

**НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ УКРАЇНИ
«КИЇВСЬКИЙ ПОЛІТЕХНІЧНИЙ ІНСТИТУТ
імені ІГОРЯ СІКОРСЬКОГО»**

Навчально-науковий інститут телекомунікаційних систем

Кафедра телекомунікацій

До захисту допущено:

В.о.завідувача кафедри

_____ Сергій КРАВЧУК

«__» _____ 2026 р.

Дипломна робота

на здобуття ступеня бакалавра

**за освітньо-професійною програмою «Інженерія та програмування
інфокомунікацій»**

спеціальності 172 «Телекомунікації та радіотехніка»

**на тему: «Моделювання системи створення завад для малих безпілотних
літальних апаратів»**

Виконав:

студент IV курсу, групи ТЗ-22

Чуб Вадим Віталійович _____

Керівник:

Асистент кафедри ТК НН ІТС,

Сайченко Іван Олегович _____

Рецензент:

Доцент кафедри ІТТ НН ІТС, к.т.н., доцент,

Правило Валерій Володимирович _____

Засвідчую, що у цій дипломній роботі
немає запозичень з праць інших авторів
без відповідних посилань.

Студент _____

Київ – 2026 року

Національний технічний університет України
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»
Навчально-науковий інститут телекомунікаційних систем
Кафедра телекомунікацій

Рівень вищої освіти – перший (бакалаврський)

Спеціальність – 172 «Телекомунікації та радіотехніка»

Освітньо-професійна програма «Інженерія та програмування інфокомунікацій»

ЗАТВЕРДЖУЮ

В.о.завідувача кафедри

_____ Сергій КРАВЧУК

«___» _____ 2026 р.

ЗАВДАННЯ

на дипломну роботу студенту

Чубу Вадиму Віталійовичу

1. Тема роботи «Моделювання системи створення завад для малих безпілотних літальних апаратів», керівник роботи Сайченко Іван Олегович, затверджені наказом по університету від «26» травня 2026 р. № 1912-с.
2. Термін подання студентом роботи 10 червня 2026 р.
3. Вихідні дані до роботи: розроблюваний програмний засіб повинен забезпечувати моделювання корисного сигналу в каналі зв'язку малого БПЛА, додавання білого гаусівського шуму, імпульсної та вузькосмугової завад, побудову часових і спектральних графіків, розрахунок показників якості сигналу та експорт результатів моделювання.
4. Зміст роботи: виконати аналіз особливостей функціонування малих БПЛА та їхніх каналів зв'язку, розглянути основні типи завад і підходи до їх математичного опису, побудувати математичну модель корисного сигналу, адитивного каналу та завадових складових, розробити програмний засіб для моделювання впливу завад на сигнал у каналі зв'язку малого БПЛА, провести експериментальне моделювання для кількох сценаріїв та виконати аналіз отриманих результатів.
5. Перелік ілюстративного матеріалу: узагальнена структура безпілотної авіаційної системи, класифікація малих БПЛА, схема основних каналів зв'язку

малого БПЛА, класифікація завад, узагальнена структура системи протидії малим БПЛА, архітектура розробленого програмного засобу, часові та спектральні графіки сигналу без завад і за наявності завад, графік залежності фактичного SNR від заданого рівня шуму, таблиця порівняння показників якості сигналу.

6. Дата видачі завдання 1 жовтня 2025 р.

Календарний план

№ з/п	Назва етапів виконання дипломної роботи	Термін виконання етапів роботи	Примітка
1	Огляд літератури та аналіз тематики роботи	01.10.2025-11.02.2026	Виконано
2	Аналіз особливостей функціонування малих БПЛА	12.02.2026-09.03.2026	Виконано
3	Аналіз каналів зв'язку БПЛА та моделей завад	10.03.2026-04.04.2026	Виконано
4	Розроблення математичної моделі сигналу й завад	05.04.2026-09.05.2026	Виконано
5	Розроблення програмного засобу моделювання	10.05.2026-25.05.2026	Виконано
6	Проведення експериментів, аналіз результатів і оформлення роботи	26.05.2026-01.06.2026	Виконано

Студент

Вадим ЧУБ

Керівник

Іван САЙЧЕНКО

РЕФЕРАТ

Дипломна робота містить 134 сторінки, 20 рисунків, 11 таблиць, 1 додаток. Було використано 31 джерело інформації.

Актуальність роботи. Малі безпілотні літальні апарати широко застосовуються у цивільній, промисловій, науковій та оборонній сферах. Ефективність їхньої роботи значною мірою залежить від стабільності каналу зв'язку, через який передаються команди керування, телеметрія, навігаційні дані та інформація від корисного навантаження. Наявність шумів і завад у каналі зв'язку може призводити до погіршення якості сигналу, зменшення співвідношення сигнал/шум і спотворення прийнятих даних. Тому дослідження впливу різних типів завад на сигнал у каналі зв'язку малого БПЛА є актуальною задачею.

Мета роботи полягає у розробленні та дослідженні програмного засобу для моделювання впливу різних типів завад на сигнал у каналі зв'язку малого безпілотного літального апарата.

Об'єкт дослідження – процес передавання сигналу в каналі зв'язку малого БПЛА за наявності завадового впливу.

Предмет дослідження – математичні моделі корисного сигналу та завадових складових, а також програмні засоби моделювання їхнього впливу на характеристики прийнятого сигналу.

Методи дослідження. У роботі використано методи аналізу науково-технічних джерел, математичного моделювання сигналів і завад, дискретного подання сигналу, адитивного моделювання каналу зв'язку, спектрального аналізу на основі швидкого перетворення Фур'є, а також методи програмної реалізації та експериментального порівняння результатів моделювання.

Отримані результати. У роботі розглянуто особливості функціонування малих БПЛА, основні канали зв'язку та чинники, що можуть погіршувати якість

передавання сигналу. Обґрунтовано використання дискретної гармонічної моделі корисного сигналу та адитивної моделі каналу зв'язку. Розроблено програмний засіб, який забезпечує формування корисного сигналу, додавання білого гаусівського шуму, імпульсної та вузькосмугової завад, побудову часових і спектральних графіків, а також розрахунок кількісних показників якості сигналу. Проведене моделювання показало, що білий гаусівський шум створює випадкове зашумлення сигналу та знижує співвідношення сигнал/шум, імпульсна завада суттєво збільшує пікову амплітуду та коефіцієнт форми, а вузькосмугова завада проявляється у спектрі як додаткова частотна складова. Найбільше погіршення показників якості сигналу спостерігається за комбінованого впливу кількох завадових складових.

Галузь застосування. Результати роботи можуть бути використані у навчальних і дослідницьких цілях для аналізу впливу завад на сигнали в каналах зв'язку малих БПЛА. Розроблений програмний засіб може бути використаний як основа для подальшого розширення моделі шляхом додавання складніших сигналів, параметрів каналу зв'язку та додаткових методів аналізу.

Ключові слова: БПЛА, малий БПЛА, канал зв'язку, завада, адитивна модель, білий гаусівський шум, імпульсна завада, вузькосмугова завада, SNR, RMS, спектральний аналіз, програмний засіб.

ABSTRACT

The bachelor's thesis contains 134 pages, 20 figures, 11 tables, and 1 appendix. A total of 31 information sources were used.

Relevance of the work. Small unmanned aerial vehicles are widely used in civil, industrial, scientific, and defense-related fields. The effectiveness of their operation largely depends on the stability of the communication channel through which control commands, telemetry, navigation data, and payload information are transmitted. The presence of noise and interference in the communication channel can lead to signal quality degradation, a decrease in the signal-to-noise ratio, and distortion of received data. Therefore, studying the influence of different types of interference on the signal in the communication channel of a small UAV is a relevant task.

The purpose of the work is to develop and study a software prototype for modeling the influence of different types of interference on the signal in the communication channel of a small unmanned aerial vehicle.

The object of research is the process of signal transmission in the communication channel of a small UAV under interference conditions.

The subject of research is mathematical models of the useful signal and interference components, as well as software tools for modeling their influence on the characteristics of the received signal.

Research methods. The work uses methods of scientific and technical literature analysis, mathematical modeling of signals and interference, discrete signal representation, additive modeling of the communication channel, spectral analysis based on the Fast Fourier Transform, as well as methods of software implementation and experimental comparison of modeling results.

Obtained results. The work considers the features of small UAV operation, the main communication channels, and the factors that can degrade signal transmission quality. The use of a discrete harmonic model of the useful signal and an additive

communication channel model is substantiated. A software prototype has been developed that provides useful signal generation, addition of additive white Gaussian noise, impulse interference, and narrowband interference, construction of time-domain and spectral plots, and calculation of quantitative signal quality indicators. The conducted modeling showed that additive white Gaussian noise causes random signal distortion and reduces the signal-to-noise ratio, impulse interference significantly increases the peak amplitude and crest factor, while narrowband interference appears in the spectrum as an additional frequency component. The greatest degradation of signal quality indicators is observed under the combined influence of several interference components.

Field of application. The results of the work can be used for educational and research purposes to analyze the influence of interference on signals in the communication channels of small UAVs. The developed software prototype can serve as a basis for further model extension by adding more complex signals, communication channel parameters, and additional analysis methods.

Keywords: UAV, small UAV, communication channel, interference, additive model, additive white Gaussian noise, impulse interference, narrowband interference, SNR, RMS, spectral analysis, software prototype.

ЗМІСТ

ВСТУП	10
РОЗДІЛ 1 ОГЛЯД ЛІТЕРАТУРИ ТА ІСНУЮЧИХ РІШЕНЬ У СФЕРІ ЗАХИСТУ І ПРОТИДІЇ МАЛИМ БПЛА.....	13
1.1. Класифікація та особливості функціонування малих безпілотних літальних апаратів.....	13
1.2. Канали зв'язку малих БПЛА та їхні вразливості	18
1.3. Типи завад у каналах зв'язку малих БПЛА	25
1.4. Сучасні системи протидії малим БПЛА.....	31
Висновки	39
РОЗДІЛ 2 ТЕОРЕТИЧНІ ОСНОВИ МОДЕЛЮВАННЯ ТА ПОСТАНОВКА ЗАДАЧІ	41
2.1. Математичне подання сигналу в каналі зв'язку малого БПЛА	41
2.2. Адитивна модель каналу зв'язку	44
2.3. Моделі шумових, імпульсних та вузькосмугових завад.....	47
2.4. Методи аналізу сигналів у часовій і частотній областях.....	53
2.5. Показники оцінювання якості сигналу	58
2.6. Постановка задачі моделювання.....	62
Висновки	66
РОЗДІЛ 3 РОЗРОБКА ПРОГРАМНОГО ЗАСОБУ СИСТЕМИ СТВОРЕННЯ ЗАВАД	68
3.1. Вибір інструментів програмної реалізації	68
3.2. Загальна архітектура програмного засобу	71
3.3. Реалізація модуля формування корисного сигналу	76
3.4. Реалізація модуля генерації завад.....	79
3.5. Реалізація модуля аналізу та візуалізації результатів.....	83
3.6. Веб-інтерфейс користувача та порядок роботи з програмним засобом.....	88
Висновки	92
РОЗДІЛ 4 ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНА ЧАСТИНА ТА АНАЛІЗ РЕЗУЛЬТАТІВ МОДЕЛЮВАННЯ	94
4.1. Опис сценаріїв моделювання	94
4.2. Аналіз впливу білого гаусівського шуму	97
4.3. Аналіз впливу імпульсної завади.....	101
4.4. Аналіз впливу вузькосмугової завади	104
4.5. Аналіз комбінованого впливу завад	108
4.6. Узагальнення результатів моделювання	112
Висновки	115
ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ ПО РОБОТІ.....	117
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ	120
ДОДАТОК А.....	124

ПЕРЕЛІК СКОРОЧЕНЬ

AWGN	Additive White Gaussian Noise
C-UAS	Counter-Unmanned Aircraft System
CSV	Comma-Separated Values
FFT	Fast Fourier Transform
RMS	Root Mean Square
SNR	Signal-to-Noise Ratio
UAV	Unmanned Aerial Vehicle
БАС	Безпілотна авіаційна система
БПЛА	Безпілотний літальний апарат
ДПФ	Дискретне перетворення Фур'є

ВСТУП

Упродовж останніх років малі безпілотні літальні апарати набули значного поширення в цивільній, комерційній, промисловій, науковій та спеціалізованій сферах. Вони використовуються для аерофотозйомки, моніторингу територій, контролю стану об'єктів інфраструктури, пошуково-рятувальних операцій, екологічного спостереження, виконання логістичних та інших прикладних завдань. Ефективність функціонування таких систем значною мірою залежить від надійності безпроводового каналу зв'язку, через який передаються команди керування, телеметричні дані, координати, службові повідомлення та інша інформація, необхідна для стабільної роботи літального апарата.

Однією з ключових проблем під час функціонування малих БПЛА є вразливість їхніх каналів зв'язку до завадових впливів. У реальних умовах передавання сигналів відбувається за наявності шумів, завад від інших радіоелектронних систем, багатопроменевого поширення, ослаблення сигналу та інших дестабілізуючих чинників. Це може призводити до погіршення якості приймання інформації, збільшення ймовірності помилок, зниження стійкості каналу зв'язку, а в окремих випадках - до порушення стабільності функціонування всієї системи. Саме тому дослідження впливу завад на характеристики сигналу є актуальним завданням у галузі телекомунікацій та радіотехніки.

Актуальність теми зумовлена потребою у дослідженні поведінки сигналів у каналах зв'язку малих безпілотних літальних апаратів в умовах дії різних типів завад. Для сучасних інфокомунікаційних систем важливим є не лише передавання сигналу, а й оцінювання його стійкості до завадового впливу, дослідження часових, енергетичних і спектральних характеристик, а також визначення кількісних показників погіршення якості зв'язку. У цьому контексті програмне моделювання є доцільним інструментом дослідження, оскільки дозволяє відтворювати типові сценарії впливу завад у контрольованому

середовищі, змінювати параметри сигналу та завад і аналізувати результати без необхідності побудови складного апаратного комплексу.

У межах цієї роботи система створення завад розглядається як об'єкт математичного та програмного моделювання. Такий підхід дає змогу зосередитися на дослідженні впливу завад на характеристики сигналу, аналізі змін його параметрів та побудові наочних результатів у вигляді графіків і спектральних залежностей. Це дозволяє поєднати теоретичний аналіз із практичною реалізацією моделі та створити основу для подальшого розширення дослідження.

Доцільність обраного напрямку дослідження полягає в тому, що програмна модель дає змогу дослідити вплив різних типів завад на корисний сигнал у часовій і частотній областях, оцінити зміну його параметрів та порівняти результати для кількох сценаріїв. Як базові типи завад доцільно розглядати шумові, імпульсні та вузькосмугові завади, оскільки вони дозволяють побудувати змістовну модель впливу завад на сигнал і водночас забезпечують наочність результатів. Для реалізації моделі можуть бути використані сучасні програмні засоби математичного моделювання, обробки сигналів та візуалізації даних.

Практична цінність роботи полягає у створенні програмної моделі, яка може бути використана для аналізу впливу завад на сигнали в системах зв'язку малих БПЛА, а також як основа для подальшого розширення дослідження, ускладнення моделі та вдосконалення програмної реалізації.

Метою роботи є розроблення та дослідження програмної моделі завадового впливу на сигнал у каналі зв'язку малого БПЛА з можливістю аналізу часових, спектральних та енергетичних характеристик сигналу.

Для досягнення поставленої мети необхідно розв'язати такі завдання:

1. провести аналіз наукових джерел і сучасних підходів до моделювання сигналів та завад у системах зв'язку малих БПЛА;
2. розглянути особливості безпроводового каналу зв'язку малого БПЛА та його чутливість до завадових впливів;

3. обґрунтувати вибір базової моделі корисного сигналу та типів завад, доцільних для програмного моделювання;
4. обґрунтувати вибір методів і програмних засобів моделювання;
5. визначити вимоги до моделі, її вхідні та вихідні параметри;
6. розробити програмну модель корисного сигналу та завадового впливу;
7. провести моделювання для кількох характерних сценаріїв;
8. проаналізувати результати моделювання в часовій і частотній областях;
9. оцінити вплив завад на характеристики сигналу за допомогою співвідношення сигнал/шум, потужності, RMS, пікової амплітуди та інших показників якості.

Об'єктом дослідження є процеси передавання та спотворення сигналів у системах зв'язку малих безпілотних літальних апаратів в умовах завадового впливу.

Предметом дослідження є методи та програмні засоби моделювання сигналів, шумів і завад у каналах зв'язку малих БПЛА.

Методи дослідження: аналіз науково-технічних джерел, системний і порівняльний підходи, математичне та імітаційне моделювання, часовий і спектральний аналіз сигналів, графічна інтерпретація результатів, оцінювання ефективності завадового впливу за показником співвідношення сигнал/шум.

Практичне значення одержаних результатів полягає у створенні основи для подальшого програмного аналізу та візуалізації процесів, що впливають на якість передавання сигналу в системах малих БПЛА. Розроблена модель може бути використана як базовий дослідницький інструмент для аналізу впливу завад на сигнал у каналі зв'язку малого БПЛА. Надалі вона може бути розширена шляхом введення нових типів завад, додаткових параметрів каналу зв'язку, складніших сигналів або розширених засобів аналізу результатів.

РОЗДІЛ 1

ОГЛЯД ЛІТЕРАТУРИ ТА ІСНУЮЧИХ РІШЕНЬ У СФЕРІ ЗАХИСТУ І ПРОТИДІЇ МАЛИМ БПЛА

1.1. Класифікація та особливості функціонування малих безпілотних літальних апаратів

Безпілотний літальний апарат є складовою безпіотної авіаційної системи (БАС), яка включає не лише сам літальний апарат, а й засоби керування, канали зв'язку, програмне забезпечення, наземну станцію, навігаційні компоненти та інші елементи, необхідні для виконання польотного завдання. У технічній літературі поняття БПЛА часто розглядається саме в системному контексті, оскільки ізольований літальний апарат без каналу керування, обміну даними та засобів навігації не може повноцінно виконувати свої функції [1; 2]. Узагальнена структура безпіотної авіаційної системи, що відображає взаємодію між БПЛА, каналами зв'язку, наземною станцією керування, оператором і корисним навантаженням, наведена на рисунку 1.1.

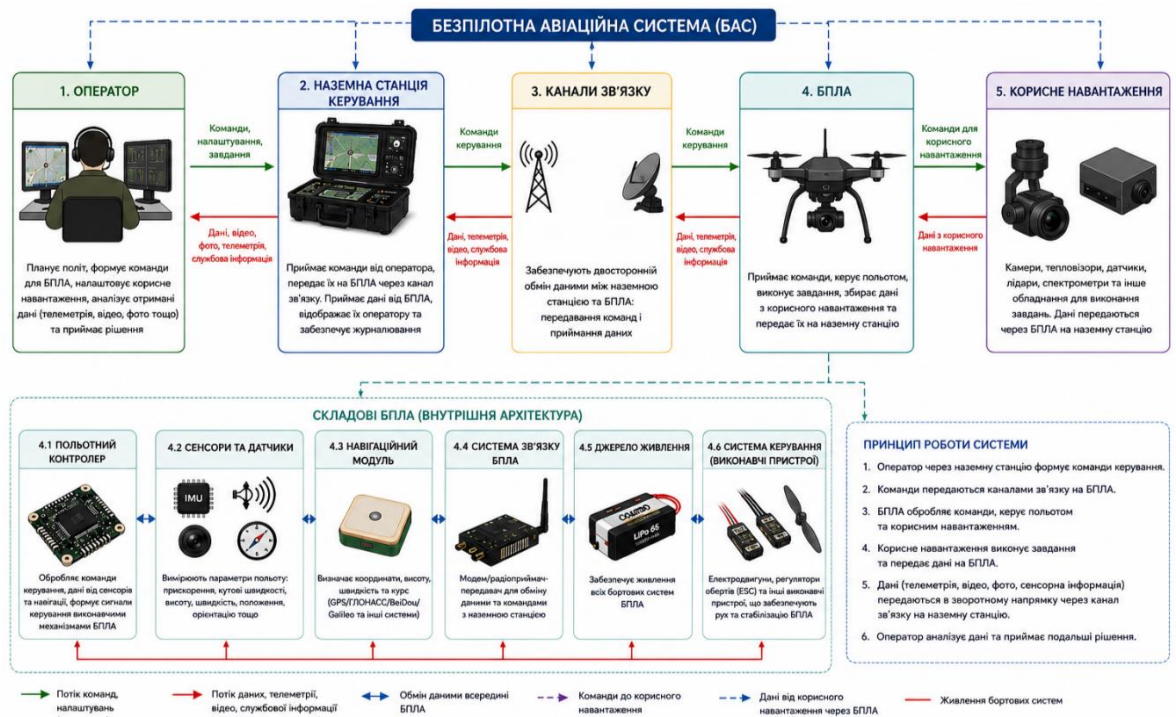


Рис. 1.1. Узагальнена структура безпіотної авіаційної системи

Малі БПЛА вирізняються порівняно невеликою масою, компактними розмірами, мобільністю, простотою розгортання та відносно невисокою вартістю експлуатації. Завдяки цим властивостям вони набули широкого поширення в цивільній, промисловій, науковій, комерційній та спеціалізованій сферах. До типових напрямів використання малих БПЛА належать аерофотозйомка, моніторинг територій, контроль стану об'єктів інфраструктури, екологічне спостереження, пошуково-рятувальні роботи, логістичні завдання, огляд важкодоступних ділянок місцевості та збирання даних за допомогою бортових сенсорів [3; 4].

У нормативних документах і регуляторних матеріалах класифікація малих БПЛА може здійснюватися за масою, умовами експлуатації, рівнем ризику, типом польотного завдання та віддаленістю від людей або об'єктів інфраструктури. Наприклад, у європейській практиці цивільні дрони в категорії відкритої експлуатації поділяються за підкатегоріями та класами, що враховують масу апарата, умови виконання польоту та обмеження щодо безпечної експлуатації [1]. Такий підхід свідчить про те, що малі БПЛА є не однорідною групою пристроїв, а широким класом технічних систем із різними характеристиками та умовами використання.

З технічної точки зору малі БПЛА можна класифікувати за кількома ознаками. За конструкцією вони можуть бути мультироторними, літакового типу, гібридними або іншими спеціалізованими платформами. Мультироторні апарати зазвичай мають високу маневреність, здатність зависати в повітрі та виконувати завдання на обмежених територіях. БПЛА літакового типу краще підходять для триваліших польотів і покриття більших площ, однак потребують інших умов запуску, посадки та керування. Гібридні конструкції поєднують окремі переваги різних типів платформ, але мають складнішу технічну реалізацію. Основні типи малих БПЛА за конструктивною ознакою схематично подано на рисунку 1.2.



Рис. 1.2. Класифікація малих БПЛА за типом конструкції

За призначенням малі БПЛА можуть виконувати спостережні, вимірювальні, транспортні, інспекційні, картографічні, дослідницькі та інші функції. У кожному з цих випадків вимоги до каналу зв'язку можуть відрізнятися. Для апаратів, які передають відео або зображення, важливою є пропускна здатність каналу. Для систем, орієнтованих на телеметрію та керування, особливого значення набувають надійність, затримка передавання даних і стійкість до завад. Саме тому класифікація БПЛА має значення не лише для опису самих апаратів, а й для подальшого аналізу їхніх інфокомунікаційних характеристик.

З погляду організації зв'язку малий БПЛА зазвичай взаємодіє з наземною станцією керування або оператором через безпроводовий канал. Через цей канал можуть передаватися команди керування, телеметричні дані, координати, службові повідомлення, а також дані корисного навантаження, наприклад відеосигнал або інформація з бортових сенсорів. У дослідженнях, присвячених UAV-мережам, окремо підкреслюється, що для таких систем важливими є як

канали “повітря – земля”, так і зв’язки між повітряними вузлами, якщо йдеться про групове використання апаратів або мережеву взаємодію [3].

Канал зв’язку є одним із ключових елементів функціонування малого БПЛА. Його роль полягає не лише в передаванні команд, а й у забезпеченні зворотного зв’язку між літальним апаратом і оператором. У разі погіршення якості зв’язку можуть виникати затримки в передаванні команд, втрата частини телеметричних даних, зниження якості відео або порушення стабільності взаємодії між компонентами системи. Тому аналіз каналів зв’язку малих БПЛА є важливим етапом дослідження, особливо в контексті теми, пов’язаної з моделюванням завадового впливу.

Особливість малих БПЛА полягає також у тому, що вони часто працюють у складному радіоелектронному середовищі. На якість сигналу можуть впливати відстань між апаратом і наземною станцією, рельєф місцевості, наявність перешкод, багатопроменеве поширення, природні та техногенні шуми, а також сигнали інших радіоелектронних систем. Для малих апаратів ця проблема є особливо актуальною, оскільки їхні технічні можливості щодо потужності передавача, розміру антени та енергоспоживання є обмеженими.

Таким чином, малі БПЛА доцільно розглядати як комплексні технічні системи, ефективність яких значною мірою залежить від стабільності безпроводового каналу зв’язку. Незалежно від конкретного призначення апарата, якість передавання даних впливає на керування, моніторинг стану системи, отримання інформації з бортового обладнання та загальну надійність виконання завдання. Це обґрунтовує необхідність подальшого аналізу каналів зв’язку малих БПЛА, їхніх вразливостей і типових завадових впливів.

Таблиця 1.1

Основні ознаки класифікації малих БПЛА

Ознака класифікації	Основні варіанти	Значення для дослідження
Тип конструкції	Мультироторні, літакового типу, гібридні	Впливає на тривалість польоту, маневреність і сценарії використання
Призначення	Моніторинг, інспекція, зйомка, логістика, дослідження	Визначає вимоги до каналу зв'язку та типу переданих даних
Тип переданих даних	Команди керування, телеметрія, координати, відео, сенсорні дані	Визначає вимоги до надійності, затримки та пропускну здатності
Умови експлуатації	Відкрита місцевість, міське середовище, промислові об'єкти	Впливають на рівень шумів, перешкод і багатопроменевого поширення
Організація зв'язку	“Повітря – земля”, “повітря – повітря”, зв'язок через мережеву інфраструктуру	Визначає архітектуру каналу та можливі вразливості

Як видно з таблиці 1.1, класифікація малих БПЛА має безпосереднє значення для аналізу їхніх каналів зв'язку. Тип конструкції, призначення, умови експлуатації та характер переданих даних визначають вимоги до стійкості сигналу, пропускну здатності та надійності передавання інформації. Саме тому наступним етапом огляду є розгляд особливостей каналів зв'язку малих БПЛА та чинників, що впливають на їхню вразливість до завад.

1.2. Канали зв'язку малих БПЛА та їхні вразливості

Канали зв'язку малих безпілотних літальних апаратів є однією з ключових складових усієї безпілотної системи. Саме через них забезпечується передавання команд керування, телеметричних даних, координат, службових повідомлень, а також інформації з бортових сенсорів або відеокамери. Якщо в підрозділі 1.1 малі БПЛА було розглянуто як комплексні технічні системи, то в цьому підрозділі основну увагу доцільно зосередити на комунікаційній складовій, оскільки саме вона безпосередньо пов'язана з темою моделювання завадового впливу.

У загальному вигляді система зв'язку малого БПЛА складається з бортового передавача і приймача, антенної системи, наземної станції керування, середовища поширення радіосигналу та програмних засобів обробки даних. Передавання інформації у такій системі відбувається через безпроводовий канал, характеристики якого залежать від частотного діапазону, відстані між передавачем і приймачем, потужності сигналу, положення антен, умов поширення, наявності перешкод і рівня зовнішніх шумів [15]. У дослідженнях, присвячених UAV-мережам, підкреслюється, що канали зв'язку БПЛА мають суттєві відмінності від класичних наземних каналів через тривимірний характер руху, зміну висоти, кута місця, швидкості та умов прямої або непрямої видимості [4; 6].

Для малих БПЛА можна виділити кілька основних типів каналів зв'язку. Найпоширенішим є канал типу "повітря - земля", який забезпечує взаємодію між літальним апаратом і наземною станцією керування або оператором. Через такий канал передаються команди керування від наземної станції до БПЛА, а у зворотному напрямку – телеметрія, зокрема координати, висота, швидкість, стан бортових систем, рівень заряду, службові повідомлення та дані корисного навантаження. Саме цей тип каналу є найбільш важливим для більшості практичних сценаріїв використання малих БПЛА, оскільки він забезпечує безпосередній зв'язок між оператором і апаратом [4; 6].

Іншим типом є канал “повітря - повітря”, який використовується у випадках групової роботи кількох БПЛА, ретрансляції даних або побудови тимчасової повітряної мережі. У такому випадку апарати можуть обмінюватися інформацією між собою, координувати рух, передавати службові дані або виконувати роль проміжних вузлів зв’язку. Для такого типу каналу важливими є взаємне положення апаратів, швидкість їхнього руху, орієнтація антен і наявність прямої видимості між повітряними вузлами [5; 6].

Окремо можна розглядати канали з використанням зовнішньої мережевої інфраструктури. У таких сценаріях БПЛА може взаємодіяти зі стільниковою мережею або іншими елементами телекомунікаційної інфраструктури. Це дозволяє збільшити зону покриття, передавати дані на більші відстані та використовувати наявні мережеві ресурси. Водночас такий підхід створює додаткові проблеми, пов’язані з передаванням між базовими станціями, взаємною інтерференцією, завантаженістю мережі та необхідністю підтримання стабільного з’єднання під час руху БПЛА [7]. Узагальнену схему основних каналів зв’язку малого БПЛА наведено на рисунку 1.3.

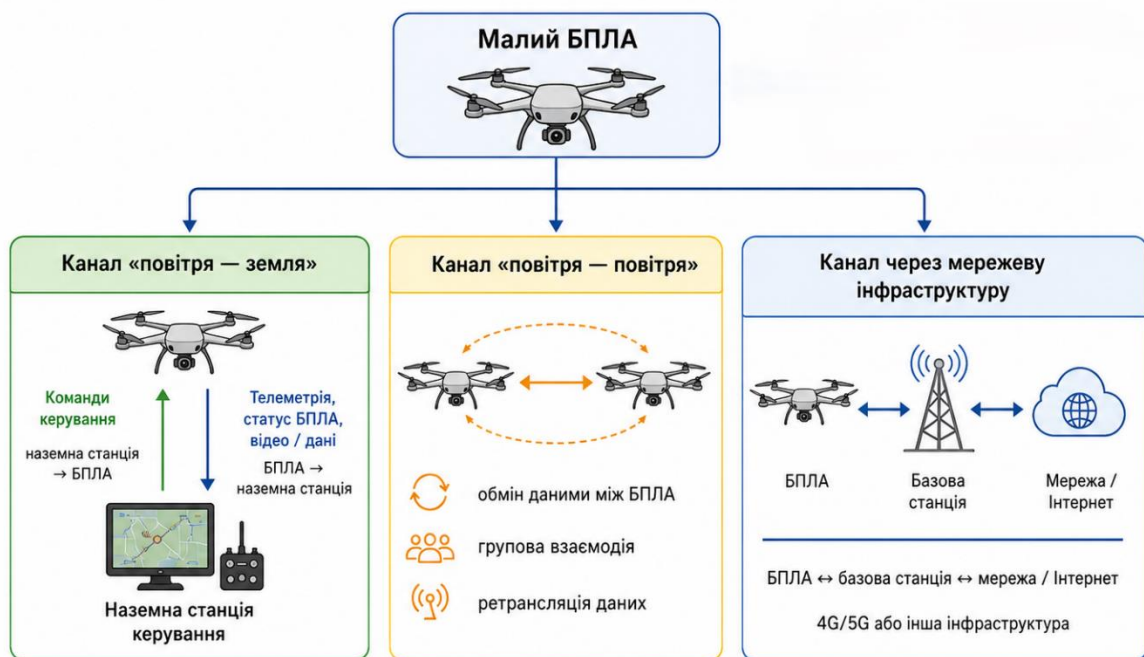


Рис. 1.3. Основні канали зв’язку малого БПЛА

Кожен із зазначених каналів має власні вимоги до якості передавання. Для каналу керування найважливішими є мала затримка, стійкість до втрат і висока надійність доставлення команд. Навіть короточасне погіршення якості такого каналу може призвести до затримки реакції апарата, помилок у виконанні команд або переходу системи до аварійного чи захисного режиму. Тому канал керування не обов'язково повинен мати велику пропускну здатність, однак має бути стабільним і передбачуваним за затримкою.

Телеметричний канал забезпечує передавання інформації про поточний стан БПЛА до наземної станції. До телеметричних даних належать координати, висота, швидкість, заряд акумулятора, стан бортових систем, параметри навігації та інші службові показники. Для цього каналу особливо важливими є регулярність оновлення даних і достатня надійність. Втрата частини телеметричної інформації може ускладнити контроль за станом апарата і знизити точність прийняття рішень оператором.

Канал передавання даних корисного навантаження, наприклад відеосигналу або інформації з бортових сенсорів, має інші вимоги. Для нього важливою є насамперед пропускну здатність, оскільки відео, зображення та інші об'ємні дані потребують передавання значно більшого обсягу інформації. Водночас такий канал також є чутливим до завад, оскільки погіршення якості сигналу може проявлятися у вигляді затримок, втрати кадрів, зниження якості зображення або повного переривання передачі.

З погляду оцінювання якості каналу зв'язку важливими є кілька параметрів: рівень прийнятого сигналу, затримка, пропускну здатність, надійність передавання та співвідношення сигнал/шум. Показник співвідношення сигнал/шум є особливо важливим для цієї роботи, оскільки він дозволяє кількісно оцінити, наскільки корисний сигнал переважає над шумовою або завадовою складовою. Зменшення цього показника свідчить про погіршення умов приймання, збільшення ймовірності помилок і зниження стійкості каналу зв'язку [5; 7; 14].

На якість каналу зв'язку малого БПЛА впливає низка фізичних чинників. Одним із основних є відстань між літальним апаратом і наземною станцією. Зі збільшенням відстані рівень прийнятого сигналу зменшується, що може призводити до погіршення співвідношення сигнал/шум. Якщо при цьому рівень шумів або перешкод залишається значним, якість приймання помітно знижується. Для каналів типу “повітря – земля” важливими є також висота польоту, кут місця, положення антен і наявність перешкод між передавачем і приймачем [6].

Важливим чинником є також багатопроменеве поширення сигналу. У реальних умовах сигнал може надходити до приймача не лише прямим шляхом, а й після відбиття від земної поверхні, будівель, дерев, промислових об'єктів або інших перешкод. У результаті до приймача потрапляє кілька копій одного сигналу з різними затримками та фазовими зсувами. Це може спричинити інтерференцію, зміну амплітуди прийнятого сигналу, спотворення його часової форми та погіршення якості приймання [6].

Ще однією проблемою є затінення та блокування прямої видимості. У міському або промисловому середовищі сигнал може частково або повністю перекриватися будівлями, рельєфом, транспортом, рослинністю чи іншими об'єктами. Крім того, під час маневрування самого БПЛА на якість зв'язку може впливати зміна орієнтації апарата та антен. У таких умовах канал зв'язку стає нестабільним, а рівень прийнятого сигналу може змінюватися не поступово, а різко, що ускладнює підтримання якісного з'єднання [6; 7].

Рух БПЛА також створює додаткові складності для організації зв'язку. Під час польоту змінюються відстань до наземної станції, просторове положення апарата, кут приходу сигналу та умови відбиття. Це робить канал нестационарним, тобто таким, характеристики якого змінюються в часі. У багатодронових системах ця проблема посилюється, оскільки змінюється не лише положення одного апарата відносно станції, а й взаємна геометрія кількох повітряних вузлів [5; 6].

На якість зв'язку впливає і частотне середовище. Малі БПЛА можуть працювати в діапазонах, де одночасно функціонує багато інших безпроводових пристроїв. Це створює ризик взаємної інтерференції, особливо в умовах насиченого радіоелектронного середовища. Джерелами перешкод можуть бути інші системи зв'язку, побутове або промислове радіоелектронне обладнання, засоби безпроводового доступу та інші передавачі. У рекомендаціях ITU-R радіошум розглядається як сукупність природних і техногенних впливів, що можуть погіршувати умови приймання сигналу [10; 19].

Окремо слід враховувати технічні обмеження самих малих БПЛА. Через невеликі габарити та масу вони мають обмежений енергетичний ресурс, компактні антени та порівняно невисоку потужність передавача. Такі обмеження ускладнюють підвищення енергетичного запасу каналу, використання складних антенних систем або резервних каналів зв'язку. Унаслідок цього малі БПЛА можуть бути більш чутливими до шумів, перешкод, втрат сигналу та короткочасних розривів зв'язку [5; 7].

Вразливості каналів зв'язку малих БПЛА можна умовно поділити на фізичні, завадові та інформаційно-безпекові. До фізичних належать ослаблення сигналу, багатопроменеве поширення, затінення, нестабільність антенної орієнтації та зміна умов поширення під час руху. До завадових чинників належать шум, інтерференція від інших радіосистем, імпульсні перешкоди та інші електромагнітні впливи. До інформаційно-безпекових вразливостей належать ризики перехоплення даних, підміни сигналів, втручання в навігацію або порушення цілісності команд [8; 9]. Основні групи чинників, що впливають на якість каналу зв'язку малого БПЛА, подано на рисунку 1.4.

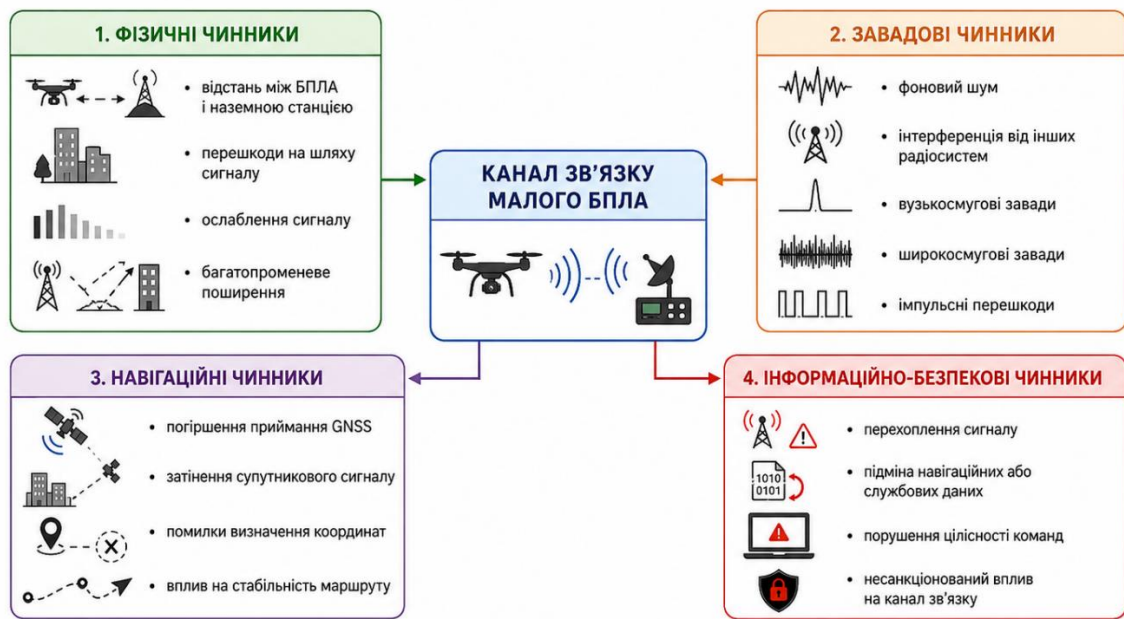


Рис. 1.4. Основні чинники погіршення якості каналу зв'язку малого БПЛА

У межах цієї дипломної роботи основна увага приділяється не детальному аналізу кіберзагроз, а саме впливу завадових чинників на характеристики сигналу. Проте загальні безпекові ризики підтверджують, що комунікаційна підсистема БПЛА є одним із найбільш чутливих елементів усієї системи. Зокрема, у наукових джерелах і рекомендаціях з кібербезпеки БПЛА розглядаються ризики, пов'язані з перехопленням інформації, порушенням автентичності команд, впливом на навігаційні дані та створенням умов нестабільної роботи каналу зв'язку [8; 9].

Для подальшого моделювання важливо, що значна частина зазначених чинників може бути подана у спрощеній математичній формі. Ослаблення сигналу може бути представлене як зменшення амплітуди, шум – як випадкова складова, що додається до корисного сигналу, а імпульсна завада – як короточасний вплив підвищеної амплітуди. Такий підхід дає змогу перейти від загального опису вразливостей до побудови програмної моделі, у якій можна змінювати параметри сигналу та завад і спостерігати їхній вплив на часові та спектральні характеристики.

Узагальнення основних каналів зв'язку малого БПЛА та характерних для них вразливостей наведено в таблиці 1.2.

Таблиця 1.2

Основні канали зв'язку малих БПЛА та їхні вразливості

Канал або складова системи	Основне призначення	Ключові вимоги	Типові вразливості
Канал “повітря – земля”	Обмін даними між БПЛА та наземною станцією	Надійність, достатня пропускна здатність, стабільний рівень сигналу	Ослаблення з відстанню, затінення, багатопроменевість, інтерференція
Канал “повітря – повітря”	Обмін даними між кількома БПЛА	Синхронізація, стійкість до зміни топології, мала затримка	Зміна взаємного положення, переривчасті з'єднання, вплив маневрування
Канал керування	Передавання команд від оператора до БПЛА	Мала затримка, висока надійність, стійкість до втрат	Затримка команд, спотворення сигналу, втрата керованості
Телеметричний канал	Передавання даних про стан БПЛА	Регулярність оновлення, достовірність даних	Втрата частини телеметрії, зниження точності контролю
Канал передавання корисних даних	Передавання відео, зображень або даних сенсорів	Висока пропускна здатність, прийнятна затримка	Погіршення якості зображення, втрати даних, затримки

Як видно з таблиці 1.2, різні канали зв'язку малого БПЛА мають різне функціональне призначення, однак усі вони залежать від якості передавання сигналу. Найбільш критичними для стабільної роботи є канал керування і телеметричний канал, оскільки вони безпосередньо пов'язані з керуванням апаратом та контролем його стану. Канал передавання відео або сенсорних даних може бути менш критичним для базового керування, однак його погіршення суттєво впливає на якість виконання прикладного завдання.

Таким чином, канали зв'язку малих БПЛА є вразливими до комплексу фізичних, завадових і системних чинників. Найбільш характерними проблемами є ослаблення сигналу з відстанню, багатопроменеве поширення, затінення, шум, інтерференція, обмеження потужності передавача та нестабільність умов польоту. У межах подальшого дослідження ці чинники доцільно розглядати через спрощену модель, у якій корисний сигнал піддається впливу шумових та імпульсних завад. Це створює основу для переходу до аналізу типів завад і підходів до їх моделювання в наступному підрозділі.

1.3. Типи завад у каналах зв'язку малих БПЛА

Надійність функціонування малого безпілотного літального апарата значною мірою залежить від якості його безпроводового каналу зв'язку. Через цей канал передаються команди керування, телеметричні дані, службова інформація, відеопотік або інші дані корисного навантаження. У реальних умовах передавання сигналу відбувається не в ідеальному середовищі, а за наявності шумів, зовнішніх електромагнітних впливів, взаємних перешкод від інших радіосистем і навмисних завадових дій. Такі чинники можуть змінювати форму сигналу, знижувати співвідношення сигнал/шум, погіршувати якість приймання та зменшувати стійкість каналу зв'язку [6; 8; 10; 14].

У загальному вигляді заваду можна визначити як небажаний сигнал або випадковий вплив, який накладається на корисний сигнал і ускладнює його правильне приймання та обробку. Для малих БПЛА це особливо важливо,

оскільки вони часто мають обмежену потужність передавача, невеликі габарити антен і працюють у складному електромагнітному середовищі. Навіть незначне погіршення умов зв'язку може впливати на якість керування, стабільність телеметрії або передавання даних від корисного навантаження.

Завади в каналах зв'язку малих БПЛА доцільно класифікувати за кількома ознаками: за походженням, спектральними властивостями та характером дії в часі. За походженням вони можуть бути природними, техногенними, взаємними між радіосистемами або навмисно створеними. За спектральними властивостями завади поділяють на вузькосмугові та широкосмугові. За часовою структурою вони можуть бути неперервними, переривчастими або імпульсними. Узагальнену класифікацію завад у каналах зв'язку малих БПЛА подано на рисунку 1.5.

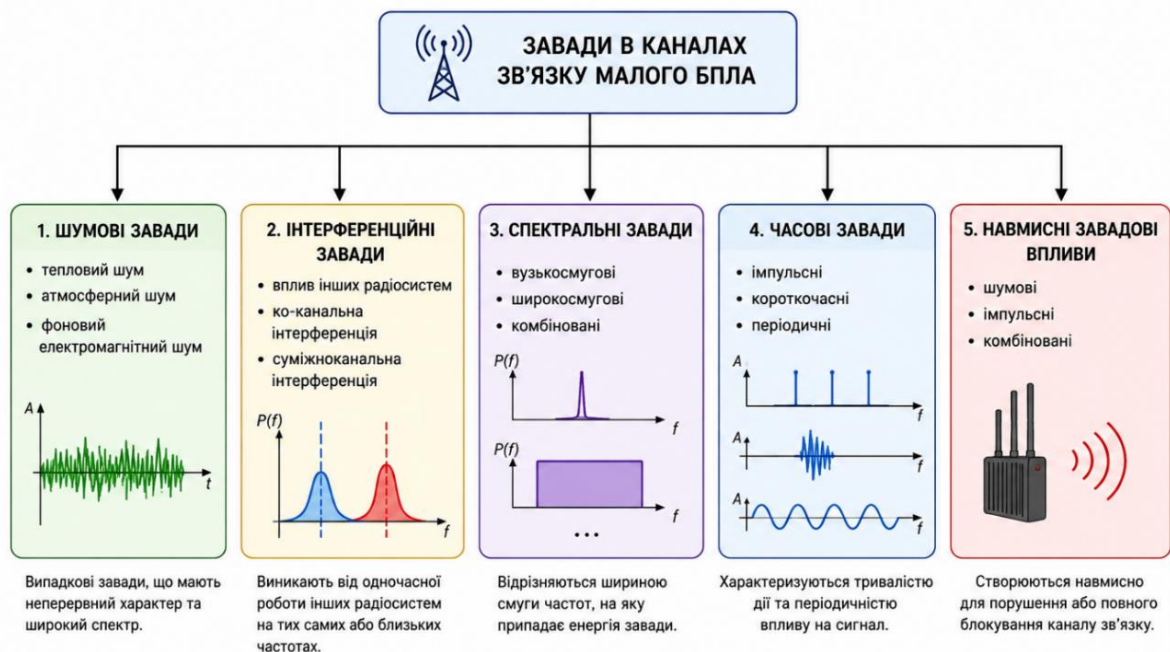


Рис. 1.5. Класифікація завад у каналах зв'язку малих БПЛА

Одним із базових типів завад є тепловий шум. Він виникає в електронних компонентах приймального тракту внаслідок хаотичного теплового руху носіїв

заряду. У теорії зв'язку такий шум часто описують як білий гаусівський шум, оскільки ця модель є зручною для початкового аналізу впливу випадкової шумової складової на сигнал [16; 17; 18]. У межах цієї роботи детальне математичне подання білого гаусівського шуму розглядається в розділі 2, а в цьому підрозділі він розглядається як один із основних типів завадового впливу.

Крім теплового шуму, на роботу безпроводового каналу можуть впливати природні радіошуми. До них належать атмосферні, космічні та галактичні шуми. Для більшості прикладних задач зв'язку малих БПЛА вони не завжди є визначальними, однак формують частину загального шумового фону, у якому працює приймальна апаратура [10].

Окрему групу становлять техногенні завади. Вони виникають унаслідок роботи промислового обладнання, електродвигунів, ліній електропередач, транспортних систем, побутової електроніки, базових станцій, маршрутизаторів, передавачів та інших радіоелектронних засобів. Для малих БПЛА це особливо актуально в міських умовах, де радіочастотне середовище є насиченим, а кількість джерел випромінювання значно більша, ніж у відкритій місцевості.

Важливими для каналів зв'язку БПЛА є також взаємні завади між різними радіосистемами. До них належать ко-канальна та суміжноканальна інтерференція. Ко-канальна інтерференція виникає тоді, коли кілька систем працюють в одному або близькому частотному каналі. Суміжноканальна інтерференція виникає внаслідок впливу сигналів із сусідніх частотних каналів через недосконалість фільтрації або надмірний рівень випромінювання [5; 20; 22].

За характером спектрального впливу завади поділяють на вузькосмугові та широкосмугові. Вузькосмугова завада зосереджена в обмеженій ділянці спектра і може суттєво впливати на сигнал, якщо її частота збігається або наближена до робочої частоти каналу. Широкасмугова завада охоплює значно ширшу смугу частот і може підвищувати загальний рівень шумового фону в каналі.

За часовою структурою завади можуть бути неперервними, переривчастими або імпульсними. Неперервні завади діють протягом усього часу передавання сигналу й призводять до сталого погіршення умов приймання. Переривчасті завади виникають нерегулярно або з певною періодичністю. Імпульсні завади мають короткочасний характер, але часто супроводжуються значною амплітудою. У часовій області вони проявляються як різкі сплески, які можуть спотворювати окремі фрагменти сигналу [16; 17; 18].

У контексті цієї роботи окрему увагу слід приділити навмисним завадам, або джемінгу. У широкому розумінні джемінгом називають цілеспрямоване створення радіозавад для погіршення або порушення роботи каналу зв'язку. У межах даної роботи такі впливи розглядаються виключно як об'єкти математичного та програмного моделювання, без аналізу практичної апаратної реалізації. З погляду моделі навмисна завада може бути представлена як додатковий сигнал або шумова складова, яка накладається на корисний сигнал і змінює його часові, спектральні або енергетичні характеристики [8; 11; 12; 21].

Для малих БПЛА завадовий вплив є особливо критичним через обмежені енергетичні ресурси, невеликі розміри антен і залежність від стабільного радіоканалу. На відміну від більших авіаційних систем, малі БПЛА часто використовують компактні передавачі та працюють у відкритих або міських умовах, де рівень сторонніх електромагнітних впливів може суттєво змінюватися. Тому навіть відносно невелике зниження якості сигналу може призвести до погіршення керування, втрати телеметрії або зниження якості передавання даних від корисного навантаження.

Узагальнену класифікацію основних типів завад, які можуть враховуватися під час моделювання каналів зв'язку малих БПЛА, подано в таблиці 1.3.

Таблиця 1.3

Основні типи завад у каналах зв'язку малих БПЛА

Тип завади	Характеристика	Можливий вплив на сигнал
Тепловий шум	Випадковий шум електронних компонентів приймача	Зниження співвідношення сигнал/шум
Атмосферний шум	Природний радіошум, пов'язаний з атмосферними процесами	Підвищення фоновому шуму
Техногенний шум	Завади від електронного, промислового або побутового обладнання	Спотворення сигналу, підвищення шумового рівня
Ко-канальна інтерференція	Небажаний сигнал у тому самому частотному каналі	Ускладнення виділення корисного сигналу
Суміжноканальна інтерференція	Вплив сигналів із сусідніх частотних каналів	Часткове перекриття спектра, помилки приймання
Вузькосмугова завада	Зосереджена в малій смузі частот	Спотворення окремих спектральних компонентів
Широкосмугова завада	Охоплює широку смугу частот	Загальне погіршення якості приймання
Імпульсна завада	Короткочасні сплески великої амплітуди	Локальне спотворення сигналу в часі
Навмисна завада	Цілеспрямований завадовий вплив	Значне зниження якості або стійкості зв'язку

Як видно з таблиці 1.3, різні типи завад впливають на канал зв'язку по-різному. Шумові завади переважно підвищують загальний фоновий рівень і знижують якість приймання. Імпульсні завади створюють короточасні спотворення у часовій області. Вузькосмугові завади можуть формувати окрему небажану складову в спектрі сигналу, а широкосмугові – погіршувати якість приймання в ширшому діапазоні частот.

Загальний вплив завади на корисний сигнал можна подати як накладання додаткової складової на сигнал у каналі зв'язку. У такому випадку на вході приймача спостерігається вже не ідеальний корисний сигнал, а сигнал, спотворений шумом або завадою. Схематичне подання такого впливу наведено на рисунку 1.6.

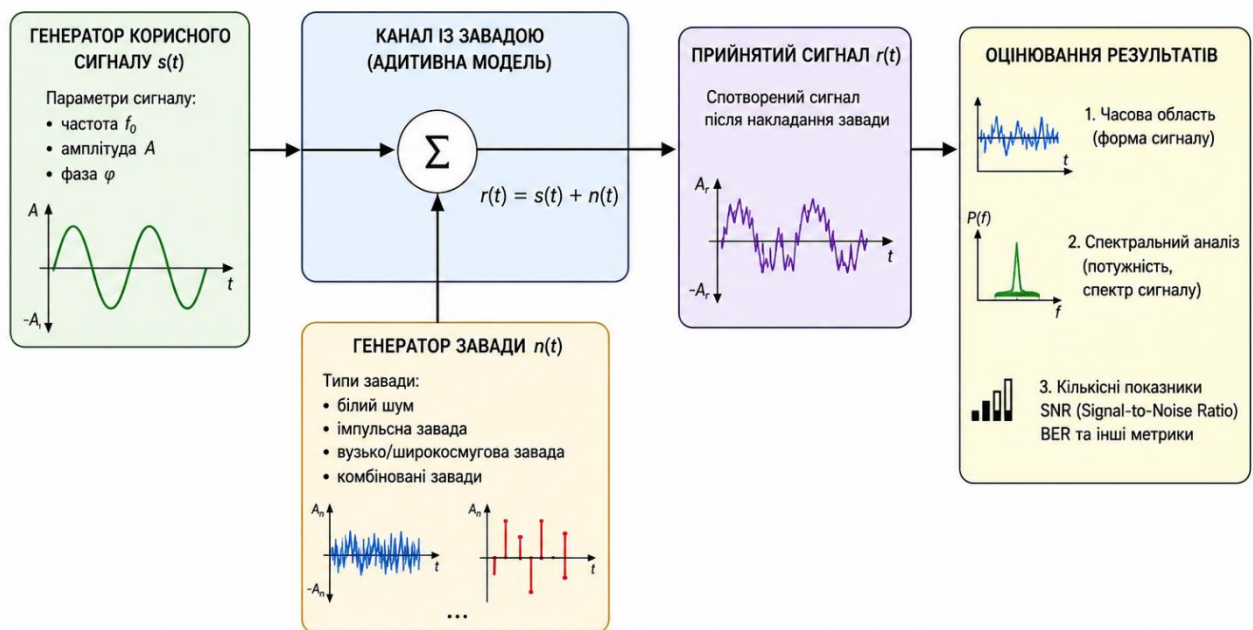


Рис. 1.6. Загальна схема впливу завади на корисний сигнал у каналі зв'язку

На рисунку відображено загальний принцип формування прийнятого сигналу в умовах завадового впливу. Корисний сигнал проходить через канал, у якому на нього накладається шумова або інша завадова складова. У результаті

на приймач надходить сигнал, що відрізняється від початкового. Детальніше математичне подання такої адитивної моделі та окремих типів завад розглянуто в другому розділі.

Наявність завад призводить до погіршення якості зв'язку. Основними наслідками можуть бути зменшення дальності стійкого керування, поява помилок у передаванні даних, затримки в обміні інформацією, втрата телеметрії або відеосигналу. Для малих БПЛА це є критичним, оскільки порушення каналу зв'язку може впливати не лише на якість виконання завдання, а й на безпечність польоту.

У межах цієї дипломної роботи основну увагу доцільно зосередити на трьох типах завад, які є зручними для подальшого програмного моделювання: білому гаусівському шумі, імпульсній заваді та вузькосмуговій заваді. Білий шум дозволяє змодельовати випадкове фонове зашумлення каналу, імпульсна завада – короточасні амплітудні сплески, а вузькосмугова завада – вплив сигналу, енергія якого зосереджена поблизу певної частоти. Математичне подання цих завад і спосіб їх використання в адитивній моделі каналу розглядаються в наступному розділі.

Отже, завади в каналах зв'язку малих БПЛА можуть мати різне походження, спектральну структуру та часовий характер. Для оглядового аналізу важливо визначити їхні основні типи та наслідки впливу на канал зв'язку, а для подальшого моделювання – обрати такі моделі завад, які дозволяють наочно дослідити зміну форми сигналу, його спектра та кількісних показників якості. У цій роботі такими базовими моделями є шумова, імпульсна та вузькосмугова завади.

1.4. Сучасні системи протидії малим БПЛА

Поширення малих безпілотних літальних апаратів зумовило розвиток окремого напрямку технічних рішень, спрямованих на їх виявлення, супровід,

ідентифікацію та нейтралізацію. У сучасній англomовній літературі для таких рішень часто використовується поняття Counter-UAS або C-UAS, тобто системи протидії безпілотним авіаційним системам. Їхнє завдання полягає не лише у фізичному припиненні польоту БПЛА, а й у своєчасному виявленні апарата, визначенні його типу, оцінюванні потенційної загрози та виборі доцільного способу реагування [11; 12].

Системи протидії малим БПЛА доцільно розглядати як багатокомпонентні комплекси, що поєднують засоби спостереження, аналізу та впливу. На першому етапі така система повинна виявити наявність БПЛА в зоні спостереження. Для цього можуть використовуватися радіочастотні, радіолокаційні, оптичні, тепловізійні або акустичні засоби. На другому етапі здійснюється ідентифікація об'єкта, тобто відокремлення БПЛА від інших рухомих або нерухомих об'єктів. Лише після цього може бути прийняте рішення про спосіб реагування. Така логіка є важливою, оскільки помилкове виявлення або неправильна класифікація об'єкта може призвести до неефективного або небажаного застосування засобів протидії. [11; 12] Загальну послідовність роботи системи протидії малим БПЛА подано на рисунку 1.7.

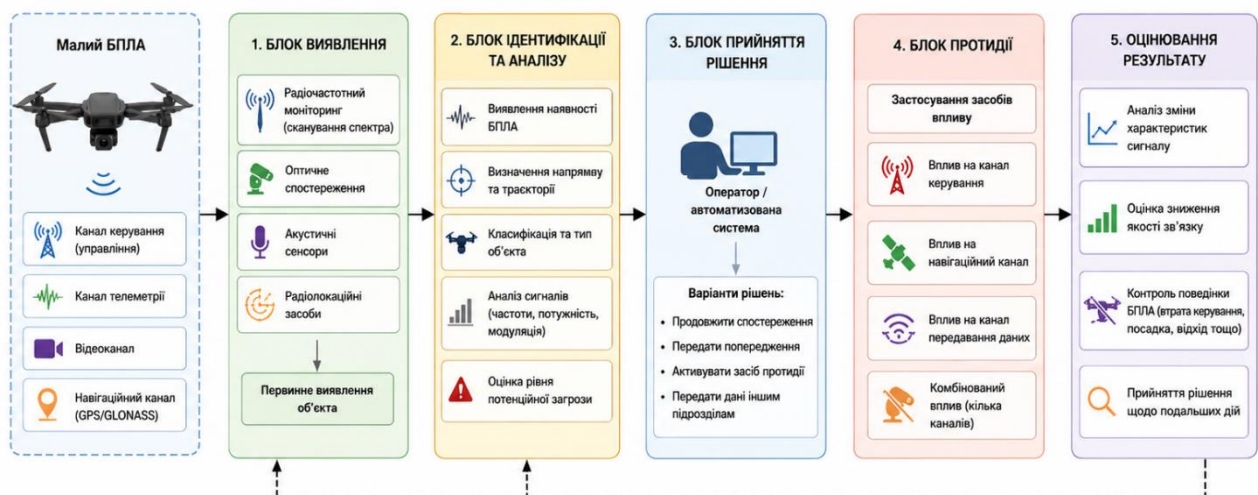


Рис. 1.7. Узагальнена структура системи протидії малим БПЛА

У загальному вигляді сучасні засоби протидії малим БПЛА можна поділити на кілька груп: радіочастотні та радіоелектронні, навігаційні, оптичні, акустичні, фізичні, кібернетичні та комбіновані. Такий поділ є умовним, оскільки на практиці більшість сучасних комплексів використовує не один, а кілька підходів одночасно. Наприклад, система може виявляти БПЛА за радіосигналом, підтверджувати його наявність за допомогою оптичного сенсора, а для реагування використовувати вплив на канал зв'язку або навігаційну підсистему [11; 12].

Найбільш близькими до теми цієї дипломної роботи є радіочастотні та радіоелектронні підходи. Радіочастотні засоби можуть використовуватися для виявлення сигналів керування, телеметрії або передавання даних від корисного навантаження. Їхня перевага полягає в тому, що вони дозволяють виявити активний канал зв'язку між БПЛА та наземною станцією керування. У межах таких систем можливе як пасивне спостереження за радіоефіром, так і активний вплив на канал зв'язку.

Радіоелектронний вплив на БПЛА у спрощеному вигляді можна розглядати як створення умов, за яких приймальна частина системи не може коректно виділити корисний сигнал на фоні шумів або завад. Такий вплив може призводити до погіршення якості передавання команд, втрати частини телеметричних даних, зниження стабільності каналу або переходу апарата в аварійний режим. У межах цієї роботи такі процеси розглядаються не як інструкція з практичного застосування, а як об'єкт математичного та програмного моделювання. Саме тому увага зосереджується на загальних характеристиках сигналу, шуму, завади та співвідношення сигнал/шум.

Окрему групу становлять системи впливу на навігаційну підсистему БПЛА. Значна частина малих БПЛА використовує супутникову навігацію для визначення координат, стабілізації польоту або виконання автоматизованого маршруту. У відкритих джерелах часто розглядаються підходи, пов'язані з порушенням приймання навігаційного сигналу або підміною навігаційних

даних. Проте в межах цієї дипломної роботи такі методи не є основним предметом дослідження, оскільки вони стосуються окремих питань навігаційної безпеки, а не моделювання завад у каналі зв'язку [8; 9].

Оптичні та тепловізійні засоби переважно використовуються для виявлення, супроводу та підтвердження наявності БПЛА. Вони дають змогу отримати візуальне або теплове зображення об'єкта, визначити напрямок його руху та приблизний тип. Їхня ефективність залежить від погодних умов, освітлення, дальності спостереження, наявності перешкод у полі зору та розмірів самого БПЛА. Для малих апаратів це є суттєвим обмеженням, оскільки вони мають невеликі габарити та можуть бути складними для виявлення на значній відстані.

Акустичні системи використовують звук, який створюють двигуни та гвинти БПЛА. Такі засоби можуть бути корисними як пасивний спосіб виявлення, однак мають суттєві обмеження. На результати впливають фоновий шум, вітер, транспорт, міська інфраструктура та відстань до об'єкта. Крім того, різні моделі БПЛА можуть мати подібні акустичні ознаки, що ускладнює їх точну класифікацію.

Фізичні або кінетичні засоби протидії передбачають безпосереднє перехоплення або механічне припинення польоту БПЛА. До них можуть належати спеціалізовані сітки, перехоплювачі, захисні бар'єри або інші технічні рішення. У цивільному контексті такі методи мають обмежене застосування, оскільки пов'язані з ризиком падіння апарата, пошкодженням майна або створенням небезпеки для людей. Тому в багатьох сценаріях перевага може надаватися не фізичному знищенню, а впливу на канал зв'язку або примусовому переходу БПЛА до безпечного режиму.

Кібернетичні методи протидії пов'язані з виявленням і використанням вразливостей у програмному забезпеченні, протоколах обміну даними або механізмах автентифікації. Вони можуть бути спрямовані на порушення обміну

даними або вплив на логіку роботи системи. Водночас такі методи потребують аналізу конкретної платформи, її програмного забезпечення та протоколів, тому в межах цієї дипломної роботи вони розглядаються лише як суміжний напрям. Для обраної теми більш доцільним є дослідження саме завадового впливу на сигнал, оскільки він може бути поданий у вигляді математичної моделі та реалізований у програмному середовищі.

Найбільш ефективними вважаються комбіновані системи протидії, які поєднують кілька каналів виявлення та кілька способів реагування. Наприклад, радіочастотний сенсор може виявляти активність каналу керування, оптичний модуль – підтверджувати наявність об'єкта, а програмний блок – аналізувати отримані дані та обирати спосіб реагування. Такий підхід підвищує надійність системи, оскільки один тип сенсора може компенсувати обмеження іншого. Основні групи засобів протидії малим БПЛА узагальнено на рисунку 1.8.



Рис. 1.8. Основні групи засобів протидії малим БПЛА

Узагальнену характеристику основних підходів до протидії малим БПЛА подано в таблиці 1.4.

Таблиця 1.4

Узагальнена характеристика основних підходів до протидії малим БПЛА

Тип системи протидії	Основний принцип роботи	Переваги	Обмеження
Радіочастотна	Виявлення або аналіз сигналів керування, телеметрії та передавання даних	Може виявляти активний канал зв'язку, безпосередньо пов'язана з комунікаційною підсистемою БПЛА	Залежить від активності радіоканалу та умов радіоефіру
Радіоелектронна	Створення завадового впливу на канал зв'язку або окремі радіосигнали	Дозволяє впливати на якість приймання сигналу без фізичного контакту з БПЛА	Потребує обережного застосування, може впливати на інші радіосистеми
Навігаційна	Порушення або спотворення роботи навігаційної підсистеми	Може впливати на автоматизовані режими польоту	Не є універсальною для всіх типів БПЛА, пов'язана з питаннями навігаційної безпеки

Продовження таблиці 1.4

Оптична/ тепловізійна	Візуальне або теплове виявлення та супровід об'єкта	Дає можливість підтвердити наявність БПЛА та оцінити його поведінку	Залежить від погоди, освітлення, дальності та видимості
Акустична	Виявлення характерного шуму двигунів і гвинтів	Пасивний спосіб спостереження, не потребує радіовипромінювання	Чутлива до фонового шуму, вітру та міського середовища
Фізична/ кінетична	Механічне перехоплення або припинення польоту	Може забезпечити безпосередню нейтралізацію об'єкта	Має ризики пошкоджень, падіння БПЛА та обмежене цивільне застосування
Кібернетична	Вплив на програмне забезпечення, протоколи або механізми обміну даними	Потенційно може впливати на логіку роботи системи	Потребує знання конкретної платформи та її вразливостей
Комбінована	Поєднання кількох засобів виявлення, аналізу та реагування	Підвищує надійність і зменшує кількість помилкових спрацювань	Складніша структура, вища вартість і складність інтеграції

Як видно з таблиці 1.4, різні системи протидії мають неоднакову сферу застосування та різний рівень залежності від умов середовища. Радіочастотні й радіоелектронні підходи є найбільш близькими до теми цієї роботи, оскільки вони безпосередньо пов'язані з каналами зв'язку, шумами, інтерференцією та завадовим впливом. Оптичні, акустичні та фізичні методи також є важливими для загального розуміння C-UAS, але вони менш придатні для програмного моделювання сигналів у межах обраної теми.

Приклади сучасних систем протидії, описані у відкритих джерелах, показують, що реальні C-UAS-рішення дедалі частіше будуються як інтегровані комплекси. У них поєднуються сенсори різної природи, засоби аналізу даних, алгоритми класифікації об'єктів і різні варіанти реагування [11; 12]. Окремі випробування таких технологій також проводяться на рівні міжнародних організацій та спеціалізованих навчань, що свідчить про актуальність напрямку C-UAS і постійний розвиток відповідних рішень [13].

Водночас для цієї дипломної роботи важливо не описувати конкретні технічні параметри реальних засобів протидії, а визначити місце завадового впливу серед інших підходів. Радіоелектронна протидія є лише одним із можливих напрямів C-UAS, однак саме вона найкраще узгоджується з темою моделювання системи створення завад. Її можна досліджувати на безпечному й узагальненому рівні, розглядаючи не практичну реалізацію пристрою, а математичну взаємодію корисного сигналу, шуму та завади в каналі зв'язку.

З погляду подальшого моделювання найбільш доцільним є представлення системи протидії не як повного C-UAS-комплексу, а як спрощеної моделі завадового впливу на канал зв'язку малого БПЛА. У такій моделі корисний сигнал може бути поданий у вигляді базового сигналу з певною амплітудою та частотою, а завада — як додаткова складова, що змінює часову форму, спектральний склад або енергетичні характеристики прийнятого сигналу. Саме цей підхід дозволяє перейти від огляду сучасних систем протидії до теоретичних основ моделювання, які розглядаються в наступному розділі.

Отже, сучасні системи протидії малим БПЛА є складними багатокомпонентними рішеннями, що можуть включати радіочастотні, радіoeлектронні, навігаційні, оптичні, акустичні, фізичні, кібернетичні та комбіновані засоби. Для теми цієї дипломної роботи найбільше значення мають радіочастотні та радіoeлектронні підходи, оскільки вони пов'язані з аналізом каналу зв'язку, впливом шумів і завад, а також оцінюванням якості приймання сигналу. Саме тому подальше дослідження доцільно зосередити на побудові спрощеної програмної моделі, яка дозволить дослідити вплив різних типів завад на характеристики сигналу малого БПЛА.

Висновки

У першому розділі було розглянуто особливості функціонування малих безпілотних літальних апаратів, їхню класифікацію, сфери застосування та роль безпроводового каналу зв'язку в забезпеченні керування, передавання телеметрії та даних корисного навантаження. Встановлено, що малі БПЛА доцільно розглядати як комплексні інфокомунікаційні системи, ефективність яких значною мірою залежить від якості та стійкості каналів зв'язку.

Проаналізовано основні типи каналів зв'язку малих БПЛА, зокрема канали “повітря – земля”, “повітря – повітря”, канал керування, телеметричний канал і канал передавання корисних даних. Визначено, що ці канали є вразливими до ослаблення сигналу, багатопроменевого поширення, затінення, шумів, інтерференції, імпульсних перешкод та інших завадових чинників.

Окрему увагу приділено типам завад, які можуть впливати на якість передавання сигналу в каналах зв'язку малих БПЛА. Розглянуто тепловий, атмосферний і техногенний шум, ко-канальну та суміжноканальну інтерференцію, вузькосмугові, широкосмугові, імпульсні та навмисні завади. Встановлено, що для подальшого програмного моделювання найбільш доцільно використовувати спрощені моделі білого шуму, імпульсних перешкод і додаткових завадових складових.

Також було розглянуто сучасні системи протидії малим БПЛА на рівні загальних концепцій. Визначено, що такі системи можуть включати радіочастотні, радіоелектронні, навігаційні, оптичні, акустичні, фізичні, кібернетичні та комбіновані засоби. Для теми цієї дипломної роботи найбільше значення мають радіочастотні та радіоелектронні підходи, оскільки саме вони пов'язані з аналізом каналу зв'язку, шумів, перешкод і завадового впливу.

Отже, результати аналітичного огляду підтверджують доцільність подальшого дослідження завадового впливу на сигнали в каналах зв'язку малих БПЛА. Це створює основу для переходу до теоретичних основ моделювання сигналів і завад, постановки задачі та вибору програмних засобів реалізації моделі.

РОЗДІЛ 2

ТЕОРЕТИЧНІ ОСНОВИ МОДЕЛЮВАННЯ ТА ПОСТАНОВКА ЗАДАЧІ

2.1. Математичне подання сигналу в каналі зв'язку малого БПЛА

Для моделювання впливу завад на канал зв'язку малого БПЛА необхідно визначити математичне подання корисного сигналу. У системах зв'язку сигнал є фізичним процесом, за допомогою якого інформація передається від передавача до приймача. У реальних каналах зв'язку БПЛА сигнал може мати складну структуру, що залежить від типу модуляції, протоколу передавання даних, смуги частот, апаратної реалізації передавача та приймача. Проте в межах цієї роботи основна увага приділяється не відтворенню конкретного протоколу зв'язку, а дослідженню впливу завад на форму, спектр і енергетичні характеристики сигналу. Тому для базового моделювання доцільно використати спрощену гармонічну модель сигналу [16; 18].

У неперервному часі гармонічний сигнал можна подати у вигляді:

$$s(t) = A \sin(2\pi f t + \varphi), \quad (2.1)$$

де $s(t)$ – миттєве значення сигналу в момент часу t , A – амплітуда сигналу, f – частота сигналу, φ – початкова фаза.

Амплітуда визначає максимальне відхилення сигналу від нульового рівня, частота характеризує кількість коливань за одиницю часу, а початкова фаза задає зміщення сигналу відносно початку відліку часу. Така модель є спрощеною, однак вона є зручною для початкового аналізу, оскільки дозволяє наочно показати, як шумові, імпульсні та вузькосмугові завади змінюють сигнал.

Оскільки програмне моделювання виконується в цифровому середовищі, неперервний сигнал необхідно подати у дискретному вигляді. Дискретизація полягає в тому, що значення сигналу розглядаються не в усі моменти часу, а

лише в окремих точках – відліках. Якщо частота дискретизації дорівнює F_s , то момент часу, який відповідає n -му відліку, визначається як [18; 24]:

$$t_n = \frac{n}{F_s} \quad (2.2)$$

Тоді дискретне подання гармонічного сигналу має вигляд:

$$s[n] = A \sin \left(2\pi f \frac{n}{F_s} + \varphi \right), \quad (2.3)$$

де $s[n]$ – значення сигналу в n -му відліку, n – номер відліку, F_s – частота дискретизації.

Частота дискретизації визначає кількість відліків сигналу за одну секунду. Чим більшою є частота дискретизації, тим точніше цифрова послідовність відтворює форму неперервного сигналу. Водночас надмірне збільшення частоти дискретизації збільшує кількість відліків і, відповідно, обсяг обчислень. Для коректного подання сигналу в цифровій формі частота дискретизації має відповідати умові Найквіста [18; 24]:

$$F_s \geq 2f_{max}, \quad (2.4)$$

де f_{max} – максимальна частота сигналу. Якщо ця умова не виконується, може виникати накладання спектральних складових, що призводить до спотворення сигналу під час цифрового аналізу.

У межах цієї роботи корисний сигнал малого БПЛА розглядається як дискретна послідовність відліків $s[n]$, сформована на основі гармонічної моделі. Таке подання не враховує всіх особливостей реальних телекомунікаційних

протоколів, однак є достатнім для дослідження базового впливу завадових складових. Воно дозволяє зосередитися саме на зміні форми сигналу, його спектра та енергетичних характеристик після накладання шуму або завади.

Однією з важливих характеристик сигналу є його середня потужність. Для дискретної послідовності вона визначається за формулою [16; 18]:

$$P_s = \frac{1}{N} \sum_{n=0}^{N-1} |s[n]|^2, \quad (2.5)$$

де P_s – середня потужність сигналу, N – кількість відліків, $s[n]$ – значення сигналу в n -му відліку. Середня потужність використовується для подальшого оцінювання рівня шуму, завадового впливу та співвідношення сигнал/шум.

З погляду програмної реалізації таке подання є зручним, оскільки сигнал можна сформуванати як масив числових відліків. Спочатку задаються амплітуда, частота, початкова фаза, частота дискретизації та тривалість моделювання. Далі формується часовий масив, після чого для кожного відліку обчислюється значення сигналу відповідно до дискретної гармонічної моделі. Отримана послідовність $s[n]$ надалі використовується як основа для накладання білого гаусівського шуму, імпульсної або вузькосмугової завади.

Отже, у межах цієї дипломної роботи математичне подання сигналу базується на дискретній гармонічній моделі. Вона дозволяє задати основні параметри сигналу, сформуванати його цифрове представлення та використати його як основу для подальшого моделювання завадового впливу в каналі зв'язку малого БПЛА.

2.2. Адитивна модель каналу зв'язку

У реальних умовах сигнал у каналі зв'язку малого БПЛА не надходить до приймача в ідеальному вигляді. На нього впливають шум приймальної апаратури, зовнішній радіошум, інтерференція від інших джерел випромінювання, а також навмисні або випадкові завадові впливи. Для початкового етапу моделювання доцільно використати адитивну модель каналу, у якій прийнятий сигнал розглядається як сума корисної складової та шуму або завади [16; 18; 25; 26].

У загальному вигляді адитивна модель каналу записується так:

$$r(t) = s(t) + n(t), \quad (2.6)$$

де $r(t)$ – прийнятий сигнал; $s(t)$ – корисний сигнал, що передається через канал; $n(t)$ – шумова або завадова складова, яка накладається на сигнал у процесі передавання.

Фізичний зміст цієї моделі полягає в тому, що на приймальній стороні спостерігається не лише корисний сигнал, сформований передавачем, а й додаткова випадкова або детермінована складова, зумовлена властивостями каналу, роботою інших радіосистем, фоновим електромагнітним шумом або навмисними завадовими впливами. У такому випадку завдання моделювання полягає в тому, щоб окремо сформувати корисний сигнал, окремо задати заваду, виконати їх додавання та оцінити, як змінилися характеристики прийнятого сигналу [16; 17].

Оскільки програмна реалізація моделі виконується в цифровому середовищі, основним для подальшого аналізу є дискретне подання адитивної моделі:

$$r[n] = s[n] + n[n], \quad (2.7)$$

де $r[n]$ – прийнятий сигнал у n -му відліку; $s[n]$ – дискретне значення корисного сигналу; $n[n]$ – дискретне значення шуму або завади; n – номер відліку.

Якщо корисний сигнал подається у вигляді гармонічної дискретної послідовності, то прийнятий сигнал можна записати так:

$$r[n] = A \sin\left(2\pi f \frac{n}{F_s} + \varphi\right) + n[n], \quad (2.8)$$

де A – амплітуда корисного сигналу; f – його частота; F_s – частота дискретизації; φ – початкова фаза; $n[n]$ – шумова або завадова складова.

Таке подання є зручним для програмного моделювання, оскільки всі складові задаються як числові масиви однакової довжини. У результаті прийнятий сигнал формується шляхом додавання відповідних елементів масиву корисного сигналу та масиву завади. Це дозволяє наочно порівнювати сигнал до і після накладання шуму, будувати графіки в часовій області, виконувати спектральний аналіз та розраховувати показники якості сигналу [25].

У більш загальному вигляді адитивна модель може враховувати кілька завадових складових:

$$r[n] = s[n] + \sum_{k=1}^M n_k[n], \quad (2.9)$$

де M – кількість завадових компонентів; $n_k[n]$ – k -та шумова або завадова складова.

Такий запис дозволяє моделювати складніші умови, коли на корисний сигнал одночасно впливають фоновий шум, інтерференція, вузькосмугова завада або імпульсні перешкоди.

Для цієї роботи доцільно розглядати модель, у якій на корисний сигнал можуть накладатися білий гаусівський шум, імпульсна завада та вузькосмугова завада:

$$r[n] = s[n] + w[n] + i[n] + j[n], \quad (2.10)$$

де $w[n]$ – білий гаусівський шум; $i[n]$ – імпульсна завада; $j[n]$ – вузькосмугова завада.

Перевагою адитивної моделі є її простота та придатність для програмної реалізації. Вона дозволяє окремо змінювати параметри корисного сигналу й завади, формувати різні сценарії моделювання та оцінювати їхній вплив на форму сигналу, спектр і кількісні показники якості. Крім того, така модель добре узгоджується з логікою програмного засобу, у якому сигнал і завади задаються як масиви відліків, а прийнятий сигнал отримується шляхом їхнього додавання.

Разом із тим адитивна модель має певні обмеження. Вона не враховує повністю всі властивості реального радіоканалу, зокрема багатопроточне поширення, завмирання, зміну відстані між передавачем і приймачем, доплерівський зсув, вплив рельєфу та перешкод. У складніших моделях канал може описуватися не лише додаванням шуму, а й зміною амплітуди та фази сигналу за допомогою коефіцієнта каналу [6; 20; 21]:

$$r[n] = h[n]s[n] + n[n], \quad (2.11)$$

де $h[n]$ – коефіцієнт каналу, що враховує затухання, фазові зміни та інші властивості середовища поширення.

Проте для цілей цієї дипломної роботи адитивна модель є достатньою, оскільки основна увага зосереджена на дослідженні впливу шумових та завадових складових на корисний сигнал. Вона забезпечує зрозумілу математичну основу для подальшого моделювання, реалізації програмного засобу та аналізу результатів у часовій і частотній областях.

2.3. Моделі шумових, імпульсних та вузькосмугових завад

У каналі зв'язку малого БПЛА завадова складова може мати різну природу, інтенсивність і часовий характер. Вона може проявлятися як випадкове фонове зашумлення, короткочасні імпульсні сплески або як додатковий сигнал, енергія якого зосереджена в обмеженій частотній області. Для програмного моделювання такі впливи доцільно описувати через окремі математичні моделі, які можна додавати до корисного сигналу в межах адитивного підходу [16; 18; 25; 26].

У межах цієї роботи завадову складову $n[n]$ доцільно подати як сукупність кількох можливих компонентів: білого гаусівського шуму, імпульсної завади, вузькосмугової завади або їхньої комбінації. У загальному вигляді це можна записати так:

$$n[n] = w[n] + i[n] + j[n], \quad (2.12)$$

де $w[n]$ – білий гаусівський шум; $i[n]$ – імпульсна завада; $j[n]$ – вузькосмугова завада. У випадку одночасного врахування цих складових прийнятий сигнал формується відповідно до адитивної моделі з кількома завадовими компонентами, наведеної у формулі (2.10).

Базовою моделлю випадкової шумової складової в теорії зв'язку є адитивний білий гаусівський шум, або AWGN. Така модель використовується для опису випадкових флуктуацій, які можуть виникати в радіоканалі, приймальній апаратурі або середовищі поширення сигналу. Її перевагою є математична простота та зручність для програмної реалізації [16; 18; 25].

У дискретному вигляді канал із білим гаусівським шумом можна подати так:

$$r[n] = s[n] + w[n], \quad (2.13)$$

де $r[n]$ – прийнятий сигнал, $s[n]$ – корисний сигнал, $w[n]$ – відлік білого гаусівського шуму.

Шумова послідовність $w[n]$ задається як випадкова величина з нормальним розподілом:

$$w[n] \sim N(0, \sigma^2), \quad (2.14)$$

де σ^2 – дисперсія шуму. Для білого гаусівського шуму математичне сподівання дорівнює нулю:

$$E\{w[n]\} = 0, \quad (2.15)$$

а дисперсія визначає середню потужність шумової складової:

$$D\{w[n]\} = \sigma^2 \quad (2.16)$$

Нульове математичне сподівання означає, що шум не має сталої складової зміщення і в середньому не збільшує та не зменшує значення сигналу. Водночас дисперсія характеризує інтенсивність випадкових відхилень. Чим більшою є дисперсія, тим сильніше шум спотворює корисний сигнал.

У програмній реалізації рівень білого шуму зручно задавати через співвідношення сигнал/шум. Якщо відома потужність корисного сигналу P_s і задане значення SNR_{dB} , то потужність шуму можна визначити через лінійне значення SNR [16; 18]:

$$SNR = 10^{\frac{SNR_{dB}}{10}} \quad (2.17)$$

Після цього потужність шуму можна визначити як:

$$P_w = \frac{P_s}{SNR} \quad (2.18)$$

Для білого гаусівського шуму дисперсію можна прийняти рівною потужності шуму:

$$\sigma^2 = P_w \quad (2.19)$$

Тоді шумову послідовність можна сформулювати так:

$$w[n] = \sigma \xi[n] \quad (2.20)$$

де $\xi[n] \sim N(0,1)$ – випадкова величина зі стандартним нормальним розподілом.

Такий спосіб є зручним для програмної реалізації, оскільки дозволяє задавати рівень шуму через одне числове значення SNR_{dB} . Наприклад, можна моделювати канал із високим, середнім або низьким співвідношенням сигнал/шум і порівнювати отримані часові графіки та спектри [16; 17; 18; 25].

Окрему групу становлять імпульсні завади. На відміну від білого шуму, який діє протягом усього інтервалу спостереження, імпульсна завада виникає у вигляді короткочасних сплесків великої амплітуди. У часовій області така завада проявляється як різке відхилення значення сигналу в одному або кількох відліках.

Найпростішу модель одиночної імпульсної завади можна записати так:

$$i[n] = \begin{cases} A_i, & n = n_i \\ 0, & n \neq n_i \end{cases} \quad (2.21)$$

де A_i – амплітуда імпульсу, n_i – номер відліку, у якому виникає імпульс.

У такому випадку прийнятий сигнал має вигляд:

$$r[n] = s[n] + i[n] \quad (2.22)$$

Проте модель, у якій імпульс існує лише в одному відліку, є досить ідеалізованою. Для програмного моделювання доцільно враховувати також тривалість імпульсної завади. У такому разі її можна подати як прямокутний імпульс:

$$i[n] = \begin{cases} A_i, & n_i \leq n < n_i + L_i \\ 0, & n < n_i \text{ або } n \geq n_i + L_i \end{cases} \quad (2.23)$$

де L_i – тривалість імпульсу в кількості відліків.

Якщо імпульсів декілька, загальна модель може бути записана у вигляді суми окремих імпульсів:

$$i[n] = \sum_{m=1}^M A_m p[n - n_m], \quad (2.24)$$

де M – кількість імпульсів, A_m – амплітуда m -го імпульсу, n_m – момент його появи, $p[n]$ – форма імпульсу.

Для прямокутної форми імпульсу функцію $p[n]$ можна задати так:

$$p[n] = \begin{cases} 1, & 0 \leq n < L \\ 0, & n < 0 \text{ або } n \geq L \end{cases} \quad (2.25)$$

Імпульсна завада є корисною для моделювання короткочасних інтенсивних спотворень у каналі зв'язку. Якщо білий шум створює відносно рівномірний випадковий фон, то імпульсна завада різко змінює окремі фрагменти сигналу. Це дозволяє дослідити вплив сплесків великої амплітуди на часову форму сигналу та його спектральне представлення.

Крім білого шуму та імпульсних завад, у каналах зв'язку може виникати вузькосмугова завада. Вона відрізняється від шумової тим, що її енергія зосереджена не в широкій смузі частот, а поблизу певної частоти. У найпростішому випадку таку заваду можна подати як гармонічне коливання [16; 18]:

$$j[n] = A_j \sin\left(2\pi f_j \frac{n}{F_s} + \varphi_j\right), \quad (2.26)$$

де A_j – амплітуда вузькосмугової завади, f_j – її частота, F_s – частота дискретизації, φ_j – початкова фаза.

Тоді прийнятий сигнал можна записати як:

$$r[n] = s[n] + j[n] \quad (2.27)$$

Якщо частота вузькосмугової завади близька до частоти корисного сигналу, її вплив може бути особливо помітним. У часовій області вона проявляється як додаткове коливання, що накладається на сигнал. У частотній області така завада утворює окрему спектральну складову або пік на частоті f_j . Саме тому вузькосмугову заваду доцільно аналізувати не лише за часовим графіком, а й через спектральне представлення.

У контексті програмного моделювання вузькосмугова завада є зручною, оскільки її параметри легко змінювати. Можна задавати амплітуду A_j , частоту f_j , фазу φ_j і досліджувати, як змінюється прийнятий сигнал, якщо частота завади віддалена від частоти корисного сигналу або наближена до неї. Такий підхід дозволяє наочно показати відмінність між широкосмуговим шумовим впливом та завадою, енергія якої сконцентрована в обмеженій частотній області [16; 17; 18].

У реальніших умовах на канал зв'язку може одночасно впливати кілька типів завад. Тому доцільно розглядати комбіновану модель, у якій прийнятий сигнал формується відповідно до адитивної моделі одночасного впливу білого шуму, імпульсної та вузькосмугової завад, наведеної у формулі (2.10).

У більш загальному вигляді вплив кількох завадових складових описується моделлю з сумою завад, наведеною у формулі (2.9).

Для практичної реалізації моделей шумових та імпульсних завад необхідно визначити набір параметрів, які можуть задаватися користувачем або програмно. Для білого гаусівського шуму основним параметром є SNR_{dB} , на основі якого визначається потужність шуму та його дисперсія. Для імпульсної завади

важливими є амплітуда імпульсу, кількість імпульсів, тривалість кожного імпульсу та моменти їх появи. Для вузькосмугової завади основними параметрами є амплітуда, частота і фаза завадового сигналу.

У межах дипломної роботи доцільно використовувати такі моделі, які є достатньо простими для програмної реалізації, але водночас дозволяють продемонструвати різні типи спотворення сигналу. Білий гаусівський шум дає змогу оцінити вплив випадкового фону; імпульсна завада – короточасні сплески великої амплітуди; вузькосмугова завада – вплив сигналу, сконцентрованого в окремій частотній області. Разом ці моделі створюють основу для порівняння кількох сценаріїв моделювання [25].

Разом із тим зазначені моделі мають певні обмеження. Вони не враховують усіх особливостей реального каналу зв'язку малого БПЛА, таких як багатопроменеве поширення, доплерівський зсув, зміна рівня сигналу через відстань, вплив рельєфу або перешкод між передавачем і приймачем. У реальних UAV-каналах ці фактори можуть суттєво змінювати якість зв'язку, однак їх урахування потребує складнішої моделі [6; 20; 21; 22].

Отже, у межах підрозділу було розглянуто основні моделі завадової складової, які можуть бути використані в адитивній моделі каналу зв'язку малого БПЛА. Білий гаусівський шум подає випадкове фонове зашумлення, імпульсна завада моделює короточасні сплески великої амплітуди, а вузькосмугова завада описує вплив сигналу, енергія якого зосереджена поблизу певної частоти. Ці моделі можуть використовуватися окремо або в комбінації, що дає змогу дослідити зміну форми сигналу, його спектра та співвідношення сигнал/шум за різних умов завадового впливу.

2.4. Методи аналізу сигналів у часовій і частотній областях

Аналіз сигналу в каналі зв'язку малого БПЛА доцільно виконувати у двох основних областях: часовій та частотній. Часова область дозволяє оцінити форму

сигналу, його амплітуду, рівень зашумлення та наявність короткочасних імпульсних сплесків. Частотна область дає змогу визначити спектральний склад сигналу, виявити основні частотні компоненти, шумовий фон і вузькосмугові завадові складові [16; 18; 24].

У програмній моделі сигнал подається у вигляді дискретної послідовності відліків $x[n]$. Такою послідовністю може бути корисний сигнал $s[n]$, завадова складова $n[n]$ або прийнятий сигнал $r[n]$, утворений після накладання завади.

Якщо частота дискретизації дорівнює F_s , то момент часу для кожного дискретного відліку визначається відповідно до формули (2.2).

Отже, часовий графік будується як залежність значення сигналу від часу. Такий графік є найбільш наочним способом первинного аналізу, оскільки дозволяє безпосередньо побачити, як змінюється сигнал після додавання шуму або іншої завадової складової.

У часовій області можна оцінювати кілька базових характеристик сигналу. Однією з них є пікова амплітуда [16; 18]:

$$A_{max} = \max_{0 \leq n < N} |x[n]|, \quad (2.28)$$

де N – кількість відліків сигналу. Цей показник дозволяє визначити найбільше відхилення сигналу від нульового рівня. Він є особливо корисним для аналізу імпульсних завад, оскільки короткочасні сплески можуть суттєво збільшувати максимальне значення сигналу.

Для оцінювання середнього рівня сигналу використовується середньоквадратичне значення [16; 18]:

$$A_{rms} = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{n=0}^{N-1} |x[n]|^2} \quad (2.29)$$

Середньоквадратичне значення враховує всі відліки сигналу й пов'язане із середньою потужністю. Середня потужність дискретного сигналу визначається за формулою [16; 18]:

$$P_x = \frac{1}{N} \sum_{n=0}^{N-1} |x[n]|^2 \quad (2.30)$$

Цей показник може застосовуватися як до корисного сигналу, так і до шумової або завадової складової. Саме через середню потужність надалі визначається співвідношення сигнал/шум.

Для порівняння сигналу до і після накладання завади можна використовувати різницю між прийнятим і корисним сигналом:

$$e[n] = r[n] - s[n] \quad (2.31)$$

У межах адитивної моделі ця різниця фактично відповідає завадовій складовій. Тому аналіз $e[n]$ дозволяє оцінити, наскільки сильно прийнятий сигнал відрізняється від початкового.

Часовий аналіз дає змогу добре виявляти загальне зашумлення та імпульсні спотворення, однак він не завжди достатній для повної оцінки сигналу. Наприклад, вузькосмугова завада може бути неочевидною на часовому графіку, але чітко проявлятися у спектрі як додаткова частотна складова. Тому для повнішого аналізу використовується частотне представлення сигналу.

Основним інструментом частотного аналізу дискретних сигналів є дискретне перетворення Фур'є (ДПФ). Воно дозволяє подати сигнал $x[n]$ як сукупність гармонічних складових із різними частотами. Для послідовності з N відліків дискретне перетворення Фур'є записується так [18; 24]:

$$X[k] = \sum_{n=0}^{N-1} x[n] e^{-j2\pi \frac{kn}{N}}, \quad (2.32)$$

де $X[k]$ – комплексне значення спектра на k -й частотній складовій; k – номер частотного відліку; N – кількість відліків сигналу; j – уявна одиниця [18; 24].

Кожному частотному відліку відповідає частота [24]:

$$f_k = \frac{kF_s}{N} \quad (2.33)$$

На практиці для обчислення спектра використовується швидке перетворення Фур'є, або FFT. Це ефективний алгоритм реалізації дискретного перетворення Фур'є, який широко застосовується в програмних засобах аналізу сигналів. У межах цієї роботи FFT використовується для побудови спектра корисного та прийнятого сигналів [24; 25].

Для аналізу спектра зазвичай використовують модуль перетворення Фур'є: $|X[k]|$. Він показує амплітуду відповідної частотної складової. Якщо аналізується чистий гармонічний сигнал, у спектрі спостерігається виражений пік на частоті цього сигналу. Якщо до сигналу додається білий шум, у спектрі підвищується загальний шумовий фон. Якщо діє вузькосмугова завада, у спектрі з'являється додатковий пік на частоті завадового сигналу [16; 18; 24].

Для оцінювання розподілу енергії в частотній області може використовуватися спектральне подання потужності [18; 24]:

$$P[k] = |X[k]|^2. \quad (2.34)$$

У нормованому вигляді така оцінка може подаватися як:

$$P[k] = \frac{1}{N} |X[k]|^2 \quad (2.35)$$

Таке подання дозволяє визначити, у яких частотних ділянках зосереджена основна енергія сигналу або завади. Це особливо важливо для аналізу вузькосмугових перешкод, оскільки вони мають енергію, сконцентровану поблизу певної частоти.

У межах програмного засобу часовий і частотний аналізи використовуються разом. Спочатку формується корисний сигнал $s[n]$, після чого до нього додається завадова складова й отримується прийнятий сигнал $r[n]$. Далі будуються часові графіки корисного сигналу, завади та прийнятого сигналу. Після цього за допомогою FFT виконується спектральний аналіз, який дозволяє оцінити зміну частотного складу сигналу після накладання завад [25].

Поєднання часової та частотної областей є важливим, оскільки різні типи завад проявляються по-різному. Білий гаусівський шум зазвичай створює випадкове зашумлення в часовій області та підвищення спектрального фону. Імпульсна завада проявляється як короткочасний сплеск великої амплітуди, що може впливати на широкий діапазон частот. Вузькосмугова завада, навпаки, може бути менш помітною в часовій області, але чітко виділяється у спектрі як окрема частотна складова [16; 18; 24].

Отже, аналіз сигналів у часовій і частотній областях є необхідною частиною моделювання каналу зв'язку малого БПЛА. Часовий аналіз дозволяє оцінити форму сигналу, рівень зашумлення та імпульсні спотворення, тоді як частотний аналіз дає змогу визначити спектральний склад сигналу та виявити вузькосмугові завади. У програмному засобі ці методи використовуються для порівняння корисного й прийнятого сигналів, а також для подальшого оцінювання якості сигналу за кількісними показниками.

2.5. Показники оцінювання якості сигналу

Для аналізу результатів моделювання недостатньо лише побудувати графіки сигналу в часовій або частотній областях. Візуальне порівняння дозволяє побачити загальний характер спотворень, однак для об'єктивної оцінки якості передавання необхідно використовувати кількісні показники. У межах цієї роботи доцільно застосовувати середню потужність сигналу та завади, співвідношення сигнал/шум, середньоквадратичне значення, пікову амплітуду, коефіцієнт форми та спектральне представлення сигналу [16; 18; 24].

Основою більшості кількісних оцінок є середня потужність сигналу. Для дискретної послідовності $s[n]$, що містить N відліків, середня потужність корисного сигналу визначається за формулою (2.5) [16; 18].

Аналогічно може бути визначена середня потужність шумової або завадової складової:

$$P_n = \frac{1}{N} \sum_{n=0}^{N-1} |n[n]|^2, \quad (2.36)$$

де P_n – середня потужність шуму або завади; $n[n]$ – значення шумової складової в n -му відліку.

Найважливішим показником для оцінювання якості сигналу в цій роботі є співвідношення сигнал/шум, або SNR. Цей показник характеризує, наскільки потужність корисного сигналу перевищує потужність шумової складової [16; 17; 18; 23]:

$$SNR = \frac{P_s}{P_n} \quad (2.37)$$

Чим більшим є значення SNR, тим кращими є умови приймання сигналу, оскільки корисна складова домінує над шумом. Якщо значення SNR

зменшується, шумова складова стає більш помітною, а форма прийнятого сигналу сильніше відхиляється від початкової [16; 17; 18].

На практиці співвідношення сигнал/шум часто подають у децибелах:

$$SNR_{dB} = 10 \log_{10} \left(\frac{P_s}{P_n} \right) \quad (2.38)$$

Логарифмічна форма є зручною, оскільки дозволяє компактно відобразити широкий діапазон значень. Наприклад, якщо $SNR_{dB} = 0$, це означає, що потужність сигналу та шуму приблизно однакові. Якщо значення SNR є додатним, корисний сигнал потужніший за шум; якщо від'ємним – шумова складова перевищує сигнал.

У програмній моделі SNR може використовуватися у двох напрямках. По-перше, через задане значення SNR_{dB} можна сформувати шум потрібної інтенсивності. По-друге, після додавання шуму або іншої завадової складової можна обчислити фактичне значення SNR і використати його для порівняння різних сценаріїв моделювання [18; 25].

Якщо відома потужність корисного сигналу P_s і задане бажане значення SNR_{dB} , то перехід від значення SNR у децибелах до лінійного значення виконується за формулою (2.17).

Після цього необхідна потужність шумової складової визначається відповідно до формули (2.18).

Для білого гаусівського шуму з нульовим математичним сподіванням дисперсія дорівнює потужності шуму, як показано у формулі (2.19).

Такий підхід є зручним для програмної реалізації, оскільки дозволяє моделювати різні умови каналу через одне значення SNRdB: від майже чистого сигналу до сигналу, суттєво спотвореного шумом [16; 18; 25].

Якщо в моделі враховується не лише шум, а й інші завадові компоненти, можна використовувати узагальнений підхід, за якого в знаменнику враховується сумарна потужність усіх завадових складових:

$$SNR_{\Sigma} = \frac{P_s}{P_{n,\Sigma}}, \quad (2.39)$$

де $P_{n,\Sigma}$ – сумарна потужність шуму та інших завад. У випадку одночасної дії білого шуму, імпульсної та вузькосмугової завади це можна записати як:

$$P_{n,\Sigma} = P_w + P_i + P_j, \quad (2.40)$$

де P_w – потужність білого шуму, P_i – потужність імпульсної завади, P_j – потужність вузькосмугової завади. Такий підхід дозволяє оцінювати не лише окремий шумовий вплив, а й комбіновану дію кількох завадових складових.

Окрім потужності та SNR, для аналізу сигналу використовуються амплітудні показники. Одним із таких показників є пікова амплітуда, яка визначається відповідно до формули (2.28) [18; 24].

Пікова амплітуда показує найбільше відхилення сигналу від нульового рівня. Цей показник є особливо корисним під час аналізу імпульсних завад, оскільки короткочасний сплеск може різко збільшити максимальне значення сигналу, навіть якщо середня потужність змінюється незначно.

Іншим важливим показником є середньоквадратичне значення, що визначається відповідно до формули (2.29).

Середньоквадратичне значення характеризує узагальнений рівень сигналу на всьому інтервалі спостереження. Воно пов'язане із середньою потужністю, оскільки для нормованого сигналу потужність може бути подана як квадрат RMS-значення:

$$P_x = A_{rms}^2 \quad (2.41)$$

Для аналізу імпульсних спотворень також можна використовувати відношення пікового значення до середньоквадратичного, тобто коефіцієнт форми або crest factor:

$$CF = \frac{A_{max}}{A_{rms}} \quad (2.42)$$

Якщо сигнал має відносно рівномірну форму без різких сплесків, цей показник залишається помірним. Якщо ж у сигналі з'являються короткочасні імпульсні завади великої амплітуди, пікове значення зростає значно сильніше, ніж RMS, тому коефіцієнт форми збільшується. Це дає змогу використовувати його як додатковий індикатор імпульсного характеру завадового впливу [18; 24].

Для частотного аналізу якості сигналу важливим є спектральне представлення. Спектральна потужність та її нормоване подання визначаються за формулами (2.34) і (2.35).

Спектральна щільність потужності показує, як енергія сигналу або завади розподілена за частотами. Для чистого гармонічного сигналу основна енергія зосереджена поблизу однієї частоти. Для білого шуму характерним є підвищення загального спектрального фону, а для вузькосмугової завади – поява окремої вираженої частотної складової. Тому спектральні показники доцільно використовувати як доповнення до SNR, особливо тоді, коли необхідно виявити не лише загальне погіршення сигналу, а й характер цього погіршення [18; 24; 25].

У межах програмного засобу основними вихідними показниками є середня потужність корисного сигналу, потужність завади, потужність прийнятого сигналу, значення SNR_{dB} , RMS, пікова амплітуда та коефіцієнт форми. Ці показники дозволяють кількісно порівнювати різні сценарії моделювання: сигнал без завад, сигнал із білим гаусівським шумом, сигнал з імпульсною завадою, сигнал із вузькосмуговою завадою та комбінований вплив.

Отже, система показників оцінювання якості сигналу має поєднувати енергетичні, амплітудні та спектральні характеристики. Основним кількісним критерієм у цій роботі є SNR, оскільки він безпосередньо відображає співвідношення потужності корисного сигналу та шумової складової. Додаткові показники, зокрема RMS, пікова амплітуда, коефіцієнт форми та спектральне представлення, дають змогу точніше описати характер спотворень, особливо за наявності імпульсних або вузькосмугових завад. Саме ці показники можуть бути використані для порівняння різних сценаріїв моделювання каналу зв'язку малого БПЛА.

2.6. Постановка задачі моделювання

Після визначення математичного подання сигналу, адитивної моделі каналу зв'язку, типів завад і показників оцінювання якості сигналу доцільно сформулювати загальну постановку задачі моделювання. У межах цієї дипломної роботи моделювання розглядається як засіб дослідження того, як шумові, імпульсні та вузькосмугові завади впливають на сигнал у каналі зв'язку малого БПЛА. Основна увага приділяється не повному відтворенню реального радіоканалу, а побудові спрощеної програмної моделі, яка дозволяє наочно проаналізувати зміну сигналу під дією різних типів завад.

Метою моделювання є дослідження впливу завадових складових на часові, спектральні та енергетичні характеристики сигналу в каналі зв'язку малого БПЛА. Для цього необхідно сформувати корисний сигнал із заданими

параметрами, згенерувати одну або кілька завадових складових, виконати їх накладання на сигнал у межах адитивної моделі, а потім оцінити отриманий результат за допомогою часових графіків, спектрального аналізу та кількісних показників якості.

Об'єктом моделювання є сигнал у каналі зв'язку малого БПЛА, який зазнає впливу шумових та завадових чинників. Предметом моделювання є зміна характеристик цього сигналу під дією білого гаусівського шуму, імпульсної завади, вузькосмугової перешкоди та їхніх комбінацій. Такий підхід дозволяє дослідити загальні закономірності погіршення якості сигналу в умовах завадового впливу без прив'язки до конкретного апаратного комплексу або протоколу зв'язку.

У межах моделі корисний сигнал подається як дискретна послідовність $s[n]$, сформована на основі гармонічного сигналу. Прийнятий сигнал визначається через адитивне накладання завадових складових відповідно до формули (2.7).

Якщо в моделі враховуються кілька типів завад, прийнятий сигнал описується розширеною адитивною моделлю, наведеною у формулі (2.10). Такий запис є зручним для програмної реалізації, оскільки кожна складова може формуватися окремо, після чого додається до корисного сигналу відповідно до обраного сценарію моделювання.

Вхідними параметрами програмної моделі є параметри корисного сигналу, параметри дискретизації, характеристики завад і параметри аналізу. До параметрів корисного сигналу належать амплітуда A_s , частота f_0 , початкова фаза φ_s , тривалість спостереження та кількість відліків N . До параметрів дискретизації належить частота дискретизації F_s , яка визначає часовий крок моделювання та точність подання сигналу в цифровій формі.

Для шумової складової основним параметром є задане значення SNR_{dB} , на основі якого визначається потужність шуму та його дисперсія. Для імпульсної

завади задаються амплітуда імпульсу, кількість імпульсів, тривалість імпульсу та моменти їх появи. Для вузькосмугової завади основними параметрами є амплітуда, частота та початкова фаза завадового сигналу.

Вихідними результатами моделювання мають бути сформований корисний сигнал $s[n]$, завадова складова $n[n]$, прийнятий сигнал $r[n]$, часові графіки сигналів, спектральне представлення, а також числові показники якості. До основних показників належать середня потужність сигналу, потужність завади, співвідношення сигнал/шум, середньоквадратичне значення, пікова амплітуда та коефіцієнт форми.

Загальна логіка моделювання полягає у послідовному виконанні кількох етапів: задання параметрів сигналу й завад, формування часової осі, генерація корисного сигналу, генерація вибраних завадових складових, адитивне накладання завад на сигнал, аналіз отриманого результату в часовій і частотній областях та розрахунок показників якості. Детальна програмна реалізація цих етапів буде розглянута в наступному розділі.

У межах роботи доцільно передбачити кілька базових варіантів моделювання: сигнал без завад, сигнал із білим гаусівським шумом, сигнал з імпульсною завадою, сигнал із вузькосмуговою завадою та комбінований вплив кількох завадових складових. Такі варіанти дозволяють порівняти, як різні типи завад впливають на часову форму сигналу, його спектр і кількісні показники якості. Детальний аналіз результатів для цих варіантів доцільно виконати в експериментальному розділі роботи.

Важливо також визначити обмеження моделі. У цій роботі сигнал розглядається на сигнальному рівні без детального моделювання конкретного протоколу зв'язку, структури пакетів, кодування, модуляції та алгоритмів корекції помилок. Модель не враховує повною мірою багатопроменеве поширення, завмирання, доплерівський зсув, зміну відстані між БПЛА та наземною станцією, вплив рельєфу та перешкод у зоні поширення сигналу. Такі

чинники є важливими для реального безпроводового каналу, однак їх урахування потребує складнішої моделі та виходить за межі базової програмної реалізації [6; 20; 21; 22].

Попри зазначені обмеження, обрана постановка задачі є достатньою для досягнення мети дипломної роботи. Вона дозволяє побудувати зрозумілу програмну модель, у якій можна задавати параметри сигналу та завад, формувати прийнятий сигнал, будувати графіки, виконувати спектральний аналіз і розраховувати кількісні показники якості. Такий підхід забезпечує зв'язок між теоретичними положеннями другого розділу та подальшою практичною реалізацією.

Отже, задача моделювання полягає в розробленні програмного засобу, який забезпечує формування корисного сигналу малого БПЛА, генерацію шумових, імпульсних і вузькосмугових завад, накладання цих завад на сигнал у межах адитивної моделі, аналіз отриманого результату в часовій і частотній областях та розрахунок показників якості. Сформульована постановка задачі є основою для наступного розділу, у якому буде описано архітектуру програмного засобу, вибір інструментів реалізації та логіку роботи окремих модулів моделі.

Висновки

У другому розділі було розглянуто теоретичні основи моделювання сигналу в каналі зв'язку малого БПЛА та сформульовано постановку задачі подальшої програмної реалізації. Визначено, що для базового моделювання корисний сигнал доцільно подавати у вигляді дискретної послідовності, сформованої на основі гармонічної моделі. Основними параметрами такого сигналу є амплітуда, частота, початкова фаза, тривалість спостереження, кількість відліків і частота дискретизації.

Обґрунтовано використання адитивної моделі каналу зв'язку, відповідно до якої прийнятий сигнал розглядається як сума корисного сигналу та завадової складової. Такий підхід є зручним для програмного моделювання, оскільки дозволяє окремо формувати корисний сигнал і завадові компоненти, після чого аналізувати результат їхнього накладання в часовій і частотній областях.

Розглянуто основні моделі завад, які можуть бути використані в роботі. Білий гаусівський шум подано як модель випадкового фонових зашумлення сигналу, імпульсну заваду – як короткочасний сплеск підвищеної амплітуди, а вузькосмугову заваду – як додаткове гармонічне коливання, енергія якого зосереджена поблизу певної частоти. Також показано можливість використання комбінованої моделі, у якій на сигнал одночасно впливають кілька завадових складових.

Окрему увагу приділено методам аналізу сигналів у часовій і частотній областях. Часовий аналіз дає змогу оцінити форму сигналу, амплітудні зміни, рівень зашумлення та наявність імпульсних сплесків. Частотний аналіз, що виконується за допомогою дискретного або швидкого перетворення Фур'є, дозволяє визначити спектральний склад сигналу, виявити вузькосмугові завади та оцінити зміну розподілу енергії за частотою.

Визначено основні показники оцінювання якості сигналу, які доцільно використовувати в межах програмного моделювання. До них належать середня

потужність корисного сигналу, потужність завадової складової, співвідношення сигнал/шум, середньоквадратичне значення, пікова амплітуда, коефіцієнт форми та спектральні характеристики. Основним кількісним показником обрано SNR, оскільки він безпосередньо відображає співвідношення потужності корисного сигналу та завадової складової і є зручним для програмної реалізації.

У результаті сформульовано постановку задачі моделювання. Вона полягає у створенні програмного засобу, який забезпечує формування корисного сигналу малого БПЛА, генерацію шумових, імпульсних і вузькосмугових завад, накладання цих завад на сигнал у межах адитивної моделі, побудову часових і спектральних графіків, а також розрахунок показників якості. Отримані теоретичні положення створюють основу для наступного розділу, у якому буде описано розроблення програмного засобу системи створення завад для малих БПЛА.

РОЗДІЛ 3

РОЗРОБКА ПРОГРАМНОГО ЗАСОБУ СИСТЕМИ СТВОРЕННЯ ЗАВАД

3.1. Вибір інструментів програмної реалізації

Для розроблення програмного засобу системи моделювання завад у каналі зв'язку малого БПЛА необхідно обрати такі інструменти, які забезпечують зручне формування сигналів, роботу з числовими масивами, генерацію випадкових процесів, побудову графіків, спектральний аналіз і взаємодію користувача з моделлю. Оскільки задача передбачає не створення апаратного засобу протидії, а саме програмне моделювання завадового впливу, доцільним є використання мови програмування Python та бібліотек для наукових обчислень і веб-візуалізації результатів.

Python обрано як основну мову програмування через його зручність для математичного моделювання, обробки даних і швидкого створення дослідницьких прототипів. Ця мова має зрозумілий синтаксис, підтримує роботу з великою кількістю спеціалізованих бібліотек і дозволяє реалізувати всі етапи моделювання в одному середовищі: формування корисного сигналу, генерацію завад, адитивне накладання, розрахунок показників якості та побудову графіків [27].

Основною бібліотекою для числових розрахунків у програмному засобі є NumPy. Вона використовується для створення масивів відліків сигналу, формування часової осі, реалізації математичних операцій над сигналами та генерації випадкових значень. У межах роботи корисний сигнал, шумова складова, імпульсна завада, вузькосмугова завада та прийнятий сигнал подаються як масиви однакової довжини. Це дає змогу виконувати операції над усією послідовністю відліків без необхідності обробляти кожен елемент окремо [28].

За допомогою NumPy реалізуються такі основні операції: формування часової послідовності, обчислення гармонічного сигналу, генерація білого гаусівського шуму, створення імпульсних завад, формування вузькосмугової завади, додавання масивів сигналу й завад, а також розрахунок потужності, середньоквадратичного значення та пікової амплітуди. Також у програмному засібі використовується модуль `numpy.fft`, який забезпечує виконання швидкого перетворення Фур'є для побудови спектра сигналу.

Для візуалізації результатів моделювання використовується бібліотека Matplotlib. Вона дозволяє будувати графіки сигналів у часовій області, окремо відображати завадову складову, порівнювати корисний і прийнятий сигнали, а також формувати спектральні графіки після виконання FFT-аналізу [29]. У межах дипломної роботи візуалізація має важливе значення, оскільки дозволяє наочно показати, як різні типи завад змінюють форму сигналу та його спектральний склад.

Для створення веб-інтерфейсу користувача обрано Streamlit. Цей інструмент дозволяє швидко створювати інтерактивні веб-застосунки на Python без необхідності окремо розробляти складну клієнтську частину. У програмному засобі Streamlit використовується для створення бічної панелі з параметрами моделювання, чекбоксів вибору типів завад, вкладок із графіками та кнопок для завантаження результатів. Завдяки цьому користувач може змінювати параметри сигналу й завад без редагування програмного коду [30].

Використання веб-інтерфейсу є доцільним для цієї дипломної роботи, оскільки воно спрощує демонстрацію роботи програмного засобу. Користувач може задавати амплітуду, частоту, фазу, частоту дискретизації та тривалість сигналу, а також обирати, які завади потрібно додати до моделі. Для білого гаусівського шуму задається рівень SNR у децибелах, для імпульсної завади – амплітуда, кількість імпульсів і тривалість, а для вузькосмугової завади – амплітуда, частота та фаза. Після зміни параметрів інтерфейс автоматично оновлює графіки та числові показники.

Для табличного подання результатів у програмному засобі використовується бібліотека Pandas. Вона застосовується для формування таблиць із числовими даними сигналу та показниками моделювання. Крім того, Pandas дає змогу експортувати результати у форматі CSV, що є зручним для подальшого аналізу або використання даних у четвертому розділі дипломної роботи [31].

Структурно програмний засіб поділено на дві основні частини. Перша частина містить математичну та обчислювальну логіку моделі: формування сигналу, генерацію завад, розрахунок показників якості й виконання спектрального аналізу. Друга частина відповідає за веб-інтерфейс, введення параметрів, відображення графіків і експорт результатів. Такий поділ дозволяє відокремити математичну модель від засобів взаємодії з користувачем, що робить програму більш зрозумілою та зручною для подальшого розширення.

Обраний набір інструментів відповідає задачам, сформульованим у другому розділі. Python забезпечує загальну програмну основу, NumPy використовується для числового моделювання сигналів і завад, Matplotlib – для побудови графіків, Streamlit – для створення веб-інтерфейсу, а Pandas – для табличного подання й експорту результатів. Такий підхід дозволяє реалізувати програмний засіб, який забезпечує формування корисного сигналу, додавання шумових, імпульсних і вузькосмугових завад, аналіз отриманого сигналу в часовій і частотній областях та розрахунок основних показників якості.

Отже, для програмної реалізації обрано інструменти, які є відкритими, доступними та придатними для дослідницького моделювання. Їх використання дозволяє створити інтерактивний програмний засіб з веб-інтерфейсом, який може бути застосований для демонстрації впливу різних типів завад на сигнал у каналі зв'язку малого БПЛА та для отримання результатів, необхідних для подальшого експериментального аналізу.

3.2. Загальна архітектура програмного засобу

Програмний засіб системи моделювання завад у каналі зв'язку малого БПЛА побудовано за модульним принципом. Такий підхід дозволяє розділити загальну задачу на окремі функціональні частини: введення параметрів, формування корисного сигналу, генерацію завад, адитивне накладання завадових складових, аналіз отриманого сигналу, побудову графіків і експорт результатів. Завдяки цьому кожен елемент програми виконує окрему функцію, а загальна структура програмного засобу залишається зрозумілою та придатною для подальшого розширення.

Архітектура програмного засобу відповідає постановці задачі, сформульованій у другому розділі. Основна ідея полягає в тому, що спочатку формується корисний сигнал $s[n]$, після чого до нього додається одна або кілька завадових складових. У результаті утворюється прийнятий сигнал $r[n]$, який далі аналізується в часовій і частотній областях. У загальному вигляді логіка моделі може бути записана так:

$$r[n] = s[n] + n[n], \quad (3.1)$$

де $s[n]$ – корисний сигнал, $n[n]$ – сумарна завадова складова, $r[n]$ – прийнятий сигнал після накладання завад.

Якщо одночасно враховуються кілька типів завад, сумарна завадова складова може бути подана у вигляді:

$$n[n] = w[n] + i[n] + j[n], \quad (3.2)$$

де $w[n]$ – білий гаусівський шум, $i[n]$ – імпульсна завада, $j[n]$ – вузькосмугова завада. Тоді прийнятий сигнал визначається як:

$$r[n] = s[n] + w[n] + i[n] + j[n]. \quad (3.3)$$

З погляду програмної реалізації засіб складається з двох основних логічних частин: обчислювальної частини та інтерфейсної частини. Обчислювальна частина відповідає за математичну логіку моделі: формування часової осі, генерацію корисного сигналу, створення шумових та завадових складових, адитивне накладання сигналів, розрахунок показників якості та виконання спектрального аналізу. Інтерфейсна частина забезпечує взаємодію користувача з програмою: введення параметрів, вибір типів завад, відображення графіків, таблиць і завантаження результатів.

Такий поділ є доцільним, оскільки математична логіка відокремлена від засобів взаємодії з користувачем. Це дозволяє змінювати або розширювати модель сигналу та завад без повної перебудови інтерфейсу, а також удосконалювати інтерфейс без зміни базових алгоритмів моделювання.

Вхідними даними програмного засобу є параметри корисного сигналу, параметри дискретизації та параметри завадових складових. До параметрів корисного сигналу належать амплітуда, частота, початкова фаза, частота дискретизації та тривалість моделювання. Ці параметри визначають форму вихідного сигналу, який у подальшому використовується для накладання завад.

Для білого гаусівського шуму основним параметром є задане значення SNR у децибелах. На його основі програма визначає потужність шуму та формує випадкову шумову послідовність. Для імпульсної завади користувач задає амплітуду імпульсів, їхню кількість, тривалість у відліках і параметр випадковості. Для вузькосмугової завади задаються амплітуда, частота та початкова фаза. Вибір активних завад здійснюється за допомогою чекбоксів у веб-інтерфейсі.

Основними функціональними модулями програмного засобу є:

- модуль введення параметрів;

- модуль формування корисного сигналу;
- модуль генерації завадових складових;
- модуль адитивного накладання завад;
- модуль розрахунку показників якості;
- модуль спектрального аналізу;
- модуль візуалізації та експорту результатів.

Модуль введення параметрів реалізовано у веб-інтерфейсі. Він забезпечує взаємодію користувача з моделлю та дозволяє змінювати параметри сигналу й завад без редагування програмного коду. Завдяки цьому користувач може швидко перевіряти різні варіанти моделювання та порівнювати їхні результати.

Модуль формування корисного сигналу створює часову вісь і дискретну послідовність $s[n]$, яка відповідає базовому сигналу в каналі зв'язку малого БПЛА. У програмному засобі для цього використовується гармонічна модель сигналу, що дозволяє задавати його амплітуду, частоту та фазу.

Модуль генерації завадових складових формує окремі масиви для білого шуму, імпульсної та вузькосмугової завади. Кожна завада створюється окремо, що дозволяє вмикати їх незалежно або комбінувати між собою. Такий підхід є зручним для подальшого порівняння окремих і комбінованих сценаріїв впливу.

Модуль адитивного накладання виконує додавання корисного сигналу та вибраних завадових складових. Усі сигнали подаються як масиви однакової довжини, тому формування прийнятого сигналу зводиться до додавання відповідних відліків. У результаті програма отримує сигнал $r[n]$, який імітує прийнятий сигнал після впливу завад.

Модуль розрахунку показників якості визначає основні числові характеристики сигналу. До них належать потужність корисного сигналу, потужність завади, потужність прийнятого сигналу, співвідношення сигнал/шум, середньоквадратичне значення, пікова амплітуда та коефіцієнт

форми. Ці показники використовуються для кількісного порівняння різних умов моделювання.

Модуль спектрального аналізу виконує швидке перетворення Фур'є для корисного та прийнятого сигналів. Це дає змогу отримати спектральне представлення сигналу, визначити основну частотну складову, оцінити підвищення шумового фону та виявити додаткові спектральні компоненти, спричинені вузькосмуговою завадою.

Модуль візуалізації та експорту результатів забезпечує побудову графіків і збереження результатів моделювання. У програмному засобі передбачено відображення сигналу в часовій області, окремого графіка завадової складової, спектра сигналу, графіка залежності фактичного SNR від заданого рівня шуму, а також таблиці з числовими даними. Результати можуть бути завантажені у форматах PNG і CSV.

Загальну послідовність роботи програмного засобу можна подати у вигляді таких етапів:

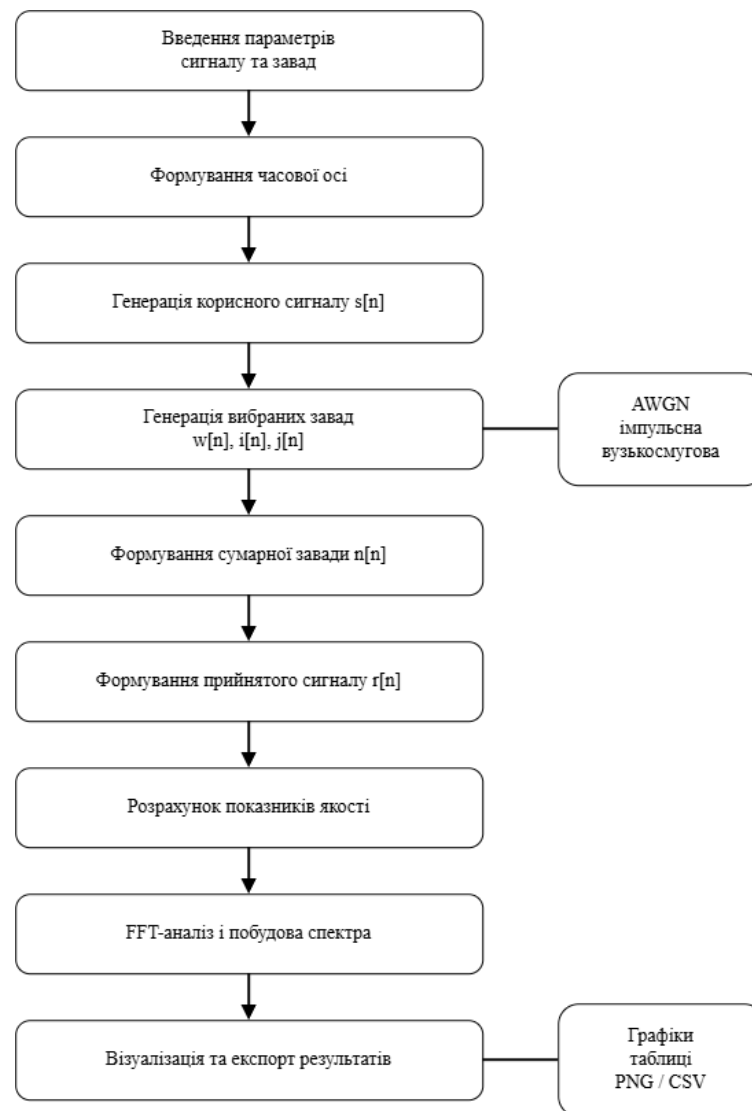


Рис. 3.1. Загальна архітектура програмного засобу

Вихідними даними програмного засобу є часові та спектральні представлення сигналу, числові показники якості, а також табличні дані, що відображають результати моделювання. Вони забезпечують можливість подальшого порівняльного аналізу різних сценаріїв завадового впливу в експериментальному розділі роботи.

Отже, загальна архітектура програмного засобу побудована як послідовність взаємопов'язаних модулів, що забезпечують повний цикл моделювання: від введення параметрів сигналу та завад до отримання графіків і числових показників якості. Така структура відповідає теоретичній постановці

задачі та дозволяє використовувати програмний засіб для дослідження впливу різних типів завад на сигнал у каналі зв'язку малого БПЛА.

3.3. Реалізація модуля формування корисного сигналу

Одним із базових елементів програмного засобу є модуль формування корисного сигналу. Його призначення полягає у створенні дискретної послідовності відліків $s[n]$, яка надалі використовується як основа для накладання шумових, імпульсних і вузькосмугових завад. Саме цей сигнал у межах моделі розглядається як сигнал у каналі зв'язку малого БПЛА до впливу завадових складових.

У другому розділі було обґрунтовано використання спрощеної гармонічної моделі сигналу. Такий підхід не відтворює повністю структуру реальних телекомунікаційних протоколів, однак є достатнім для дослідження впливу завад на форму сигналу, його спектр та енергетичні характеристики. У програмному засобі корисний сигнал формується у вигляді дискретної гармонічної послідовності:

$$s[n] = A_s \sin\left(2\pi f_s \frac{n}{F_s} + \varphi_s\right), \quad (3.4)$$

де A_s – амплітуда корисного сигналу, f_s – частота сигналу, F_s – частота дискретизації, φ_s – початкова фаза, n – номер дискретного відліку.

Вхідними параметрами модуля формування сигналу є амплітуда, частота, початкова фаза, частота дискретизації та тривалість моделювання. Амплітуда визначає максимальне відхилення сигналу від нульового рівня, частота задає кількість коливань за одиницю часу, фаза визначає початкове зміщення сигналу, частота дискретизації впливає на кількість відліків за секунду, а тривалість моделювання визначає загальну довжину сформованої послідовності.

Перед формуванням сигналу створюється часова вісь. Кількість відліків визначається як добуток частоти дискретизації на тривалість моделювання:

$$N = F_s T, \quad (3.5)$$

де N – кількість відліків, F_s – частота дискретизації, T – тривалість моделювання. Для кожного відліку формується відповідне значення часу:

$$t_n = \frac{n}{F_s} \quad (3.6)$$

Після формування часової осі для кожного значення часу обчислюється миттєве значення корисного сигналу. У програмній реалізації це виконується над усім масивом відліків, що дозволяє швидко сформувати сигнал заданої тривалості. Спрощений фрагмент реалізації модуля формування сигналу наведено нижче.

```
def create_time_vector(sampling_rate_hz, duration_s):
    samples_count = int(sampling_rate_hz * duration_s)
    return np.arange(samples_count) / sampling_rate_hz

def generate_useful_signal(t, amplitude, frequency_hz, phase_rad):
    return amplitude * np.sin(
        2 * np.pi * frequency_hz * t + phase_rad
    )
```

У наведеному фрагменті функція `create_time_vector` формує часовий масив, який містить моменти часу для всіх відліків сигналу. Функція `generate_useful_signal` використовує цей часовий масив і параметри сигналу для

обчислення значень гармонічної послідовності. У результаті формується масив $s[n]$, який має ту саму довжину, що й часовий масив.

У веб-інтерфейсі користувач може задавати параметри корисного сигналу за допомогою відповідних елементів керування. Зміна будь-якого з параметрів призводить до автоматичного перерахунку сигналу та оновлення графіків. Наприклад, збільшення амплітуди призводить до збільшення розмаху сигналу, зміна частоти впливає на кількість коливань на заданому інтервалі часу, а зміна частоти дискретизації впливає на кількість відліків, що використовуються для подання сигналу в цифровій формі.

Важливим аспектом формування сигналу є дотримання умови коректної дискретизації. Якщо частота сигналу наближається до половини частоти дискретизації або перевищує її, цифрове подання сигналу може бути спотвореним. Тому в програмному засобі передбачено перевірку співвідношення між частотою сигналу та частотою дискретизації. Це дозволяє попередити користувача про можливу некоректність обраних параметрів.

Сформований корисний сигнал використовується як базова складова для подальшого моделювання. На наступних етапах до нього можуть бути додані білий гаусівський шум, імпульсна завада, вузькосмугова завада або їхня комбінація. Таким чином, модуль формування корисного сигналу забезпечує початкові дані для всіх подальших етапів роботи програмного засобу.

Отже, реалізація модуля формування корисного сигналу базується на дискретній гармонічній моделі. Модуль дозволяє задавати основні параметри сигналу, формувати часову вісь, створювати масив відліків $s[n]$ і використовувати його як основу для подальшого аналізу впливу завад у каналі зв'язку малого БПЛА.

3.4. Реалізація модуля генерації завад

Наступним етапом роботи програмного засобу після формування корисного сигналу є генерація завадових складових. Призначення цього модуля полягає у створенні таких сигналів, які можуть бути додані до корисного сигналу в межах адитивної моделі каналу зв'язку. У програмному засобі реалізовано три основні типи завад: білий гаусівський шум, імпульсну заваду та вузькосмугову заваду. Кожна з них формується окремо, що дозволяє досліджувати як індивідуальний, так і комбінований вплив різних типів завад на сигнал.

Білий гаусівський шум використовується для моделювання випадкового фонового зашумлення каналу зв'язку. У програмному засобі інтенсивність такого шуму задається через значення співвідношення сигнал/шум SNR_{dB} . Спочатку обчислюється середня потужність корисного сигналу, після чого задане значення SNR_{dB} переводиться у лінійну форму:

$$SNR = 10^{\frac{SNR_{dB}}{10}} \quad (3.7)$$

На основі цього визначається необхідна потужність шуму:

$$P_w = \frac{P_s}{SNR}, \quad (3.8)$$

де P_s – середня потужність корисного сигналу, P_w – потужність шумової складової. Після цього формується випадкова послідовність із нормальним розподілом, нульовим математичним сподіванням і стандартним відхиленням, що відповідає розрахованій потужності шуму. Такий підхід дозволяє моделювати різні умови приймання сигналу: від майже чистого сигналу при високому SNR до суттєво зашумленого сигналу при низькому SNR.

Спрощений фрагмент реалізації генерації білого гаусівського шуму наведено нижче.

```
def calculate_power(x):  
    return np.mean(np.abs(x) ** 2)  
  
def generate_awgn(signal, snr_db, seed):  
    rng = np.random.default_rng(seed)  
    signal_power = calculate_power(signal)  
    snr_linear = 10 ** (snr_db / 10)  
    noise_power = signal_power / snr_linear  
    return rng.normal(  
        loc=0.0,  
        scale=np.sqrt(noise_power),  
        size=len(signal)  
    )
```

У цьому фрагменті функція `calculate_power` визначає середню потужність сигналу, а функція `generate_awgn` формує шумову послідовність заданої інтенсивності. Параметр `seed` використовується для відтворюваності результатів моделювання, оскільки однакове значення цього параметра дозволяє отримувати однакову випадкову послідовність шуму під час повторних запусків.

Імпульсна завада використовується для моделювання короточасних сплесків великої амплітуди. На відміну від білого шуму, який діє протягом усього інтервалу моделювання, імпульсна завада виникає лише в окремих відліках або коротких часових ділянках. У програмному засобі для неї задаються амплітуда імпульсу, кількість імпульсів, тривалість імпульсу у відліках та параметр випадкового розміщення.

У найпростішому вигляді така завада створюється як масив нульових значень, у який у випадкових позиціях додаються імпульси заданої амплітуди.

Якщо імпульс має тривалість L_i , то він займає не один, а кілька послідовних відліків. Це дозволяє моделювати не лише одиничні короткі сплески, а й імпульсні впливи певної тривалості.

Спрощений фрагмент реалізації імпульсної завади має такий вигляд:

```
def generate_impulse_interference(length, amplitude, count, width, seed):
    rng = np.random.default_rng(seed)
    interference = np.zeros(length)

    if count <= 0 or amplitude == 0:
        return interference

    max_start = max(1, length - width)
    starts = rng.choice(max_start, size=count, replace=False)

    for start in starts:
        end = min(start + width, length)
        interference[start:end] += amplitude

    return interference
```

У наведеному фрагменті спочатку створюється нульовий масив довжиною, що відповідає довжині корисного сигналу. Далі випадково обираються позиції початку імпульсів, після чого на відповідних ділянках масиву додається задана амплітуда. У результаті формується імпульсна завада, яка може бути додана до корисного сигналу або використана разом з іншими завадовими складовими.

Вузькосмугова завада в програмному засобі моделюється як додаткове гармонічне коливання з окремою амплітудою, частотою та початковою фазою. Такий підхід дозволяє імітувати ситуацію, коли в каналі зв'язку присутній небажаний сигнал, енергія якого зосереджена поблизу певної частоти. У часовій області така завада проявляється як додаткове коливання, а в частотній області – як окрема спектральна складова.

Математично вузькосмугова завада у програмі формується за виразом:

$$j[n] = A_j \sin\left(2\pi f_j \frac{n}{F_s} + \varphi_j\right), \quad (3.9)$$

де A_j – амплітуда вузькосмугової завади, f_j – її частота, F_s – частота дискретизації, φ_j – початкова фаза. Відповідний фрагмент реалізації може бути поданий так:

```
def generate_narrowband_interference(t, amplitude, frequency_hz, phase_rad):
    return amplitude * np.sin(
        2 * np.pi * frequency_hz * t + phase_rad
    )
```

Після формування окремих завадових складових програма створює сумарну заваду $n[n]$. Якщо користувач обирає лише один тип завади, сумарна завада дорівнює відповідній складовій. Якщо активовано кілька типів завад, вони додаються між собою відповідно до моделі сумарної завадової складової, наведеної у формулі (3.2). На основі сумарної завадової складової прийнятий сигнал формується відповідно до адитивної моделі (3.1).

У веб-інтерфейсі вибір активних завад здійснюється за допомогою чекбоксів. Це дозволяє користувачу самостійно визначати сценарій моделювання: сигнал лише з білим шумом, сигнал з імпульсною завадою, сигнал із вузькосмуговою завадою або комбінований вплив кількох завад. Спрощений фрагмент об'єднання завадових складових наведено нижче.

```
def combine_disturbances(signal, awgn, impulse, narrowband,
                        use_awgn, use_impulse, use_narrowband):
    disturbance = np.zeros_like(signal)

    if use_awgn:
        disturbance = disturbance + awgn
    if use_impulse:
        disturbance = disturbance + impulse
    if use_narrowband:
        disturbance = disturbance + narrowband

    return disturbance
```

У цьому фрагменті спочатку створюється нульовий масив, який має таку саму довжину, як і корисний сигнал. Далі залежно від вибору користувача до нього додаються відповідні завадові складові. Такий підхід робить модель гнучкою, оскільки дозволяє легко вмикати або вимикати окремі типи завад без зміни основної логіки програми.

Отже, модуль генерації завад забезпечує формування трьох основних типів впливу на сигнал: випадкового шумового, короткочасного імпульсного та вузькосмугового гармонічного. Кожна завада має власний набір параметрів, які задаються користувачем через веб-інтерфейс. Окреме формування завадових складових та їх подальше комбінування дозволяють досліджувати різні сценарії впливу на канал зв'язку малого БПЛА та створюють основу для подальшого аналізу сигналу в часовій і частотній областях.

3.5. Реалізація модуля аналізу та візуалізації результатів

Після формування корисного сигналу, генерації завадових складових і отримання прийнятого сигналу необхідно виконати його аналіз. Модуль аналізу та візуалізації результатів призначений для кількісного й графічного оцінювання впливу завад на сигнал у каналі зв'язку малого БПЛА. Він забезпечує розрахунок основних показників якості, побудову часових і спектральних графіків, а також

підготовку даних для подальшого використання в експериментальному розділі роботи.

Основою аналізу є порівняння корисного сигналу $s[n]$, сумарної завадової складової $n[n]$ та прийнятого сигналу $r[n]$. У межах модуля аналізу прийнятий сигнал розглядається відповідно до дискретної адитивної моделі, наведеної у формулі (3.1). Тому для оцінювання результатів моделювання доцільно аналізувати не лише сам прийнятий сигнал, а й окремо завадову складову. Це дозволяє встановити, який саме характер має спотворення: випадкове зашумлення, короткочасний імпульсний вплив, вузькосмугове коливання або їхня комбінація.

У програмному засобі реалізовано розрахунок кількох основних числових показників. До них належать середня потужність корисного сигналу, потужність завади, потужність прийнятого сигналу, співвідношення сигнал/шум, середньоквадратичне значення, пікова амплітуда та коефіцієнт форми. Ці показники дозволяють не лише візуально, а й кількісно порівнювати різні сценарії моделювання.

Середня потужність дискретного сигналу визначається як середнє значення квадратів його відліків:

$$P_x = \frac{1}{N} \sum_{n=0}^{N-1} |x[n]|^2 \quad (3.10)$$

На основі потужності корисного сигналу та потужності завади розраховується фактичне значення SNR:

$$SNR_{dB} = 10 \log_{10} \left(\frac{P_s}{P_n} \right) \quad (3.11)$$

Якщо потужність завадової складової дорівнює нулю, тобто сигнал аналізується без завад, значення SNR можна вважати нескінченно великим, оскільки відсутня шумова або завадова складова в знаменнику.

Середньоквадратичне значення використовується для оцінювання узагальненого рівня сигналу:

$$A_{rms} = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{n=0}^{N-1} |x[n]|^2} \quad (3.12)$$

Пікова амплітуда визначає найбільше відхилення сигналу від нульового рівня:

$$A_{max} = \max_{0 \leq n < N} |x[n]| \quad (3.13)$$

Для додаткового аналізу імпульсних спотворень використовується коефіцієнт форми:

$$CF = \frac{A_{max}}{A_{rms}} \quad (3.14)$$

Якщо в сигналі присутні короточасні сплески великої амплітуди, пікове значення зростає сильніше, ніж RMS, тому коефіцієнт форми збільшується. Це робить його корисним додатковим показником для аналізу імпульсних завад.

Спрощений фрагмент реалізації розрахунку показників якості наведено нижче.

```

def calculate_power(x):
    return np.mean(np.abs(x) ** 2)

def calculate_snr_db(signal, disturbance):
    signal_power = calculate_power(signal)
    disturbance_power = calculate_power(disturbance)

    if disturbance_power == 0:
        return float("inf")

    return 10 * np.log10(signal_power / disturbance_power)

def calculate_rms(x):
    return np.sqrt(np.mean(np.abs(x) ** 2))

def calculate_peak(x):
    return np.max(np.abs(x))

def calculate_crest_factor(x):
    rms = calculate_rms(x)
    if rms == 0:
        return 0.0
    return calculate_peak(x) / rms

```

У наведеному фрагменті функція `calculate_power` визначає середню потужність сигналу, `calculate_snr_db` розраховує співвідношення сигнал/шум у децибелах, `calculate_rms` визначає середньоквадратичне значення, `calculate_peak` – пікову амплітуду, а `calculate_crest_factor` – коефіцієнт форми. Перевірка нульового значення потужності завади або RMS потрібна для уникнення некоректного ділення на нуль.

Окрім часових та енергетичних характеристик, у програмному засобі реалізовано спектральний аналіз сигналу. Для цього використовується швидке

перетворення Фур'є. Воно дозволяє перейти від часової послідовності $x[n]$ до її частотного представлення $X[k]$. У програмному засобі спектр обчислюється як для корисного сигналу, так і для прийнятого сигналу. Це дає змогу порівняти, як завади змінюють частотний склад сигналу.

Спрощений фрагмент реалізації FFT-аналізу має такий вигляд:

```
def calculate_fft(x, sampling_rate_hz):
    n = len(x)
    spectrum = np.fft.rfft(x)
    frequencies = np.fft.rfftfreq(n, d=1 / sampling_rate_hz)
    amplitude_spectrum = np.abs(spectrum) / n

    return frequencies, amplitude_spectrum
```

У цій функції `np.fft.rfft` використовується для обчислення спектра дійсного сигналу, а `np.fft.rfftfreq` – для формування частотної осі. Нормування спектра на кількість відліків дозволяє отримати амплітудне представлення, придатне для порівняння різних сигналів.

Графічне подання результатів є важливою частиною програмного засобу. У програмі передбачено побудову кількох типів графіків. Першим є часовий графік, на якому відображаються корисний сигнал $s[n]$ і прийнятий сигнал $r[n]$. Він дозволяє візуально оцінити, як завади змінюють форму сигналу. Другим є окремий графік завадової складової $n[n]$, який дає змогу проаналізувати характер самої завади. Третім є спектральний графік, що показує частотний склад корисного й прийнятого сигналів.

Окремо реалізовано графік залежності фактичного значення SNR від заданого рівня шуму. Для його побудови програма формує кілька варіантів AWGN із різними заданими значеннями SNR_{dB} , після чого обчислює фактично отримане значення SNR для кожного випадку. Такий графік використовується

для перевірки коректності генерації білого гаусівського шуму та може бути застосований у подальшому експериментальному аналізі.

Результати моделювання можуть бути збережені для подальшого використання. Графіки експортуються у форматі PNG, а числові дані сигналів і таблиці результатів – у форматі CSV. Це дає змогу використовувати отримані результати для побудови ілюстрацій, порівняльних таблиць і графіків в експериментальному розділі дипломної роботи.

Таким чином, модуль аналізу та візуалізації забезпечує завершальний етап роботи програмного засобу. Він дозволяє перейти від сформованих сигналів до їх кількісного й графічного оцінювання. Завдяки розрахунку показників якості, побудові часових і спектральних графіків, а також можливості експорту результатів засіб може бути використаний для дослідження впливу різних типів завад на сигнал у каналі зв'язку малого БПЛА.

3.6. Веб-інтерфейс користувача та порядок роботи з програмним засобом

Для забезпечення зручної взаємодії користувача з програмним засобом було реалізовано веб-інтерфейс. Його використання дозволяє працювати з моделлю без редагування програмного коду: користувач задає параметри сигналу та завад через елементи керування, після чого програма автоматично виконує моделювання, розрахунок показників і побудову графіків. Такий підхід є зручним для демонстрації роботи програмного засобу та проведення серії експериментів із різними вхідними параметрами.

Інтерфейс програмного засобу умовно поділяється на дві основні частини: бічну панель введення параметрів і основну область відображення результатів. У бічній панелі користувач задає параметри корисного сигналу, параметри шумових і завадових складових, а також обирає, які типи завад необхідно враховувати під час моделювання. Основна область призначена для

відображення поточного сценарію, числових показників, графіків і таблиць із результатами.

До параметрів корисного сигналу, які задаються через інтерфейс, належать амплітуда, частота, початкова фаза, частота дискретизації та тривалість моделювання. Ці параметри визначають форму сигналу $s[n]$, який є базовою складовою моделі. Після зміни будь-якого з цих параметрів програма перераховує часову вісь, формує новий корисний сигнал і оновлює результати моделювання.

Окремий блок інтерфейсу призначений для вибору типів завад. У програмному засобі користувач може активувати або вимкнути білий гаусівський шум, імпульсну заваду та вузькосмугову заваду. Такий підхід дозволяє формувати різні сценарії моделювання: сигнал без завад, сигнал з одним типом завади або сигнал із комбінованим впливом кількох завадових складових.

Для білого гаусівського шуму задається значення SNR_{dB} , яке визначає інтенсивність шумової складової. Чим більшим є значення SNR, тим слабшим є вплив шуму на сигнал. При зменшенні SNR потужність шумової складової зростає, що призводить до помітнішого спотворення прийнятого сигналу. Додатково користувач може задавати параметр випадковості, який використовується для відтворюваності результатів генерації шуму.

Для імпульсної завади в інтерфейсі задаються амплітуда імпульсів, їхня кількість, тривалість у відліках і параметр випадкового розміщення. Ці параметри дозволяють моделювати короткочасні сплески різної інтенсивності та тривалості. Зміна кількості або амплітуди імпульсів безпосередньо впливає на форму прийнятого сигналу та на такі показники, як пікова амплітуда і коефіцієнт форми.

Для вузькосмугової завади користувач задає амплітуду, частоту та початкову фазу. Така завада моделюється як додаткове гармонічне коливання,

що накладається на корисний сигнал. Її вплив особливо добре помітний у частотній області, оскільки у спектрі прийнятого сигналу з'являється додаткова складова на частоті завади.

Після задання параметрів програма автоматично формує поточний сценарій моделювання. У верхній частині основної області інтерфейсу відображається назва активного сценарію, наприклад: сигнал без завад, AWGN, імпульсна завада, вузькосмугова завада або комбінований вплив. Нижче подаються основні числові показники, зокрема SNR, потужність прийнятого сигналу, RMS і пікова амплітуда. Детальніші показники можуть бути переглянуті у відповідній таблиці.

Результати моделювання подаються у вигляді кількох вкладок. На вкладці часової області відображається графік корисного сигналу та прийнятого сигналу після накладання завад. Цей графік дозволяє візуально порівняти початкову форму сигналу з результатом впливу завадової складової. Він є найбільш наочним для аналізу загального зашумлення та імпульсних спотворень.

Окрема вкладка призначена для відображення завадової складової $p[n]$. Наявність такого графіка є важливою, оскільки користувач може аналізувати не лише кінцевий прийнятий сигнал, а й сам характер завади. Наприклад, для білого шуму графік має випадковий характер, для імпульсної завади видно короткочасні сплески, а для вузькосмугової завади – регулярне гармонічне коливання.

На вкладці частотної області відображається спектральне представлення корисного та прийнятого сигналів. Цей графік дозволяє оцінити, як завади змінюють частотний склад сигналу. Для білого шуму характерним є підвищення загального спектрального фону, для вузькосмугової завади – поява додаткового спектрального піка, а для імпульсної завади – зміни в ширшому діапазоні частот.

Окремо в інтерфейсі реалізовано вкладку для аналізу залежності фактичного SNR від заданого рівня шуму. На цій вкладці користувач задає

діапазон значень SNR_{dB} і крок зміни. Програма генерує шум для кожного заданого значення, обчислює фактичне SNR і будує графік залежності. Такий інструмент дає змогу перевірити коректність генерації білого гаусівського шуму та оцінити відповідність фактичного рівня шуму заданим параметрам.

Також передбачено вкладку з числовими даними. У ній користувач може переглянути частину сформованих відліків часу, корисного сигналу, завадової складової та прийнятого сигналу. Це дозволяє не лише оцінювати результати візуально, а й працювати з числовими значеннями сигналів.

Важливою функцією веб-інтерфейсу є можливість експорту результатів. Користувач може завантажити графіки у форматі PNG, а числові дані – у форматі CSV. Це спрощує подальше використання результатів у дипломній роботі, зокрема для вставлення графіків у текст, формування таблиць і проведення порівняльного аналізу в експериментальному розділі.

Загальний порядок роботи з програмним засобом можна подати так: спочатку користувач задає параметри корисного сигналу, після чого обирає потрібні типи завад і встановлює їхні параметри. Далі програма автоматично формує корисний сигнал, генерує вибрані завадові складові, виконує їх адитивне накладання, розраховує показники якості та будує графіки. Після аналізу результатів користувач може змінити параметри та повторити моделювання для іншого сценарію.

Отже, веб-інтерфейс забезпечує зручну взаємодію користувача з програмним засобом і дає змогу проводити моделювання без безпосереднього редагування коду. Реалізовані елементи керування, вкладки з графіками, таблиці числових показників і засоби експорту результатів дозволяють використовувати програмний засіб як інструмент для дослідження впливу різних типів завад на сигнал у каналі зв'язку малого БПЛА.

Висновки

У третьому розділі було розглянуто процес розроблення програмного засобу для моделювання завад у каналі зв'язку малого БПЛА. Для реалізації програмного засобу обрано мову програмування Python та набір бібліотек, що забезпечують числове моделювання, обробку масивів, побудову графіків, спектральний аналіз, табличне подання результатів і створення веб-інтерфейсу користувача.

Було сформовано загальну архітектуру програмного засобу, яка базується на модульному принципі. У межах цієї архітектури виділено блоки введення параметрів, формування корисного сигналу, генерації завадових складових, адитивного накладання завад, розрахунку показників якості, спектрального аналізу, візуалізації та експорту результатів. Такий підхід дозволяє розділити окремі етапи моделювання та забезпечує можливість подальшого розширення функціональності програмного засобу.

Реалізовано модуль формування корисного сигналу, який створює дискретну гармонічну послідовність із заданими параметрами амплітуди, частоти, початкової фази, частоти дискретизації та тривалості моделювання. Отриманий сигнал використовується як базова складова для подальшого накладання шумових та завадових компонентів.

Окремо реалізовано модуль генерації завад, який передбачає формування білого гаусівського шуму, імпульсної завади та вузькосмугової завади. Білий гаусівський шум задається через значення SNR, імпульсна завада – через амплітуду, кількість і тривалість імпульсів, а вузькосмугова завада – через амплітуду, частоту та фазу. Також передбачено можливість комбінування кількох завадових складових в одному сценарії моделювання.

У програмному засобі реалізовано модуль аналізу результатів, який забезпечує розрахунок основних показників якості сигналу: потужності корисного сигналу, потужності завади, потужності прийнятого сигналу,

співвідношення сигнал/шум, середньоквадратичного значення, пікової амплітуди та коефіцієнта форми. Крім того, реалізовано спектральний аналіз на основі швидкого перетворення Фур'є, що дозволяє оцінювати зміну частотного складу сигналу після накладання завад.

Для взаємодії користувача з моделлю створено веб-інтерфейс, який дозволяє задавати параметри сигналу та завад без редагування програмного коду. Інтерфейс забезпечує вибір активних типів завад, автоматичне оновлення графіків і числових показників, перегляд результатів у часовій та частотній областях, а також експорт графіків і числових даних.

Отже, у межах третього розділу було розроблено програмний засіб, який реалізує повний цикл моделювання: від задання параметрів сигналу та завад до отримання прийнятого сигналу, його аналізу й візуалізації результатів. Розроблений програмний засіб може бути використаний як основа для проведення експериментальних досліджень у наступному розділі, де буде виконано аналіз впливу різних типів завад на характеристики сигналу в каналі зв'язку малого БПЛА.

РОЗДІЛ 4

ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНА ЧАСТИНА ТА АНАЛІЗ РЕЗУЛЬТАТІВ МОДЕЛЮВАННЯ

4.1. Опис сценаріїв моделювання

Після розроблення програмного засобу доцільно виконати його перевірку на кількох типових сценаріях моделювання. Метою такого дослідження є оцінювання того, як різні типи завад впливають на часову форму сигналу, його спектральне представлення та кількісні показники якості. Для цього в роботі розглянуто сигнал без завад, сигнал із білим гаусівським шумом, сигнал з імпульсною завадою, сигнал із вузькосмуговою завадою та сигнал за комбінованого впливу кількох завадових складових.

Для забезпечення коректного порівняння результатів у всіх сценаріях використовувався однаковий набір базових параметрів корисного сигналу. Це дозволяє оцінювати вплив саме завадових складових, не змінюючи форму початкового сигналу. У межах експериментального дослідження було задано такі параметри корисного сигналу:

Таблиця 4.1

Базові параметри корисного сигналу

Параметр	Значення
Амплітуда сигналу	1
Частота сигналу	50 Гц
Початкова фаза	0 рад
Частота дискретизації	2000 Гц
Тривалість моделювання	1 с

Обрані параметри є зручними для наочного аналізу результатів. Частота сигналу 50 Гц дозволяє чітко спостерігати гармонічну форму сигналу в часовій області. Частота дискретизації 2000 Гц є достатньо більшою за частоту сигналу, тому цифрове подання сигналу не призводить до помітних спотворень, пов'язаних із недостатньою кількістю відліків. Тривалість моделювання 1 с дає змогу отримати достатню кількість періодів сигналу для аналізу в часовій та частотній областях.

Початковим сценарієм є сигнал без завад. У цьому випадку всі завадові складові вимкнено, тому прийнятий сигнал збігається з корисним сигналом:

$$r[n] = s[n]. \quad (4.1)$$

Цей сценарій використовується як еталонний, оскільки дозволяє порівнювати подальші результати з початковим сигналом. Часове представлення корисного сигналу без завад наведено на рисунку 4.1.

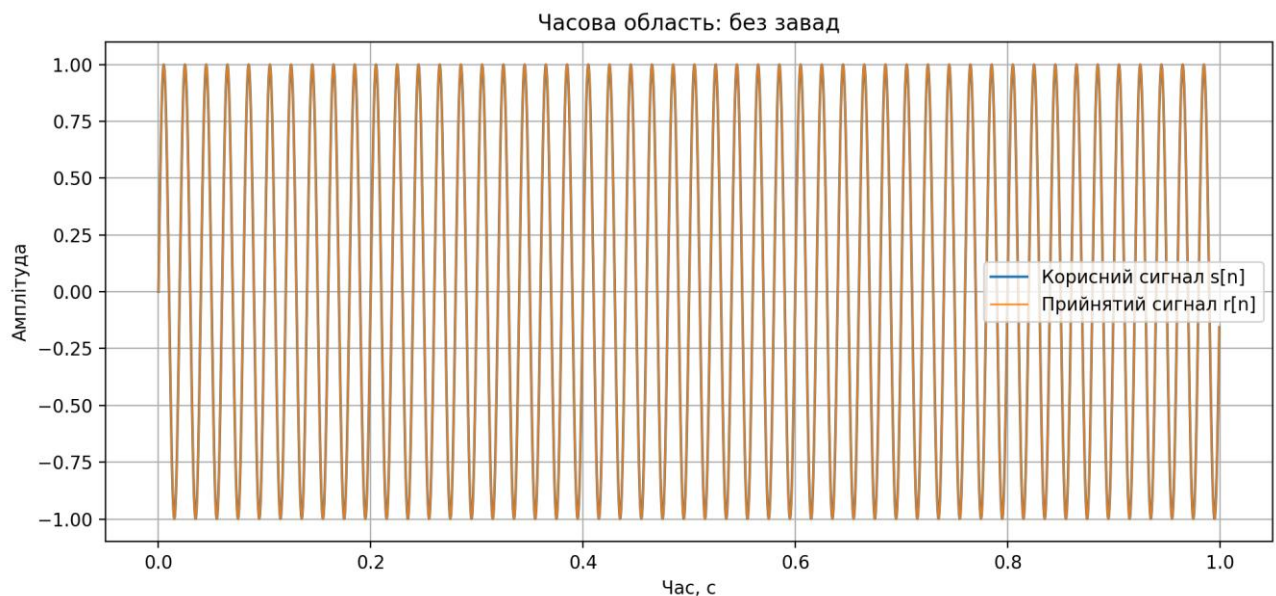


Рис. 4.1. Часове представлення корисного сигналу без завад

Як видно з рисунка 4.1, корисний сигнал має гармонічну форму, а прийнятий сигнал повністю збігається з ним. Це пояснюється тим, що за відсутності завад сумарна завадова складова дорівнює нулю. Такий результат є очікуваним і підтверджує коректність базового формування сигналу в програмному засобі.

Для подальшого аналізу було сформовано кілька сценаріїв завадового впливу. Перший сценарій передбачає додавання білого гаусівського шуму AWGN із заданим значенням $SNR = 10$ дБ. Він використовується для перевірки впливу випадкового шумового фону на сигнал. Другий сценарій передбачає імпульсну заваду з амплітудою 3, кількістю імпульсів 5 і тривалістю 4 відліки. Такий сценарій дає змогу проаналізувати вплив короточасних сплесків на часову форму сигналу. Третій сценарій передбачає вузькосмугову заваду з амплітудою 0,5 і частотою 120 Гц, що дозволяє оцінити появу додаткової спектральної складової. Окремо розглянуто комбінований сценарій, у якому одночасно діють білий гаусівський шум, імпульсна та вузькосмугова завади.

Узагальнені параметри сценаріїв моделювання подано в таблиці 4.2.

Таблиця 4.2

Параметри сценаріїв моделювання

Сценарій	AWGN	Імпульсна завада	Вузькосмугова завада
Без завад	вимкнено	Вимкнено	вимкнено
Білий гаусівський шум	($SNR = 10$) дБ	Вимкнено	вимкнено
Імпульсна завада	вимкнено	амплітуда 3; кількість 5; тривалість 4 відліки;	вимкнено
Вузькосмугова завада	вимкнено	Вимкнено	амплітуда 0,5; частота 120 Гц; фаза 0 рад
Комбінований вплив	($SNR = 10$) дБ,	амплітуда 3; кількість 5; тривалість 4 відліки;	амплітуда 0,5; частота 120 Гц; фаза 0 рад

Для кожного сценарію в програмному засобі було побудовано часові графіки, графіки завадової складової, спектральні представлення та розраховано основні числові показники якості сигналу. До таких показників належать потужність корисного сигналу, потужність завади, потужність прийнятого сигналу, співвідношення сигнал/шум, RMS, пікова амплітуда та коефіцієнт форми.

Використання фіксованих базових параметрів сигналу дозволяє виконати порівняння сценаріїв за єдиних умов. У такому випадку зміни часової форми, спектра та числових показників можна пов'язувати саме з типом і параметрами завадової складової. Подальші підрозділи присвячено окремому аналізу впливу білого гаусівського шуму, імпульсної завади, вузькосмугової завади та їхньої комбінації на характеристики прийнятого сигналу.

4.2. Аналіз впливу білого гаусівського шуму

Першим сценарієм завадового впливу є додавання до корисного сигналу білого гаусівського шуму. Така завада використовується для моделювання випадкового фонових зашумлення каналу зв'язку. У межах цього сценарію було використано базові параметри корисного сигналу, наведені в таблиці 4.1, а рівень шуму задано через співвідношення сигнал/шум $SNR = 10$ дБ. Імпульсна та вузькосмугова завади в цьому сценарії були вимкнені.

У програмному засобі білий гаусівський шум формується як випадкова послідовність із нормальним розподілом і нульовим середнім значенням. Потужність шуму визначається на основі заданого значення SNR. Оскільки потужність корисного сигналу в базовому сценарії становить 0,5, для $SNR=10$ дБ очікувана потужність шумової складової має бути приблизно:

$$P_w = \frac{0,5}{10} = 0,05 \quad (4.2)$$

За результатами моделювання фактична потужність завади становила 0,0503, що практично збігається з очікуваним значенням. Фактичне значення SNR дорівнювало 9,9712 дБ, тобто є близьким до заданого рівня 10 дБ. Невелике відхилення пояснюється випадковим характером сформованої шумової послідовності.

Часове представлення сигналу з білим гаусівським шумом наведено на рисунку 4.2.

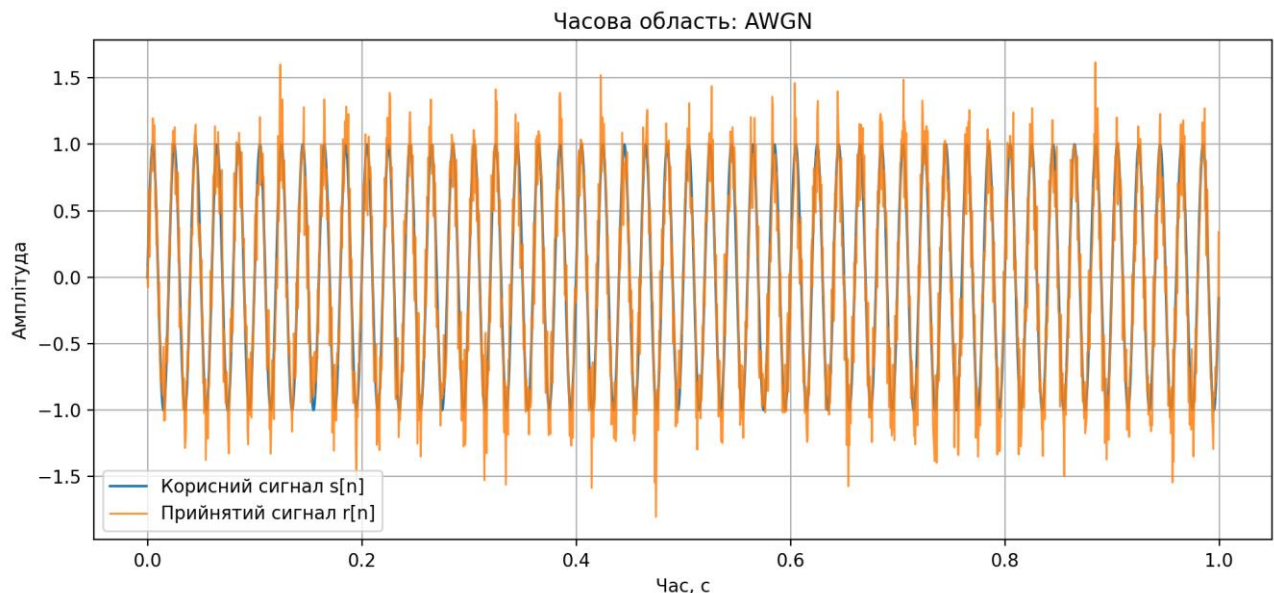


Рис. 4.2. Часове представлення сигналу з білим гаусівським шумом при SNR = 10 дБ

Як видно з рисунка 4.2, після додавання AWGN прийнятий сигнал зберігає загальну гармонічну форму, однак навколо неї з'являються випадкові коливання. Це відповідає очікуваному впливу білого шуму: він не має сталої форми або окремої частоти, а проявляється як випадкове зашумлення всього сигналу в часовій області.

Окремо завадову складову AWGN подано на рисунку 4.3.

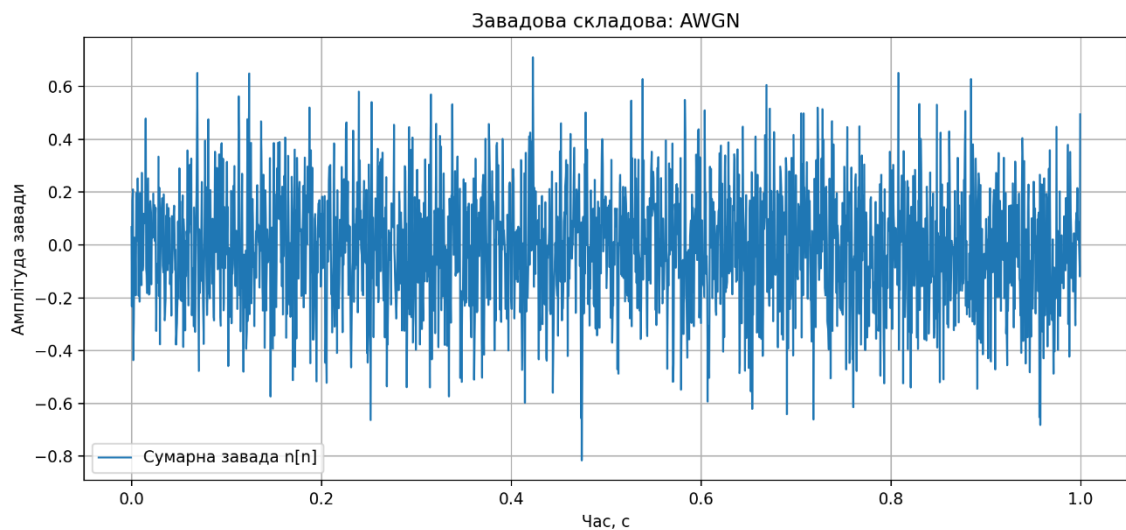


Рис. 4.3. Завадова складова AWGN при $\text{SNR} = 10$ дБ

З рисунка 4.3 видно, що шумова складова має випадковий характер і коливається відносно нульового рівня. Вона не містить виражених імпульсних сплесків або регулярного гармонічного коливання, що узгоджується з моделлю білого гаусівського шуму. Такий тип завади переважно підвищує загальний рівень зашумлення сигналу та знижує співвідношення сигнал/шум.

Числові показники для сценарію з білим гаусівським шумом наведено в таблиці 4.3

Таблиця 4.3

Показники сигналу при дії білого гаусівського шуму

Показник	Значення
Потужність корисного сигналу	0,5
Потужність завади	0,0503
Потужність прийнятого сигналу	0,5497
Фактичне SNR	9,9712 дБ
RMS прийнятого сигналу	0,7414
Пікова амплітуда прийнятого сигналу	1,8035
Коефіцієнт форми	2,4325

Порівняно зі сценарієм без завад потужність прийнятого сигналу збільшилася з 0,5000 до 0,5497, що пояснюється додаванням шумової складової. RMS також збільшився з 0,7071 до 0,7414, оскільки загальний енергетичний рівень сигналу зріс. Пікова амплітуда становила 1,8035, що більше за пікову амплітуду чистого сигналу. Це пояснюється тим, що випадкові шумові відхилення можуть додаватися до корисного сигналу й тимчасово збільшувати його миттєве значення.

Для додаткової перевірки коректності генерації AWGN у програмному засобі було побудовано графік залежності фактичного значення SNR від заданого рівня шуму. Результат наведено на рисунку 4.4.

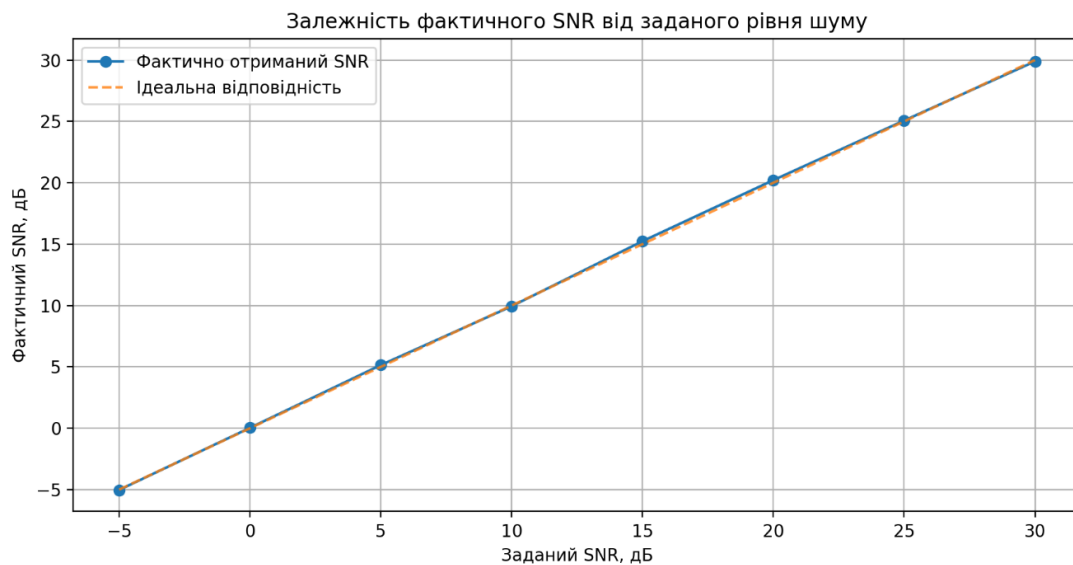


Рис. 4.4. Залежність фактичного значення SNR від заданого рівня шуму AWGN

На рисунку 4.4 видно, що фактичні значення SNR майже збігаються з ідеальною лінією відповідності. Це свідчить про коректність алгоритму масштабування шумової складової відповідно до заданого рівня SNR_{dB} . Незначні відхилення є допустимими, оскільки шум формується як випадкова послідовність.

Отже, результати моделювання підтверджують коректність реалізації білого гаусівського шуму в програмному засобі. Додавання AWGN призводить до випадкового зашумлення сигналу, збільшення потужності прийнятого сигналу, зростання RMS і зниження якості приймання, що відображається через значення SNR. Отримані результати відповідають очікуваним властивостям моделі AWGN.

4.3. Аналіз впливу імпульсної завади

Наступним сценарієм моделювання є дослідження впливу імпульсної завади на корисний сигнал. На відміну від білого гаусівського шуму, який діє протягом усього інтервалу спостереження, імпульсна завада має короткочасний характер і проявляється у вигляді окремих сплесків підвищеної амплітуди. Такий тип завади доцільно використовувати для моделювання коротких інтенсивних впливів, які можуть спотворювати окремі фрагменти сигналу.

У цьому сценарії білий гаусівський шум і вузькосмугова завада були вимкнені. Для імпульсної завади було задано амплітуду імпульсів 3, кількість імпульсів 5 та тривалість кожного імпульсу 4 відліки. Корисний сигнал формувався з базовими параметрами, наведеними в таблиці 4.1.

Часове представлення сигналу з імпульсною завадою наведено на рисунку 4.5.

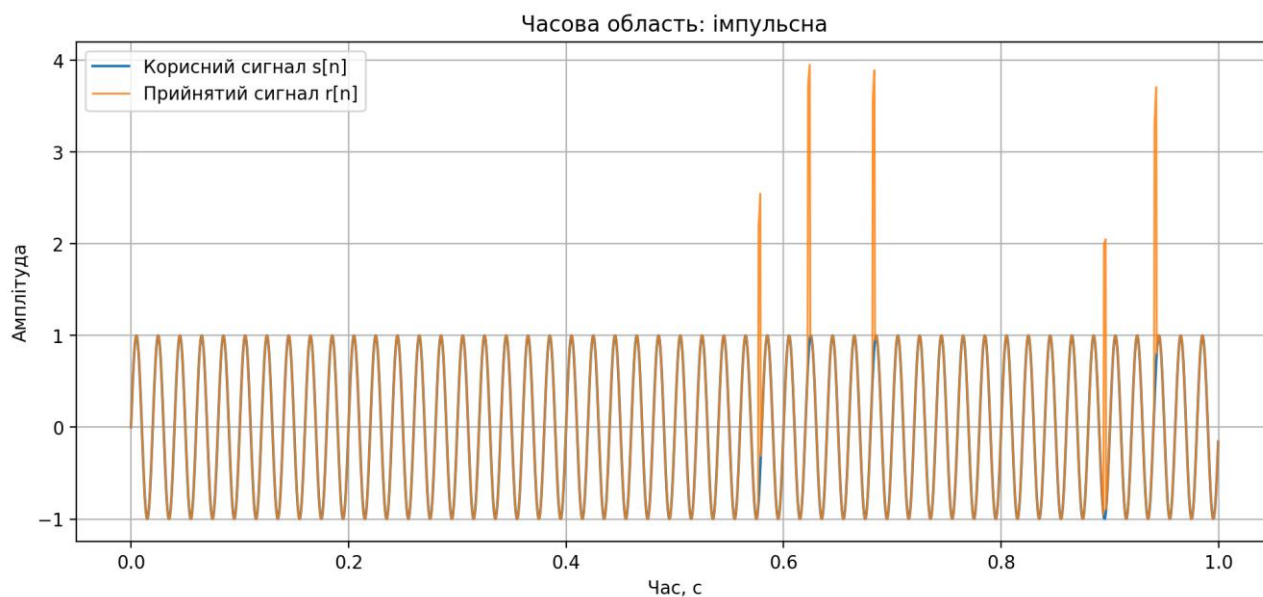


Рис. 4.5. Часове представлення сигналу з імпульсною завадою

Як видно з рисунка 4.5, прийнятий сигнал переважно повторює форму корисного гармонічного сигналу, однак у деяких точках спостерігаються різкі короткочасні сплески. Ці сплески відповідають моментам дії імпульсної завади. Між імпульсами прийнятий сигнал практично збігається з корисним сигналом, що пояснюється відсутністю інших завадових складових у цьому сценарії. Окреме представлення імпульсної завадової складової наведено на рисунку 4.6.

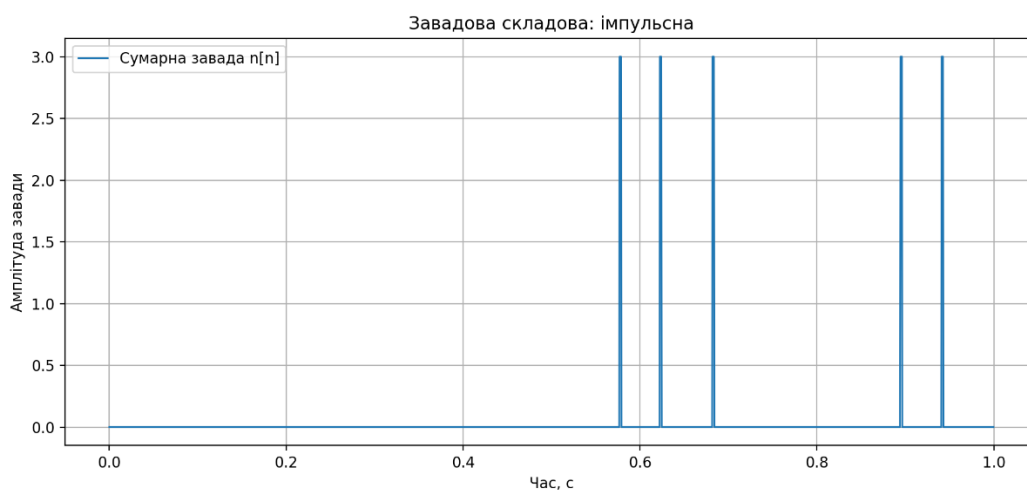


Рис. 4.6. Імпульсна завадова складова

З рисунка 4.6 видно, що імпульсна завада має вигляд окремих коротких прямокутних імпульсів. Їхня амплітуда відповідає заданому значенню 3, а тривалість кожного імпульсу становить 4 відліки. Такий характер завади суттєво відрізняється від білого шуму: вона не створює постійного фоновому зашумлення, а впливає лише на окремі часові ділянки сигналу.

Числові показники для сценарію з імпульсною завадою наведено в таблиці 4.4.

Таблиця 4.4

Показники сигналу при дії імпульсної завади

Показник	Значення
Потужність корисного сигналу	0,5
Потужність завади	0,09
Потужність прийнятого сигналу	0,5958
Фактичне SNR	7,4473 дБ
RMS прийнятого сигналу	0,7719
Пікова амплітуда прийнятого сигналу	3,9509
Коефіцієнт форми	5,1188

Отримані показники демонструють характерний вплив імпульсної завади. Потужність завади становить 0,0900, а фактичне значення SNR дорівнює 7,4473 дБ. Порівняно зі сценарієм без завад RMS прийнятого сигналу збільшився з 0,7071 до 0,7719, що свідчить про зростання загального енергетичного рівня сигналу.

Найбільш помітними є зміни пікової амплітуди та коефіцієнта форми. Пікова амплітуда прийнятого сигналу зросла до 3,9509, тоді як для сигналу без завад вона становила 1. Це пояснюється тим, що імпульсна завада має амплітуду 3 і додається до миттєвого значення корисного сигналу. У результаті в окремих

точках значення прийнятого сигналу може суттєво перевищувати амплітуду початкового сигналу.

Коефіцієнт форми збільшився до 5,1188, що також є очікуваним результатом. Для чистого гармонічного сигналу цей показник становить приблизно 1,4142, тоді як наявність короткочасних імпульсів великої амплітуди різко збільшує відношення пікового значення до RMS. Таким чином, коефіцієнт форми є корисним додатковим індикатором наявності імпульсних спотворень у сигналі.

Отже, результати моделювання підтверджують коректність реалізації імпульсної завади в програмному засобі. Імпульсна завада призводить до появи короткочасних сплесків у часовій області, помірного збільшення середньої потужності та RMS, а також суттєвого зростання пікової амплітуди й коефіцієнта форми. Отримані результати відповідають очікуваним властивостям імпульсного завадового впливу.

4.4. Аналіз впливу вузькосмугової завади

Третім сценарієм моделювання є дослідження впливу вузькосмугової завади на корисний сигнал. На відміну від білого гаусівського шуму, який має випадковий характер, та імпульсної завади, яка діє лише в окремі моменти часу, вузькосмугова завада є регулярним коливанням, енергія якого зосереджена поблизу певної частоти. Такий тип впливу доцільно аналізувати не лише в часовій, а й у частотній області.

У цьому сценарії білий гаусівський шум та імпульсна завада були вимкнені. Вузькосмугова завада задавалася як гармонічне коливання з амплітудою 0,5, частотою 120 Гц і початковою фазою 0 рад. Корисний сигнал мав базові параметри, наведені в таблиці 4.1, зокрема амплітуду 1 і частоту 50 Гц.

Часове представлення сигналу з вузькосмуговою завадою наведено на рисунку 4.7.

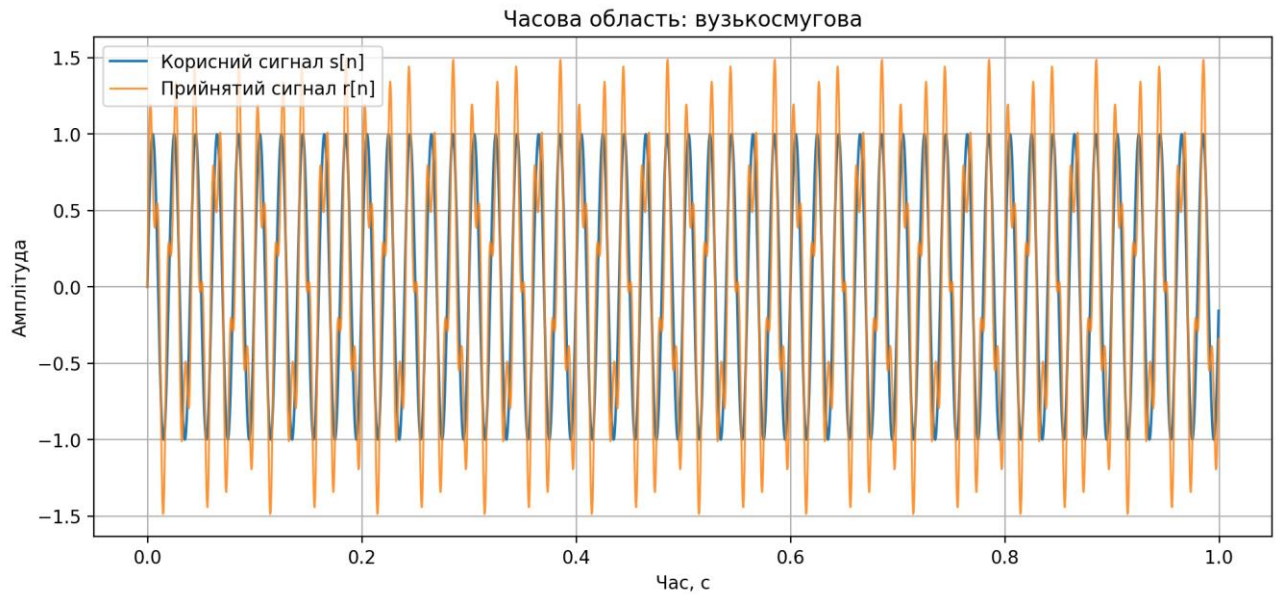


Рис. 4.7. Часове представлення сигналу з вузькосмуговою завадою

Як видно з рисунка 4.7, після додавання вузькосмугової завади прийнятий сигнал уже не має вигляду чистої синусоїди. Його форма стає складнішою, оскільки до основного гармонічного сигналу з частотою 50 Гц додається ще одне гармонічне коливання з частотою 120 Гц. При цьому завада діє протягом усього інтервалу спостереження, на відміну від імпульсної завади, яка проявляється лише в окремі моменти часу.

Для більш наочного аналізу цього типу завади доцільно розглянути спектральне представлення сигналу. Спектр корисного та прийнятого сигналів за наявності вузькосмугової завади наведено на рисунку 4.8.

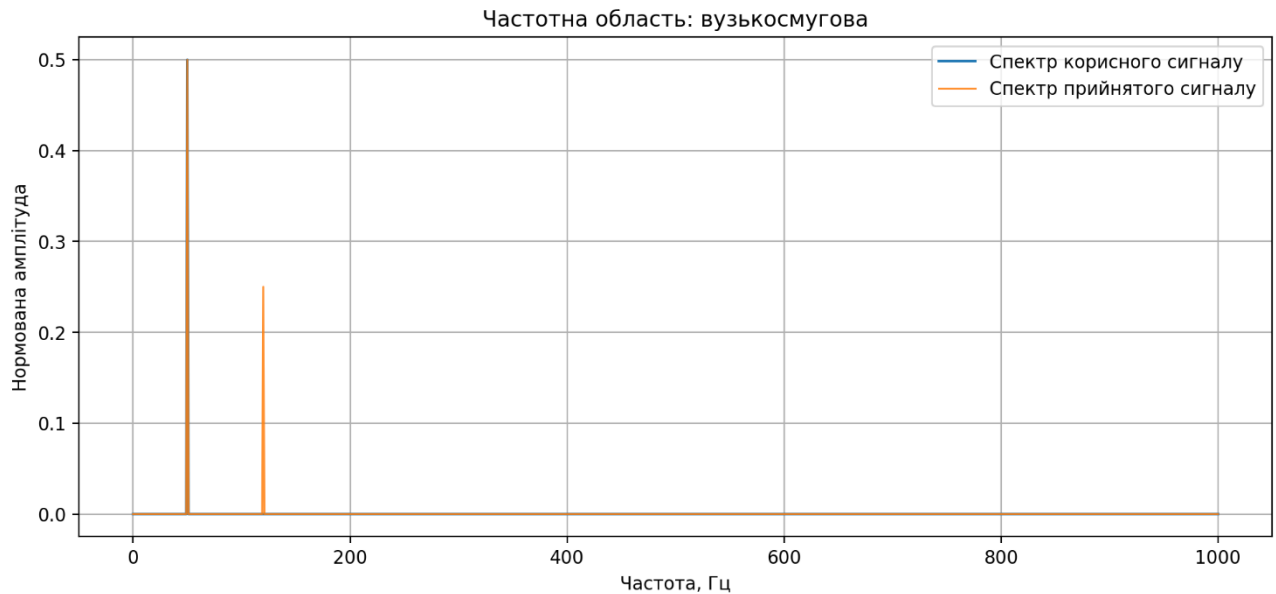


Рис. 4.8. Спектр сигналу за наявності вузькосмугової завади

На рисунку 4.8 видно, що спектр корисного сигналу має основний пік поблизу частоти 50 Гц. Після додавання вузькосмугової завади у спектрі прийнятого сигналу з'являється додатковий пік поблизу частоти 120 Гц. Саме ця спектральна складова відповідає заданій вузькосмуговій заваді. При цьому на частоті корисного сигналу спектри частково перекриваються, оскільки прийнятий сигнал містить корисну складову $s[n]$.

Числові показники для сценарію з вузькосмуговою завадою наведено в таблиці 4.5.

Таблиця 4.5

Показники сигналу при дії вузькосмугової завади

Показник	Значення
Потужність корисного сигналу	0,5
Потужність завади	0,125
Потужність прийнятого сигналу	0,625
Фактичне SNR	6,0206 дБ
RMS прийнятого сигналу	0,7906
Пікова амплітуда прийнятого сигналу	1,4867
Коефіцієнт форми	1,8805

Отримані числові значення також відповідають очікуваним результатам. Оскільки вузькосмугова завада задана як гармонічне коливання з амплітудою 0,5, її середня потужність становить:

$$P_j = \frac{A_j^2}{2} = \frac{0,5^2}{2} = 0,125 \quad (4.3)$$

Це повністю збігається з отриманим значенням потужності завади 0,125. Відповідне значення SNR визначається співвідношенням потужності корисного сигналу до потужності завади:

$$SNR_{dB} = 10 \log_{10} \left(\frac{0,5}{0,125} \right) \approx 6,02 \text{ дБ} \quad (4.4)$$

Отримане в програмі значення 6,0206 дБ підтверджує коректність розрахунків.

Порівняно зі сценарієм без завад, RMS прийнятого сигналу збільшився з 0,7071 до 0,7906, що пояснюється додаванням додаткового гармонічного коливання. Пікова амплітуда зросла до 1,4867, а коефіцієнт форми – до 1,8805. При цьому ці значення є значно меншими, ніж у сценарії з імпульсною завадою, оскільки вузькосмугова завада не створює короткочасних сплесків великої амплітуди, а рівномірно впливає на сигнал протягом усього інтервалу спостереження.

Отже, результати моделювання підтверджують коректність реалізації вузькосмугової завади в програмному засобі. У часовій області вона змінює форму прийнятого сигналу через додавання ще одного гармонічного коливання, а в частотній області проявляється як додатковий спектральний пік на частоті

завади. Отримані часові, спектральні та числові результати відповідають очікуваним властивостям вузькосмугового завадового впливу.

4.5. Аналіз комбінованого впливу завад

Окремо було розглянуто сценарій комбінованого впливу, у якому на корисний сигнал одночасно накладаються білий гаусівський шум, імпульсна завада та вузькосмугова завада. Такий сценарій є найбільш складним серед розглянутих, оскільки прийнятий сигнал формується під дією кількох різних за характером завадових складових. У цьому випадку сумарна завада містить випадковий шумовий фон, короточасні імпульсні сплески та регулярну вузькосмугову складову.

У межах комбінованого сценарію використовувалися ті самі параметри завад, що й у попередніх підрозділах. Для білого гаусівського шуму було задано $SNR = 10$ дБ, для імпульсної завади – амплітуду 3, кількість імпульсів 5, тривалість 4 відліки, а для вузькосмугової завади – амплітуду 0,5, частоту 120 Гц і початкову фазу 0 рад. Прийнятий сигнал у цьому випадку визначається як:

$$r[n] = s[n] + w[n] + i[n] + j[n] \quad (4.5)$$

де $w[n]$ – білий гаусівський шум, $i[n]$ – імпульсна завада, $j[n]$ – вузькосмугова завада.

Часове представлення сигналу за комбінованого впливу завад наведено на рисунку 4.9.

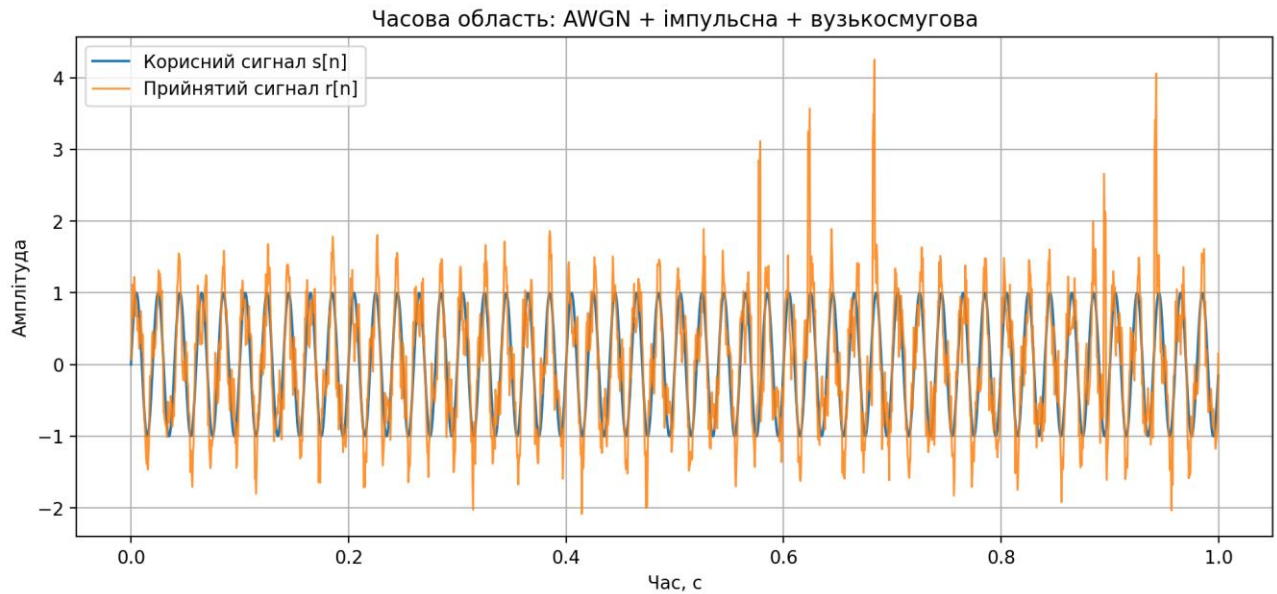


Рис. 4.9. Часове представлення сигналу за комбінованого впливу завад

Як видно з рисунка 4.9, форма прийнятого сигналу суттєво відрізняється від чистого гармонічного сигналу. У ній одночасно присутні випадкові коливання, спричинені білим гаусівським шумом, регулярне додаткове коливання, зумовлене вузькосмуговою завадою, а також різкі короточасні сплески, пов'язані з імпульсною завадою. Таким чином, у часовій області комбінований вплив проявляється як поєднання кількох типів спотворення.

Сумарну завадову складову для цього сценарію наведено на рисунку 4.10.

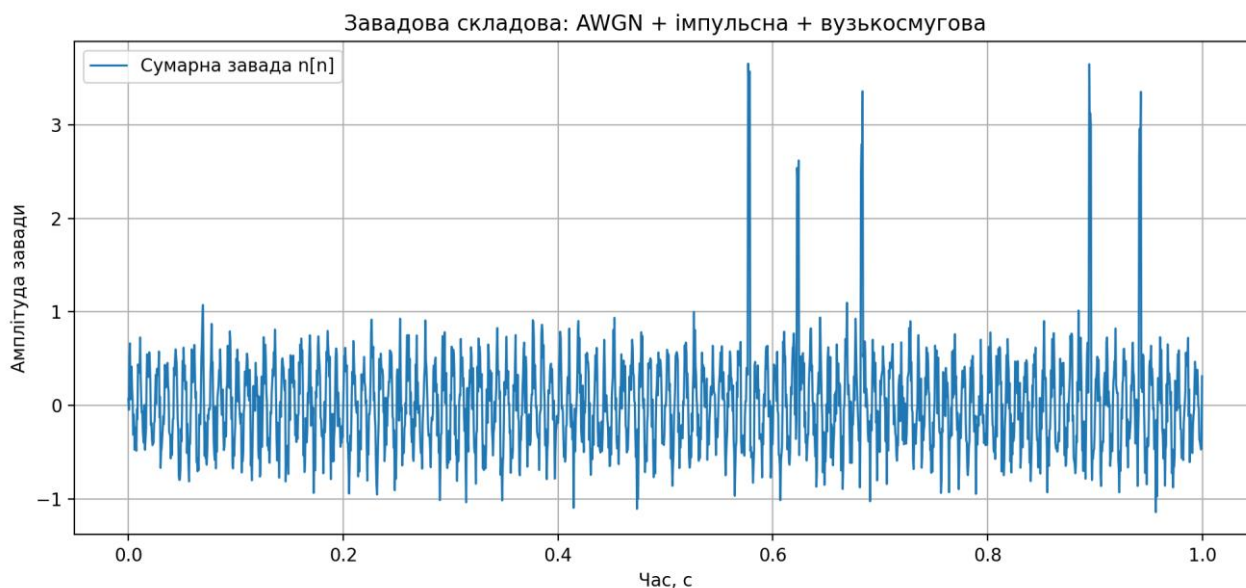


Рис. 4.10. Сумарна завадова складова за комбінованого впливу

З рисунка 4.10 видно, що завадова складова має складну форму. На відміну від окремого білого шуму або окремої імпульсної завади, тут одночасно спостерігаються випадкові коливання, гармонічна складова та окремі імпульсні сплески. Це підтверджує, що сумарна завада формується шляхом додавання кількох незалежних компонентів.

Для оцінювання комбінованого впливу в частотній області було побудовано спектр корисного та прийнятого сигналів. Його наведено на рисунку 4.11.

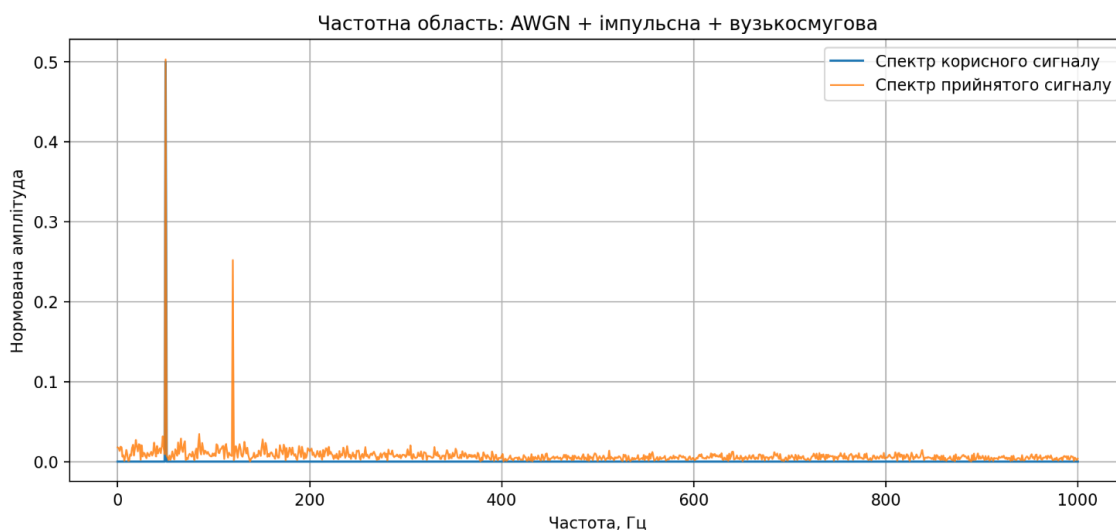


Рис. 4.11. Спектр сигналу за комбінованого впливу завад

На рисунку 4.11 видно, що спектр прийнятого сигналу містить основний пік поблизу частоти 50 Гц, який відповідає корисному сигналу, а також додатковий пік поблизу частоти 120 Гц, що відповідає вузькосмуговій заваді. Крім того, у спектрі спостерігається підвищений фоновий рівень, зумовлений білим гаусівським шумом. Імпульсна завада, на відміну від вузькосмугової, не формує одного вузького спектрального піка, а може впливати на ширший частотний діапазон.

Числові показники для комбінованого сценарію наведено в таблиці 4.6.

Таблиця 4.6

Показники сигналу за комбінованого впливу завад

Показник	Значення
Потужність корисного сигналу	0,5
Потужність завади	0,2658
Потужність прийнятого сигналу	0,7709
Фактичне SNR	2,7441 дБ
RMS прийнятого сигналу	0,878
Пікова амплітуда прийнятого сигналу	4,2508
Коефіцієнт форми	4,8412

Отримані числові результати узгоджуються з очікуваною дією кількох завадових складових. Сумарна потужність завади становить 0,2658. Це значення близьке до суми потужностей окремих складових, отриманих у попередніх сценаріях:

$$P_{\Sigma} \approx 0,0503 + 0,0900 + 0,1250 = 0,2653. \quad (4.6)$$

Невелика різниця між очікуваним і фактичним значенням пов'язана з випадковим характером шумової та імпульсної складових. Отримане значення

SNR становить 2,7441 дБ, що є найменшим серед розглянутих сценаріїв. Це пояснюється тим, що у знаменнику при обчисленні SNR враховується сумарна потужність усіх завадових компонентів.

Потужність прийнятого сигналу збільшилася до 0,7709, а RMS – до 0,8780, що свідчить про зростання загального енергетичного рівня сигналу. Пікова амплітуда становить 4,2508, тобто є найбільшою серед усіх сценаріїв. Це очікувано, оскільки імпульсна завада додається до сигналу одночасно з шумовою та вузькосмуговою складовими. Коефіцієнт форми також залишається високим і становить 4,8412, що підтверджує наявність короточасних сплесків великої амплітуди.

Порівняно з окремими сценаріями, комбінований вплив є більш складним для аналізу, оскільки різні типи завад проявляються по-різному. Білий гаусівський шум підвищує загальний рівень випадкових коливань, імпульсна завада збільшує пікові значення, а вузькосмугова завада формує окрему спектральну складову. Саме тому для оцінювання такого сценарію доцільно використовувати одночасно часові графіки, спектральне представлення та числові показники якості.

Отже, результати моделювання комбінованого сценарію підтверджують коректність роботи програмного засобу при одночасному використанні кількох типів завад. Отримані графіки та числові показники відповідають очікуваним властивостям кожної завадової складової: AWGN створює випадковий шумовий фон, імпульсна завада формує короточасні сплески, а вузькосмугова завада проявляється як додаткова частотна складова у спектрі прийнятого сигналу.

4.6. Узагальнення результатів моделювання

Для узагальнення результатів моделювання доцільно порівняти всі розглянуті сценарії за основними кількісними показниками якості сигналу. У попередніх підрозділах було окремо проаналізовано вплив білого гаусівського

шуму, імпульсної завади, вузькосмугової завади та їхньої комбінації. Однак для повнішого оцінювання результатів важливо зіставити ці сценарії між собою за єдиним набором показників.

У таблиці 4.7 наведено порівняння результатів моделювання для всіх сценаріїв. До таблиці включено співвідношення сигнал/шум, потужність корисного сигналу, потужність завади, потужність прийнятого сигналу, RMS, пікову амплітуду та коефіцієнт форми.

Таблиця 4.7

Порівняння показників якості сигналу для різних сценаріїв моделювання

Сценарій	SNR, дБ	Потужність корисного сигналу	Потужність завади	Потужність прийнятого сигналу	RMS	Пікова амплітуда	Коефіцієнт форми
Без завад	—	0,5	0	0,5	0,7071	1	1,4142
Білий гаусівський шум	9,9712	0,5	0,0503	0,5497	0,7414	1,8035	2,4325
Імпульсна завада	7,4473	0,5	0,09	0,5958	0,7719	3,9509	5,1188
Вузькосмугова завада	6,0206	0,5	0,125	0,625	0,7906	1,4867	1,8805
Комбінований вплив	2,7441	0,5	0,2658	0,7709	0,878	4,2508	4,8412

У сценарії без завад прийнятий сигнал збігається з корисним сигналом, тому потужність завадової складової дорівнює нулю. У цьому випадку значення SNR у звичайному вигляді не визначається, оскільки в знаменнику відсутня потужність завади. Цей сценарій використовується як еталонний для порівняння з іншими результатами.

У сценарії з білим гаусівським шумом потужність завади становить 0,0503, а фактичне значення SNR дорівнює 9,9712 дБ. Це значення є близьким до

заданого рівня 10 дБ, що підтверджує коректність масштабування шумової складової. Порівняно з чистим сигналом RMS і пікова амплітуда зросли помірно, що відповідає характеру AWGN як випадкового фоновому шуму.

Імпульсна завада має більший вплив на пікові значення сигналу. Хоча її середня потужність становить 0,0900, тобто не є найбільшою серед окремих сценаріїв, пікова амплітуда прийнятого сигналу зростає до 3,9509, а коефіцієнт форми – до 5,1188. Це пояснюється короткочасним характером імпульсної завади: вона діє лише на окремих часових ділянках, але має велику амплітуду.

Вузькосмугова завада має потужність 0,1250, що є більшою, ніж у сценаріях з AWGN та імпульсною завадою. Водночас пікова амплітуда і коефіцієнт форми залишаються значно меншими, ніж у випадку імпульсної завади. Це пояснюється тим, що вузькосмугова завада є регулярним гармонічним коливанням, яке діє протягом усього інтервалу моделювання, але не створює різких короткочасних сплесків. Її основний вплив найкраще проявляється у частотній області як додатковий спектральний пік.

Найбільш суттєві зміни спостерігаються у сценарії комбінованого впливу. Потужність сумарної завади становить 0,2658, що є найбільшим значенням серед усіх сценаріїв. Відповідно, SNR зменшується до 2,7441 дБ. Потужність прийнятого сигналу та RMS також мають найбільші значення. Пікова амплітуда становить 4,2508, що пояснюється додаванням імпульсних сплесків поверх шумової та вузькосмугової складових.

Порівняння отриманих результатів показує, що різні типи завад впливають на сигнал по-різному. Білий гаусівський шум переважно підвищує загальний рівень випадкових коливань і зменшує SNR. Імпульсна завада найбільше впливає на пікову амплітуду та коефіцієнт форми. Вузькосмугова завада найбільш помітна у спектральній області, де формує додаткову частотну складову. Комбінований сценарій поєднує всі ці ефекти та призводить до найгіршого значення SNR серед розглянутих варіантів.

Отже, результати моделювання підтверджують, що розроблений програмний засіб дозволяє не лише візуально спостерігати зміну форми сигналу, а й кількісно оцінювати вплив різних типів завад. Використання часових графіків, спектрального аналізу та числових показників забезпечує комплексне порівняння сценаріїв і дає змогу визначати характер завадового впливу на сигнал у каналі зв'язку малого БПЛА.

Висновки

У четвертому розділі було виконано дослідження роботи програмного засобу системи моделювання завад у каналі зв'язку малого БПЛА. Для цього було сформовано кілька сценаріїв моделювання: сигнал без завад, сигнал із білим гаусівським шумом, сигнал з імпульсною завадою, сигнал із вузькосмуговою завадою та сигнал за комбінованого впливу кількох завадових складових.

Для забезпечення коректного порівняння всі сценарії виконувалися за однакових базових параметрів корисного сигналу. Сигнал без завад використано як еталонний варіант. У цьому випадку прийнятий сигнал повністю збігався з корисним сигналом, а потужність завадової складової дорівнювала нулю. Це підтвердило коректність формування базового сигналу в програмному засобі.

Під час моделювання білого гаусівського шуму було встановлено, що така завада створює випадкове зашумлення сигналу в часовій області та знижує співвідношення сигнал/шум. Для заданого значення $SNR = 10$ дБ фактичне значення становило 9,9712 дБ, що підтверджує коректність алгоритму масштабування шумової складової. Додатково побудований графік залежності фактичного SNR від заданого рівня шуму показав близькість отриманих значень до ідеальної лінії відповідності.

Аналіз імпульсної завади показав, що вона проявляється у вигляді короткочасних сплесків великої амплітуди. Такий тип завадового впливу найбільше позначається на піковій амплітуді та коефіцієнті форми сигналу. У відповідному сценарії пікова амплітуда прийнятого сигналу зросла до 3,9509, а

коефіцієнт форми – до 5,1188, що суттєво перевищує значення для сигналу без завад.

Дослідження вузькосмугової завади підтвердило, що її вплив найбільш наочно проявляється у частотній області. У спектрі прийнятого сигналу, крім основного піка на частоті корисного сигналу, з'явився додатковий пік поблизу частоти 120 Гц, що відповідає заданій частоті завади. Числові показники також підтвердили коректність моделі: потужність вузькосмугової завади становила 0,1250, що відповідає очікуваному значенню для гармонічного коливання з амплітудою 0,5.

Найбільш суттєве погіршення якості сигналу спостерігалось у сценарії комбінованого впливу. У цьому випадку одночасна дія білого шуму, імпульсної та вузькосмугової завад призвела до найбільшої сумарної потужності завади 0,2658, найменшого значення SNR 2,7441 дБ та найбільшої пікової амплітуди 4,2508. Це підтверджує, що сумарний вплив кількох завадових складових є складнішим для аналізу та призводить до більш помітного спотворення сигналу.

Отримані результати показали, що різні типи завад мають різний характер впливу на сигнал. Білий гаусівський шум переважно створює випадковий шумовий фон, імпульсна завада викликає короточасні амплітудні сплески, а вузькосмугова завада формує додаткову частотну складову у спектрі. Комбінований сценарій поєднує ці ефекти та демонструє найбільше погіршення показників якості сигналу.

Отже, результати експериментального дослідження підтвердили працездатність і коректність розробленого програмного засобу. Програмний засіб дозволяє формувати корисний сигнал, додавати різні типи завад, аналізувати отриманий сигнал у часовій і частотній областях, а також розраховувати кількісні показники якості. Це дає змогу використовувати його як дослідницький інструмент для аналізу впливу завад на сигнал у каналі зв'язку малого БПЛА.

ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ ПО РОБОТІ

У дипломній роботі було розглянуто питання моделювання завадового впливу на сигнал у каналі зв'язку малого безпілотного літального апарата. Актуальність теми зумовлена широким використанням малих БПЛА та їхньою залежністю від стабільного безпроводового каналу зв'язку, через який передаються команди керування, телеметрія, навігаційні дані та інформація від корисного навантаження. Порушення або погіршення якості такого каналу може суттєво впливати на роботу апарата, тому дослідження впливу шумів і завад є важливою задачею.

У першому розділі було проаналізовано особливості функціонування малих БПЛА, їхню класифікацію, основні канали зв'язку та вразливості цих каналів. Показано, що канал зв'язку є одним із ключових елементів безпілотної авіаційної системи, оскільки забезпечує взаємодію між БПЛА, оператором, наземною станцією керування та іншими елементами системи. Також було розглянуто основні типи завад, які можуть впливати на канали зв'язку, та сучасні підходи до протидії малим БПЛА. Встановлено, що для теми цієї роботи найбільш важливими є радіочастотні та радіоелектронні підходи, пов'язані з впливом на канал зв'язку.

У другому розділі було сформовано теоретичну основу для подальшого моделювання. Корисний сигнал у каналі зв'язку малого БПЛА подано у вигляді дискретної гармонічної послідовності, що дозволяє наочно досліджувати його зміну під дією завадових складових. Обґрунтовано використання адитивної моделі каналу, у якій прийнятий сигнал розглядається як сума корисного сигналу та завади. Розглянуто моделі білого гаусівського шуму, імпульсної та вузькосмугової завад, а також визначено основні методи аналізу сигналів у часовій і частотній областях. Для кількісного оцінювання якості сигналу обрано такі показники, як потужність сигналу й завади, SNR, RMS, пікова амплітуда, коефіцієнт форми та спектральні характеристики.

У третьому розділі було розроблено програмний засіб для моделювання завад у каналі зв'язку малого БПЛА. Для реалізації обрано мову програмування Python та бібліотеки для числового моделювання, візуалізації, табличного подання результатів і створення веб-інтерфейсу. Програмний засіб побудовано за модульним принципом: окремо реалізовано формування корисного сигналу, генерацію завадових складових, адитивне накладання завад, розрахунок показників якості, спектральний аналіз, візуалізацію та експорт результатів. Веб-інтерфейс дозволяє користувачу задавати параметри сигналу й завад без редагування програмного коду та одразу отримувати графіки й числові показники.

У четвертому розділі було виконано експериментальне дослідження роботи програмного засобу. Для порівняння результатів було використано фіксований набір базових параметрів корисного сигналу та кілька сценаріїв моделювання: сигнал без завад, сигнал із білим гаусівським шумом, сигнал з імпульсною завадою, сигнал із вузькосмуговою завадою та сигнал за комбінованого впливу кількох завадових складових. Це дозволило оцінити вплив кожного типу завади на часову форму сигналу, спектральне представлення та кількісні показники якості.

За результатами моделювання встановлено, що білий гаусівський шум створює випадкове зашумлення сигналу та знижує співвідношення сигнал/шум. Для заданого значення $SNR = 10$ дБ фактичне значення становило 9,9712 дБ, що підтверджує коректність алгоритму формування шумової складової. Імпульсна завада проявилася у вигляді короточасних сплесків, які суттєво збільшили пікову амплітуду та коефіцієнт форми сигналу. Вузькосмугова завада найбільш помітно проявилася у частотній області як додатковий спектральний пік на заданій частоті 120 Гц. Комбінований сценарій показав найбільше погіршення якості сигналу, оскільки одночасна дія кількох завад призвела до найбільшої сумарної потужності завади та найменшого значення SNR серед усіх розглянутих сценаріїв.

Отримані результати підтвердили працездатність розробленого програмного засобу та відповідність його роботи теоретичним положенням, розглянутим у другому розділі. Програмний засіб забезпечує формування корисного сигналу, додавання шумових, імпульсних і вузькосмугових завад, побудову часових і спектральних графіків, а також розрахунок основних показників якості сигналу. Це дозволяє використовувати його як дослідницький інструмент для аналізу впливу різних типів завад на сигнал у каналі зв'язку малого БПЛА.

Таким чином, мету дипломної роботи досягнуто. У роботі було обґрунтовано вибір математичних моделей сигналу та завад, реалізовано програмний засіб моделювання, проведено експериментальне дослідження його роботи та виконано порівняльний аналіз отриманих результатів. Розроблений програмний засіб може бути використаний для навчальних і дослідницьких цілей, а також може бути розширений у подальшому шляхом додавання складніших моделей сигналів, нових типів завад, параметрів каналу зв'язку та додаткових засобів аналізу результатів.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. European Union Aviation Safety Agency. Open Category – Low Risk – Civil Drones [Електронний ресурс]. – Режим доступу до ресурсу: <https://www.easa.europa.eu/en/domains/drones-air-mobility/operating-drone/open-category-low-risk-civil-drones>
2. Federal Aviation Administration. Small Unmanned Aircraft Systems (UAS) Regulations (Part 107) [Електронний ресурс]. – Режим доступу до ресурсу: <https://www.faa.gov/newsroom/small-unmanned-aircraft-systems-uas-regulations-part-107>
3. Elmeseiry N. A Detailed Survey and Future Directions of Unmanned Aerial Vehicles (UAVs) with Potential Applications / N. Elmeseiry, N. Alshaer, T. Ismail // Aerospace. – 2021. – Vol. 8, № 12. – Article 363. – DOI: 10.3390/aerospace8120363.
4. Hayat S. Survey on Unmanned Aerial Vehicle Networks for Civil Applications: A Communications Viewpoint / S. Hayat, E. Yanmaz, R. Muzaffar // IEEE Communications Surveys & Tutorials. – 2016. – Vol. 18, № 4. – P. 2624–2661. – DOI: 10.1109/COMST.2016.2560343.
5. Gupta L. Survey of Important Issues in UAV Communication Networks / L. Gupta, R. Jain, G. Vaszkun // IEEE Communications Surveys & Tutorials. – 2016. – Vol. 18, № 2. – P. 1123–1152. – DOI: 10.1109/COMST.2015.2495297.
6. Khuwaja A. A Survey of Channel Modeling for UAV Communications / A. Khuwaja, Y. Chen, N. Zhao, M.-S. Alouini, P. Dobbins // IEEE Communications Surveys & Tutorials. – 2018. – Vol. 20, № 4. – P. 2804–2821. – DOI: 10.1109/COMST.2018.2856587.
7. Mozaffari M. A Tutorial on UAVs for Wireless Networks: Applications, Challenges, and Open Problems / M. Mozaffari, W. Saad, M. Bennis, Y.-H. Nam, M. Debbah // IEEE Communications Surveys & Tutorials. – 2019. – Vol. 21, № 3. – P. 2334–2360. – DOI: 10.1109/COMST.2019.2902862.

8. Yaacoub J.-P. Security Analysis of Drones Systems: Attacks, Limitations, and Recommendations / J.-P. Yaacoub, H. Noura, O. Salman, A. Chehab // Internet of Things. – 2020. – Vol. 11. – Article 100218. – DOI: 10.1016/j.iot.2020.100218.
9. Cybersecurity and Infrastructure Security Agency. Cybersecurity Best Practices for Operating Commercial Unmanned Aircraft Systems (UASs) [Електронний ресурс]. – Режим доступу до ресурсу: <https://www.cisa.gov/sites/default/files/publications/CISA%20Cybersecurity%20Best%20Practices%20for%20Operating%20Commerical%20UAS%20%28508%29.pdf>
10. International Telecommunication Union. Recommendation ITU-R P.372-17: Radio noise [Електронний ресурс]. – Режим доступу до ресурсу: <https://www.itu.int/rec/R-REC-P.372-17-202408-I/en>
11. Michel A. H. Counter-Drone Systems. 2nd ed. [Електронний ресурс] / A. H. Michel. – Режим доступу до ресурсу: <https://dronecenter.bard.edu/projects/counter-drone-systems-project/counter-drone-systems-2nd-edition>
12. Mototolea D. Counter-Unmanned Aerial Systems / D. Mototolea, A. Mîndroiu // Scientific Bulletin of Naval Academy. – 2019. – Vol. XXII, № 1. – P. 192–195. – DOI: 10.21279/1454-864X-19-I1-026.
13. NATO. NATO tests counter-drone technologies during exercise [Електронний ресурс]. – Режим доступу до ресурсу: https://www.nato.int/cps/en/natohq/news_218655.htm
14. Ільченко М. Ю. Телекомунікаційні системи / М. Ю. Ільченко, С. О. Кравчук. – Київ : Наукова думка, 2017. – 730 с.
15. Ільченко М. Ю. Сучасні телекомунікаційні системи / М. Ю. Ільченко, С. О. Кравчук. – Київ : Наукова думка, 2008. – 328 с.
16. Haykin S. Communication Systems / S. Haykin, M. Moher. – 5th ed. – Hoboken : John Wiley & Sons, 2009.

17. Sklar B. Digital Communications: Fundamentals and Applications / B. Sklar. – 2nd ed. – Upper Saddle River : Prentice Hall, 2001.
18. Proakis J. G. Digital Communications / J. G. Proakis, M. Salehi. – 5th ed. – New York : McGraw-Hill, 2008.
19. ITU-R P.372-16. Radio noise. – Geneva : International Telecommunication Union, 2022.
20. Rappaport T. S. Wireless Communications: Principles and Practice / T. S. Rappaport. – 2nd ed. – Upper Saddle River : Prentice Hall, 2002.
21. Zeng Y. Wireless communications with unmanned aerial vehicles: opportunities and challenges / Y. Zeng, R. Zhang, T. J. Lim // IEEE Communications Magazine. – 2016. – Vol. 54, № 5. – P. 36–42.
22. Fotouhi A. Survey on UAV cellular communications: practical aspects, standardization advancements, regulation, and security challenges / A. Fotouhi et al. // IEEE Communications Surveys & Tutorials. – 2019. – Vol. 21, № 4. – P. 3417–3442.
23. Shannon C. E. A Mathematical Theory of Communication / C. E. Shannon // Bell System Technical Journal. – 1948. – Vol. 27. – P. 379–423, 623–656.
24. Oppenheim A. V. Discrete-Time Signal Processing / A. V. Oppenheim, R. W. Schaffer. – 3rd ed. – Upper Saddle River : Pearson, 2010.
25. Tranter W. H. Principles of Communication Systems Simulation with Wireless Applications / W. H. Tranter, K. S. Shanmugan, T. S. Rappaport, K. L. Kosbar. – Upper Saddle River : Prentice Hall, 2004.
26. Lathi B. P. Modern Digital and Analog Communication Systems / B. P. Lathi, Z. Ding. – 4th ed. – New York : Oxford University Press, 2009.
27. Python Software Foundation. Python 3 Documentation [Электронный ресурс]. – Режим доступа до ресурсу: <https://docs.python.org/3/>
28. NumPy Developers. NumPy Documentation [Электронный ресурс]. – Режим доступа до ресурсу: <https://numpy.org/doc/stable/>
29. Matplotlib Development Team. Matplotlib Documentation [Электронный ресурс]. – Режим доступа до ресурсу: <https://matplotlib.org/stable/>

- 30.Streamlit. Streamlit Documentation [Электронный ресурс]. – Режим доступа до ресурсу: <https://docs.streamlit.io/>
- 31.Pandas Development Team. Pandas Documentation [Электронный ресурс]. – Режим доступа до ресурсу: <https://pandas.pydata.org/docs/>

ДОДАТОК А

Лістинг програмного коду програмного засобу

У додатку наведено лістинг програмного коду розробленого програмного засобу для моделювання завад у каналі зв'язку малого БПЛА. Код охоплює основні складові програмної реалізації: формування корисного сигналу, генерацію завадових складових, адитивне накладання завад, розрахунок числових показників якості сигналу, спектральний аналіз, побудову графіків і реалізацію інтерфейсу користувача.

Програмна реалізація складається з двох логічних частин. Перша частина відповідає за математичне моделювання сигналу та завад, зокрема за формування дискретної гармонічної послідовності, генерацію білого гаусівського шуму, імпульсної та вузькосмугової завад, а також за обчислення потужності, SNR, RMS, пікової амплітуди, коефіцієнта форми та спектральних характеристик.

Друга частина відповідає за взаємодію користувача з програмним засобом. Вона забезпечує введення параметрів корисного сигналу й завад, вибір сценаріїв моделювання, запуск розрахунків, візуальне подання результатів у часовій і частотній областях, відображення числових показників та експорт отриманих даних.

А.1. Лістинг модуля математичного моделювання сигналу та завад

```
from dataclasses import dataclass
from typing import Dict, Tuple
import numpy as np

@dataclass
class SignalParams:
    amplitude: float = 1.0
    frequency_hz: float = 50.0
    phase_rad: float = 0.0
    sampling_rate_hz: float = 2000.0
    duration_s: float = 1.0
```

```

@dataclass
class NoiseParams:
    snr_db: float = 10.0
    seed: int = 42

@dataclass
class ImpulseParams:
    amplitude: float = 3.0
    count: int = 5
    width_samples: int = 4
    seed: int = 7

@dataclass
class NarrowbandParams:
    amplitude: float = 0.5
    frequency_hz: float = 120.0
    phase_rad: float = 0.0

def create_time_vector(params: SignalParams) -> np.ndarray:
    samples_count = int(params.sampling_rate_hz * params.duration_s)
    return np.arange(samples_count) / params.sampling_rate_hz

def generate_useful_signal(t: np.ndarray, params: SignalParams) -> np.ndarray:
    return params.amplitude * np.sin(
        2 * np.pi * params.frequency_hz * t + params.phase_rad
    )

def calculate_power(x: np.ndarray) -> float:
    return float(np.mean(np.abs(x) ** 2))

def calculate_rms(x: np.ndarray) -> float:
    return float(np.sqrt(np.mean(np.abs(x) ** 2)))

def calculate_peak(x: np.ndarray) -> float:
    return float(np.max(np.abs(x)))

def calculate_crest_factor(x: np.ndarray) -> float:
    rms = calculate_rms(x)
    if rms == 0:
        return 0.0
    return float(calculate_peak(x) / rms)

def calculate_snr_db(signal: np.ndarray, disturbance: np.ndarray) -> float:
    signal_power = calculate_power(signal)
    disturbance_power = calculate_power(disturbance)
    if disturbance_power == 0:
        return float("inf")
    return float(10 * np.log10(signal_power / disturbance_power))

def generate_awgn(signal: np.ndarray, params: NoiseParams) -> np.ndarray:
    rng = np.random.default_rng(params.seed)
    signal_power = calculate_power(signal)
    snr_linear = 10 ** (params.snr_db / 10)
    noise_power = signal_power / snr_linear
    return rng.normal(loc=0.0, scale=np.sqrt(noise_power), size=len(signal))

def generate_impulse_interference(
    length: int, params: ImpulseParams
) -> Tuple[np.ndarray, np.ndarray]:

```

```

rng = np.random.default_rng(params.seed)
interference = np.zeros(length)

if params.count <= 0 or params.amplitude == 0:
    return interference, np.array([], dtype=int)

width = max(1, int(params.width_samples))
max_start = max(1, length - width)
count = min(int(params.count), max_start)
starts = rng.choice(max_start, size=count, replace=False)

for start in starts:
    end = min(start + width, length)
    interference[start:end] += params.amplitude

return interference, np.sort(starts)

def generate_narrowband_interference(
    t: np.ndarray, params: NarrowbandParams
) -> np.ndarray:
    return params.amplitude * np.sin(
        2 * np.pi * params.frequency_hz * t + params.phase_rad
    )

def combine_disturbances(
    signal: np.ndarray,
    awgn: np.ndarray,
    impulse: np.ndarray,
    narrowband: np.ndarray,
    use_awgn: bool,
    use_impulse: bool,
    use_narrowband: bool,
) -> np.ndarray:
    disturbance = np.zeros_like(signal)

    if use_awgn:
        disturbance = disturbance + awgn
    if use_impulse:
        disturbance = disturbance + impulse
    if use_narrowband:
        disturbance = disturbance + narrowband

    return disturbance

def calculate_fft(
    x: np.ndarray, sampling_rate_hz: float
) -> Tuple[np.ndarray, np.ndarray]:
    n = len(x)
    spectrum = np.fft.rfft(x)
    frequencies = np.fft.rfftfreq(n, d=1 / sampling_rate_hz)
    amplitude_spectrum = np.abs(spectrum) / n
    return frequencies, amplitude_spectrum

def calculate_metrics(signal: np.ndarray, received: np.ndarray, disturbance:
np.ndarray) -> Dict[str, float]:
    return {
        "SNR, дБ": calculate_snr_db(signal, disturbance),
        "Потужність корисного сигналу": calculate_power(signal),
        "Потужність завади": calculate_power(disturbance),
        "Потужність прийнятого сигналу": calculate_power(received),
        "RMS прийнятого сигналу": calculate_rms(received),
        "Пікова амплітуда прийнятого сигналу": calculate_peak(received),
    }

```

```

        "Коефіцієнт форми": calculate_crest_factor(received),
    }

def run_snr_sweep(signal: np.ndarray, snr_values_db: np.ndarray, seed: int = 42)
-> Dict[str, np.ndarray]:
    actual_snr = []

    for index, snr_db in enumerate(snr_values_db):
        noise = generate_awgn(signal, NoiseParams(snr_db=float(snr_db),
seed=seed + index))
        actual_snr.append(calculate_snr_db(signal, noise))

    return {
        "target_snr_db": np.array(snr_values_db, dtype=float),
        "actual_snr_db": np.array(actual_snr, dtype=float),
    }

```

A.2. Лістинг модуля інтерфейсу користувача

```

import io
import matplotlib.pyplot as plt
import numpy as np
import pandas as pd
import streamlit as st

from uav_jamming_model import (
    SignalParams,
    NoiseParams,
    ImpulseParams,
    NarrowbandParams,
    create_time_vector,
    generate_useful_signal,
    generate_awgn,
    generate_impulse_interference,
    generate_narrowband_interference,
    combine_disturbances,
    calculate_fft,
    calculate_metrics,
    run_snr_sweep,
)

st.set_page_config(
    page_title="Моделювання завад для малого БПЛА",
    page_icon="🚁",
    layout="wide",
)

def make_time_plot(t, useful_signal, received_signal, scenario_name):
    fig, ax = plt.subplots(figsize=(10, 4.8))
    ax.plot(t, useful_signal, label="Корисний сигнал s[n]", linewidth=1.4)
    ax.plot(t, received_signal, label="Прийнятий сигнал r[n]", linewidth=1.1,
alpha=0.85)
    ax.set_title(f"Часова область: {scenario_name}")
    ax.set_xlabel("Час, с")
    ax.set_ylabel("Амплітуда")
    ax.grid(True)
    ax.legend()
    fig.tight_layout()
    return fig

```

```

def make_disturbance_plot(t, disturbance, scenario_name):
    fig, ax = plt.subplots(figsize=(10, 4.8))
    ax.plot(t, disturbance, label="Сумарна завада n[n]", linewidth=1.2)
    ax.set_title(f"Завадова складова: {scenario_name}")
    ax.set_xlabel("Час, с")
    ax.set_ylabel("Амплітуда завади")
    ax.grid(True)
    ax.legend()
    fig.tight_layout()
    return fig

def make_spectrum_plot(useful_signal, received_signal, sampling_rate_hz,
scenario_name):
    f_signal, spectrum_signal = calculate_fft(useful_signal, sampling_rate_hz)
    f_received, spectrum_received = calculate_fft(received_signal,
sampling_rate_hz)

    fig, ax = plt.subplots(figsize=(10, 4.8))
    ax.plot(f_signal, spectrum_signal, label="Спектр корисного сигналу",
linewidth=1.4)
    ax.plot(f_received, spectrum_received, label="Спектр прийнятого сигналу",
linewidth=1.1, alpha=0.85)
    ax.set_title(f"Частотна область: {scenario_name}")
    ax.set_xlabel("Частота, Гц")
    ax.set_ylabel("Нормована амплітуда")
    ax.grid(True)
    ax.legend()
    fig.tight_layout()
    return fig

def make_snr_sweep_plot(snr_sweep):
    fig, ax = plt.subplots(figsize=(9, 4.8))
    ax.plot(
        snr_sweep["target_snr_db"],
        snr_sweep["actual_snr_db"],
        marker="o",
        label="Фактично отриманий SNR",
    )
    ax.plot(
        snr_sweep["target_snr_db"],
        snr_sweep["target_snr_db"],
        linestyle="--",
        label="Ідеальна відповідність",
        alpha=0.8,
    )
    ax.set_title("Залежність фактичного SNR від заданого рівня шуму")
    ax.set_xlabel("Заданий SNR, дБ")
    ax.set_ylabel("Фактичний SNR, дБ")
    ax.grid(True)
    ax.legend()
    fig.tight_layout()
    return fig

def fig_to_png_bytes(fig):
    buffer = io.BytesIO()
    fig.savefig(buffer, format="png", dpi=200, bbox_inches="tight")
    buffer.seek(0)
    return buffer

```



```

def format_metric(value):
    if np.isinf(value):
        return "∞"
    return f"{value:.3f}"

st.title("Програмний засіб моделювання завад у каналі зв'язку малого БПЛА")
st.write(
    "Інтерфейс дозволяє задавати параметри корисного сигналу, обирати потрібні "
    "завадові складові, аналізувати часові графіки, спектри та числові показники "
    "якості."
)

with st.sidebar:
    st.header("Параметри корисного сигналу")

    signal_amplitude = st.number_input("Амплітуда сигналу", min_value=0.1,
max_value=10.0, value=1.0, step=0.1)
    signal_frequency = st.number_input("Частота сигналу, Гц", min_value=1.0,
max_value=1000.0, value=50.0, step=1.0)
    signal_phase = st.number_input("Початкова фаза, рад", min_value=0.0,
max_value=6.28, value=0.0, step=0.1)
    sampling_rate = st.number_input("Частота дискретизації, Гц",
min_value=100.0, max_value=20000.0, value=2000.0, step=100.0)
    duration = st.number_input("Тривалість моделювання, с", min_value=0.1,
max_value=10.0, value=1.0, step=0.1)

    st.header("Вибір завад")
    use_awgn = st.checkbox("Додати білий гаусівський шум AWGN", value=True)
    use_impulse = st.checkbox("Додати імпульсну заваду", value=False)
    use_narrowband = st.checkbox("Додати вузькосмугову заваду", value=False)

    st.header("Параметри AWGN")
    snr_db = st.slider("Заданий SNR, дБ", min_value=-10.0, max_value=40.0,
value=10.0, step=1.0)
    noise_seed = st.number_input("Seed шуму", min_value=0, max_value=9999,
value=42, step=1)

    st.header("Параметри імпульсної завади")
    impulse_amplitude = st.number_input("Амплітуда імпульсів", min_value=0.0,
max_value=20.0, value=3.0, step=0.5)
    impulse_count = st.number_input("Кількість імпульсів", min_value=0,
max_value=100, value=5, step=1)
    impulse_width = st.number_input("Тривалість імпульсу, відліків",
min_value=1, max_value=200, value=4, step=1)
    impulse_seed = st.number_input("Seed імпульсів", min_value=0,
max_value=9999, value=7, step=1)

    st.header("Параметри вузькосмугової завади")
    narrow_amplitude = st.number_input("Амплітуда вузькосмугової завади",
min_value=0.0, max_value=10.0, value=0.5, step=0.1)
    narrow_frequency = st.number_input("Частота вузькосмугової завади, Гц",
min_value=1.0, max_value=2000.0, value=120.0, step=1.0)
    narrow_phase = st.number_input("Фаза вузькосмугової завади, рад",
min_value=0.0, max_value=6.28, value=0.0, step=0.1)

if signal_frequency >= sampling_rate / 2:
    st.warning(
        "Частота сигналу наближається до або перевищує частоту Найквіста. "
        "Для коректного моделювання збільште частоту дискретизації або зменште "
        "частоту сигналу."
    )

```

```

    )

    if narrow_frequency >= sampling_rate / 2:
        st.warning(
            "Частота вузькосмугової завади наближається до або перевищує частоту Найквіста."
        )

    signal_params = SignalParams(
        amplitude=signal_amplitude,
        frequency_hz=signal_frequency,
        phase_rad=signal_phase,
        sampling_rate_hz=sampling_rate,
        duration_s=duration,
    )

    noise_params = NoiseParams(snr_db=snr_db, seed=int(noise_seed))
    impulse_params = ImpulseParams(
        amplitude=impulse_amplitude,
        count=int(impulse_count),
        width_samples=int(impulse_width),
        seed=int(impulse_seed),
    )
    narrow_params = NarrowbandParams(
        amplitude=narrow_amplitude,
        frequency_hz=narrow_frequency,
        phase_rad=narrow_phase,
    )

    t = create_time_vector(signal_params)
    useful_signal = generate_useful_signal(t, signal_params)

    awgn = generate_awgn(useful_signal, noise_params)
    impulse, impulse_positions = generate_impulse_interference(len(useful_signal),
        impulse_params)
    narrowband = generate_narrowband_interference(t, narrow_params)

    disturbance = combine_disturbances(
        useful_signal,
        awgn,
        impulse,
        narrowband,
        use_awgn=use_awgn,
        use_impulse=use_impulse,
        use_narrowband=use_narrowband,
    )

    received = useful_signal + disturbance

    selected_disturbances = []
    if use_awgn:
        selected_disturbances.append("AWGN")
    if use_impulse:
        selected_disturbances.append("імпульсна")
    if use_narrowband:
        selected_disturbances.append("вузькосмугова")

    scenario_name = " + ".join(selected_disturbances) if selected_disturbances else
    "без завад"

    metrics = calculate_metrics(useful_signal, received, disturbance)

```

```

st.subheader("Поточний сценарій")
st.info(f"Обраний сценарій: **{scenario_name}**")

st.subheader("Основні показники")
cols = st.columns(4)
cols[0].metric("SNR, дБ", format_metric(metrics["SNR, дБ"]))
cols[1].metric("Потужність r[n]", f"{metrics['Потужність прийнятого сигналу']:.4f}")
cols[2].metric("RMS r[n]", f"{metrics['RMS прийнятого сигналу']:.4f}")
cols[3].metric("Пік r[n]", f"{metrics['Пікова амплітуда прийнятого сигналу']:.4f}")

with st.expander("Детальні числові показники"):
    metrics_df = pd.DataFrame(
        [{"Показник": key, "Значення": value} for key, value in metrics.items()]
    )
    st.dataframe(metrics_df, use_container_width=True)

st.subheader("Графіки результатів")

tab_time, tab_disturbance, tab_spectrum, tab_snr, tab_data = st.tabs(
    ["Часова область", "Завада", "Частотна область", "SNR-графік", "Дані"]
)

time_fig = make_time_plot(t, useful_signal, received, scenario_name)
disturbance_fig = make_disturbance_plot(t, disturbance, scenario_name)
spectrum_fig = make_spectrum_plot(useful_signal, received, sampling_rate,
                                   scenario_name)

with tab_time:
    st.pyplot(time_fig, use_container_width=True)
    st.download_button(
        "Завантажити графік часової області PNG",
        data=fig_to_png_bytes(time_fig),
        file_name=f"{scenario_name}_time.png",
        mime="image/png",
    )

with tab_disturbance:
    st.pyplot(disturbance_fig, use_container_width=True)
    st.download_button(
        "Завантажити графік завади PNG",
        data=fig_to_png_bytes(disturbance_fig),
        file_name=f"{scenario_name}_disturbance.png",
        mime="image/png",
    )

with tab_spectrum:
    st.pyplot(spectrum_fig, use_container_width=True)
    st.download_button(
        "Завантажити спектр PNG",
        data=fig_to_png_bytes(spectrum_fig),
        file_name=f"{scenario_name}_spectrum.png",
        mime="image/png",
    )

with tab_snr:
    st.write(
        "Графік показує, як фактичне значення SNR змінюється при різних заданих  
рівнях шуму AWGN."
    )

    snr_start, snr_end = st.slider(

```

```

        "Діапазон заданого SNR, дБ",
        min_value=-10,
        max_value=40,
        value=(-5, 30),
        step=1,
    )
    snr_step = st.number_input("Крок SNR, дБ", min_value=1, max_value=10,
value=5, step=1)

    snr_values = np.arange(snr_start, snr_end + snr_step, snr_step)
    snr_sweep = run_snr_sweep(useful_signal, snr_values, seed=int(noise_seed))
    snr_fig = make_snr_sweep_plot(snr_sweep)

    st.pyplot(snr_fig, use_container_width=True)

    snr_df = pd.DataFrame(
        {
            "Заданий SNR, дБ": snr_sweep["target_snr_db"],
            "Фактичний SNR, дБ": snr_sweep["actual_snr_db"],
        }
    )
    st.dataframe(snr_df, use_container_width=True)

    st.download_button(
        "Завантажити SNR-графік PNG",
        data=fig_to_png_bytes(snr_fig),
        file_name="snr_sweep.png",
        mime="image/png",
    )

    snr_csv = snr_df.to_csv(index=False)
    st.download_button(
        "Завантажити SNR-таблицю CSV",
        data=snr_csv,
        file_name="snr_sweep.csv",
        mime="text/csv",
    )

with tab_data:
    st.write("Перші 100 відліків сигналів")
    preview_count = min(100, len(t))
    data_df = pd.DataFrame(
        {
            "t, c": t[:preview_count],
            "s[n]": useful_signal[:preview_count],
            "завада": disturbance[:preview_count],
            "r[n]": received[:preview_count],
        }
    )
    st.dataframe(data_df, use_container_width=True)

    csv_buffer = io.StringIO()
    full_df = pd.DataFrame(
        {
            "t_s": t,
            "useful_signal": useful_signal,
            "disturbance": disturbance,
            "received_signal": received,
        }
    )
    full_df.to_csv(csv_buffer, index=False)

    st.download_button(

```

```
        "Завантажити дані CSV",
        data=csv_buffer.getvalue(),
        file_name=f"{scenario_name}_data.csv",
        mime="text/csv",
    )

if use_impulse and len(impulse_positions) > 0:
    with st.expander("Позиції імпульсних завад"):
        st.write(impulse_positions.tolist())
```