передавальні функції всіх ланок системи, тобто кінематичної ланки, радіоланцюга і контуру автопілот-снаряд.

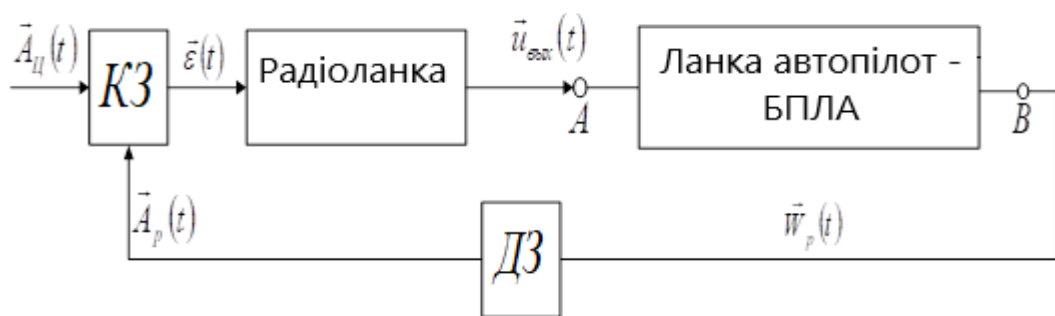


Рисунок. 1.8 - Структурна схема системи самонаведення

Ці передавальні функції мають бути визначені з урахуванням дії перешкод (та інших джерел похибок), що виникають у радіоланцюзі і в ланці автопілот-снаряд. Після того, як усі передавальні функції знайдено, має бути проведено аналіз системи регулювання (рис. 1.6 або 1.7), у результаті якого

мають бути визначені точність і дальність дії системи керування як за відсутності, так і за наявності перешкод. Такий аналіз становить зазвичай великі математичні труднощі, які вдається подолати лише шляхом застосування аналогових і цифрових обчислювальних машин.

Під час синтезу завдання полягає у визначенні характеристик окремих ланок системи, що забезпечують оптимальну (тобто найкращу в заздалегідь установленому сенсі) дію системи в цілому.

Розв'язання цього завдання також представляє великі труднощі і здійснюється як шляхом порівняльного аналізу різних варіантів побудови системи (тобто шляхом так званого інженерного синтезу), так і шляхом спеціальних математичних методів синтезу.

Таким чином, розробка систем радіоуправління містить у собі такі основні питання:

- а) вибір кінематичного методу наведення.
- б) вибір складу вимірювальних засобів.
- в) складання функціональної схеми системи керування.
- г) складання структурної схеми системи керування та визначення передавальних функцій її ланок.
- д) дослідження окремих ланок структурної схеми і схеми загалом методами аналізу і синтезу.

Крім цих питань, пов'язаних зі складанням та аналізом структурної схеми, необхідних для оцінювання точності, дальності та завадостійкості системи керування, доводиться вирішувати цілу низку інших важливих питань. До них належить насамперед забезпечення достатньої надійності системи керування, тобто досить великої ймовірності її безвідмовної дії.

2 РОЗРОБЛЕННЯ СТРУКТУРНОЇ ТА ФУНКЦІОНАЛЬНОЇ ЕЛЕКТРИЧНОЇ СХЕМИ БОРТОВОЇ ЧАСТИНИ ЛІНІЇ РАДІОУПРАВЛІННЯ БПЛА

2.1 Розроблення структурної схеми бортової частини ЛРУ БПЛА у складі загальної схеми

У процесі телекерування на борт літального апарата командною радіолінією (КРЛ) передають у разі декартової кермової системи управління команди курсу і тангажу або в разі полярної кермової системи - команди крену і тангажу. Для того щоб здійснити передачу командною радіолінією кількох незалежних команд одночасно, необхідно зробити її багатоканальною. При цьому побудова командної радіолінії виявляється багато в чому аналогічною побудові інших багатоканальних систем передавання повідомлень, до числа яких належать телеметричні та багатоканальні системи зв'язку.

Так само як і в інших багатоканальних системах, у командній радіолінії для передавання кожного незалежного повідомлення виділяється окремий канал. Причому під незалежним повідомленням у разі командної лінії слід розуміти команду певного виду, наприклад команду управління за курсом або за тангажем. Поділ каналів між собою проводиться за часовою, частотною або за кодовою ознаками. При цьому в кожному каналі формується своє допоміжне піднесуче коливання - імпульсне за часового або кодового поділу каналів і безперервне за поділу каналів за частотою. Параметри піднесучих коливань змінюються під дією переданих команд. Сума піднесучих модулює передавач і надсилається на приймальний бік радіолінії. У приймачі після посилення в загальному тракті та демодуляції відбувається поділ піднесучих і виділення з них переданої команди.

Головка самонаведення, яка може містити в собі тепловий візир, принцип якого полягає у виявленні цілі шляхом інфрачервоного опромінення, або іншу апаратуру, через передавач передає інформацію на командний пункт.

2.2 Розробка функціональної схеми бортової частини ЛРУ БПЛА

В аналоговій радіолінії ШІМ-ЧМн-АМ застосовується режим безперервного випромінювання високочастотного сигналу та частотне ущільнення каналів із використанням гармонійних піднесучих коливань. Структурну схему передавального і приймального трактів такої радіолінії наведено на рис. 2.1. та рис. 2.2 Тимчасові діаграми, які пояснюють процес передавання команд по одному з каналів цієї радіолінії, наведено на рис. 2.3.

Командне повідомлення першого каналу $u_{kc}(t)$ надходить на перетворювач напруга-тимчасовий інтервал, на виході якого утворюється послідовність імпульсів із широтно-імпульсною модуляцією $u_{ШІМ1}(t)$, за допомогою яких здійснюється годинникова маніпуляція гармонійного піднесучого коливання. Будемо вважати, що використовуються два незалежні генератори піднесучих коливань (з частотами F_{11} і F_{21}), які по черзі комутуються керуючими імпульсами. У цьому разі в моменти комутації неперервність фази піднесучого коливання не зберігається. На виході комутатора утворюється сигнал u_{m1} з модуляцією ШІМ-ЧМн. Аналогічні перетворення виконуються в іншому каналі передавального тракту. Сигнали $u_{m1}(t)$ і $u_{m11}(f)$, які відрізняються значеннями часових частот піднесучих коливань і коефіцієнтами команд χ_{k1} і χ_{k11} , складаються в суматорі. Сумарним сигналом $u_m(t) = u_{m1}(t) + u_{m11}(t)$ здійснюється амплітудна модуляція несучого коливання. Результуючий сигнал радіолінії ШІМ-ЧМн-АМ отримують у результаті здійснення трьох ступенів модуляції.

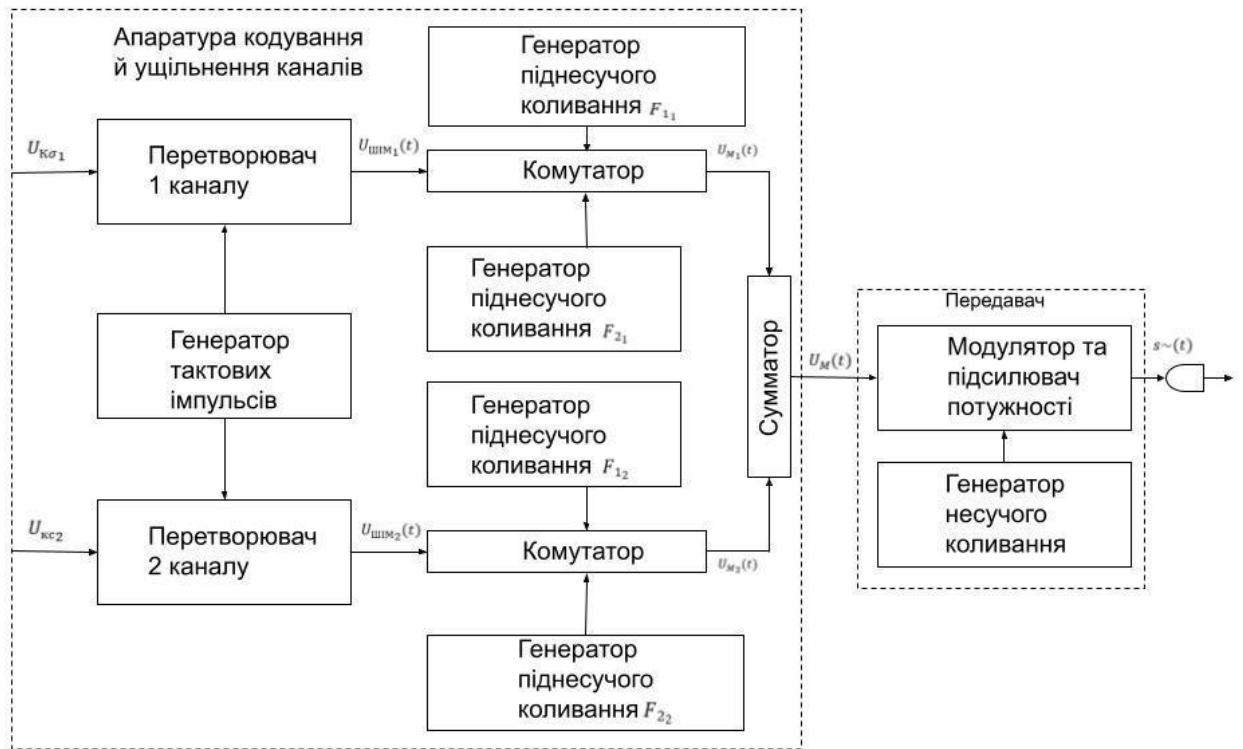


Рисунок. 2.1 - Структурна схема передавального тракту

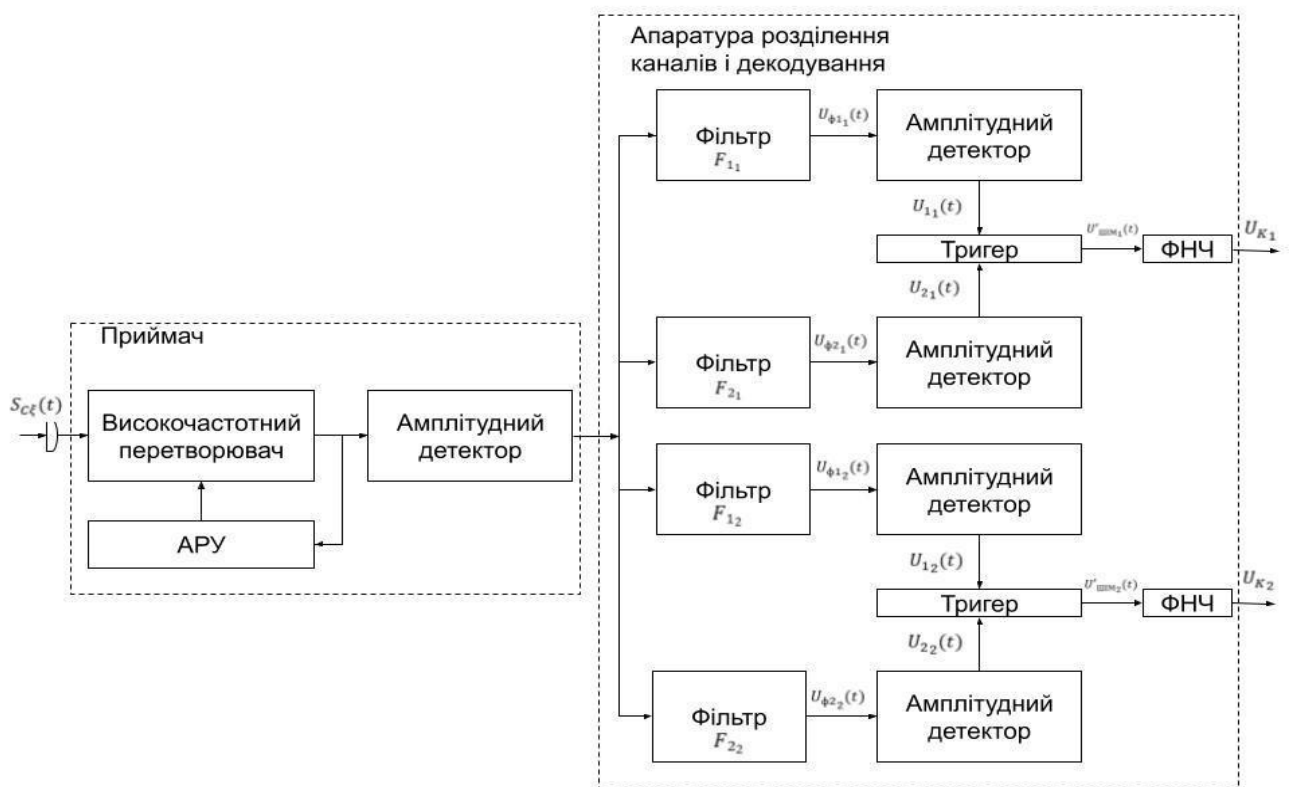


Рисунок. 2.2 – Структурна схема приймального тракту

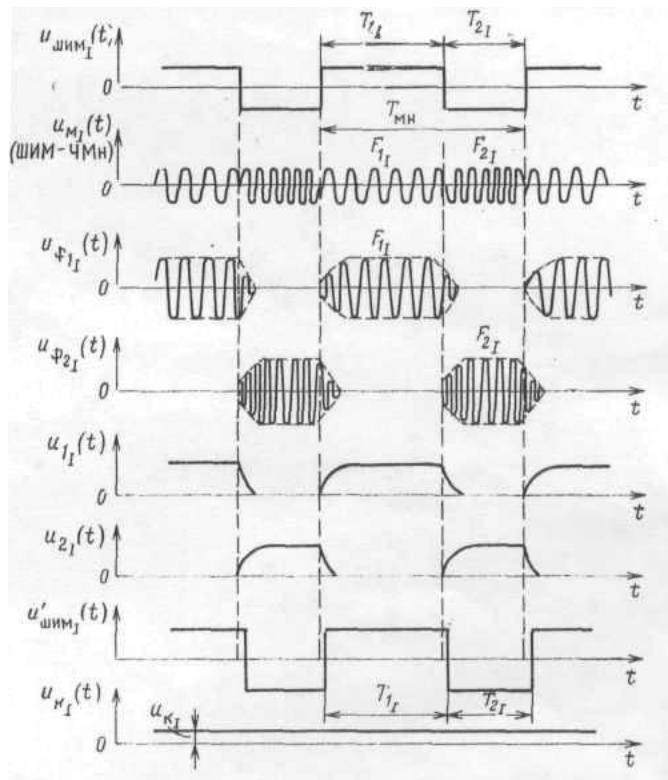


Рисунок. 2.3 - Тимчасові діаграми сигналів для 1 каналу радіолінії ШІМ-ЧМН-АМ

У приймальному пристрої проводиться амплітудне детектування несучого коливання. З виходу детектора сигнал $u_d(t)$ надходить на розділові фільтри піднесучих коливань.

У кожному каналі приймального тракту є два розділові фільтри і два амплітудні детектори обвідної, на виході яких утворюються відеоімпульси $u_{11}(t)$ і $u_{21}(t)$ відповідної тривалості. Ці імпульси надходять на демодулятор ШІМ, основними елементами якого є тригер і ФНЧ. На виході тригера відновлюється сигнал із широтно-імпульсною модуляцією $u'_{\text{ШИМ}}(t)$. Через обмежену смугу пропускання розділових фільтрів імпульси $u_{11}(t)$ і $u_{21}(t)$, що запускають, мають розтягнуті фронти. Тому моменти спрацьовування тригера запізнюються щодо початку цих імпульсів. Якщо схема приймального тракту є симетричною, таке запізнювання не позначається на співвідношенні між

тривалістю позитивних і негативних імпульсів тригера. У несиметричній схемі виникають спотворення прийнятої команди, зокрема зміщення нульового рівня напруги на виході ФНЧ за умови $\chi_k = 0$. Для компенсації подібних спотворень передбачається балансування демодулятора ШІМ.

На рис. 2.4 зображено амплітудний спектр модульованого сигналу $G_M(f)$ і випромінюваного сигналу $G_S(f)$ двоканальної радіолінії ШІМ-ЧМН-АМ під час безперервного передавання постійних команд $\chi_{k1} = 0$ і $\chi_{k11} > 0$ ($T_1 > T_2$, причому для рис. 2.3 $T_{1u} = 3/4T_{MH}$). У спектрі модульованого сигналу $G_M(f)$ є дискретні складові на частотах піднесучих коливань першого і другого каналів ($F1_1; F2_1; F1_{11}; F2_{11}$), а також дискретні складові з частотами $F1_1 \pm L/T_{MH}; F2_1 \pm L/T_{MH}; F1_{11} \pm L/T_{MH}; F2_{11} \pm L/T_{MH}$; ($L = 1, 2, \dots$). Огинаюча дискретного спектра сигналу першого каналу ($\chi_{k1} = 0$) визначається спектром одиночного імпульсу тривалістю $T_{MH}/2$. Оскільки імпульси цього каналу мають однакову тривалість ($T1_1 = T2_1 = T_{MH}/2$), спектральні складові сигналу $u_{m1}(t)$ з частотами $F1_1$ і $F2_1$ мають однакові амплітуди [9]. Ширина спектра піднесучих коливань другого каналу ($\chi_{k11} > 0$) визначається тривалістю коротшого імпульсу $T2_{11}$ ($T2_{11} < T_{MH}/2$). Імпульси більшої тривалості мають більшу енергію, тому амплітуда коливання з частотою $F1_{11}$ у спектрі сигналу $u_m(t)$ перевищує амплітуду коливання з частотою $F2_{11}$. Випромінюваний сигнал радіолінії має спектр $G_S(f)$, який відповідає амплітудній модуляції несучого коливання сигналом $u_m(t)$. Спектр випромінюваного сигналу містить дві симетричні бічні смуги і центральну складову на частоті несучого коливання f_H .

Розглянемо методику вибору основних параметрів радіолінії ШІМ-ЧМН-АМ.

Коефіцієнт команди χ_H характеризує глибину широтно-імпульсної модуляції. Максимальна величина цього коефіцієнта визначається формулою:

$$|\chi_{K_{\max}}| = \left| \frac{T_{\max} - T_{\min}}{T_{\text{MH}}} \right| = \left| 1 - \frac{2T_{\min}}{T_{\text{MH}}} \right|, \quad (2.1)$$

де T_{\max} і T_{\min} - відповідно максимальна і мінімальна тривалості імпульсів на виході перетворювача.

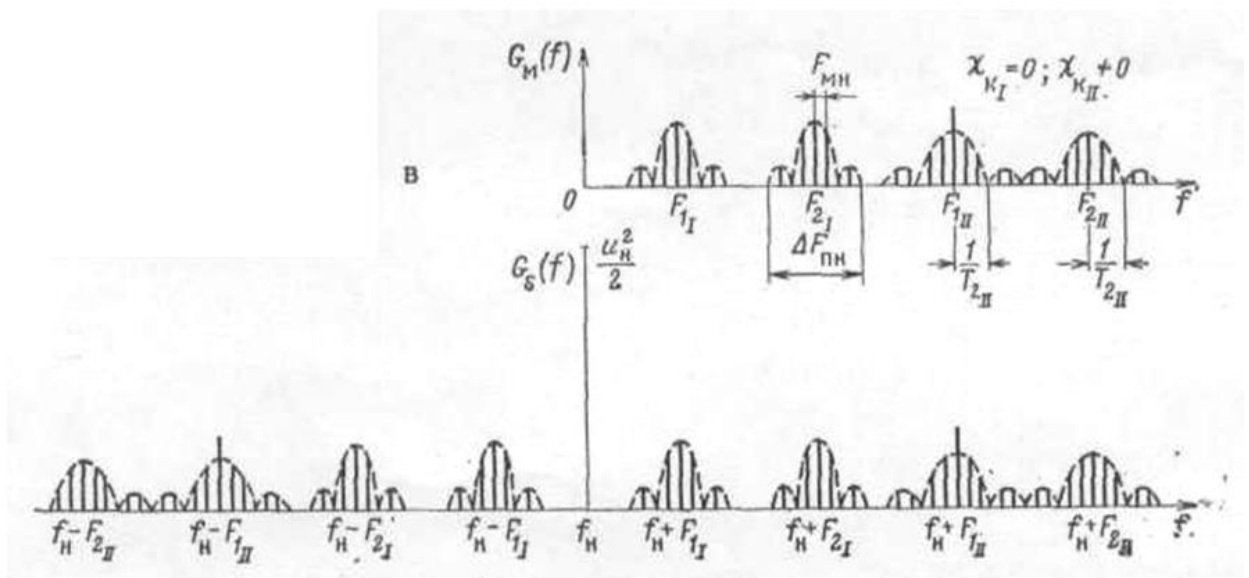


Рисунок. 2.4 - Спектри сигналів у двоканальній радіолінії ШІМ-ЧМН-АМ

Для зменшення спотворень переданої команди під дією перешкод доцільно збільшити максимальну глибину модуляції сигналу, тобто значення $\chi_{K_{\max}}$. Однак при цьому зменшується тривалість імпульсів T_{\min} , що спричиняє розширення спектра піднесучого коливання і вимагає відповідно розширення смуги пропускання радіолінії. Тому під час вибору допустимого значення T_{\min} часто використовується умова $T_{\min} \approx (0,05 - 0,1) T_{\text{MH}}$ тоді з формули (2.1) отримаємо:

$$|\chi_{K_{\max}}| = 0,8 \div 0,9. \quad (2.2)$$

Максимальна ширина окремих частотних смуг спектра піднесучих коливань визначається наближеним співвідношенням:

$$\Delta F_{\text{ПН}} \approx \frac{2 \div 4}{T_{\text{мін}}}. \quad (2.3)$$

Під час вибору ширини смуги пропускання розділових фільтрів ($\Delta F_{p\phi}$) необхідно враховувати можливе відхилення між частотою піднесучого коливання $F_{\text{ПН}}$ ($F_{\text{ПН}} = F_{1,1}, F_{2,1}, F_{1,11}, F_{2,11}$) і резонансною частотою фільтра $F_{p\phi}$; тому застосовується розрахункова формула:

$$\Delta F_{p\phi} \approx 3\alpha_{\phi}F_{\text{ПН}} + \Delta F_{\text{ПН}}, \quad (2.4)$$

де α_{ϕ} - коефіцієнт відносної середньоквадратичної нестабільності налаштування фільтрів (для звичайних резонансних фільтрів $\alpha_{\phi} \approx 0,5 - 10^{-2}$).

Частотні характеристики розділових фільтрів I каналу зображено на рис. 2.5. Оскільки реальні фільтри мають кінцеву селективність, значення частот піднесучих коливань мають віддалятися одна від одної на певну величину ΔF_0 , яку вибирають з умови відсутності взаємних перешкод:

$$\Delta F_0 = \alpha_3 \Delta F_{p\phi}. \quad (2.5)$$

Коефіцієнт запасу α_3 визначається формою частотної характеристики розділових фільтрів; значення коефіцієнта α_3 зазвичай становить 1,3 - 1,5.

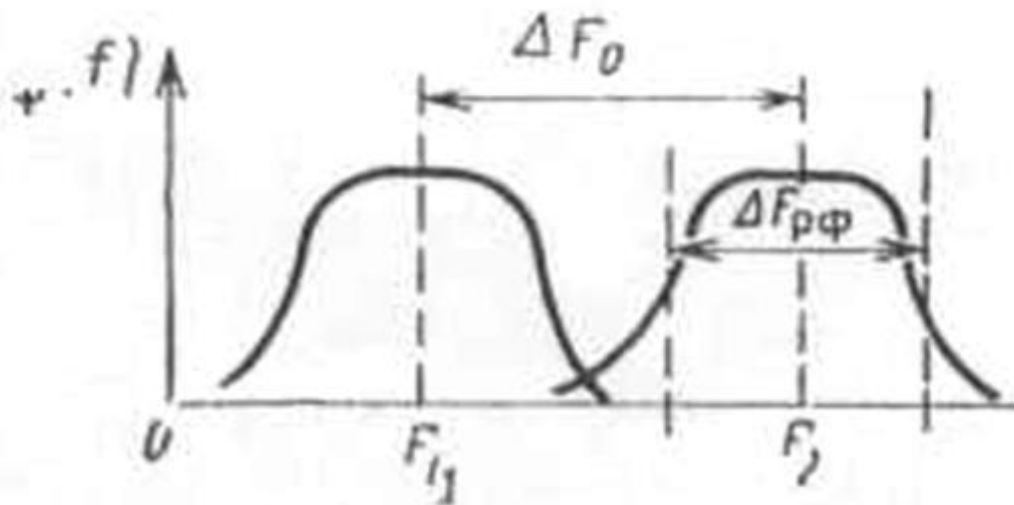


Рисунок. 2.5 - Частотні характеристики розділових фільтрів першого каналу

У процесі передачі команд можливі нелінійні спотворення сигналу через неідеальність характеристик загального тракту КРЛ (передавача і приймача). Наприклад, під час збільшення глибини модуляції несучого коливання може виявитися необхідним враховувати нелінійні ділянки модуляційної характеристики, які будуть причиною появи нелінійних спотворень сигналу. За наявності таких спотворень на виході демодулятора несучого коливання з'являються комбінаційні складові спектра піднесучих коливань, а також гармоніки цих коливань. Для ослаблення подібних завад значення частот піднесучих коливань (F_{1_1} , F_{2_1} , $F_{1_{11}}$, і $F_{2_{11}}$) вибирають із таким розрахунком, щоб комбінаційні складові та гармоніки не потрапляли в смугу пропускання розділових фільтрів. Нелінійні спотворення сигналу в двоканальній радіолінії ШІМ-ЧМн-АМ будуть відносно невеликі, якщо коефіцієнт амплітудної модуляції несучого коливання, створюваної кожним із піднесучих коливань, відповідає умові $m_{AM} \leq 0,4$.

Один із видів спотворень переданих команд зумовлений випадковістю фазових співвідношень у моменти комутації піднесучих коливань. Величина

цих помилок пропорційна мінімальному значенню частоти піднесучого коливання $F_{\text{ПН}_{\text{мін}}}$, (на рис. 2.4 $F_{\text{ПН}_{\text{мін}}} = F1_1$). Тому під час вибору значень $F_{\text{ПН}_{\text{мін}}}$ і $T_{\text{мін}}$ зазвичай використовується умова:

$$F_{\text{ПН}_{\text{мін}}} \geq \frac{10}{T_{\text{мін}}}. \quad (2.6)$$

Максимальне значення частоти піднесучого коливання $F_{\text{ПН}_{\text{макс}}}$ (на рис. 2.4 $F_{\text{ПН}_{\text{макс}}} = F2_1$) обмежене допустимим розширенням спектра випромінюваного сигналу F_c . Параметри $F_{\text{ПН}_{\text{макс}}}$ і F_c пов'язані співвідношенням:

$$F_c = 2 \left(F_{\text{ПН}_{\text{макс}}} + \frac{\Delta F_{\text{ПН}}}{2} \right), \quad (2.7)$$

де $\Delta F_{\text{ПН}}$ визначається формулою (2.3).

Під час вибору ширини смуги пропускання УПЧ ($\Delta F_{\text{ПЧ}}$) враховується нестабільність частоти гетеродина в приймачі та зміни частоти сигналу, що приймається, зокрема доплерівське зміщення частоти сигналу. Таким чином, використовується співвідношення:

$$\Delta F_{\text{ПЧ}} = F_c + \Delta F_{f_{\text{макс}}}, \quad (2.8)$$

де $\Delta F_{f_{\text{макс}}}$ - максимально можливе сумарне відхилення проміжної частоти від її номінального значення.

2.3 Принцип роботи функціональної електричної схеми бортової частини лінії радіоуправління БПЛА

Антенa приймача приймає високочастотний сигнал (ВЧ), який підсилюється на підсилювачі високої частоти (ПВЧ), далі сигнал надходить на змішувач, де внаслідок змішання сигналу несучої частоти з сигналом опорного генератора (з частотою 600 МГц) утворюється проміжна частота (ПЧ) (500кГц). Вихідний сигнал проміжної частоти проходить через смуговий фільтр (СФ) і надходить на ЧМ детектор. Сигнал низької частоти (НЧ), що виділився, надходить на схему автоматичного регулювання посилення (АРП) і на смугові фільтри. Залежно від амплітуди вихідного АМ сигналу змінюється коефіцієнт посилення ПВЧ, таким чином здійснюється автоматичне регулювання посилення. Смугові фільтри видають сигнали низької частоти (20 і 15 кГц), які через амплітудні детектори надходять на RS-тригер. Вихідний ШІМ-сигнал інтегрується у ФНЧ і в результаті інтегрування виходить сигнал постійної напруги.

3. РОЗРОБЛЕННЯ ПРОТОТИПУ КОМП'ЮТЕРНОЇ МОДЕЛІ ЛІНІЇ РАДІОУПРАВЛІННЯ БПЛА

3.1 Програмне забезпечення і його опис

Однією з головних переваг пакета MATLAB є те, що користувачеві потрібно знати тільки стільки, скільки необхідно для розв'язання поставленого завдання. Наприклад, у найпростішому випадку MATLAB може виконувати роль звичайного калькулятора, і потрібно лише запам'ятати знаки математичних операцій. Якщо ж поставлене завдання вимагає створення спеціальних інструментів, MATLAB надає користувачеві практично універсальну об'єктно-орієнтовану мову програмування з інтерактивними засобами налагодження для створення програм. У сфері математичного моделювання MATLAB дає змогу користувачам повною мірою скористатися останніми досягненнями комп'ютерних технологій, такими як візуалізація, передача голосових (аудіо) даних і обмін даними через Інтернет. Крім того, користувачі можуть використовувати MATLAB для створення власних графічних інтерфейсів, що відповідають як власним вподобанням, так і вимогам поставленого завдання.

Технологія комп'ютерного моделювання передбачає виконання таких дій:

- а) визначення мети моделювання;
- б) розроблення концептуальної моделі;
- в) формалізація моделі;
- г) програмна реалізація моделі;
- г) планування модельних експериментів;

- д) реалізація плану експерименту;
- е) аналіз та інтерпретація результатів моделювання.

Розробка SIMULINK-моделей (далі - S-моделей) базується на технології drag-and-drop. Модулі (або блоки), що зберігаються в бібліотеці SIMULINK, використовуються як "будівельні блоки" для побудови S-моделі.

Бібліотека SIMULINK хороша тим, що надає користувачеві доступ до всіх основних функцій пакета MATLAB і є відносно незалежним компонентом пакета, так що для роботи з нею не потрібні знання використання інших інструментів пакета.

Блоки, що містяться в створеній вами моделі, можуть бути пов'язані між собою як з точки зору інформації, так і з точки зору управління. Тип зв'язку залежить від типу блоку і логіки моделі. Дані, якими обмінюються блоки, можуть бути скалярними значеннями, векторами або матрицями будь-якої розмірності

3.2 Розробка комп'ютерної моделі ЛРУ

Для стохастичного та динамічного дослідження ЛРУ БПЛА використовуються різні методи моделювання на цифрових та аналогових обчислювальних машинах. Під час моделювання динамічні характеристики легко і швидко відтворюються на екрані дисплея.

Базовими елементами моделі БПЛА є функціональні стандартні блоки, які виконують певні функції. За допомогою цих блоків можна моделювати будь-які передавальні функції, типові нелінійності, логічні функції тощо.

Будь-який функціональний блок включає: входи, виходи, параметри та функції, які виконують операції над вхідними величинами для отримання

вихідних значень. Для з'єднання блоків необхідно вихід одного блоку подати на вхід іншого.

Моделювання БПЛА здійснюється з використанням готового пакета "SIMULc".

Вхідна мова пакета "SIMULc" є блок-орієнтованою. Основними елементами вхідної мови є стандартні та нестандартні функціональні блоки.

Будь-який функціональний блок включає:

- входи;
- виходи;
- параметри і функції, які виконують операції над вхідними величинами для отримання вихідних значень.

Для опису структури системи необхідно призначити вихід одного блоку на вхід іншого. Користувач може визначати змінні та константи. Вони можуть використовуватися як входи стандартних або входи/виходи нестандартних блоків.

На рис. 3.1 представлена схема прототипу комп'ютерної моделі лінії радіоуправління БПЛА.

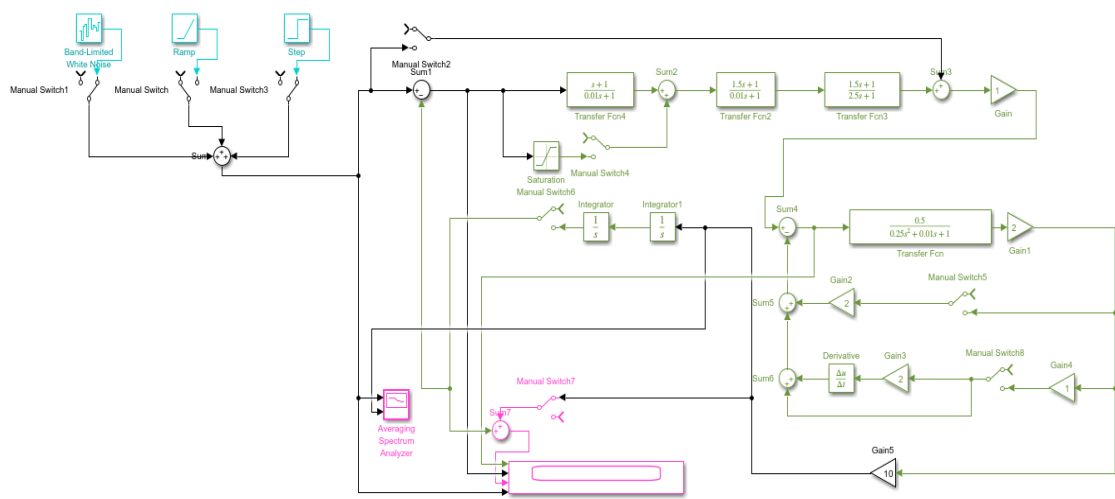


Рисунок. 3.1 - Схема прототипу комп'ютерної моделі лінії радіоуправління БПЛА

Схема прототипу комп'ютерної моделі лінії радіоуправління БПЛА складається з 3 основних блоків:

- блок генераторів стандартних сигналів;
- два допоміжних осцилографа для моніторингу сигналу;
- типова схема моделі БПЛА.

Використовуючи перемикачі "Manual Switch" виконується з'єднання генераторів стандартних сигналів з входом моделі БПЛА:

- включення сигналу одиничної функції "Step" на вхід моделі дає змогу за кривими перехідного процесу оцінити якість БПЛА. Зміна амплітуди функції "Step" (збільшення або зменшення) приводить модель БПЛА в стійкий або нестійкий стан;

- увімкнення сигналу типу "Ramp" дає змогу оцінити якість динамічного регулювання моделі (динамічного відпрацювання вхідного сигналу) за її динамічними помилками [2];

- включення генератора "білого шуму" "Band-Limited White Noise" дає змогу провести статистичне дослідження замкнутого контуру БПЛА.

Модель БПЛА складається з послідовно з'єднаних компонентів:

- інтегро - диференціювального фільтра:

$$K_{\text{УВК}}(p) = \frac{K_{\text{УВК}}(1 + pT_2)}{1 + pT_1} = \frac{(S + 0,5)^2}{S + 0,25}. \quad (3.1)$$

- дискримінатора (формувача сигналу помилки);
- пристрій передачі команд наведення:

$$K_{\text{ППК}}(p) = \frac{K_{\text{ППК}}}{1 + pT_{\text{ППК}}} = \frac{1}{(S + 10)}. \quad (3.2)$$

- формувача системи з обмежувачем "Saturation";
- узагальненого регульованого підсилювача БПЛА для зміни смуги контуру керування;

- системи стабілізації характеристик БПЛА:

$$K_v(p) = \int W_{\text{БПЛА}}(t) dt = W_{\text{БПЛА}}(p) \frac{K_u}{p} \quad \text{- за швидкістю;} \quad (3.3)$$

$$K_w(p) = W_{\text{БПЛА}} K_w \quad \text{- за прискоренням.}$$

- кінематичної ланки зворотного зв'язку:

$$K_0(p) = \frac{1}{p^2}. \quad (3.4)$$

- комутаційні ключі;

Блок контролю змін сигналів у 4-х точках БПЛА:

- сигнал помилки БПЛА;

- сигнал помилки стабілізаційної системи;

- нормального прискорення;

- сигнал відпрацювання вхідного керуючого впливу на виході "кінематичної ланки".

У підсумку комп'ютерна модель БПЛА складається з двох вбудованих систем:

- канал управління польотом БПЛА;

- канал управління БПЛА з двома контурами НЗЗ.

Стандартні сигнали можна надсилати на кожну систему окремо і контролювати різні точки моделі. Можна змінювати параметри вхідних стандартних сигналів, а також параметри і структуру самої моделі[8].

3.3 Дослідження перехідних процесів

Просторовий рух БПЛА описується рівняннями сил, моментів і кінематики польоту. Рівняння сили описує переміщення центру мас (ЦМ) у вертикальному просторі:

$$F_{Yv} = mW_Y \cong Y^\alpha \alpha + P\alpha \pm Y^\delta \delta. \quad (3.5)$$

При $\delta=0$ отримаємо вертикальне прискорення :

$$W_Y = \frac{Y^{\alpha+P}}{m} \alpha. \quad (3.6)$$

Лінеаризоване рівняння моментів описує обертання БПЛА навколо ЦМ відносно осі OZ згідно з основним законом динаміки обертального руху і може бути подане у вигляді:

$$I\alpha = I_Z \ddot{\nu} = M_Z^\delta \delta - M_Z^\alpha \alpha - M_Z^{\omega_Z} \omega_Z, \quad (3.7)$$

де - I_Z - момент інерції БПЛА відносно осі OZ . Він залежить від розподілу маси відносно осі обертання OZ. Для обруча з радіусом r момент інерції є $I_0 = mr^2$.

Рівняння кінематики описується:

- рівнянням зв'язку кутів:

$$V = \theta + \alpha. \quad (3.8)$$

- швидкісним рівнянням:

$$\{\dot{x}_g = v \cos \theta \quad \dot{y}_g = v \sin \theta . \quad (3.9)$$

Для отримання передавальної функції каналу керування БПЛА необхідно отримати залежність $\alpha = f(\delta)$ з урахуванням динаміки обертання БПЛА навколо осі OZ, тобто $K(p) = \frac{\alpha(p)}{\delta(p)}$. Для цього використовуємо рівняння моментів і сил. У рівнянні моментів (3.5) необхідно v виразити через α і відповідні похідні:

$$v = \theta + \alpha, v' = \theta' + \alpha' , \quad (3.10)$$

де $\omega_z = v'$ - кутова швидкість.

З рівняння сил виводимо кутову швидкість вектора швидкості БПЛА. Для цього представимо нормальне прискорення у вертикальній площині у вигляді $W_Y = v\theta'$ і отримаємо θ' :

$$\begin{aligned} F_{Yv} = mv\theta' &= (Y^\alpha + p)\alpha, \\ \theta' &= \frac{Y^\alpha + p}{mv} \alpha. \end{aligned} \quad (3.11)$$

Позначимо $T_v = \frac{mv}{Y^\alpha + p}$ - постійна аеродинамічна часу БПЛА.

Тоді рівняння (3.10) можна переписати у вигляді:

$$v = \theta + \alpha, v' = \frac{\alpha}{T_v} + \alpha', v'' = \frac{\alpha'}{T_v} + \alpha''. \quad (3.12)$$

Підставимо отримані значення в основне рівняння динаміки обертання БПЛА навколо осі OZ:

$$I_Z(\theta'' + \alpha'') = M_Z^\delta \delta - M_Z^\alpha \alpha - M_Z^{\omega Z}(\theta' + \alpha'). \quad (3.13)$$

В останньому рівнянні розділимо вхід " δ " і вихід " α " і розкриємо значення всіх кутів та їхніх похідних

$$I_Z \left(\alpha'' + \frac{1}{T_v} \alpha' \right) + M_Z^{\omega Z} \left(\alpha' + \frac{1}{T_v} \alpha \right) + M_Z^\alpha \alpha = M_Z^\delta \delta. \quad (3.14)$$

Згрупуємо однакові члени відносно α і запишемо останнє рівняння з урахуванням перетворення Лапласа :

$$I_Z \alpha'' + \left(\frac{I_Z}{T_v} + M_Z^{\omega Z} \right) \alpha' + \left(M_Z^\alpha + \frac{M_Z^{\omega Z}}{T_v} \right) \alpha = M_Z^\delta \delta, \quad (3.15)$$

$$\alpha' = p\alpha, \alpha'' = p^2\alpha,$$

$$I_Z p^2 \alpha + a_2 p \alpha + a_1 \alpha = M_Z^\delta \delta.$$

$$\text{де } a_1 = M_Z^\alpha + \frac{M_Z^{\omega Z}}{T_v}, \quad a_2 = \frac{I_Z}{T_v} + M_Z^{\omega Z}$$

З останнього рівняння неважко записати передавальну характеристику каналу управління БПЛА за кутом атаки α :

$$K_\alpha(p) = \frac{\delta(p)}{\alpha(p)} = \frac{\frac{M_Z^\delta}{a_1}}{1 + \frac{a_2}{a_1}p + \frac{I_Z}{a_1}p^2}. \quad (3.16)$$

Бачимо, що рівняння (3.16) відповідає коливальній ланці:

$$K_\alpha(p) = \frac{K_\alpha}{1 + 2\xi T p + T^2 p^2}. \quad (3.17)$$

де $K_\alpha = \frac{M_Z^\delta}{a_1} = \frac{M_Z^\delta}{M_Z^\alpha + \frac{M_Z^{\omega Z}}{T_v}} = \frac{M_Z^\delta T_v}{M_Z^\alpha T_v + M_Z^{\omega Z}} \approx \frac{M_Z^\delta}{M_Z^\alpha} = \frac{S_\delta X_\delta}{S_\alpha X_F}$ - коефіцієнт передавання, який

визначається відношенням площі керма S_δ до площі крила + корпусу S_α з урахуванням їхніх плечей відносно ЦМ:

$$T = \sqrt{\frac{I_Z}{a_1}} = \sqrt{\frac{I_Z}{M_Z^\alpha + \frac{M_Z^{\omega Z}}{T_v}}} \approx \sqrt{\frac{I_Z}{M_Z^\alpha}} = \sqrt{\frac{I_Z}{C_{Y\alpha} \frac{\rho v^2}{2} S_\alpha X_F}} - \text{постійна часу};$$

$$\xi \cong \frac{1}{2T_v} \cdot \frac{I_Z}{M_Z^\alpha} \sqrt{\frac{M_Z^\alpha}{I_Z}} = \frac{1}{2T_v} \cdot \sqrt{\frac{I_Z}{M_Z^\alpha}} = \frac{Y^\alpha + P}{2mv} \sqrt{\frac{I_Z}{M_Z^\alpha}} - \text{коефіцієнт демпфірування.}$$

Аналіз отриманої передавальної характеристики (3.17) показує таке:

а) без інерційний коефіцієнт передачі K_α за кутом атаки залежить від геометричного компонування БПЛА (відношенням площ S_δ і S_α , їхніх плечей X_δ і X_F), а також швидкості польоту БПЛА та змінюється в незначних межах ($K_\alpha = 0,4 \dots 0,6$). Цей коефіцієнт K_α визначає керованість і стійкість БПЛА і показує $\alpha = K_\alpha \delta$, на який кут α повернеться БПЛА, якщо δ повернути на 1° ;

б) постійна часу $T = \sqrt{\frac{I_Z}{C_{Y\alpha} \frac{\rho v^2}{2} S_\alpha X_F}}$ обернено пропорційна швидкісному

напору $q = \frac{\rho v^2}{2}$ і прямо пропорційна масі БПЛА. Тому за постійної швидкості польоту зі зростанням висоти T збільшується (зменшується керованість). Також T збільшується зі збільшенням маси БПЛА;

в) коефіцієнт демпфірування ξ визначається здебільшого демпфуючим моментом $M_Z^{\omega Z}$ і має приблизний діапазон $\xi = 0,05 \dots 0,15$.

На практиці використовують коефіцієнт передачі каналу за нормальним прискоренням:

$$K_W = \frac{W_H}{\delta} = \frac{\alpha W_H}{\delta \alpha} = K_\alpha \frac{W_H}{\alpha} = \frac{S_{\text{руля}} X_\delta}{S_{\text{крыла}} X_F} \frac{Y^\alpha + P}{m}. \quad (3.18)$$

Коефіцієнт K_W показує, яке діятиме нормальне прискорення W_H , якщо кермо повернеться на 1° . Цей коефіцієнт пропорційний швидкісному напору $q = \frac{\rho v^2}{2}$ і при зміні висоти та швидкості має діапазон $K_W = 20 \dots 400$ м/сек² рад.

БПЛА як динамічна ланка САУ в першому наближенні являє собою коливальну ланку з нелінійними параметрами, що змінюються [10].

Для отримання передавальної характеристики каналу керування БПЛА врахуємо зв'язок кутів $v = \theta + \alpha$ і запишемо θ від похідної θ' , тобто $\theta = \frac{1}{T_v p} \alpha$.

Тоді кут тангажу можна записати:

$$\omega(p) = \frac{1}{T_v p} \alpha + \alpha = \alpha \left(\frac{1+pT_v}{pT_v} \right). \quad (3.19)$$

У підсумку передавальна характеристика каналу управління БПЛА має вид:

$$K_v(p) = \frac{v(p)}{\delta(p)} = \frac{\frac{K_\alpha}{T_v} (1+pT_v)}{p(1+2\xi T p + T^2 p^2)}, \quad (3.20)$$

і його структура показана на рис. 3.2.

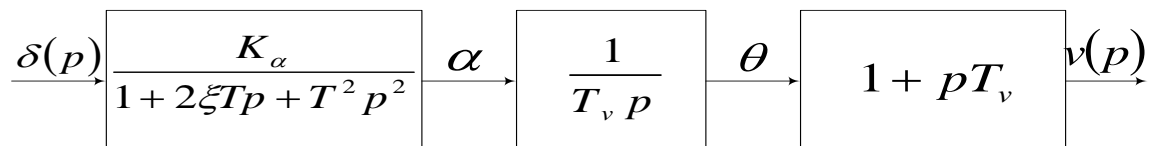


Рисунок. 3.2 - Передавальна характеристика каналу керування БПЛА

Для побудови її ЛАХ і ФЧХ врахуємо такі параметри:

а) постійна часу T_v відповідає низькій частоті $\omega_v = \frac{1}{T_v}$, оскільки T_v змінюється в межах $T_v = 1 \dots 15$ сек;

б) постійна часу $T < T_v$ менша за аеродинамічну постійну часу і власна частота коливань БПЛА лежить у межах $\omega_0 = \frac{1}{T} = 0.5 \dots 5$ Гц;

в) коефіцієнт демпфірування визначає величину резонансного піку на ЛАХ і поблизу точки резонансу $\omega_0 = \frac{1}{T}$ сильно залежить від ступеня загасання[11].

Якщо прийняти $K_a = 0.8$, $T_v = 1.5$ сек, $T = 0.8$ сек, то отримаємо такий вигляд ЛАХ і ФЧХ каналу керування БПЛА (рис. 3.3).

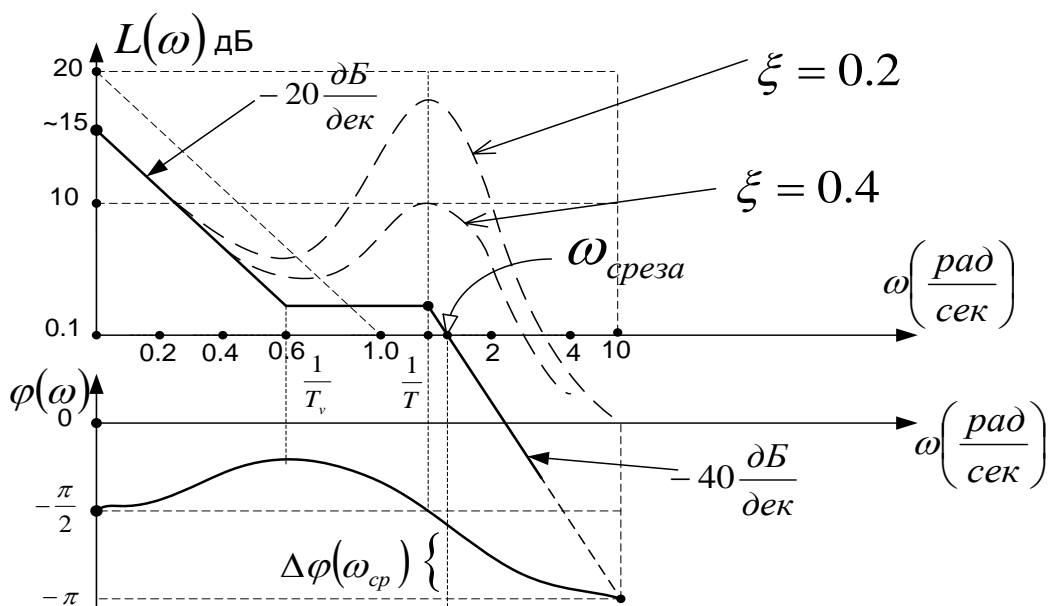


Рисунок. 3.3 - ЛАХ і ФЧХ каналу управління БПЛА

$$\text{де } \omega_{T_v} = \frac{1}{T_v} = 0.67 \text{ рад/сек;}$$

$$\omega_0 = \frac{1}{T} = 1.25 \text{ рад/сек;}$$

$$\frac{K_a}{T_v} \approx 0.53 \text{ (-5,5 дБ).}$$

З рисунка 3.3 виходить, що канал керування БПЛА за обраних параметрів має запас стійкості за фазою на $\omega_{зріза}$ приблизно $\Delta\phi(\omega_{ср}) \approx 70^\circ$, що добре і для маневреності БПЛА. А запас стійкості за амплітудою набагато перевищує 10 дБ, що забезпечує керованість і стійкість БПЛА.

Для цього на вхід каналу ЛРУ потрібно подати сигнал "Step" і за допомогою ключів забезпечити ввімкнення НЗЗ за швидкістю, прискоренням або одночасного ввімкнення цих систем. Оцінити вплив кожного ланцюга НЗЗ на якість перехідного процесу можна за осцилограмами. На рис. 3.4 показано вихід каналу за відсутності НЗЗ за швидкістю (система збуджена), а на рис. 3.5 та рис. 3.6 за наявності НЗЗ за швидкістю та прискоренням.

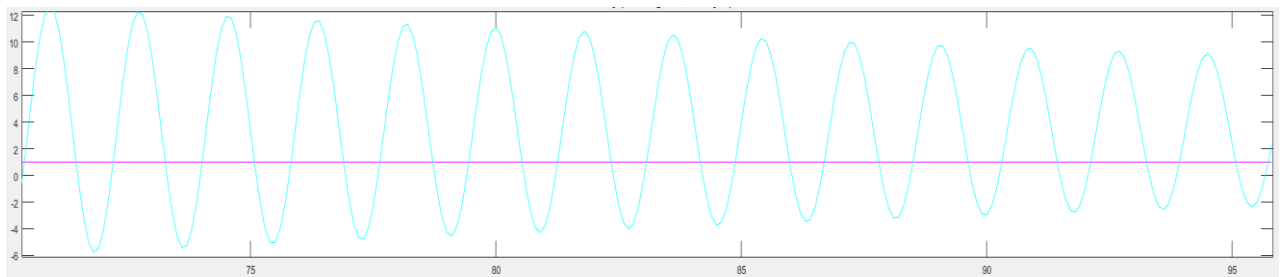


Рисунок. 3.4 - Система збуджена

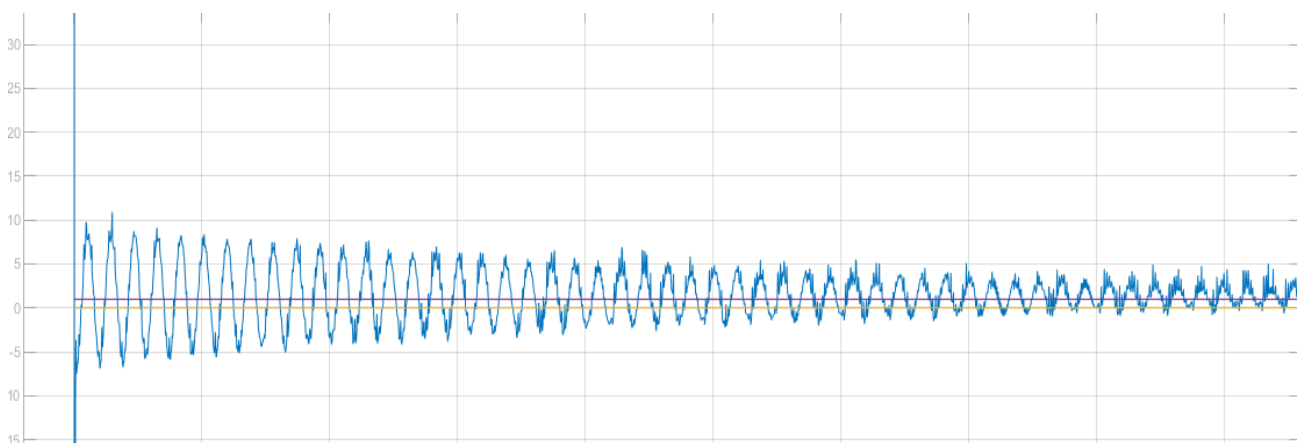
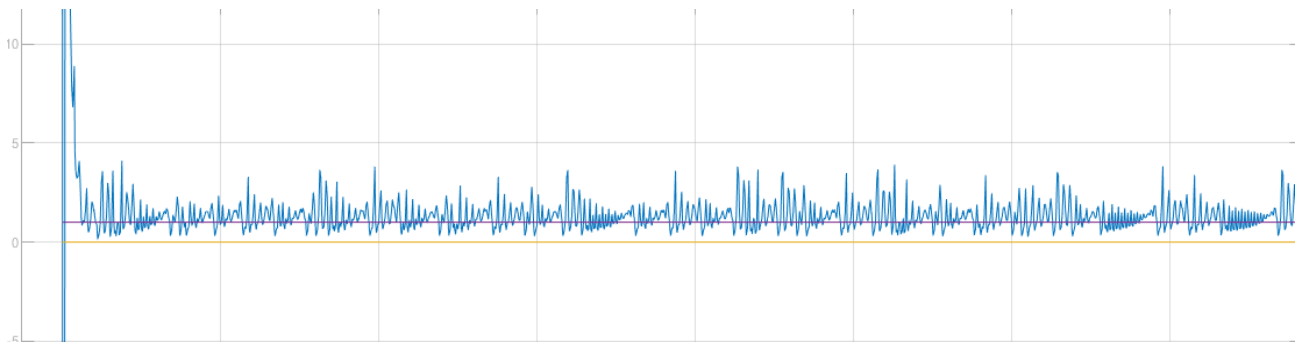


Рисунок. 3.5 – НЗЗ за прискоренням і швидкістю за малого коефіцієнта посилення



б)

Рисунок. 3.6 – НЗЗ за швидкістю за малого коефіцієнта посилення НЗЗ

3.4 Дослідження динамічних процесів у ЛРУ БПЛА

Якість керування польотом БПЛА визначається помилками усталеного польоту під час відпрацювання вхідного корисного сигналу (команд керування) за наявності перешкод.

Вихід системи (канал керування) при подачі сигналу "Ramp" показано на рис. 3.7 та рис. 3.8. З малюнка видно, що чим вужчою є смуга пропускання каналу керування, тим більшою є динамічна помилка за постійних параметрів вхідного сигналу.

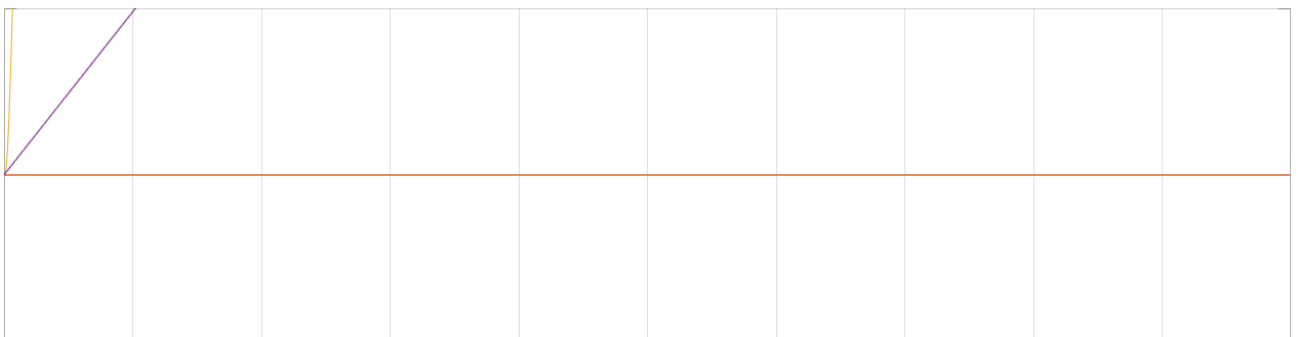
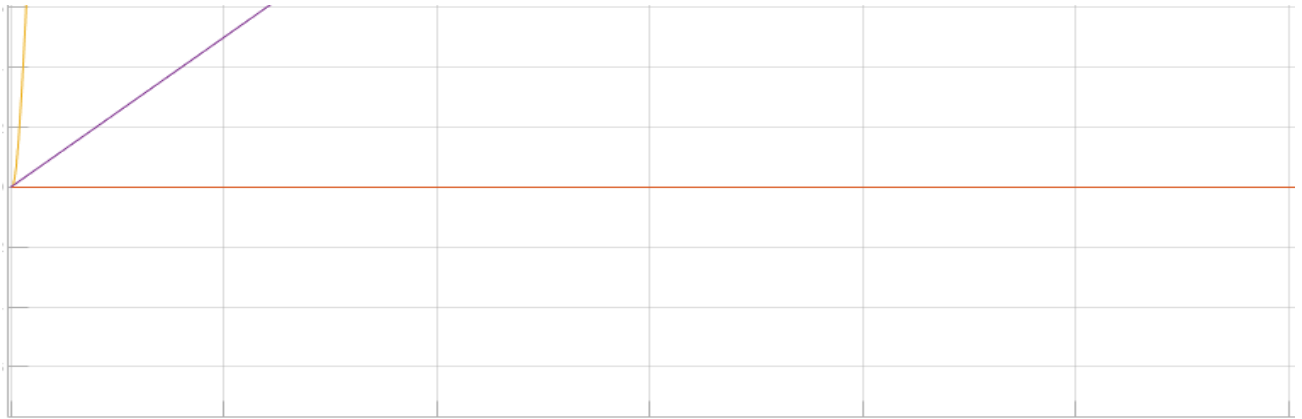


Рисунок. 3.7 Вихід системи (канал керування) під час подавання сигналу "Ramp" у середній смузі системи



б)

Рисунок. 3.8 Вихід системи (канал керування) під час подавання сигналу "Ramp" у вузькій смузі системи

3.5 Стохастичне дослідження каналу управління

Для цього на вхід каналу управління потрібно подавати сигнал типу "білий шум" з обмеженою смугою ("Band-Limited White Noise"). Для визначення залежності флуктуаційної помилки від смуги пропускання системи необхідно на вхід подавати випадковий сигнал з постійними параметрами і змінювати смугу системи.

При цьому залежно від смуги пропускання системи змінюються кореляційні властивості вихідного шуму та його рівень [12].

На рис. 3.9 та рис. 3.10 показано епюри шуму на виході каналу керування залежно від його смуги пропускання, де чітко видно зміну рівня шуму та його кореляційних властивостей.

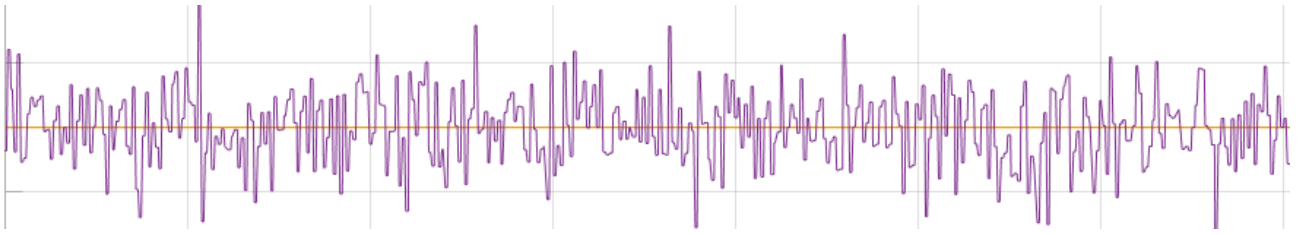


Рисунок. 3.9 - Епюри шуму на виході каналу керування при дуже широкій смузі системи

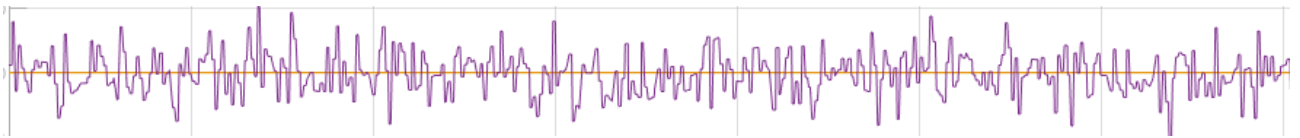


Рисунок. 3.10 - Епюри шуму на виході каналу керування у середній смузі системи

ВИСНОВКИ

В результаті написання дипломного проєкту були виконані наступні задачі:

- виконано огляд літератури з теми дослідження. Виконано аналіз способів керування БПЛА;
- розроблена структурна схема бортової частини ЛРУ БПЛА у складі загальної схеми;
- розроблена функціональна схема бортової частини ЛРУ БПЛА;
- описані принципи роботи функціональної електричної схеми бортової частини лінії радіоуправління;
- розроблений прототип комп'ютерної моделі лінії радіоуправління БПЛА;
- проведено дослідження перехідних процесів;
- досліджені динамічні процеси у ЛРУ БПЛА;
- виконане стохастичне дослідження каналу управління.

Параметри розробленого пристрою повністю задовольняють заданим параметрам. Комп'ютерна модель є працездатною і дає змогу за її допомогою проводити лабораторні дослідження. За допомогою цієї комп'ютерної моделі ми можемо побачити, як поведе себе контур наведення безпілотного апарата за умови впливу на його лінію радіоуправління шумів і наявності динамічних і статичних помилок.

Комп'ютерна модель даного розробленого пристрою застосовується в навчальному процесі, як об'єкт для лабораторного дослідження контуру

наведення БПЛА. Дана модель дає змогу візуально розглянути та вивчити роботу різних електронних пристроїв без їхнього технічного втілення, що набагато спрощує навчальний процес.

ПЕРЕЛІК ДЖЕРЕЛ ПОСИЛАННЯ

1. Гребеніков А. Г., М्याлиця А. К., Парфенюк В. В. Загальні види і характеристики безпілотних літальних апаратів: справ, посібник. Харків. 2008. 377 с.
2. Комягін С. І. Електромагнітна стійкість безпілотних літальних апаратів. М.: Красанд. 2015. 432 с.
3. Мартін Догерті. Дрони. Перший ілюстрований путівник по БПЛА. М.: Ексмо, ГрандМастер, 2017. 224 с.
4. Рендал У. Біард, Тімоті У. Маклейн. Малі безпілотні літальні апарати. Теорія і практика. М.: Техносфера. 2015. 312 с.
5. Дрони: сфери застосування – [Електронний ресурс] – 2018. 29 серпня. URL: https://brain.com.ua/brain_guide/advice/drony-sfery-zastosuvannya-v-tepershnomu-v-majbutnomu/ (дата звернення 15. 10. 2023)
6. Галузі майбутнього: як безпілотники підкорюють Україну – [Електронний ресурс] – 2018. 3 серпня. URL: <https://mind.ua/publications/20187343-galuzi-majbutnogo-yak-bezpilotniki-pidkoryuyut-ukrayinu> - (дата звернення 05.11.2023).
7. Типи безпілотників – [Електронний ресурс] – 2016. 16 січня. URL: https://avr-group.com.ua/news/drones_types_classes_functions/ (дата звернення 18.11.2023).
8. Апаратура радіокерування моделями - [Електронний ресурс] - 2019. 24 червня. URL: <https://uk.wikipedia.org/wiki> (дата звернення: 05.12.2023).
9. Особливості акумуляторів для радіокерованих моделей – [Електронний ресурс] – 2019. 28 січня. URL: <https://modelistam.com.ua/osobennosti-akkumulyatorov-dlya-radiopravlyaemyh-modelei-a-221/> (дата звернення 07.12.2023)

10. Математика та математичне моделювання – [Електронний ресурс] – 2015. 12 квітня. [URL:10.7463/mathm.0215.0789477](https://doi.org/10.7463/mathm.0215.0789477) (дата звернення 15.12.2023).
11. Бітченко О. М. Електроніка і мікросхемотехніка. Мікропроцесори і мікроконтролери: підруч. / О. М. Бітченко, О. І. Цопа. – Харків: Фінарт, 2015. – 434 с.
12. Глухов О.В. Вивчення властивостей мікроконтролерів і електронних систем на базі платформи Ардуіно: навч. посібник. / О.В. Глухов, О.О. Кравчук, Е.В. Левченко. – Харків : ХНУРЕ, 2019. – 146 с.