

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
НАЦІОНАЛЬНИЙ АВІАЦІЙНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
Факультет аеронавігації, електроніки та телекомунікацій
Кафедра аерокосмічних систем управління

ДОПУСТИТИ ДО ЗАХИСТУ

Завідувач кафедри АКСУ

_____Юрій МЕЛЬНИК

" _____ " _____ 2024р.

КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА

(ПОЯСНЮВАЛЬНА ЗАПИСКА)

ВИПУСКНИКА ОСВІТНЬОГО СТУПЕНЯ

“БАКАЛАВР”

Тема: Обробка сигналів за даними напівнатурного моделювання квадрокоптера по каналу крену.

Виконавець: _____ студент групи СУ-403Б Гришук Володимир Анатолійович

Керівник: _____ старший викладач Єрмолаєва Ольга Вікторівна

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

Київ 2024

НАЦІОНАЛЬНИЙ АВІАЦІЙНИЙ УНІВЕРСИТЕТ

Факультет аеронавігації, електроніки та телекомунікацій

Кафедра аерокосмічних систем управління

Спеціальність 151 Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології

ЗАТВЕРДЖУЮ

Завідувач кафедри АКСУ

_____Юрій МЕЛЬНИК

" _____ " _____ 2024р.

ЗАВДАННЯ

на виконання кваліфікаційної роботи

Грищука Володимира Анатолійовича

(Прізвище, ім'я, по батькові випускника в родовому відмінку)

1. Тема кваліфікаційної роботи: Обробка сигналів за даними напівнатурного моделювання квадрокоптера по каналу крена затверджена наказом ректора від «04» 04.2024р. № 511/ст
2. Термін виконання роботи: з "13" травня 2024 р. по "16" червня 2024 р.
3. Вихідні дані до роботи: масиви даних вхідних та вихідних сигналів по каналу крена
4. Зміст пояснювальної записки: Вступ, Основи безпілотних літальних апаратів та їх моделювання, Методи обробки сигналів, Первинна обробка сигналів квадрокоптера по каналу крена, Висновки
5. Перелік обов'язкового графічного (ілюстративного) матеріалу: осцилограми вхідних та вихідних сигналів, спектральні щільності вхідного та вихідного сигналів, взаємна спектральна щільність між входом і виходом та виходом і входом

6. Календарний план-графік:

№ пор	Завдання	Термін виконання	Відмітка про виконання
1	Уточнення постановки задачі	13.05.2024	
2	Збір інформації	15.05.24 -18.05.24	
3	Аналіз літературних джерел	19.05.24-22.05.24	
4	Вступ	23.05.24-24.05.24	
5	Розділ 1. Основи безпілотних літальних апаратів та їх моделювання	25.05.24-29.05.24	
6	Розділ 2. Методи обробки сигналів	30.05.24-02.06.24	
7	Розділ 3. Первинна обробка сигналів квадрокоптера по каналу крена	03.06.24-06.06.24	
8	Оформлення роботи	07.06.24-10.06.24	

7. Дата видачі завдання: “13” травня 2024 р.

Керівник кваліфікаційної роботи _____ Єрмолаєва О.В.

(підпис керівника)

(П.І.Б.)

Завдання прийняв до виконання _____ Грищук В.А.

(підпис випускника)

(П.І.Б.)

РЕФЕРАТ

Кваліфікаційна робота на тему «Обробка сигналів за даними напівнатурного моделювання квадрокоптера по каналу крену»: 73 сторінок, 51 рисуноків, 4 таблиці, 10 літературних джерел.

Об'єкт дослідження – квадрокоптер, розміщений на рухомій платформі стенда-імітатора.

Предмет дослідження – алгоритми та процедури апроксимації та обробки сигналів.

Мета роботи – отримання математичних моделей у вигляді спектральних та взаємна спектральних щільностей вхідних та вихідних сигналів квадрокоптера по каналу крену.

Методи дослідження – метод узагальнених логарифмічних характеристик.

КАНАЛ КРЕНУ, СТЕНД-ІМІТАТОР, СПЕКТРАЛЬНА ЩІЛЬНІСТЬ, ВЗАЄМНА СПЕКТРАЛЬНА ЩІЛЬНІСТЬ, АПРОКСИМАЦІЯ

ЗМІСТ

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ ТА СКОРОЧЕНЬ	7
ВСТУП	8
РОЗДІЛ 1. ОСНОВИ БЕЗПЛОТНИХ ЛІТАЛЬНИХ АПАРАТІВ ТА ЇХ МОДЕЛЮВАННЯ	10
1.1. Огляд БПЛА	11
1.2. Типологія та види мультикоптерів	14
1.3. Характеристики, компоненти та структура квадрокоптера	25
1.4. Натурне та напівнатурне моделювання	33
РОЗДІЛ 2. МЕТОДИ ОБРОБКИ СИГНАЛІВ	41
2.1. Апроксимація.....	42
2.1.1. Лінійна апроксимація	42
2.1.2. Квадратична апроксимація	43
2.2. Інтерполяція та її види	45
2.2.1. Лінійна інтерполяція	45
2.2.2. Кусочно-лінійна інтерполяція	46
2.2.3. Сплайн-інтерполяція	46
2.2.4. Квадратична інтерполяція	47
2.2.5. Кусочно-квадратична інтерполяція	47
2.2.6. Екстраполяція	48
2.3. Інтерполяційний поліном Лагранжа	48
2.4. Інтерполяційний поліном Ньютона	50
2.5. Метод найменших квадратів	51
2.6. Метод узагальнених логарифмічних характеристик	53

РОЗДІЛ 3. ПЕРВИННА ОБРОБКА СИГНАЛІВ КВАДРОКОПТЕРА ПО	
КАНАЛУ КРЕНА	57
3.1. Побудова кривих спектральних щільностей по каналу крену	59
3.2. Апроксимація логарифмічних кривих спектральних щільностей	64
Висновок до розділу	72
ВИСНОВКИ	73
СПИСОК БІБЛІОГРАФІЧНИХ ПОСИЛАНЬ ВИКОРИСТАНИХ	
ДЖЕРЕЛ.....	74

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ ТА СКОРОЧЕНЬ

VTOL – вертикальний зліт та посадка

«CW» – За часовою стрілкою

«CCW» – проти часової стрілки

БПЛА – безпілотні літальні апарати

ДМС – динамічне моделювання систем

GPS – глобальна система позиціонування

ESP – електронна система стабілізації

ВСТУП

Сучасні безпілотні літальні апарати (БПЛА) набувають все більшої популярності завдяки своїй універсальності та широкому спектру застосувань. Особливо виділяються мультикоптери, серед яких квадрокоптери, які стали найпоширенішими через їх простоту конструкції, високу маневреність та стабільність у польоті. Розвиток технологій управління квадрокоптерами потребує детального розуміння їх конструктивних особливостей, динамічних характеристик та методів моделювання.

Ця дипломна робота спрямована на вивчення та вдосконалення методів моделювання та обробки сигналів квадрокоптерів. Зокрема, буде досліджено напівнатурне моделювання, яке є важливим інструментом для тестування систем управління в умовах, наближених до реальних. Основна увага приділяється напівнатурному моделюванню, що дозволяє створювати віртуальні моделі та проводити їх тестування у контрольованих умовах, знижуючи ризики та витрати на експерименти.

У рамках дослідження буде також розглянуто використання сучасних алгоритмів машинного навчання для поліпшення обробки сигналів. Ці алгоритми можуть значно підвищити точність та швидкість аналізу даних, отриманих під час польоту квадрокоптера. Особлива увага буде приділена алгоритмам для розпізнавання та корекції помилок у сигналах, що виникають через зовнішні впливи або технічні несправності. Це допоможе підвищити стабільність та ефективність роботи системи управління.

В роботі буде проведено огляд різних видів БПЛА та мультикоптерів, їх типологію, конструктивні особливості та основні компоненти квадрокоптера. Це допоможе краще зрозуміти функціональні можливості та обмеження різних типів коптерів.

Кафедра АКСУ				НАУ 24.31.05.000 ПЗ			
<i>Виконав.</i>	<i>Грищук В.А.</i>			ВСТУП	<i>Літ.</i>	<i>Арк.</i>	<i>Архів</i>
<i>Керівник</i>	<i>Єрмолаєва О.В.</i>					8	74
<i>Консульт.</i>	.				151-403Б-СУ		
<i>Контрол.</i>	<i>Дивнич М.П.</i>						
<i>Зав. каф.</i>	<i>Мельник Ю.В.</i>						

Далі, буде розглянуто методи обробки даних, зокрема апроксимацію сигналів за допомогою інтерполяції, методу найменших квадратів та методу узагальнених логарифмічних характеристик. Ці методи є ключовими для аналізу сигналів, що виникають під час моделювання та експлуатації квадрокоптерів.

Розвиток програмного забезпечення та комп'ютерних технологій дозволяє створювати все більш складні моделі квадрокоптерів. Це відкриває нові можливості для проведення детального аналізу динамічних характеристик та удосконалення алгоритмів управління. Зокрема, моделювання аеродинамічних властивостей та впливу зовнішніх факторів на поведінку квадрокоптера є важливою частиною цього дослідження. Такі підходи дозволяють зменшити кількість реальних тестувань, зберігаючи ресурси та знижуючи ризики.

Особлива увага буде приділена обробці сигналів квадрокоптера по каналах крену. Будуть проаналізовані осцилограми вхідних та вихідних сигналів, а також їх спектральні щільності. Такий аналіз дозволяє оцінити динамічні характеристики системи управління квадрокоптера, визначити вплив різних факторів на її роботу та ефективність застосовуваних методів апроксимації.

Результати дослідження будуть представлені у вигляді графіків, що демонструють ручну та автоматичну апроксимацію сигналів, а також спектральні щільності та характеристики взаємної спектральної щільності вхід-вихід. Це дозволить візуалізувати та аналізувати динамічні процеси в системі управління квадрокоптера, виявити можливі недоліки та шляхи їх усунення.

Таким чином, ця дипломна робота спрямована на підвищення точності та надійності систем управління квадрокоптерів через вдосконалення методів моделювання та обробки сигналів. Отримані результати сприятимуть розвитку безпілотних технологій та їх впровадженню в різні галузі, підвищуючи ефективність та безпеку експлуатації БПЛА.

Результати роботи пройшли апробацію на конференції “Сучасні технології розробки комп'ютеризованих систем керування рухом”.

РОЗДІЛ 1

ОСНОВИ БЕЗПЛОТНИХ ЛІТАЛЬНИХ АПАРАТІВ ТА ЇХ МОДЕЛЮВАННЯ

В цьому розділі ми дослідимо різні види БПЛА та мультикоптерів, що набули значного поширення у сучасному світі. Розглянемо їх основні характеристики, конструктивні особливості та принципи роботи. Особлива увага буде приділена квадрокоптерам, які є найпоширенішим типом мультикоптерів завдяки своїй простоті та універсальності. Це дозволить зрозуміти ключові аспекти їх конструкції та функціонування.

Далі в розділі представлено типологію мультикоптерів, що включає різні види апаратів, їх класифікацію за кількістю роторів та інші конструктивні особливості. Будуть висвітлені різні типи коптерів, включаючи трікоптери, гексакоптери та октокоптери, та їх застосування у різних сферах. Ця інформація є важливою для розуміння різноманітності мультикоптерів та їхніх переваг у конкретних умовах.

Також розглядаються характеристики, компоненти та структура квадрокоптера. Ми детально аналізуємо основні елементи конструкції, такі як рама, двигуни, контролери та системи живлення. Розуміння цих компонентів є ключовим для налаштування та оптимізації роботи квадрокоптерів, що сприяє їх ефективному використанню в різних галузях.

Наприкінці розділу буде висвітлено натурне та напівнатурне моделювання, яке використовується для тестування та дослідження БПЛА в умовах, наближених до реальних. Розглянемо переваги та обмеження кожного підходу, а також їхню роль у процесі розробки та вдосконалення систем управління коптерами. Це допоможе зрозуміти, як ефективно використовувати ці методи для підвищення надійності та продуктивності безпілотних літальних апаратів.

Кафедра АКСУ				НАУ 24.31.05.000 ПЗ			
<i>Виконав.</i>	<i>Гришук В.А.</i>			Розділ 1. Основи безпілотних літальних апаратів та їх моделювання	<i>Літ.</i>	<i>Арк.</i>	<i>Аркушів</i>
<i>Керівник</i>	<i>Єрмолаєва О.В.</i>					10	74
<i>Консульт.</i>					151-403Б-СУ		
<i>Контрол.</i>	<i>Дивнич М.П.</i>						
<i>Зав. каф.</i>	<i>Мельник Ю.В.</i>						

1.1. Огляд БПЛА

У світі розвиваються технології з використанням дронів, які застосовуються в фактично всіх сферах життєдіяльності, включаючи сільське господарство, будівництво, логістику, розваги, охорону здоров'я, охорону навколишнього середовища, наукові дослідження, безпеку та військові операції. БПЛА важко класифікувати через їх різноманітні характеристики.

На сьогоднішній день виробники БПЛА не обмежені жодними стандартами. Авіаційні регулятори не встановили загальних вимог до обладнання дронів. Вони відрізняються за розмірами, функціональністю, дальністю польоту, вагою, типом зльоту, корисним навантаженням, спеціалізацією, рівнем автономності та іншими характеристиками.

Сучасні моделі дронів можуть мати як просту конструкцію, переважно призначену для розваг, так і складнішу, з можливістю розширення функціоналу в залежності від призначення.

Незважаючи на варіації у внутрішній будові дрона (мультикоптера), його основні компоненти залишаються незмінними. Зазвичай, до основних частин дрона належать рама, польотний контролер, двигуни, акумулятор, комунікаційний контролер та сенсори. Ці компоненти забезпечують стабільний політ, керованість та можливість виконання різноманітних завдань. Додаткові аксесуари можуть включати камери, GPS-модулі та системи уникнення перешкод.

Термін «безпілотний літальний апарат» охоплює як великі літаки, порівнянні за розмірами та складністю з пілотованими, так і невеликі електронні пристрої для особистого використання. Більшість малих дронів зазвичай поставляються готовими до польоту і можуть застосовуватися в багатьох сферах - від розваг до професійних напрямків, таких як інспекція інфраструктури, моніторинг навколишнього середовища та наукові дослідження.

З розвитком технологій дрони стають все більш доступними та

універсальними, що призводить до зростання їх застосування в різних галузях. Вони допомагають оптимізувати процеси, знижувати витрати та підвищувати ефективність у багатьох сферах, включаючи моніторинг врожаїв у сільському господарстві, проведення інспекцій у будівництві та забезпечення швидкої доставки у логістиці. Військові та безпекові структури також активно впроваджують дрони для розвідки та спостереження, що значно розширює можливості збору даних і підвищує оперативність прийняття рішень.

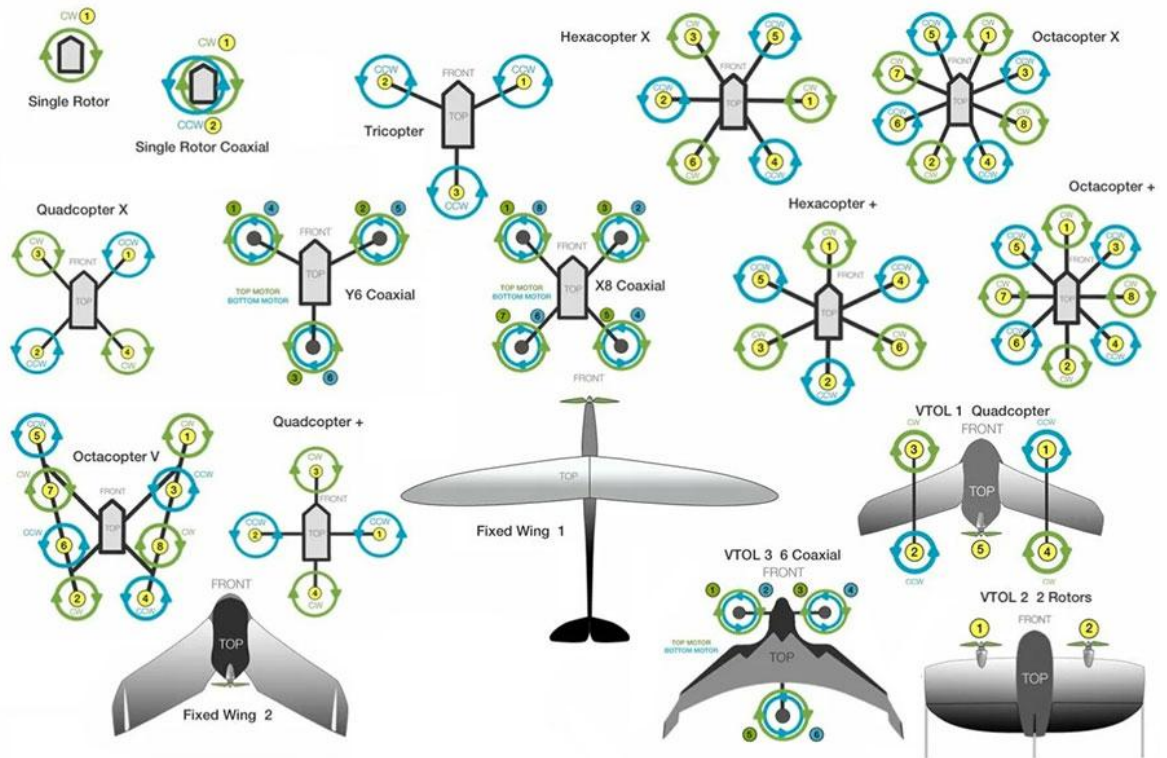


Рис. 1. Різновиди конструкцій дронів за типом роторів та крил.

Мультикоптер є безпілотним літальним апаратом вертолітного типу, який має два або більше електродвигунів із пропелерами. Завдяки цьому баланс реактивних моментів досягається шляхом попарного протилежного обертання несучих гвинтів. Завдяки своїй конструкції мультикоптери здатні забезпечувати стабільний політ і високу маневреність навіть у складних умовах..

Мультикоптери зазвичай мають симетричну конструкцію, де кожен ротор відповідає за створення підйомної сили, а також за управління рухом і стабілізацію апарату. Основними елементами мультикоптера є рама, на якій кріпляться двигуни, ротори, контролер польоту, акумулятори, та інші електронні компоненти, що забезпечують його функціонування.

Перевагою мультикоптерів є їхня здатність до вертикального зльоту і посадки (VTOL), що робить їх ідеальними для використання у міських умовах та на обмежених просторах. Вони можуть нести різноманітні корисні навантаження, включаючи камери, сенсори, та інше обладнання, що дозволяє використовувати їх у різних галузях, таких як аерофотозйомка, картографія, моніторинг, доставка вантажів, рятувальні операції та багато інших.

У мультикоптерів підйомна сила формується шляхом обертання лопатей пропелерів, які є головними джерелами тяги, натомість крила грають відносно вторинну роль. Здатність мультикоптерів залишатися у повітрі на місці і виконувати різноманітні маневри є очевидною перевагою цього типу безпілотних літальних апаратів. Додатковою перевагою є те, що для їх запуску не потрібні спеціально обладнані аеродроми.

Мультикоптери також можуть бути обладнані різними системами навігації та автопілотами, що дозволяє їм виконувати складні місії з високою точністю. Сучасні моделі мають вбудовані системи уникнення перешкод та стабілізації, що забезпечує безпечний та ефективний політ.

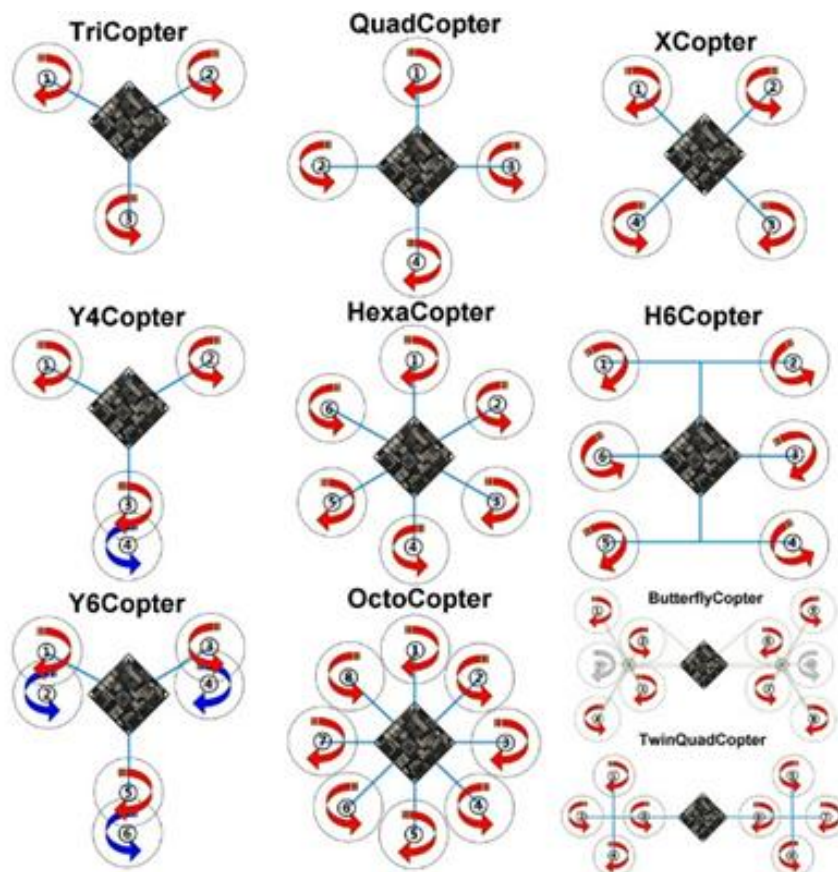


Рис. 2. Різноманітність мультикоптерів за конфігурацією та кількістю роторів.

1.2. Типологія та види мультикоптерів

Класифікація мультикоптерів за тактико-технічними характеристиками є надзвичайно важливою, оскільки вона значно полегшує роботу в майже всіх галузях. За призначенням мультикоптери поділяються на:

- аматорські, які використовуються для фото- та відеозйомки;
- комерційні, призначені для доставки пошти або різних товарів;
- наукові, призначені для вивчення різних об'єктів або збирання інформації;
- атмосферні, використовувані для проведення астрономічних або метеорологічних спостережень;
- військові або для силових структур, призначені для патрулювання прикордонних зон або військових дій.



Рис. 3. Різновиди мультикоптерів за призначенням

Відповідно до ваги та діапазону застосування, безпілотні літальні апарати можуть мати різні розміри. Вони можуть починати від дрібних мікрокоптерів, які важать менше 10 кілограмів і працюють у неподаліку від оператора, і закінчувати великими моделями, які можуть літати на висоту 20 кілометрів та перебувати в повітрі протягом 24 годин:

- мікро- та міні-мультикоптери мають масу менше 4 кг і можуть віддалятися від оператора на відстань до 30-40 км;

- легкі (або малі) мультикоптери важать до 100 кг і здатні літати на відстань до 120 км;
- середні мультикоптери мають масу до 310 кг і можуть перебувати на відстані до 1100 км від оператора;
- середньотяжкі мультикоптери важать до 500 кг і здатні літати на відстань до 2000 км;
- важкі мультикоптери мають масу понад 500 кг і можуть віддалятися від оператора на відстань до 3000 км, при цьому вони здатні перебувати в повітрі тривалий час.

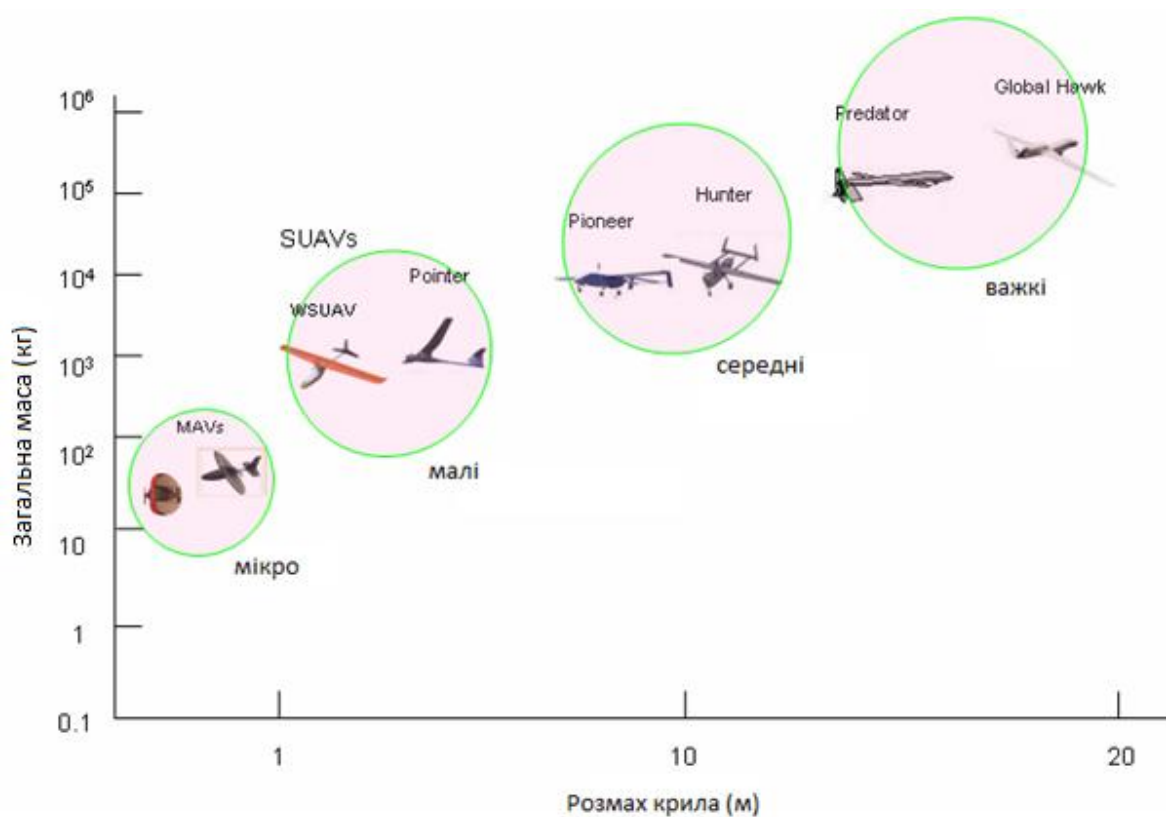


Рис. 4. Класифікація мультикоптерів за масою

Зважаючи на розмір рами, мультикоптери можна класифікувати на різні категорії, що відображають їхні функціональні можливості та призначення:

- мікро- і міні-клас мають довжину рами менше 250 мм і використовуються переважно для аматорських цілей;
- мультикоптери з рамою від 250 до 350 мм можуть бути оснащені фото- або відеокамерою і здатні розвивати значну швидкість;
- моделі з розміром рами від 350 до 450 мм можуть піднімати

обладнання, достатнє для проведення прямих відеотрансляцій;

- рами від 450 до 550 мм часто використовуються для бізнесу та доставки різних товарів;
- мультикоптери з рамою від 550 до 750 мм застосовуються переважно для наукової діяльності, оскільки можуть нести на борту значну кількість дослідницького обладнання;
- мультикоптери з рамою понад 750 мм належать до важкого класу і здатні виконувати військові завдання.

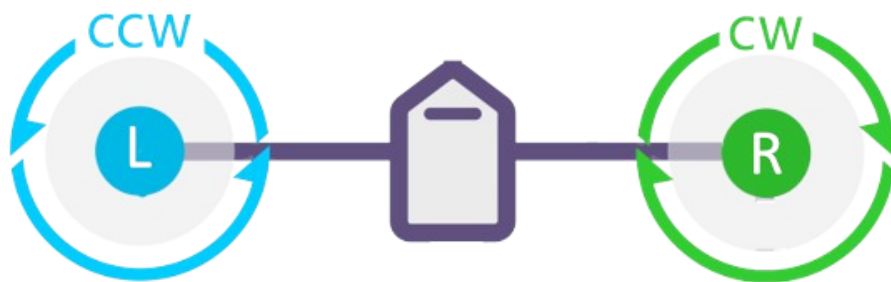
Таке розподілення за розмірами рами дозволяє краще зрозуміти можливості та обмеження різних мультикоптерів. Кожна категорія має свої унікальні характеристики, що визначають їх застосування у різних галузях. Мікро- і міні-коптери ідеально підходять для розваг та навчання, тоді як більші моделі здатні виконувати складніші завдання, від професійної аерозйомки до наукових досліджень і військових операцій. Важкі мультикоптери з великою рамою, наприклад, можуть нести високотехнологічне обладнання для збору даних або виконання спеціальних місій. Розуміння цих категорій допомагає обрати відповідний мультикоптер для конкретних потреб, забезпечуючи ефективність та надійність його використання.



Рис. 5. Варіації мультикоптерів за розміром рами

Мультикоптери можна розділити на різні типи в залежності від кількості двигунів, які керують гвинтами. У цій класифікації можуть бути як парні, так і непарні кількості гвинтів з окремим двигуном для кожного. Зазвичай, половина гвинтів працює у напрямку за годинниковою стрілкою, а решта - проти. Гвинти можуть бути розташовані по одному на кожен двигун або бути коаксіальними, тобто по два гвинти на кожен двигун.

- 1) Бікоптери, наприклад, мають лише два мотори, які обертаються у протилежних напрямках для компенсації обертального моменту. Головними перевагами таких моделей є їхня відносна простота конструкції, доступність та ефективність. Крім того, бікоптери мають найменший рівень шуму під час польоту. Зазвичай ці апарати використовуються у моделізмі серед любителів спорту.



БІКОПТЕР

Рис. 6. Схема бікоптера з позначенням напрямку обертання роторів

Бікоптер має два ротори, розташовані на кінцях горизонтальної балки. Один мотор обертається за годинниковою стрілкою (CW), а інший — проти годинникової стрілки (CCW), що допомагає стабілізувати дрон та компенсувати обертальний момент. Керування нахилом здійснюється за рахунок зміни швидкості обертання роторів. Завдяки такій конфігурації бікоптери є більш компактними та мають простішу конструкцію порівняно з іншими типами мультикоптерів. Однак, через меншу кількість роторів, їм потрібні більш точні

системи управління для забезпечення стабільного польоту.



Рис. 7. Вигляд представника бікоптера

2) Трікоптери мають три мотори, які також обертаються в різних напрямках для компенсації обертального моменту. Конструкція рами трікоптера дозволяє поєднувати переваги гвинтокрила і літака, що поліпшує його польотні характеристики порівняно з квадрокоптером. Ці моделі мультикоптерів відомі серед моделістів через їхню маневреність та універсальність.

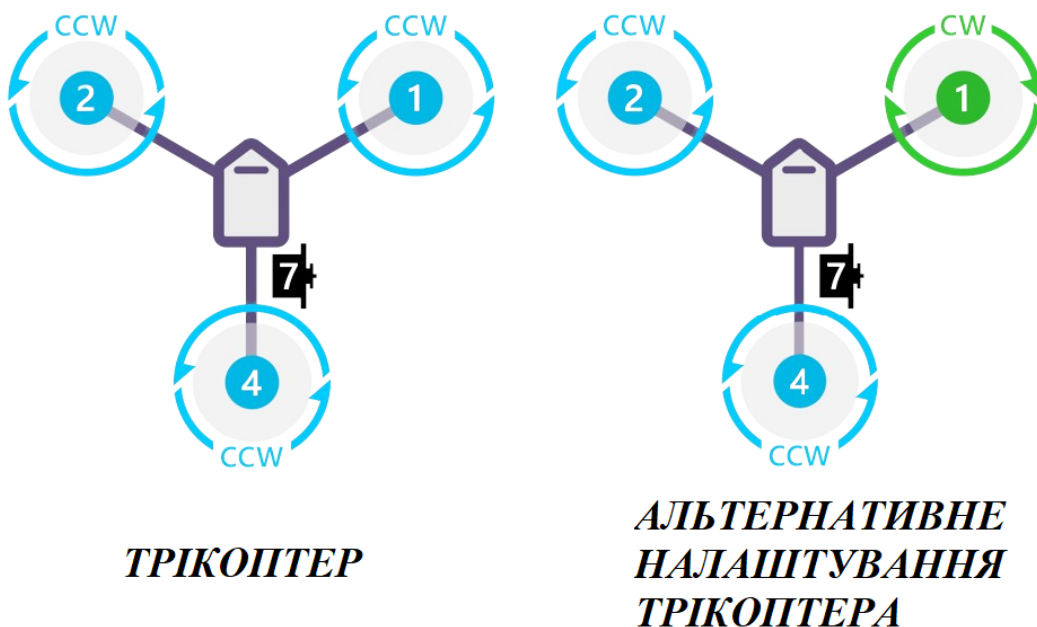


Рис. 8. Схеми трікоптерів з позначенням напрямку обертання роторів

Стандартний трікоптер має три мотори, розташовані у вигляді трикутника, які обертаються проти годинникової стрілки (CCW). Ця

конфігурація вимагає додаткових методів управління для компенсації обертального моменту і забезпечення стабільності та маневреності. Стабільність досягається за рахунок зміни швидкості обертання моторів і нахилу одного з моторів для корекції положення та напрямку польоту. У цьому випадку всі мотори обертаються в одному напрямку, що спрощує конструкцію, але потребує додаткових алгоритмів для корекції польоту.

Трікоптер з альтернативним налаштуванням також має три мотори, розташовані у вигляді трикутника. Два мотори обертаються проти годинникової стрілки (CCW), а один мотор обертається за годинниковою стрілкою (CW). Така конфігурація забезпечує природне скасування обертального моменту між роторами, що сприяє стабільності та маневреності. Використання ротора, що обертається за годинниковою стрілкою, дозволяє досягти кращого балансу та спрощує керування апаратом.

Узагальнюючи, трікоптери є ефективними та маневреними безпілотними літальними апаратами завдяки своїй унікальній трикутній конфігурації. Вони пропонують баланс між простотою конструкції та складністю управління, що дозволяє використовувати їх у різних сценаріях. Незалежно від обраної конфігурації моторів, трікоптери демонструють високу стабільність і здатність до виконання складних маневрів, що робить їх популярними в багатьох сферах застосування.



Рис. 9. Вигляд представника трікоптера

- 3) Квадрокоптери - це безпілотники з чотирма роторами, які відрізняються високою автономністю та можливістю перенесення вантажів. Завдяки їхній конструкції, дрони мають менше схильність до вібрацій, що робить їх популярними для зйомки з повітря. Однак основним недоліком є те, що відмова хоча б одного двигуна може призвести до падіння апарата. Такі квадрокоптери є оптимальним вибором для використання в різноманітних прикладних цілях завдяки своїй доступності та надійності.

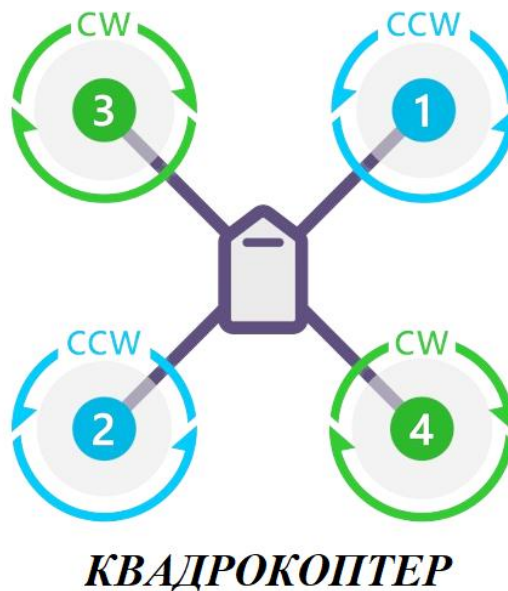


Рис. 10. Схема квадрокоптера з позначенням напрямку обертання роторів

Квадрокоптер має чотири мотори, розташовані у вигляді хреста. Конфігурація обертання роторів є наступною: два мотори обертаються за годинниковою стрілкою (CW), а два — проти годинникової стрілки (CCW). Це

дозволяє дрону стабілізуватися в польоті та виконувати різні маневри, змінюючи швидкість обертання роторів. Завдяки такій конфігурації, квадрокоптер може легко коригувати своє положення і напрямок польоту, забезпечуючи високу точність і керованість. Крім того, цей дизайн сприяє рівномірному розподілу навантаження між моторами, підвищуючи загальну ефективність і надійність дрона. Завдяки гнучкості конфігурації, квадрокоптери можуть бути адаптовані до різних умов польоту та завдань, що робить їх універсальними та ефективними засобами для різноманітних застосувань. Також, ця архітектура дозволяє вдосконалювати дрони шляхом впровадження нових технологій та покращень у дизайні, що сприяє постійному розвитку та удосконаленню цих безпілотних систем.



Рис. 11. Вигляд представника квадрокоптера

- 4) Гексакоптери — шестироторні безпілотники, які є більш надійними і дорожчими порівняно з квадрокоптерами. Великою перевагою цих апаратів є відмовостійкість — у разі поломки одного двигуна вони здатні продовжувати політ на уцілілих двигунах. Гексакоптери широко використовуються для професійної відео- та фотозйомки завдяки своїй стабільності та надійності.

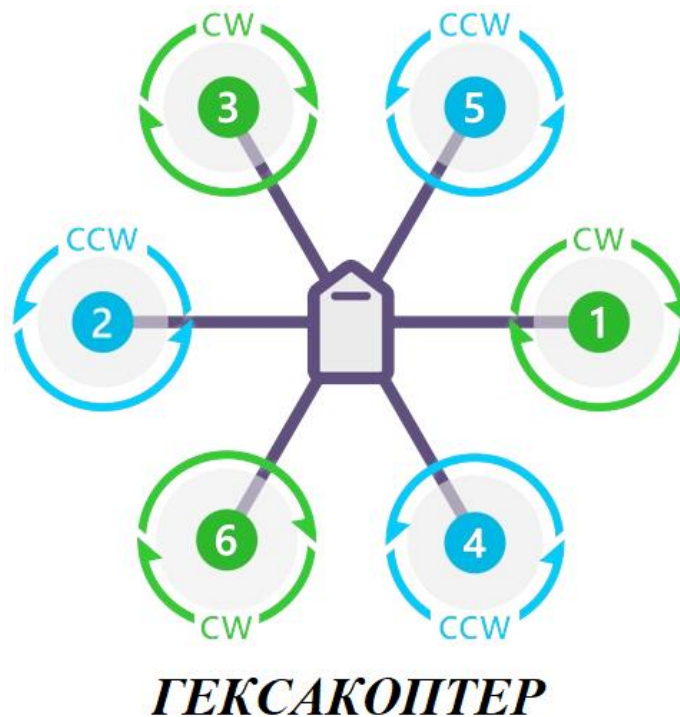


Рис. 12. Схема гексакоптера з позначенням напрямку обертання роторів

Гексакоптер має шість моторів, розташованих у формі гексагона. Конфігурація обертання роторів така: перший, третій і шостий мотори обертаються за годинниковою стрілкою (CW), тоді як другий, четвертий і п'ятий мотори обертаються проти годинникової стрілки (CCW). Це конструктивне рішення дозволяє гексакоптеру забезпечити стабільний політ і виконувати різноманітні маневри. Завдяки цій конфігурації, гексакоптер може ефективно коригувати своє положення і напрямок польоту, забезпечуючи точну керуваність і стабільність в різних умовах. Крім того, такий дизайн сприяє рівномірному розподілу навантаження між моторами, що підвищує ефективність і надійність гексакоптера. Розташування моторів у вигляді пар напроти (1-2, 3-4, 5-6) також сприяє збалансованому рухові простору і дозволяє оптимізувати роботу кожного ротора для забезпечення максимальної продуктивності і маневреності гексакоптера.

Завдяки своїй структурі, гексакоптер має перевагу в умовах високих навантажень та несприятливих погодних умов. Він здатен не лише піднімати важчі вантажі, але й забезпечувати плавний політ, навіть якщо один з моторів виходить з ладу. Ця особливість робить гексакоптери привабливими для

професійного використання, зокрема в сфері аерофотозйомки, логістики та рятувальних операцій.



Рис. 13. Вигляд представника гексакоптера

- 5) Октокоптери — восьмироготорні безпілотники, які є ще більш надійними та дорожчими, ніж гексакоптери. Завдяки більшій кількості двигунів, ці апарати мають високу стабільність у польоті та можуть нести важчі вантажі. Вони також здатні до аварійного планування в разі відмови одного чи декількох двигунів. Октокоптери використовуються для важких професійних задач, включаючи кінематографічну зйомку та інспекцію великих об'єктів.

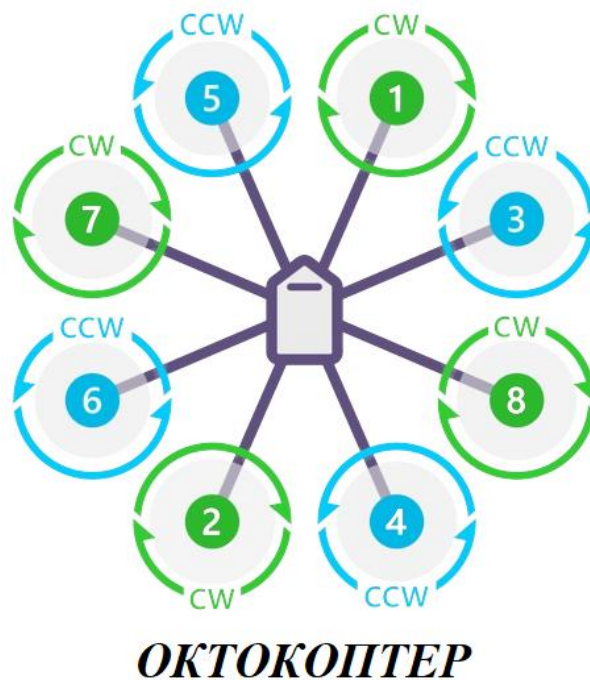


Рис. 14. Схема октокоптера з позначенням напрямку обертання роторів

Октокоптер має вісім моторів, розташованих у формі октагона. Конфігурація обертання роторів така: перший, другий, сьомий і восьмий мотори обертаються за годинниковою стрілкою (CW), тоді як третій, четвертий, п'ятий і шостий мотори обертаються проти годинникової стрілки (CCW). Така конструкція забезпечує виняткову стабільність польоту і дозволяє октокоптеру виконувати більш складні маневри. Завдяки більшій кількості моторів, октокоптер може піднімати важчі вантажі, що робить його ідеальним для професійного використання в рятувальних операціях, інспекції та кінематографії. Розташування моторів у вигляді пар напроти (1-2, 3-6, 4-5, 7-8) сприяє рівномірному розподілу тяги і поліпшеній стабільності, що дозволяє оптимізувати продуктивність і маневреність октокоптера в різних умовах. Таким чином, октокоптер є одним з найбільш надійних та потужних безпілотних апаратів, доступних на ринку.



Рис. 15. Вигляд представника октокоптера

- б) Багатороторні мультикоптери з більш ніж вісьмома моторами створюються для підвищення надійності, маневреності та стабілізації. Літальні апарати цієї категорії мають значно вищу ціну в порівнянні з іншими типами мультикоптерів і призначені для виконання спеціальних завдань. Вони також забезпечують високу стабільність у складних погодних умовах, що є критичним для рятувальних операцій та інспекцій інфраструктури. Завдяки своїй конструкції, ці дрони можуть виконувати польоти з більшою тривалістю і дальністю. Це робить їх

незамінними у ситуаціях, де потрібна висока надійність і продуктивність.



Рис. 16. Вигляд представника багатороторного мультикоптера

1.3. Характеристики, компоненти та структура квадрокоптера

У сучасному світі, дрони можуть мати різноманітні дизайни: від простих моделей, що призначені переважно для розваг, до складних конструкцій з рядом функціональних складових, які здатні перетворити ці літальні апарати в вузькоспеціалізовані пристрої.

У цьому дослідженні детально розглянемо безпілотний літальний апарат типу "квадрокоптер". Обираючи квадрокоптер для даної роботи, я вибирав з його високих показників стабільності, керованості та доступної ціни. Завдяки своїй конструкції, квадрокоптер є оптимальним рішенням для аерофотозйомки, відеозйомки та інших прикладних завдань. Висока точність і легкість управління роблять його популярним вибором серед аматорів і професіоналів.

Плюси квадрокоптера:

- Стабільність і точність керування: Завдяки конструкції з чотирма роторами, квадрокоптер має високу стабільність в польоті. Це дозволяє йому зберігати рівновагу навіть при зміні погодних умов і виконанні

складних маневрів.

- Маневреність: Конфігурація обертання роторів (два CW і два CCW) дозволяє дрону швидко змінювати напрямок руху, підвищуючи його маневреність і здатність виконувати складні траєкторії.
- Простота конструкції: Завдяки простоті конструкції, квадрокоптер легше ремонтувати і обслуговувати, що підвищує його надійність і знижує витрати на утримання.

Мінуси квадрокоптера

- Залежність від всіх двигунів: Якщо один з чотирьох двигунів виходить з ладу, квадрокоптер втрачає стабільність і може впасти, що обмежує його надійність в порівнянні з БПЛА з більшою кількістю роторів.
- Обмежена вантажопідйомність: Через обмеження конструкції, квадрокоптери мають меншу вантажопідйомність, що може обмежувати їх використання для перевезення важких вантажів.

Незважаючи на деякі обмеження, переваги квадрокоптера значно переважають його недоліки, що робить його оптимальним вибором для даної роботи.

Хоча внутрішня будова кожного квадрокоптера може варіюватися від моделі до моделі, проте його основні компоненти завжди залишаються сталими. Узагальнено, кожен дрон може бути розглянутий як сукупність наступних елементів:

1. Рама
2. Двигуни
3. Регулятори обертів
4. Пропелери
5. Польотний контролер

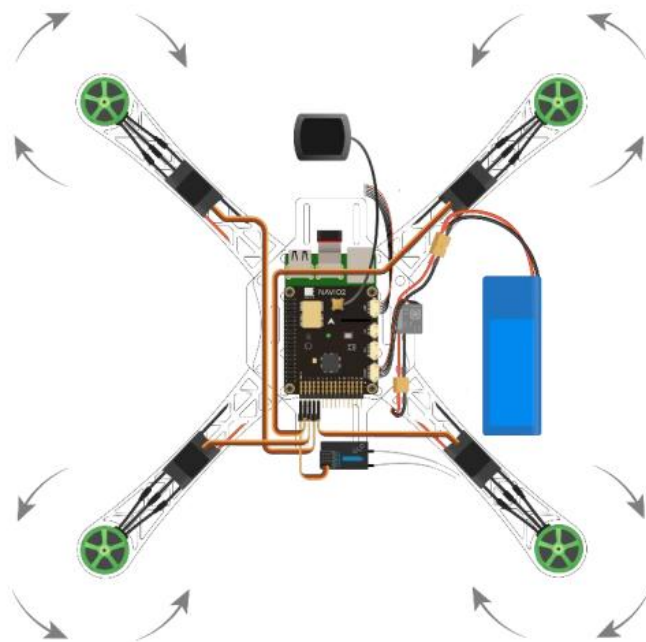


Рис. 17. Стандартна будова квадрокоптера

Базовим елементом дрона є його рама, до якої прикріплюються всі інші компоненти. Головне завдання при створенні рами - забезпечити легкий, міцний, довговічний і ергономічний корпус. Використання легких матеріалів дозволяє дрону розвивати максимальну швидкість за короткий час. Для досягнення легкості та міцності використовуються полімери, легкі сплави, карбон та скловолокно. Зазвичай, більша маневреність і легкість досягаються за допомогою складних рам, що складаються з багатьох деталей. Для зручності монтажу електропроводки рама має конструктивні отвори, які забезпечують з'єднання пролітного контролера з усіма іншими компонентами дрона.



Рис. 18. Рама для квадрокоптера

Технічні характеристики:

Таблиця 1

Модель	F450
Матеріал лучів	Високопрочний пластик
Матеріал центральної бази та кріплення моторів	Скловолокно
Вага	Вага: 290 г
Розміри	Відстань між протилежними осями моторів 455 мм
Схеми складання	Можливість складання за схемою X (ікс) або + (плюс)
Колір	Червоний + білий

Квадрокоптер складається з чотирьох двигунів, кожен з яких оснащений пропелером, що забезпечує рух. Швидкість обертання пропелерів контролюється регуляторами обертів, які відповідають на команди, що надходять від польотного контролера, для регулювання руху квадрокоптера. Польотний контролер також обробляє дані з різних датчиків, таких як акселерометри та гіроскопи, для підтримання стабільності та керованості апарата. Це дозволяє квадрокоптеру виконувати складні маневри та утримувати

задану позицію в просторі.



Рис. 19. Зовнішній вигляд пропелерів

Технічні характеристики:

Таблиця 2

Тип	1045 CW/CCW (пряме та зворотне обертання)
Колір	Чорний
Діаметр посадкового отвору	M6 з ключем під DJI мотори (в комплекті адаптери M5 та інші)
Розмір	10x4.5"
Застосування	Підходять для рам квадрокоптерів DJI 450, 550, DJI Phantom. Використовуються з моторами з посадковим ключем.

Пропелери для квадрокоптерів виготовляються з легких, але міцних матеріалів, що забезпечує оптимальну ефективність і довговічність. Їхня форма та розмір розроблені для максимального зчеплення з повітрям, що сприяє стабільному польоту і маневреності. Використання різних типів пропелерів (CW/CCW) дозволяє компенсувати обертальний момент і підтримувати баланс апарата під час польоту.



Рис. 20. Зовнішній вигляд безколекторного двигуна

Технічні характеристики:

Таблиця 3

Тип	Тип: 2212 920KV
Напруга живлення	2S-4S (4S тільки з 9 дюймовими пропелерами)
Обороти на вольт (KV)	920
Максимальна потужність	165W
Матеріал	Алюміній 6063 з ламінуванням JFE
Діаметр і висота	28 мм x 24 мм (без урахування валу)
Вага	51 г
Діаметр валу кріплення пропелера	M6 з посадковим ключем для пропелерів типу DJI

Пропелери та двигуни підібрані так, щоб забезпечити оптимальну продуктивність і стабільність польоту. Зібрані разом, ці компоненти створюють ефективну і надійну систему для керування квадрокоптером.



Рис. 21. Зовнішній вигляд зібраного двигуна із пропелером

Найбільш зношуваними складовими дрона є його пропелери та двигуни, оскільки під час польоту вони несуть основне навантаження. Часто під час аварій першими пошкоджуються саме пропелери, які є вразливими частинами конструкції. Ця проблема може бути вирішена за допомогою установки захисних дуг або кожухів.

Основою функціонування дрона є його польотний контролер, який взаємодіє з сигналами, отриманими від оператора через пульт керування та вбудовані датчики. Гнучкість і можливості дрона визначаються його здатністю обробляти широкий спектр вхідних сигналів. Кожен з чотирьох двигунів з'єднаний з контролером за допомогою певних з'єднувальних механізмів, що дозволяє передавати їм сигнали у вигляді заздалегідь запрограмованих команд.

Ці запрограмовані команди забезпечують точне керування швидкістю обертання пропелерів, що необхідно для стабільного польоту та маневреності дрона. Датчики, розташовані на дроні, постійно передають інформацію про його положення та рух, дозволяючи польотному контролеру коригувати траєкторію у режимі реального часу. Така інтеграція різних систем забезпечує високу надійність та ефективність роботи дрона у різних умовах. Це особливо важливо для виконання складних завдань. Завдяки цим технологіям, дрон може успішно працювати навіть в умовах сильного вітру або складної місцевості.

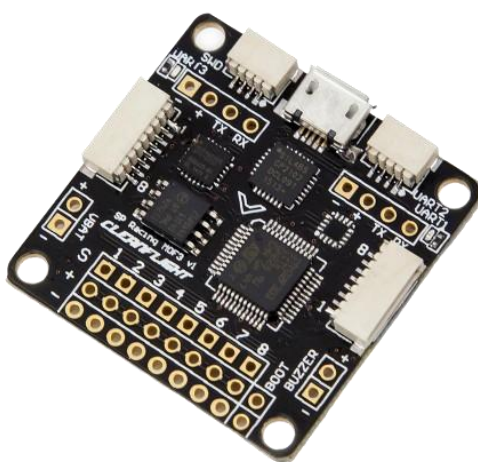


Рис. 22. Контролер польоту

Модель	SP Racing F3
Процесор	ARM Cortex-M4 72Mhz CPU з Math співпроцесором (FPU)
Функції	OSD, SmartPort, SBus, LED Strip, Battery Monitoring, Sonar, 8 моторів
Налаштування	Через CleanFlight (Windows/OSX/Linux)
Розміри	Розміри: 36x36 мм плата з 30.5 мм монтажними отворами
Вага	Вага: ~6 г
Датчик акселерометра/гіроскопа	Датчик акселерометра/гіроскопа: MPU6050
Роз'єми	MicroUSB, 2x 8pin JST-SH сокети, 8x 3pin отвори для контактів ESC/Servo, 2x 4pin отвори для серійних портів, 1x 2pin отвори для батареї, 1x 2pin отвори для звукового сигналу, 1x 4pin JST-SH сокет для I2C, 1x 4pin JST-SH сокет для SWD налагодження

Для забезпечення стабільності роботи польотного контролера при розробці дронів використовуються методи віброізоляції, які дозволяють ефективно відокремити елементи управління від вібрацій, що можуть впливати на точність керування польотом. Тому на сучасний день виробляються дрони з високою віброізоляцією. Зазвичай, чим краще віброізолюваний контролер, тим більш стабільним буде польот дрона.

Польотний контролер складається з різних комплектів датчиків, таких як GPS, лазерний дальномір, барометр, гіроскоп, акселерометр, лідар та інші, які передають йому свої вимірювання. За допомогою передавача, що встановлений на корпусі, здійснюється зворотний зв'язок. Оператор встановлює параметри польоту дрона в залежності від вимірювань різних датчиків.

Після збору всіх основних компонентів, квадрокоптер набуває свого кінцевого вигляду. У цьому проекті зібраний квадрокоптер спеціально налаштований для поканальної обробки сигналів крену, що дозволяє підтримувати стабільність і точність польоту навіть у складних умовах. Це

забезпечує ефективне виконання завдань з високою точністю і надійністю. Висока стабільність і маневреність роблять його ідеальним інструментом для наукових досліджень, технічних оглядів та інших спеціалізованих завдань.



Рис. 23. Вигляд зібраного квадрокоптера для поканальної обробки сигналів крену

Цей квадрокоптер був зібраний з використанням спеціалізованих компонентів для досягнення максимальної продуктивності в умовах реального середовища. Програмовані контролери забезпечують гнучкість у налаштуваннях, дозволяючи швидко адаптуватися до різних польотних завдань. Така модульна система дозволяє легко замінювати та оновлювати компоненти в міру потреби, що підвищує загальну надійність і довговічність апарата.

Додатково, квадрокоптер оснащений системою реального часу для моніторингу та аналізу польотних даних, що дозволяє миттєво реагувати на будь-які зміни в умовах польоту. Це включає можливість автоматичного коригування курсу і висоти для збереження стабільності. Він є відмінним вибором для проведення наукових експериментів, технічних інспекцій та інших професійних завдань, що вимагають високого рівня надійності і точності.

1.4. Натурне та напівнатурне моделювання

Натурне моделювання (реальне моделювання) – це метод дослідження, який використовує реальні об'єкти та умови для тестування і аналізу систем. Цей підхід дозволяє отримувати точні дані про поведінку системи в реальних умовах експлуатації. Основними перевагами натурального моделювання є висока точність результатів і можливість оцінки роботи системи в реальних умовах. Проте цей метод може бути дорогим і небезпечним, особливо при випробуванні нових або складних систем.

Натурне моделювання передбачає використання реальних об'єктів або повномасштабних моделей для відтворення умов, максимально наближених до реальних експлуатаційних умов. Такий підхід дозволяє оцінити поведінку системи в різних ситуаціях і визначити її надійність, ефективність та безпеку.

Однією з головних переваг натурального моделювання є його висока точність. Оскільки тестування проводиться з використанням реальних об'єктів та умов, результати таких експериментів відображають реальну поведінку системи, що дозволяє зробити обґрунтовані висновки про її функціонування. Наприклад, при тестуванні аеродинамічних характеристик літака, використання натурального моделювання дозволяє отримати точні дані про опір повітря, підйомну силу та інші важливі параметри.

Можливість оцінки роботи системи в реальних умовах є ще однією важливою перевагою натурального моделювання. Це дозволяє інженерам та дослідникам виявляти проблеми та недоліки, які можуть виникнути під час експлуатації системи, та вживати заходів для їх усунення. Наприклад, при тестуванні автомобільних систем безпеки, таких як системи антиблокування гальм (ABS) або системи стабілізації (ESP), натурне моделювання дозволяє оцінити їх ефективність в різних дорожніх умовах.

Незважаючи на значні переваги, натурне моделювання має і деякі недоліки. Одним з основних є висока вартість. Проведення експериментів з використанням реальних об'єктів та умов потребує значних фінансових витрат, що може бути неприйнятним для деяких проектів або організацій. Наприклад,

тестування нових авіаційних систем або великих інженерних конструкцій може вимагати мільйони доларів.

Ще одним важливим аспектом є безпека. Проведення експериментів з реальними об'єктами та умовами може бути небезпечним, особливо при випробуванні нових або складних систем. Наприклад, тестування нових прототипів автомобілів або військової техніки може призвести до аварій або інших небезпечних ситуацій.

Нарешті, натурне моделювання може бути обмежене часом та ресурсами. Проведення експериментів в реальних умовах потребує значного часу та ресурсів, що може затримати процес розробки та впровадження нових технологій. Наприклад, тестування нових матеріалів або конструкцій в екстремальних умовах, таких як високі температури або сильні вітри, може зайняти багато часу та вимагати спеціального обладнання.

В галузі авіації натурне моделювання використовується для тестування літаків та їх компонентів. Наприклад, випробування нових двигунів або аеродинамічних поверхонь проводяться на спеціальних тестових стендах або в аеродинамічних трубах. Такі експерименти дозволяють отримати точні дані про ефективність та надійність нових технологій перед їх впровадженням у серійне виробництво.

Натурне моделювання є важливим інструментом для дослідження та тестування складних технічних систем. Незважаючи на високу вартість та ризики, пов'язані з цим методом, його використання дозволяє отримати точні та достовірні дані про поведінку системи в реальних умовах. Це забезпечує високу якість та надійність розроблюваних технологій, що є ключовим фактором для їх успішного впровадження та експлуатації. У майбутньому вдосконалення технологій та зниження витрат на натурне моделювання можуть зробити цей метод доступнішим для більшої кількості дослідницьких проектів. Крім того, інтеграція натурального моделювання з комп'ютерним моделюванням може покращити точність і ефективність процесу тестування.

Напівнатурне моделювання (або стендове моделювання) – це підхід, при якому частина системи моделюється, а інша частина є реальною. В цьому процесі поєднуються реальна апаратура та імітатори впливів і завад, моделі зовнішнього середовища та процесів, точний математичний опис яких може бути невідомий або складний. Такий підхід дозволяє вдало поєднати переваги як математичного, так і натурального моделювання, забезпечуючи оптимальну взаємодію між обчислювальними та натурними експериментами.

Переваги напівнатурного моделювання:

- Зниження витрат: Менше затрат на розробку та тестування порівняно з натурним моделюванням.
- Підвищена безпека: Можливість тестування в контрольованих умовах зменшує ризики, пов'язані з реальними випробуваннями.
- Гнучкість: Можливість моделювання різних умов і сценаріїв без потреби у повній реконструкції тестової системи.
- Точність: Можливість комбінування реальних даних з результатами математичних моделей для досягнення більшої точності.
- Повторюваність: Можливість проведення однакових експериментів кілька разів для отримання достовірних і відтворюваних результатів.

Напівнатурне моделювання дозволяє проводити експерименти, які важко або небезпечно виконати у реальних умовах. Наприклад, тестування систем безпеки автомобілів чи аерокосмічних технологій можна здійснити з використанням реальних компонентів в умовах, що наближені до реальних, без ризику для людей. Це допомагає ефективніше виявляти потенційні проблеми та вирішувати їх на ранніх етапах розробки.

Цей метод дає змогу проводити випробування на ранніх стадіях розробки, що дозволяє виявити можливі недоліки та несправності до виготовлення кінцевого продукту. Розробники можуть оперативно вносити зміни та оптимізувати конструкцію, не витрачаючи значні кошти і час на виробництво. Це сприяє підвищенню якості кінцевих продуктів.

Важливою перевагою є можливість тестування системи в різних умовах експлуатації, включаючи екстремальні ситуації. Наприклад, поведінка квадрокоптера під час сильного вітру або при відмові одного з моторів може бути змодельована без ризику пошкодження реального обладнання. Це розширює можливості для дослідження та підвищення надійності системи.

Напівнатурне моделювання дозволяє проводити повторювані експерименти з однаковими умовами, що є критично важливим для отримання достовірних результатів. Це особливо корисно в наукових дослідженнях, де необхідно точно виміряти вплив певних параметрів на систему. Такий підхід дозволяє глибше дослідити вплив різних змінних і краще розуміти процеси в системі.

Серед недоліків цієї методології можна відзначити складнощі з передачею даних. Для ідентифікації цілі на приймальному кінці необхідно аналізувати весь потік даних без їх зменшення, що може призводити до зайвих витрат і використання каналу передачі без необхідності. Ці проблеми посилюються з розвитком Інтернету речей та підключених пристроїв. Крім того, обробка великої кількості даних вимагає значних обчислювальних ресурсів, що може уповільнити процес аналізу і реагування. Це особливо критично у випадках, коли необхідна негайна реакція на зміни в системі. Також, висока складність передачі та обробки даних може призвести до зниження точності і надійності результатів експериментів.

Узагальнюючи, напівнатурне моделювання є ефективним інструментом для дослідження та вдосконалення складних систем. Воно дозволяє проводити безпечні та економічно ефективні випробування, виявляти та усувати проблеми на ранніх стадіях розробки, а також забезпечує повторюваність експериментів. Хоча метод має певні обмеження, пов'язані з обробкою та передачею даних, його переваги значно переважають, роблячи його незамінним у сучасних інженерних та наукових дослідженнях.



Рис. 24. Головні елементи системи напівнатурного моделювання

Компоненти схеми:

- Випробувальний стенд (ВС) – платформа для розміщення досліджуваного об'єкта (наприклад, квадрокоптера або його компонентів).
- Досліджуваний об'єкт (ДСО) – включає реальні компоненти, такі як сервоприводи, підсилювачі, частотні перетворювачі тощо.
- Підсистема інформаційних датчиків (ПІД) – збирає дані з датчиків для подальшої обробки.
- Контролер управління експериментом (КУЕ) – керує процесом експерименту та забезпечує взаємодію між компонентами системи.
- Людино-машинний інтерфейс (ЛМІ) – забезпечує взаємодію оператора з системою.
- Вимірювальні і перетворюючі схеми (ВМС) – містять аналого-цифрові та цифро-аналогові перетворювачі для введення і виведення даних.
- Комп'ютер (Комп) – містить програмне забезпечення для моделювання, операційну систему, пакет прикладних програм, підсистему навчання та підтримки цілісності системи.

Система працює наступним чином: контролер управління експериментом створює моделі об'єктів, які потім передаються через випробувальний стенд на об'єкт дослідження, де знаходяться різні датчики. Це створює умови для роботи системи та дозволяє експериментатору працювати. Після цього дані через контролер управління експериментом повертаються на комп'ютер для аналізу. КУЕ видає управляючі сигнали, які надходять на всі блоки системи згідно з алгоритмом взаємодії блоків. Випробувальний стенд отримує збурення для деяких параметрів з метою заміни натурних об'єктів на інтелектуальні моделі. Підсистема інформаційних датчиків перетворює ці сигнали на аналогові сигнали і видає їх на вимірювальні схеми, які безпосередньо беруть участь у моделюванні. Велике значення приділяється засобам людино-машинного інтерфейсу, який забезпечує комфортні умови для експериментатора і допомагає зменшити кількість помилок при проектуванні.

На рисунку (рис. 25.) представлено функціональну схему динамічного моделювання систем (ДМС), яка може бути використана для напівнатурного моделювання квадрокоптера.

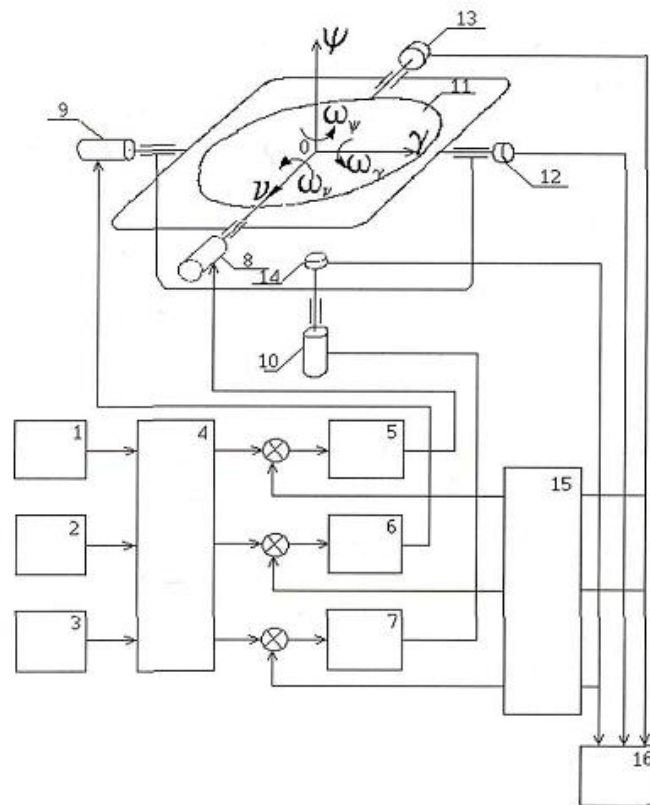


Рис.25. Функціональна структура динамічної системи моделювання

В даній структурі: 1, 2, та 3 - генератори шуму, що задають параметри шумового сигналу; 4 та 15 - модулі системи управління; 5, 6, та 7 - підсилювачі для потужності та напруги; 8, 9, та 10 - виконавчі механізми, наприклад, двигуни; 11 - основна платформа або стійка, на якій розміщений експериментальний стенд; 12, 13, та 14 - датчики зворотного зв'язку, що вимірюють величини, пов'язані з виконавчими механізмами; 16 - записувач даних або персональний електронний обчислювальний пристрій.

Під час тестування пристроїв і систем, які монтується на рухомій платформі ДМС, для симуляції реальних умов руху використовуються стаціонарні сигнали з характеристиками, що найближчі до дійсних. Оскільки багатомірний стаціонарний випадковий процес визначається повністю, завдання полягає відтворенні на платформі ДМС кутових рухів, які максимально наближені до рухів судна. Таким чином, на вхід ДМС надходить багатомірний стаціонарний випадковий сигнал, наприклад, вектор "білих" шумів, який подається також в електронний формуючий фільтр. Цей фільтр перетворює вектор електричних сигналів у вектор механічних рухів платформи, який відтворює реальний кутовий рух судна в конкретних умовах руху.

Однією з ключових особливостей запропонованого ДМС є його оптимальна електромеханічна структура, що перетворює вектор електричних сигналів у вектор механічних рухів платформи. Цей вектор відображає реальний кутовий рух судна в конкретних умовах руху. Точність імітації обмежена характеристиками механічної системи, а саме вектором ψ та співвідношенням корисного сигналу до перешкод у вимірюванні вихідних реакцій.

Для підвищення точності навігаційних систем судна важливо мати інформацію про реальні характеристики перешкод у вимірюваннях. Цю інформацію можна отримати за допомогою спеціальних ДМС, які точно відтворюють стохастичні рухи судна.

У запропонованому ДМС ключовим елементом є оптимальний електромеханічний фільтр, який перетворює "білі" шуми у програмні механічні

рухи платформи. Ці рухи відтворюють реальний кутовий рух судна в конкретних умовах. Точність імітації підвищується завдяки урахуванню реальної динаміки механічної системи, динамічних характеристик збурень та впливу шумів на вимірювання.

ДМС також відкриває можливості для дослідження впливу різних збурень на системи навігації та управління мультикоптерами. Завдяки високій точності імітації реальних умов польоту, інженери можуть досліджувати вплив факторів, таких як вітер, турбулентність і зміни тиску, на поведінку мультикоптера. Це дозволяє не лише вдосконалити існуючі системи, але й розробляти нові методи компенсації та корекції для підвищення безпеки та ефективності польотів. Крім того, ДМС можна використовувати для навчання операторів та тестування їхніх реакцій у складних умовах, що підвищує їхню підготовленість до реальних ситуацій.

Іншою важливою перевагою застосування ДМС є можливість інтеграції нових сенсорних технологій та алгоритмів управління без необхідності проведення реальних випробувань мультикоптерів. Це дозволяє економити ресурси і знижувати ризики, пов'язані з польотними випробуваннями. Використання ДМС сприяє більш гнучкому та швидкому процесу розробки, тестування та впровадження інновацій у сфері безпілотних літальних апаратів та інших галузях. Завдяки цьому науковці та інженери можуть оперативніше реагувати на виклики та розвивати технології, які забезпечать безпеку, надійність і ефективність сучасних навігаційних систем.

Таким чином, ДМС є важливим інструментом для тестування і оптимізації систем управління квадрокоптером. Завдяки їй можна відтворювати реальні умови експлуатації і точно вимірювати реакції системи на різні впливи. Це дозволяє покращити розробку і налаштування систем навігації та управління, що є критичним для безпеки і ефективності польотів. Застосування таких ДМС також сприяє розвитку нових технологій у сфері автоматизації та робототехніки, адже дозволяє досліджувати і тестувати нові алгоритми управління в реальних умовах. Це допомагає знизити ризики та вартість

експериментів, оскільки більшість тестів можна проводити у контрольованих умовах лабораторії.

РОЗДІЛ 2

МЕТОДИ ОБРОБКИ СИГНАЛІВ

У цьому розділі ми розглянемо різні методи обробки сигналів, які є критичними для багатьох технологічних і наукових застосувань. Зокрема, ми детально дослідимо методи апроксимації, інтерполяції та екстраполяції, які дозволяють відновлювати та передбачати значення сигналів на основі відомих даних.

Першою темою буде апроксимація, де ми розглянемо основні види апроксимацій, такі як лінійна та квадратична апроксимація. Ці методи дозволяють спрощувати складні функції та моделі для подальшого аналізу та використання.

Наступним важливим аспектом буде інтерполяція та її види. Ми розглянемо різні техніки інтерполяції, такі як лінійна, кусочно-лінійна, сплайн-, квадратична та кусочно-квадратична інтерполяція, висвітливши їх особливості та сфери застосування. Окремо обговоримо екстраполяцію як метод прогнозування значень сигналів за межами відомих даних.

Особливу увагу буде приділено інтерполяційним поліномам Лагранжа та Ньютона, важливим інструментам в обробці сигналів, з математичними основами та прикладами застосування. Також розглянемо метод найменших квадратів для наближення функцій і мінімізації похибок між реальними та прогнозованими даними, та метод узагальнених логарифмічних характеристик для аналізу складних сигналів.

Цей розділ забезпечить глибоке розуміння методів обробки сигналів, що є необхідним для розробки та оптимізації сучасних технологій. Маючи ці знання, ви зможете ефективно застосовувати ці методи у своїй професійній діяльності та наукових дослідженнях.

Кафедра АКСУ				НАУ 24.31.05.000 ПЗ			
<i>Виконав.</i>	<i>Гришук В.А.</i>			Розділ 2. Методи обробки сигналів	<i>Літ.</i>	<i>Арк.</i>	<i>Аркушів</i>
<i>Керівник</i>	<i>Єрмолаєва О.В.</i>					41	74
<i>Консульт.</i>					151-403Б-СУ		
<i>Контрол.</i>	<i>Дивнич М.П.</i>						
<i>Зав. каф.</i>	<i>Мельник Ю.В.</i>						

2.1. Апроксимація

Апроксимація — це процес наближення складної функції або набору даних за допомогою більш простої функції, яка з певною точністю відображає поведінку початкової функції або даних. Це дозволяє зменшити складність аналізу та обробки даних, полегшуючи розв'язання практичних задач. Наприклад, деяка функція $f(x)$ апроксимується іншою функцією $g(x)$. Знайдена аналітична залежність не обов'язково повинна проходити через всі точки, але повинна добре описувати тенденцію зміни параметрів.

Для вирішення задачі апроксимації необхідно встановити вид залежності $y = f(x)$ і відповідно до неї визначити вид емпіричної формули (лінійна, квадратична, логарифмічна тощо). Потім визначаються чисельні значення параметрів емпіричної формули, які найкраще апроксимують початкову залежність.

У цьому підрозділі розглядаються основні методи апроксимації, зокрема лінійна та квадратична апроксимації. Мета апроксимації полягає у створенні простої моделі, яка добре описує поведінку складної функції або набору даних. Вибір моделі залежить від характеру даних та бажаного рівня точності. Найпоширенішими є лінійні та квадратичні моделі.

2.1.1. Лінійна апроксимація

Лінійна апроксимація є одним з найпоширеніших методів для оцінки взаємозв'язку між двома змінними. Основна ідея лінійної апроксимації полягає в побудові лінійної функції, яка найбільш точно описує залежність між незалежною змінною x та залежною змінною y .

Лінійна апроксимація базується на методі найменших квадратів, який мінімізує суму квадратів відхилень фактичних значень від прогнозованих. Формально, пряма лінія може бути описана рівнянням:

де y — залежна змінна; x — незалежна змінна; a — кутовий коефіцієнт (нахил лінії); b — вільний член (перетин з віссю y).

Кутовий коефіцієнт показує, як змінюється при зміні на одну одиницю, а вільний член показує значення при .

Лінійна апроксимація застосовується у випадках, коли необхідно визначити тренди та взаємозв'язки між змінними. Вона корисна для прогнозування, аналізу часових рядів, інтерполяції даних та інших задач. Проте слід враховувати, що цей метод є ефективним лише за умови, що зв'язок між змінними є дійсно лінійним. У випадку нелінійних залежностей можуть знадобитися більш складні моделі.

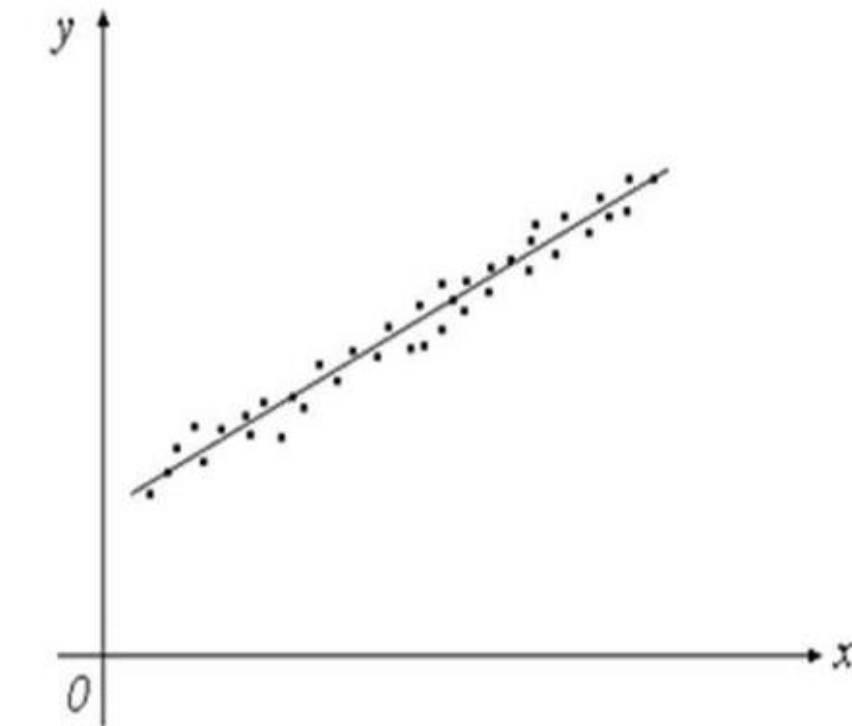


Рис. 26. Лінійна апроксимація заданих даних

Як видно з графіку (рис. 26.), лінія найменших квадратів досить добре відображає загальну тенденцію в даних, що підтверджує адекватність використання лінійної моделі для цього конкретного набору даних.

2.1.2. Квадратична апроксимація

Квадратична апроксимація є важливим методом для моделювання залежностей між змінними, які не можуть бути точно описані лінійною функцією. Вона є розширенням лінійної апроксимації і дозволяє краще відобразити нелінійні тренди в даних. Цей метод використовується в багатьох галузях науки і техніки, зокрема в фізиці, біології, економіці та інженерії.

Квадратична апроксимація базується на побудові квадратичної функції, яка мінімізує суму квадратів відхилень між фактичними значеннями та прогнозованими. Функція має вигляд:

де y — залежна змінна; x — незалежна змінна; a , b , c — коефіцієнти квадратичної функції.

Коефіцієнт a визначає кривизну параболи, b — нахил, а c — зсув по осі y .

Квадратична апроксимація застосовується у випадках, коли залежність між змінними є нелінійною. Наприклад, у фізиці вона використовується для моделювання руху об'єктів під дією сили тяжіння. Квадратична модель дозволяє врахувати складніші взаємозв'язки між змінними, ніж лінійна модель.

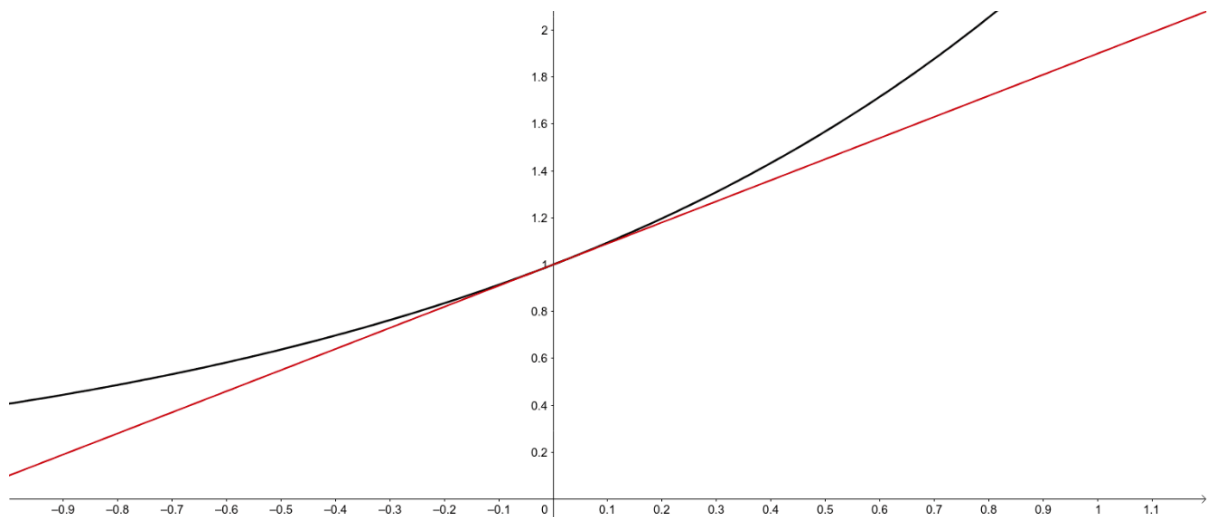


Рис. 27. Квадратична апроксимація заданих даних

Як видно з графіку (рис. 27.), квадратична модель краще відображає загальну тенденцію в даних у порівнянні з лінійною моделлю, що підтверджує адекватність використання квадратичної апроксимації для цього конкретного набору даних.

Квадратична апроксимація є потужним інструментом для аналізу даних, особливо коли залежність між змінними є нелінійною. Вона дозволяє отримати більш точні прогнози і краще зрозуміти взаємозв'язки між змінними. Проте важливо враховувати складність моделі та можливі обмеження, пов'язані з

перенавчанням та чутливістю до викидів.

2.2. Інтерполяція та її види

Інтерполяція — це математичний метод, який використовується для знаходження значень функції у проміжних точках між заданими дискретними значеннями. В основі інтерполяції лежить побудова нової функції на основі відомих значень, яка дозволяє робити припущення про значення цієї функції у проміжних точках, де немає прямих вимірювань або спостережень. Це є корисним інструментом у випадках, коли дані зібрані з певним інтервалом і потрібно знати поведінку функції між цими точками.

Основна ідея інтерполяції полягає в тому, що значення функції, яка є невідомою у деяких точках, можна оцінити за допомогою відомих значень цієї функції у сусідніх точках. Це досягається за допомогою різних математичних підходів, які дозволяють побудувати функцію, що проходить через всі задані точки або наближається до них.

2.2.1. Лінійна інтерполяція

Лінійна інтерполяція полягає у використанні лінійних поліномів для обчислення значень між відомими точками даних.

Для двох точок (x_0, y_0) і (x_1, y_1) , лінійна інтерполяція в точці x задається формулою:

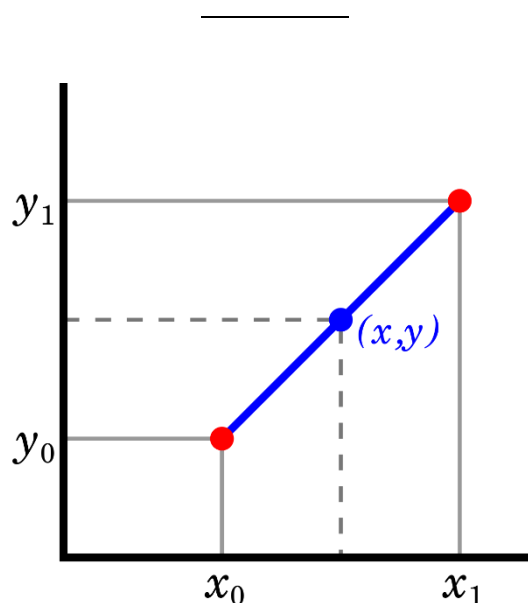


Рис.28. Приклад лінійної інтерполяції.

Недоліком лінійної інтерполяції є обмежена точність і недостатня гнучкість, особливо при роботі з нелінійними даними. Цей метод може призводити до грубих наближень і неадекватно відображати складні криві або швидкі зміни в даних. Іншими словами, лінійна інтерполяція добре підходить для простих випадків, але часто не є найкращим вибором для більш складних задач, де потрібно більш точне моделювання даних.

2.2.2. Кусочно-лінійна інтерполяція

Кусочно-лінійна інтерполяція полягає в з'єднанні кожної пари сусідніх точок лінійними відрізками, створюючи ламану лінію.

Кожен відрізок між точками x_1 та x_2 описується лінійною формулою:

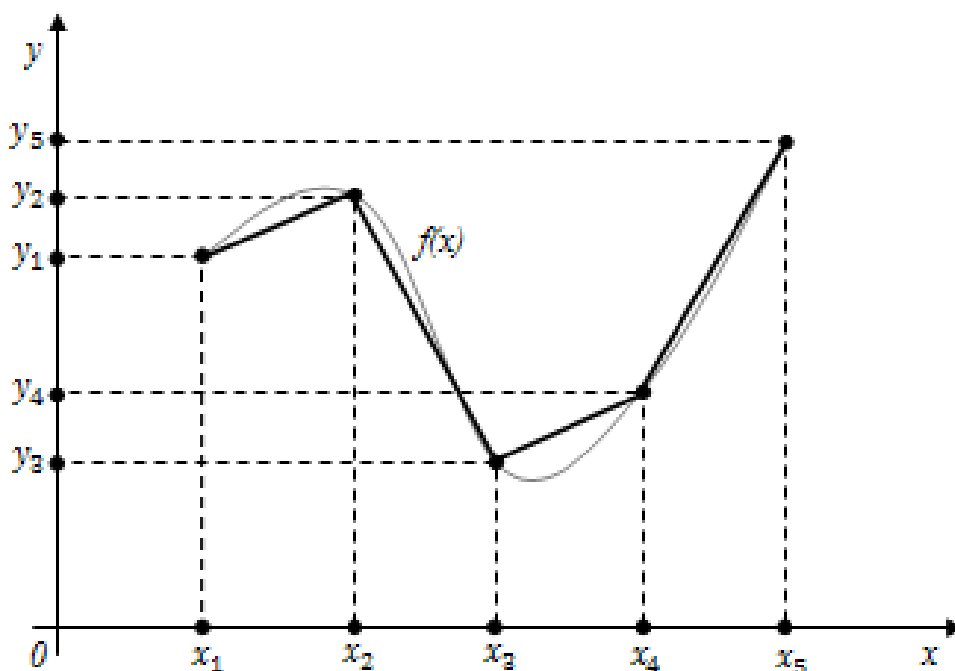


Рис. 29. Кусочно-лінійна інтерполяція

2.2.3. Сплайн-інтерполяція

Сплайн-інтерполяція використовує гладкі криві, звані сплайнами, які проходять через всі точки даних. Найпоширеніший тип - кубічний сплайн.

Кубічний сплайн для інтервалу визначається поліномом третього степеня:

Коефіцієнти обчислюються таким чином, щоб забезпечити гладкість і з'єднання в точках .

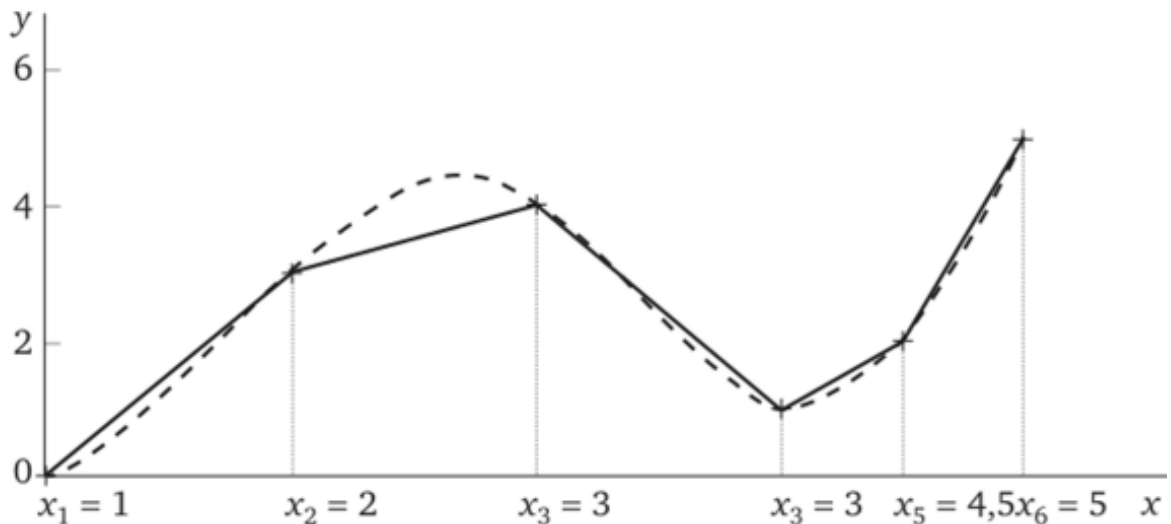


Рис. 30. Кубічна сплайн-інтерполяція заданих даних

2.2.4. Квадратична інтерполяція

Квадратична інтерполяція використовує поліном другого степеня для обчислення значень між відомими точками.

Для трьох точок , , , квадратична інтерполяція задається поліномом:

Коефіцієнти можна знайти, розв'язуючи систему рівнянь, утворених підставленням відомих точок.

2.2.5. Кусочно-квадратична інтерполяція

Кусочно-квадратична інтерполяція використовує поліноми другого степеня для кожного інтервалу між сусідніми точками.

Кожен поліном другого степеня для інтервалу може бути записаний як:

Коефіцієнти обчислюються окремо для кожного інтервалу.

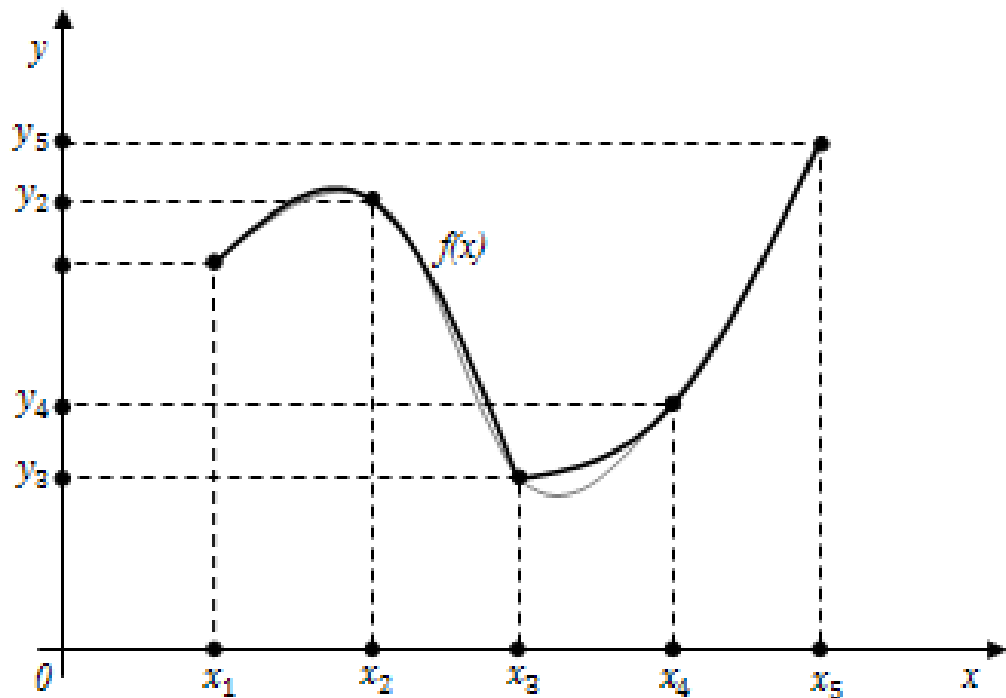


Рис. 31. Графічний показ кусочно-квадратичної інтерполяції

2.2.6. Екстраполяція

Екстраполяція — це метод, який використовується для оцінки значень функції за межами інтервалу, на якому відомі її значення. Іншими словами, екстраполяція дозволяє робити припущення про поведінку функції поза межами області, де є спостереження або вимірювання.

На відміну від інтерполяції, яка зосереджена на знаходженні значень функції між відомими точками, екстраполяція є продовженням тенденції функції на нові області. Це може бути корисним у випадках, коли потрібно прогнозувати майбутні значення на основі наявних даних, або оцінити поведінку функції у невідомих умовах. Однак, слід враховувати, що результати екстраполяції можуть бути менш точними порівняно з інтерполяцією, оскільки вони залежать від передбачень про те, що тенденції залишаються незмінними поза межами відомих даних.

2.3. Інтерполяційний поліном Лагранжа

Інтерполяція Лагранжа - це метод поліноміальної інтерполяції, який дозволяє знайти поліном, що проходить через задані точки. Поліном Лагранжа будується таким чином, щоб точно проходити через всі задані точки ,

.....

Інтерполяційний поліном Лагранжа використовується для наближення табличних даних у вигляді функції. Цей метод добре підходить для функцій, які мало осцилюють, забезпечуючи точне наближення. Однак, для функцій зі швидкозмінною похідною, використання малої кількості вузлів інтерполяції може призвести до значних похибок.

Поліном Лагранжа має вигляд:

Інтерполяційний поліном Лагранжа загального вигляду:

Поліном Лагранжа 2-го порядку для трьох точок , , має вигляд:

де:

Таким чином, поліном Лагранжа 2-го порядку можна записати у вигляді:

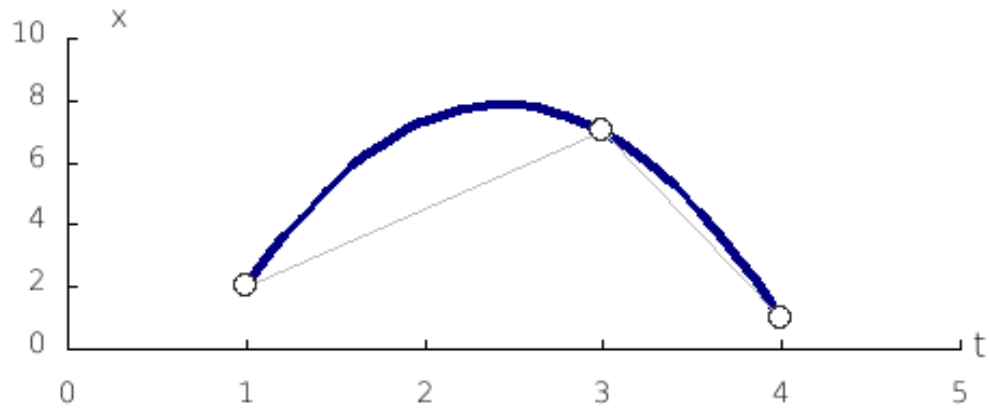


Рис. 32. Приклад інтерполяційного полінома Лагранжа 2-го порядку

2.4. Інтерполяційний поліном Ньютона

Інтерполяційний поліном Ньютона — це поліномічний вираз, який проходить через заданий набір точок і використовується для апроксимації значень функції в проміжних точках. Він побудований на основі розділених різниць, що дозволяє ефективно враховувати кожну додаткову точку і оновлювати поліном без повного перерахунку. Інтерполяційний поліном Ньютона може мати різні порядки, залежно від кількості використаних точок, і є одним з найпоширеніших методів інтерполяції в чисельному аналізі.

Інтерполяційний поліном Ньютона використовує розділені різниці для побудови полінома, який проходить через задані точки. Формула інтерполяційного полінома Ньютона для точок t_0, t_1, \dots, t_n , виглядає наступним чином:

де $\Delta^k f(t_i)$ — це розділені різниці, які обчислюються наступним чином:

$$\Delta f(t_i) = f(t_{i+1}) - f(t_i)$$

$$\Delta^2 f(t_i) = \Delta f(t_{i+1}) - \Delta f(t_i)$$

Інтерполяційний поліном Ньютона 2-го порядку для цих точок можна

записати у вигляді:

Обчислимо розділені різниці:

Після підстановки цих значень у формулу, отримаємо поліном:

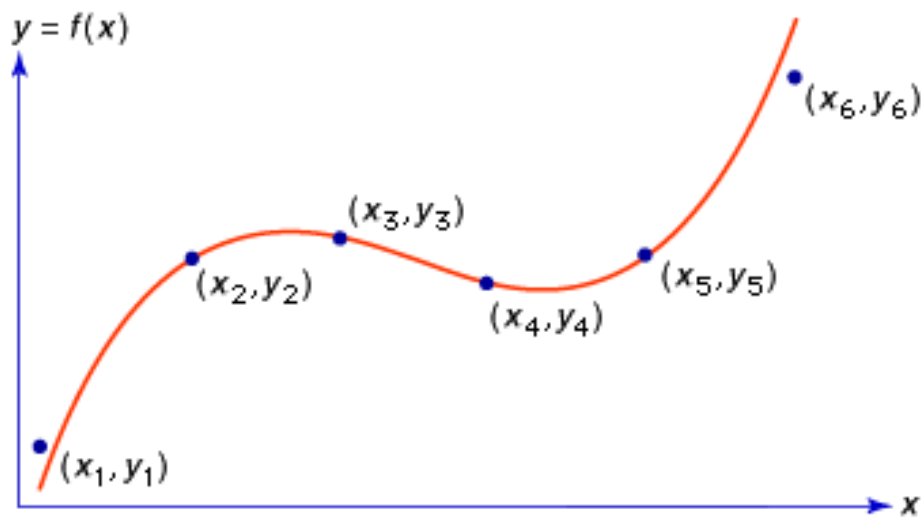


Рис. 33. Приклад інтерполяційного полінома Ньютона

Інтерполяційний поліном Ньютона дозволяє обчислювати значення функції в проміжних точках, використовуючи лише кілька відомих значень функції. Це зручно для задач, де необхідно знайти значення функції між відомими точками.

2.5. Метод найменших квадратів

Метод найменших квадратів є одним з найпоширеніших методів оцінювання параметрів у різних галузях науки і техніки. Він використовується для знаходження таких параметрів моделі, які мінімізують суму квадратів відхилень між спостережуваними даними та теоретичними значеннями, отриманими за

моделлю.

Припустимо, що у нас є набір експериментальних даних $(x_1, y_1), (x_2, y_2), \dots, (x_n, y_n)$, де x_i – незалежна змінна, а y_i – залежна змінна. Ми хочемо побудувати модель, яка описує залежність y від x . Найпростішою моделлю є лінійна залежність:

де a та b – параметри моделі, які необхідно оцінити, а ϵ – випадкова похибка.

Метод найменших квадратів передбачає мінімізацію суми квадратів відхилень між спостереженими значеннями y_i та теоретичними значеннями \hat{y}_i :

Для мінімізації функції $S(a, b)$ знайдемо частинні похідні цієї функції за a та b та прирівняємо їх до нуля:

$$\begin{aligned} \frac{\partial S}{\partial a} &= 0 \\ \frac{\partial S}{\partial b} &= 0 \end{aligned}$$

Вирішуючи ці рівняння, отримуємо систему нормальних рівнянь:

Звідси можна знайти оцінки параметрів a та b :

$$a = \frac{\sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})(x_i - \bar{x})}{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}$$

де \bar{x} та \bar{y} – середні значення x та y відповідно:

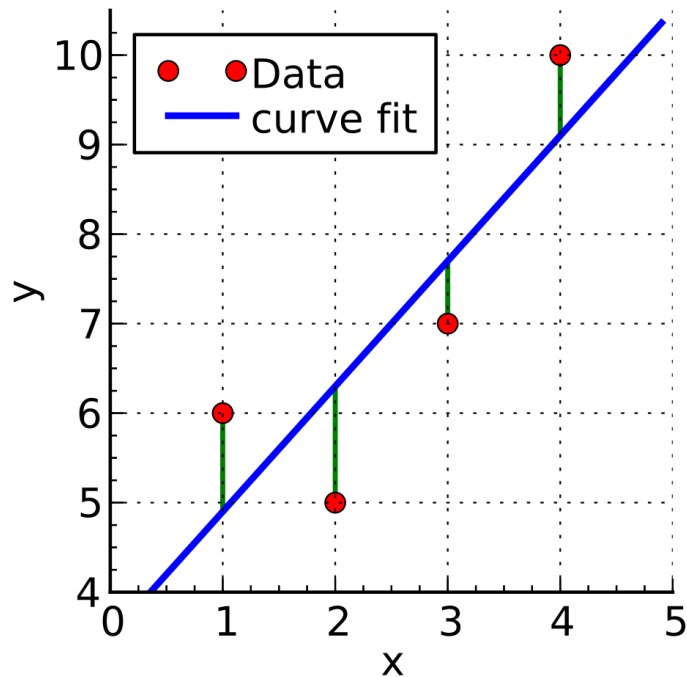


Рис. 34. Метод найменших квадратів

Метод найменших квадратів дозволяє знайти найкращі оцінки параметрів лінійної регресії, мінімізуючи суму квадратів відхилень між спостережуваними та теоретичними значеннями. Цей метод є надзвичайно ефективним та широко використовуваним у різних галузях, де необхідно моделювати залежності між змінними.

2.6. Метод узагальнених логарифмічних характеристик

Метод узагальнених логарифмічних характеристик є важливим інструментом у спектральному аналізі сигналів, який дозволяє наближати спектральні щільності складних систем. Цей метод є корисним для аналізу систем з випадковими процесами та шумами, де необхідно оцінити їхні частотні характеристики. Основна ідея методу полягає в побудові логарифмічної спектральної щільності та її апроксимації послідовністю простих функцій.

Перетворення спектральної щільності:

Щоб застосувати метод узагальнених логарифмічних характеристик, необхідно перетворити задану криву спектральної щільності $S(\omega)$ у логарифмічну криву спектральної щільності:

Побудова цієї кривої здійснюється на півлогарифмічному папері, де по осі абсцис відкладається ω , а по осі ординат — значення $S(\omega)$, виражені у децибелах.

Апроксимація логарифмічної характеристики:

Наступний крок полягає в апроксимації логарифмічної кривої послідовністю зв'язаних прямих відрізків. Кожен з цих відрізків має нахил $6k$ децибелів на октаву, де k — будь-яке ціле число. Це розбиття дозволяє спростити складну криву до більш простих ділянок, які легше аналізувати математично. В результаті початкова крива розпадається на суму півнескінчених логарифмічних характеристик.

Математичні вирази для півнескінчених характеристик:

Для апроксимації півнескінчених логарифмічних характеристик використовуються наступні функції:

де ω — частота у точці сполучення горизонтальної та нахиленої частини напівнескінченної логарифмічної характеристики. Ці функції дозволяють описати зміну спектральної щільності на кожному з відрізків апроксимації.

Логарифмічна характеристика:

Розглянемо функцію:

та відповідну їй логарифмічну характеристику:

Логарифмічна характеристика у вигляді складається з горизонтальної частини та нахиленої частини з нахилом $6k$ децибелів на октаву. Ці частини з'єднуються плавною кривою, яка має максимальне відхилення від напівнескінченної характеристики у точці, рівне 3 дБ, незалежно від значення.

Видно що логарифмічна характеристика може бути описана такими співвідношеннями:

- При :
- При :
- При :

Для різних значень (наприклад,) криві мають симетричну форму відносно точки сполучення. За межами – від точки сполучення функція відрізняється від відповідної горизонтальної або нахиленої частини напівнескінченної характеристики не більше ніж на 0,26 дБ. Це дозволяє точно наближати початкову криву логарифмічної спектральної щільності простими функціями.

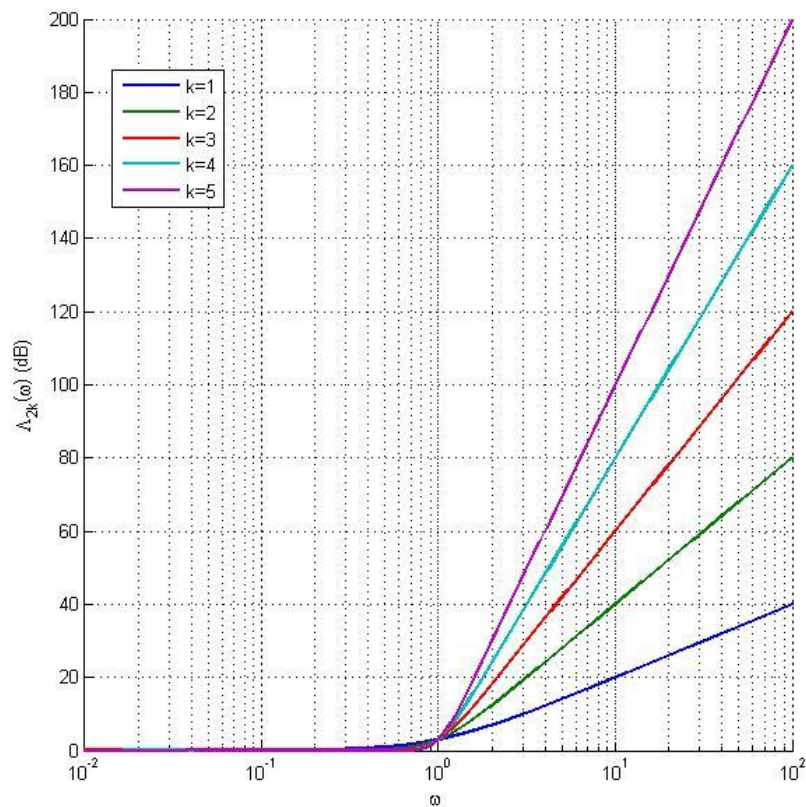


Рис. 35. Логарифмічні характеристики для різних значень параметра

На рисунку (рис. 35.) наведені логарифмічні характеристики для різних значень параметра α . Кожна лінія на графіку відповідає певному значенню α , що відображає нахил кривої в 6к децибелів на октаву. Цей графік ілюструє, як змінюється логарифмічна спектральна щільність залежно від частоти f .

Метод узагальнених логарифмічних характеристик є ключовим інструментом для аналізу спектральної щільності складних сигналів. Він спрощує математичний аналіз, розбиваючи спектральні криві на прості сегменти. Цей підхід ефективний для дослідження систем з випадковими процесами та шумами, дозволяючи оптимізувати частотні характеристики. Метод виявляє нелінійні ефекти і приховані залежності, що покращує розуміння поведінки системи. Завдяки йому можна точно оцінити вплив різних факторів, що важливо для оптимізації, наприклад, систем управління квадрокоптерами. Цей метод широко застосовується в обробці сигналів, технічній діагностиці та біомедичних дослідженнях.

Застосування даного методу, виявляється значно простішим у практиці, порівняно з іншими методами, що розглядалися раніше. Але варто пам'ятати, що коли ми маємо справу з логарифмічними кривими спектральної щільності, де є стрімкі зміни, цей підхід може привести до отримання дуже складних дробно-раціональних функцій високого порядку з чисельником і знаменником.

РОЗДІЛ 3

ПЕРВИННА ОБРОБКА СИГНАЛІВ КВАДРОКОПТЕРА ПО КАНАЛУ КРЕНА

Обробка сигналів квадрокоптера є ключовим етапом у дослідженні та оптимізації системи управління. Сигнали, які передаються через різні компоненти квадрокоптера, відображають його динамічну поведінку та реакцію на зовнішні впливи. Аналіз цих сигналів дозволяє зрозуміти, як системи управління взаємодіють з фізичними компонентами квадрокоптера та як вони реагують на змінні умови польоту.

Важливість обробки сигналів полягає в тому, що вона дозволяє виявити проблеми та недоліки у функціонуванні квадрокоптера. Наприклад, збурення та шуми можуть значно впливати на точність і стабільність управління, що ускладнює виконання точних маневрів. Визначення частотних характеристик сигналів допомагає виявити джерела цих шумів та збурень, що дозволяє розробити стратегії для їх мінімізації або усунення.

Обробка сигналів у квадрокоптері є складним завданням з кількох причин. По-перше, робота в реальному часі вимагає швидкої та точної обробки великої кількості даних. По-друге, сигнали можуть бути складними та містити численні частотні компоненти, які важко виділити й проаналізувати. По-третє, динамічні умови польоту, такі як вітер і турбулентність, додають непередбачуваності, що ускладнює аналіз.

Для ефективного аналізу сигналів використовується комплексний підхід, що включає часовий і частотний аналіз. Осцилограми вхідних і вихідних сигналів показують часові затримки, амплітудні коливання та динамічні характеристики. Спектральний аналіз досліджує розподіл енергії сигналів по частотах, розкриваючи їх частотну структуру та основні компоненти.

Кафедра АКСУ				НАУ 24.31.05.000 ПЗ					
<i>Виконав.</i>	<i>Гришук В.А.</i>			Розділ 3. Первинна обробка сигналів квадрокоптера по каналу крена	<i>Літ.</i>		<i>Арк.</i>		<i>Аркушів</i>
<i>Керівник</i>	<i>Єрмолаєва О.В.</i>						57		74
<i>Консульт.</i>					151-403Б-СУ				
<i>Контрол.</i>	<i>Дивнич М.П.</i>								
<i>Зав. каф.</i>	<i>Мельник Ю.В.</i>								

Для ще більш точного аналізу спектральних характеристик сигналів квадрокоптера може бути використана апроксимація логарифмічних кривих спектральних щільностей. Цей підхід дозволяє отримати більш деталізовану картину розподілу енергії по частотах, що сприяє ефективнішому виявленню та аналізу основних частотних компонентів. Використання апроксимації логарифмічних кривих спектральних щільностей дозволить покращити точність оцінки частотної структури сигналів та забезпечити більшу надійність виявлення джерел шумів та збурень.

Обробка сигналів у квадрокоптерах відіграє критичну роль у забезпеченні стабільності та надійності системи управління. Цей процес дозволяє виявляти та виправляти помилки, оптимізувати параметри та підвищувати продуктивність апарату. Завдяки аналізу сигналів можна досягти більш точного та ефективного управління, що стає важливим чинником для успішної експлуатації квадрокоптерів у різних умовах. Інтеграція передових технологій обробки сигналів, таких як машинне навчання та штучний інтелект, забезпечує найвищий рівень автономності та точності управління, що робить квадрокоптери досконалими для виконання різноманітних завдань.

Сучасні методи обробки сигналів у квадрокоптерах використовують алгоритми машинного навчання та штучного інтелекту. Ці алгоритми аналізують великі обсяги даних у реальному часі, прогнозують та адаптуються до різних умов польоту, автоматично коригують параметри управління для максимальної стабільності та ефективності. Використання цих підходів підвищує точність та надійність управління, розширює можливості квадрокоптерів у виконанні складних завдань, а інтеграція передових технологій робить обробку сигналів ще потужнішою для оптимізації їх роботи.

Усі розрахунки виконуються за допомогою прикладного програмного пакету MATLAB за спеціально розробленою програмою, текст програми надано в додатках до роботи.

3.1. Побудова кривих спектральних щільностей по каналу крену

Після виконання напівнатурного моделювання було зафіксовано масиви вхідних і вихідних сигналів. На графіках (рис. 36. та рис. 37.) показано осцилограми вхідних та вихідних реакцій стенда-імітатора по каналу крену, побудовані за допомогою стандартних команд MATLAB. Аналіз осцилограм дозволяє оцінити динамічну поведінку системи та виявити потенційні проблеми у функціонуванні. Отримані дані є основою для подальшої оптимізації системи управління та покращення стабільності польоту квадрокоптера.

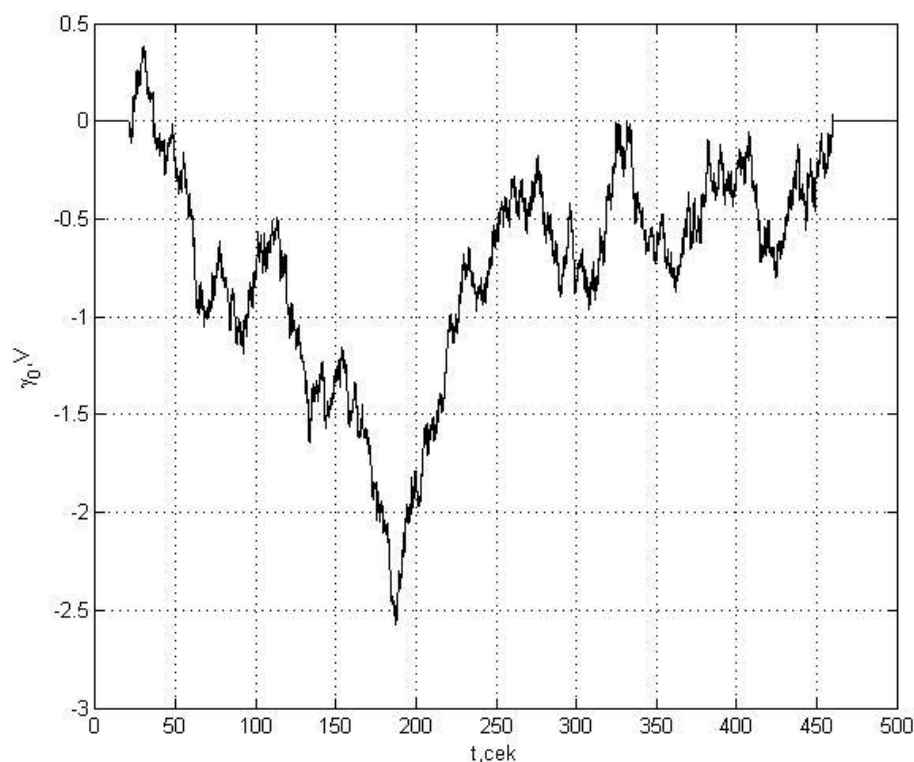


Рис. 36. Осцилограма вхідного сигналу по каналу крену

На рисунку (рис. 36.) зображена осцилограма повороту крену стенда. Графік показує зміну кута крену в часі, де видно, як сигнал зазнає значних коливань та має виражені пікові значення. Максимальне відхилення сигналу від нуля досягає приблизно мінус 2.5 вольт, після чого він поступово повертається до початкових значень, демонструючи певну тенденцію до стабілізації. Така осцилограма дозволяє аналізувати динамічні характеристики сигналу, виявляти моменти нестабільності та потенційні проблеми в системі управління креном квадрокоптера.

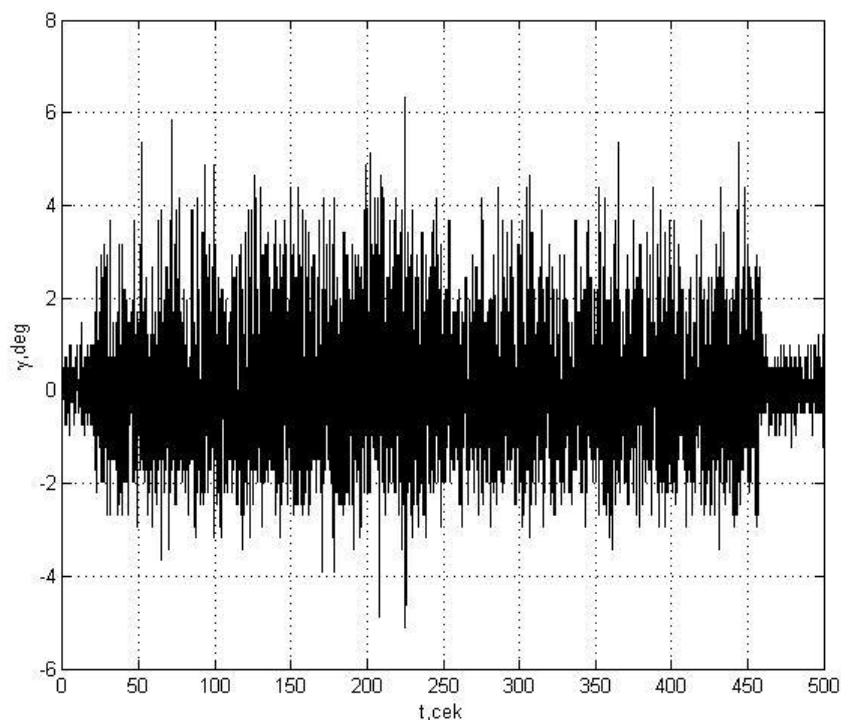


Рис. 37. Осцилограма вихідного сигналу по каналу крену

На рисунку (рис. 37.) зображена осцилограма реакції квадрокоптера. Графік демонструє високу частоту коливань сигналу з амплітудою від мінус 6 до 8 градусів. Такі значні коливання свідчать про нестабільність в системі управління креном, що може бути викликано зовнішніми впливами або недостатньою налаштованістю контролера. Аналіз цього сигналу дозволяє виявити моменти, коли система управління не встигає коригувати крен, що призводить до потенційної нестабільності польоту квадрокоптера.

На практиці при аналізі випадкових процесів часто використовуються функції спектральної щільності та взаємної спектральної щільності. Для побудови графіків цих функцій застосовують функцію `spectr`.

На першому етапі функція `spectr` обчислює кореляційні та взаємні кореляційні функції на основі векторів даних, що аналізуються. На другому етапі до отриманих кореляційних функцій застосовують перетворення Фур'є. Як відомо, результатом перетворення Фур'є кореляційної функції є залежність для спектральної щільності. Таким чином, функція `spectr` в результаті своєї роботи будує графіки спектральної та взаємної спектральної щільності.

Спектральні щільності вхідного та вихідного сигналів у логарифмічному масштабі представлені на рис. 38. і рис. 39.

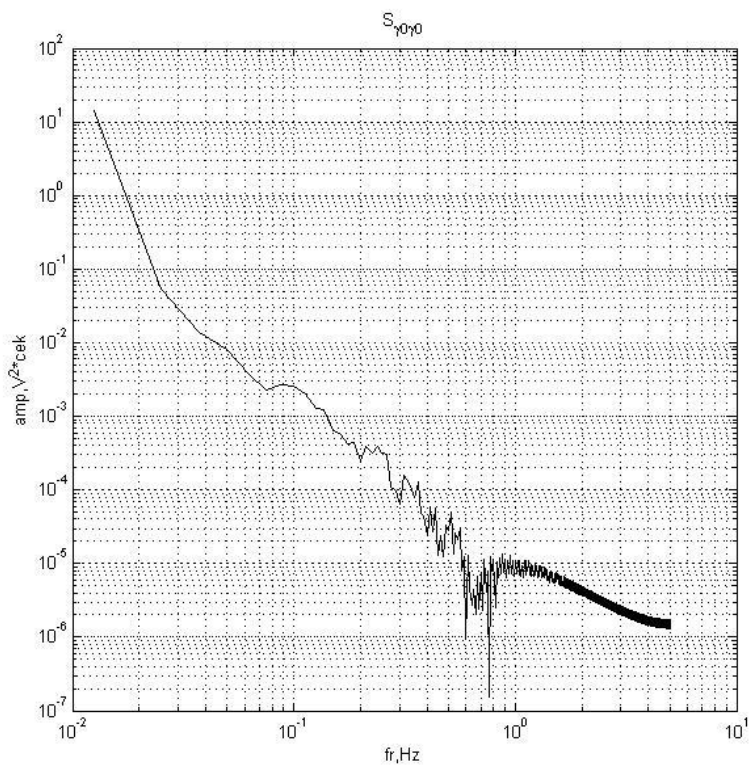


Рис. 38. Спектральна щільність вхідного сигналу по каналу крену

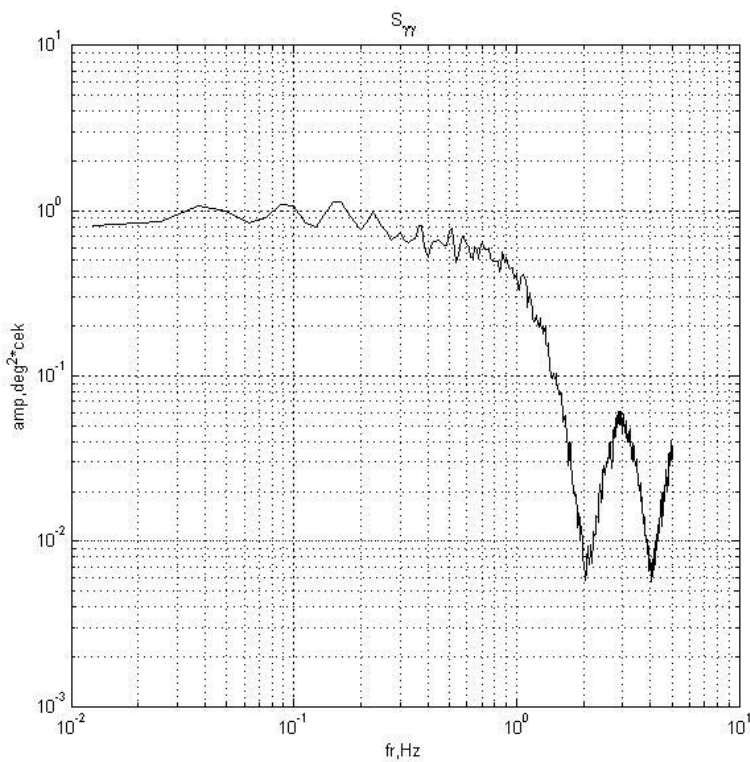


Рис. 39. Спектральна щільність вихідного сигналу по каналу крену

Амплітудна та фазова характеристики взаємна спектральної щільності між вхідним та вихідним сигналами зображені на рис. 40 і рис. 41.

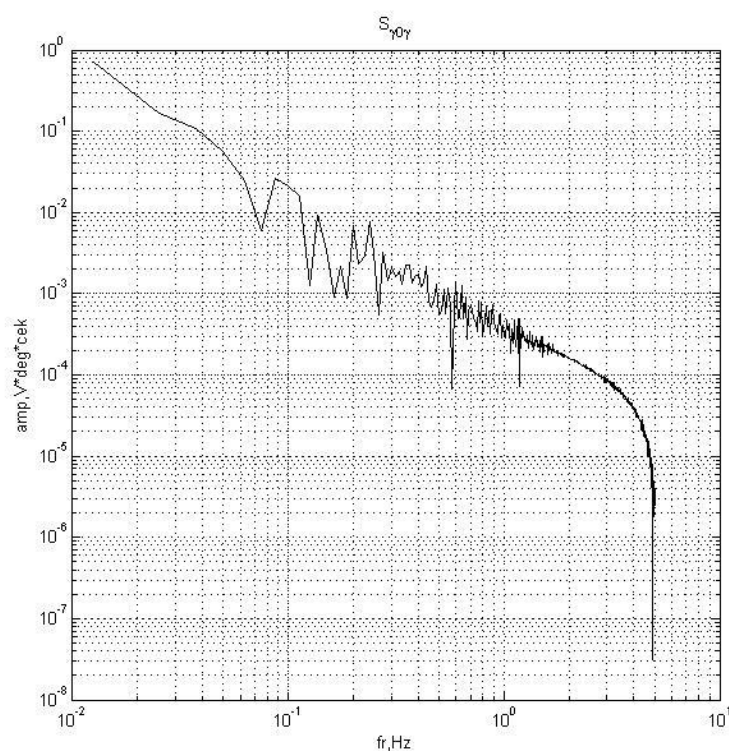


Рис. 40. Амплітудна характеристика взаємна спектральної щільності між вхідним та вихідним сигналами по каналу крену

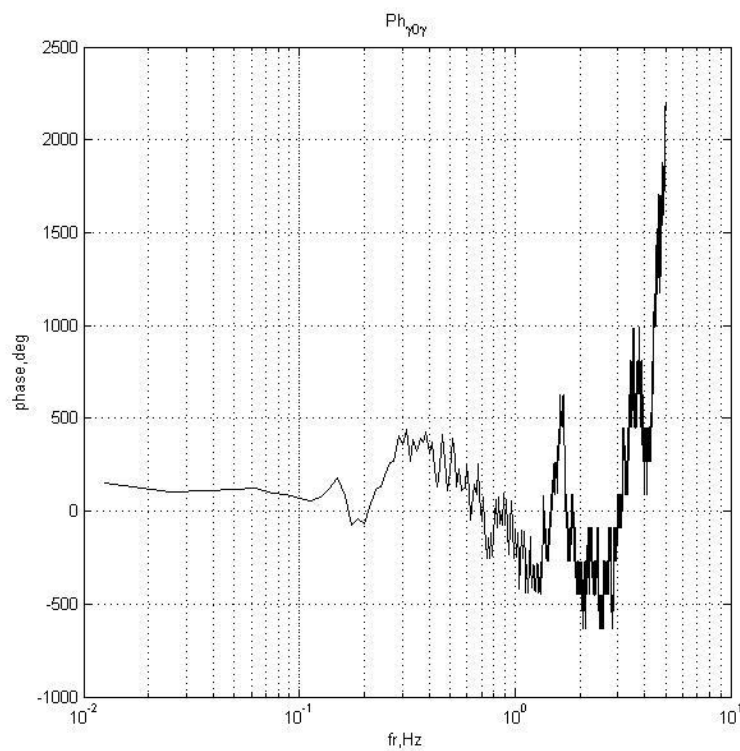


Рис. 41. Фазова характеристика взаємна спектральної щільності між вхідним та вихідним сигналами по каналу крену

Амплітудна та фазова характеристики взаємна спектральної щільності між вихідним та вхідним сигналами зображені на рис. 42. і рис. 43.

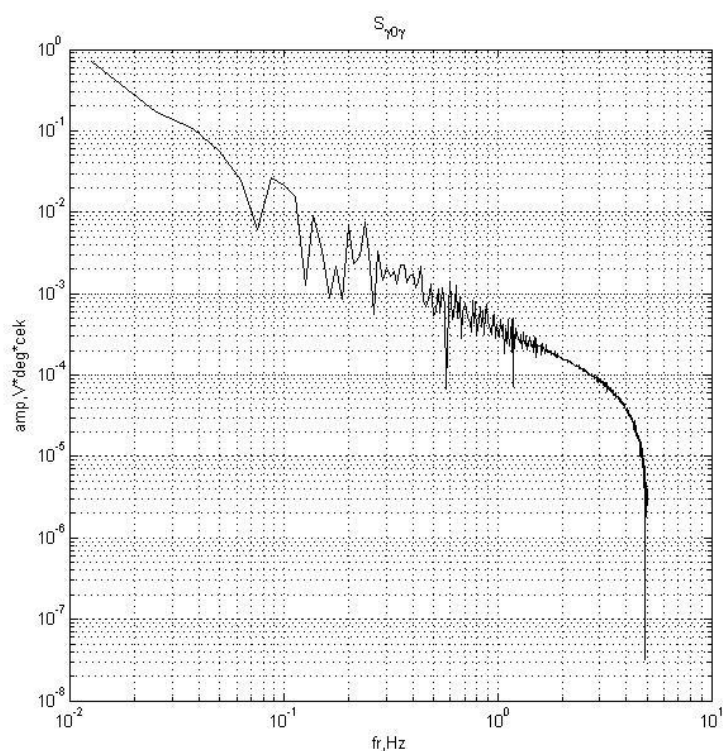


Рис. 42. Амплітудна характеристика взаємна спектральної щільності між вихідним та вхідним сигналами по каналу крену

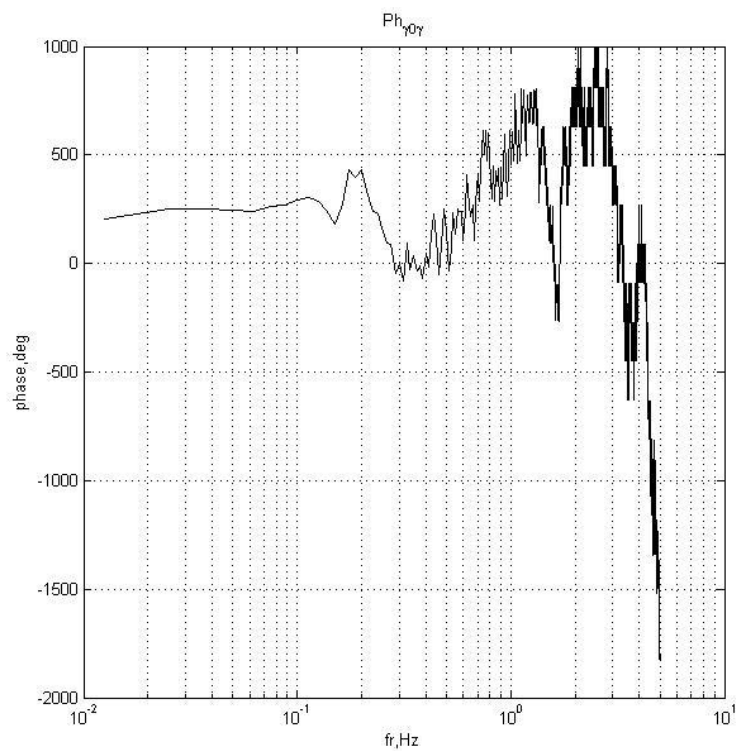


Рис. 43. Фазова характеристика взаємна спектральної щільності між вихідним та вхідним сигналами по каналу крену

3.2. Апроксимація логарифмічних кривих спектральних щільностей

На основі побудованих логарифмічних графіків залежності амплітуди від частоти необхідно визначити математичні моделі для спектральних і взаємних спектральних щільностей вхідного та вихідного сигналів системи. Для цього потрібно апроксимувати логарифмічні криві спектральних щільностей за допомогою методу узагальнених логарифмічних характеристик.

Спочатку певні сегменти кривої замінюються асимптотами, які представляють собою логарифмічні амплітудно-частотні характеристики стандартних ланок. Це дозволяє визначити загальний вигляд математичного виразу для спектральних щільностей, з яких складаються ланки, а також приблизні значення параметрів цих ланок, таких як постійні часу та коефіцієнти демпфування.

Наближену математичну модель уточнюємо за допомогою програмного пакету MATLAB, підбираючи типові ланки та їхні параметри таким чином, щоб крива, побудована за апроксимаційним виразом, максимально наближалася до експериментальної кривої, створеної за допомогою функції `spectr`. Цей процес включає багаторазове коригування параметрів для досягнення найкращого збігу між теоретичною та експериментальною кривими. Після досягнення оптимального збігу, модель може бути використана для подальшого аналізу та прогнозування поведінки системи.

На початку графічно виконаємо апроксимацію спектральної щільності вхідного сигналу по каналу крену та запишемо логарифмічні амплітудно-частотні характеристики стандартних ланок. На рисунку (рис. 44.) видно графік спектральної щільності з чорними та червоними лініями, які показують експериментальну криву і її апроксимацію відповідно. Червоні лінії відповідають апроксимаційним характеристикам, які наближують експериментальну криву, дозволяючи визначити основні параметри стандартних ланок.

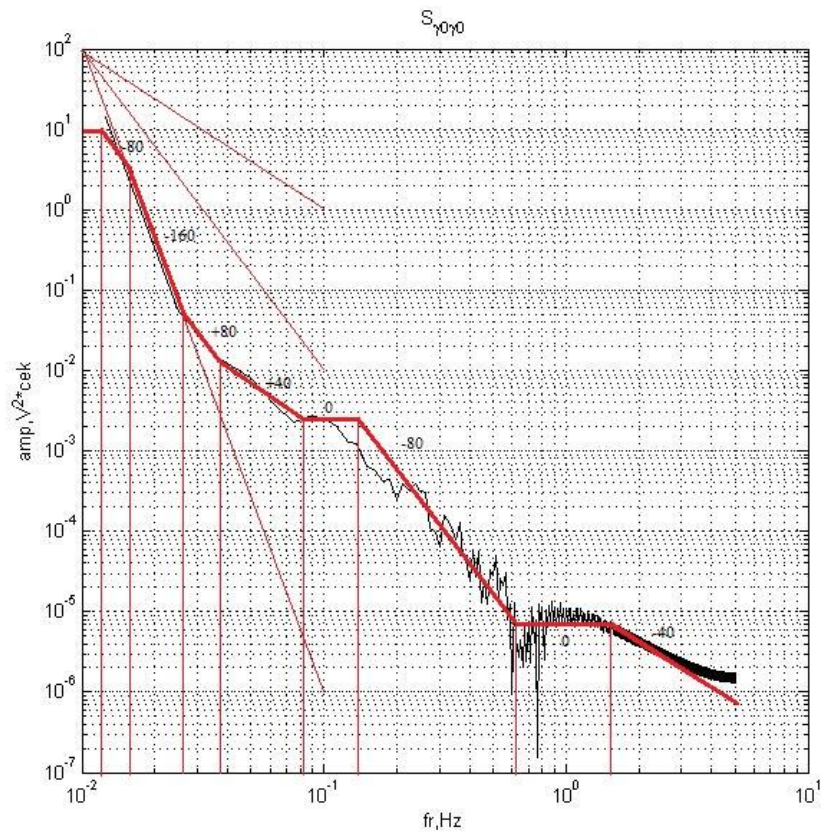


Рис. 44. Ілюстрація апроксимації спектральна щільність вхідного сигналу по каналу крену

Середньоквадратичне відхилення: _____

Кутові частоти та періоди спектральна щільність вхідного сигналу по каналу крену:

Графічне представлення за допомогою MATLAB апроксимованої і вихідної спектральних щільностей вхідного сигналу по каналу крену зображено на рис. 45.

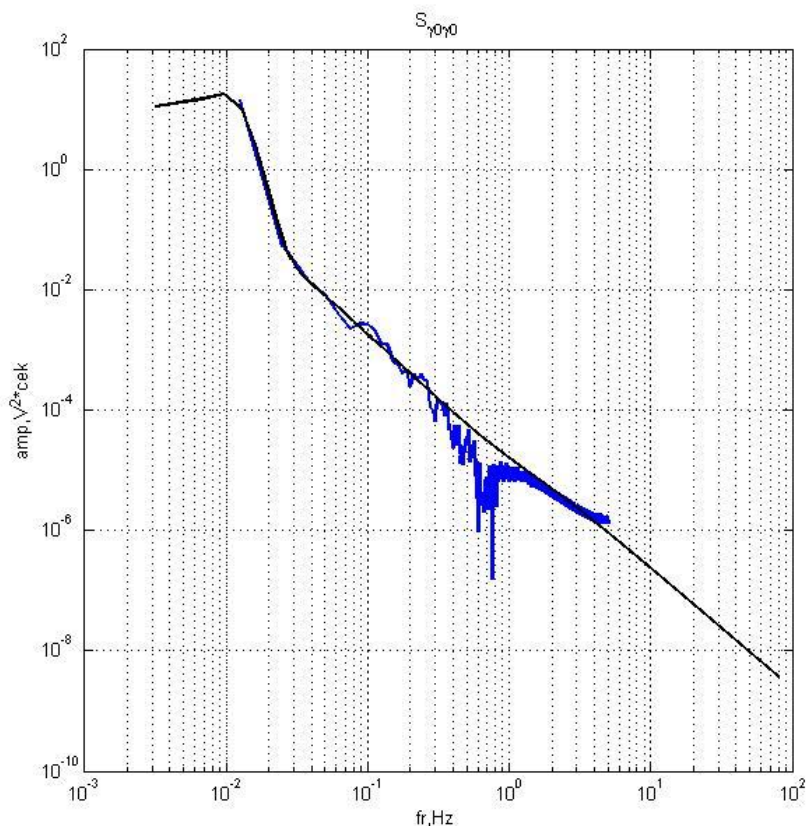


Рис. 45. Спектральна щільність вхідного сигналу по каналу крену

Визначена в результаті апроксимації математична модель для спектральної щільності вхідного сигналу по каналу крену має такий вигляд:

Визначена математична модель спектральної щільності вхідного сигналу по каналу крену дозволяє точно описати залежність амплітуди від частоти, враховуючи демпфування і постійні часу різних ланок системи. Модель включає вирази для стандартних ланок з урахуванням їхніх частотних характеристик, що забезпечує високу точність апроксимації. Ця модель є основою для подальшого аналізу і прогнозування поведінки системи в умовах

різних вхідних впливів.

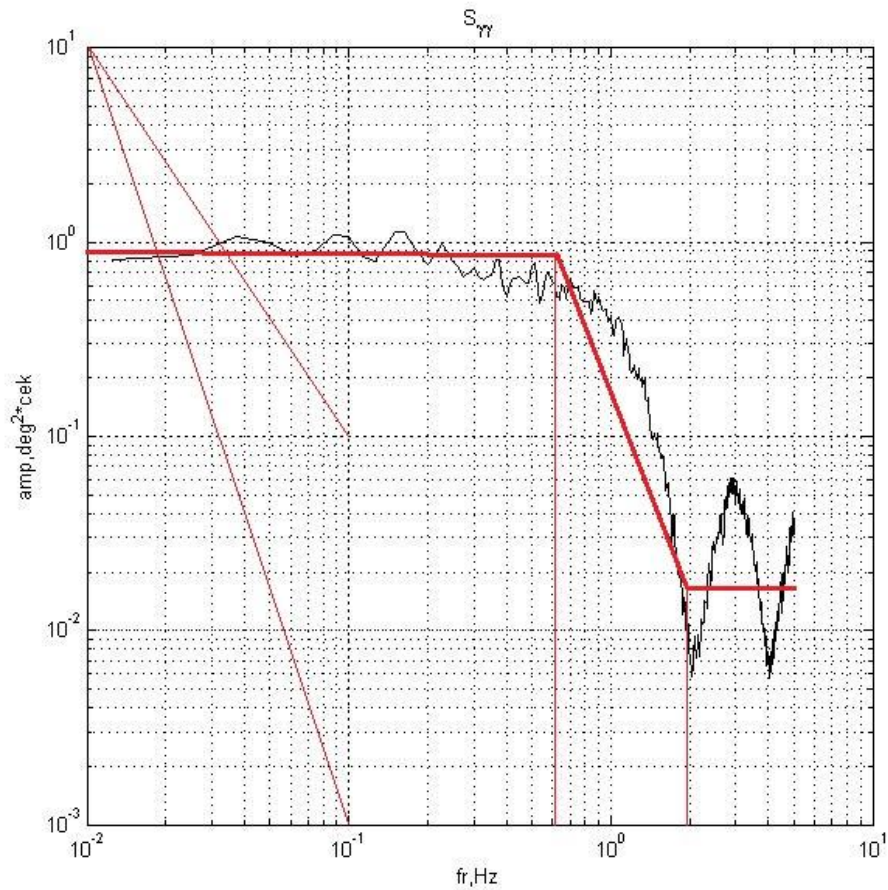


Рис. 46. Ілюстрація апроксимації спектральної щільності вихідного сигналу по каналу крену

Середньоквадратичне відхилення: _____

Кутові частоти та періоди спектральна щільність вихідного сигналу по каналу крену:

Графічне представлення за допомогою MATLAB апроксимованої і вихідної спектральних щільностей вихідного сигналу по каналу крену зображено на рис. 47.

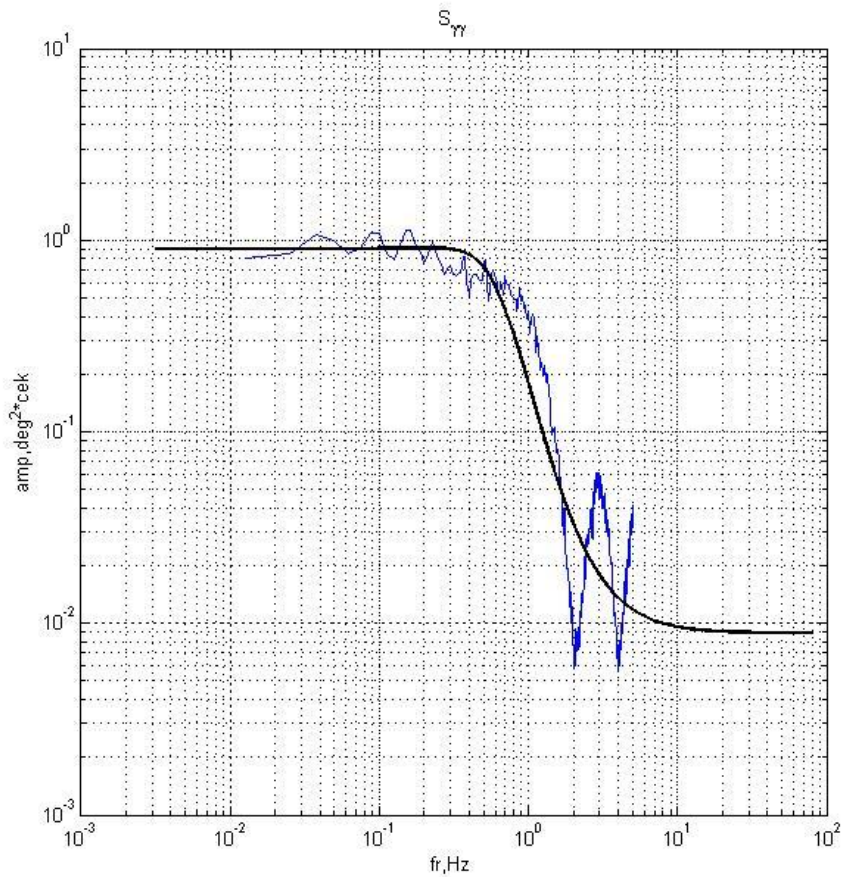


Рис. 47. Спектральна щільність вихідного сигналу по каналу крену

Визначена в результаті апроксимації математична модель для спектральної щільності вихідного сигналу по каналу крену має такий вигляд:

Математична модель спектральної щільності вихідного сигналу по каналу крену має важливе значення для аналізу динамічних характеристик системи. Модель дозволяє точно визначити вплив демпфування і часових постійних на амплітуду сигналу в залежності від частоти. Модель включає вирази для стандартних ланок з урахуванням їхніх частотних характеристик, що забезпечує високу точність при описі поведінки системи в різних режимах роботи. Завдяки врахуванню частотних характеристик стандартних ланок, модель може бути використана для прогнозування реакції системи на різні вихідні впливи. Ця модель є основою для подальшого аналізу і прогнозування поведінки системи в умовах різних вихідних впливів.

Визначимо коефіцієнт взаємозв'язку між вхідним та вихідним сигналами:

Графічне зображення кривих взаємна спектральної щільності між входом і виходом по каналу крену представлено на рис. 48.

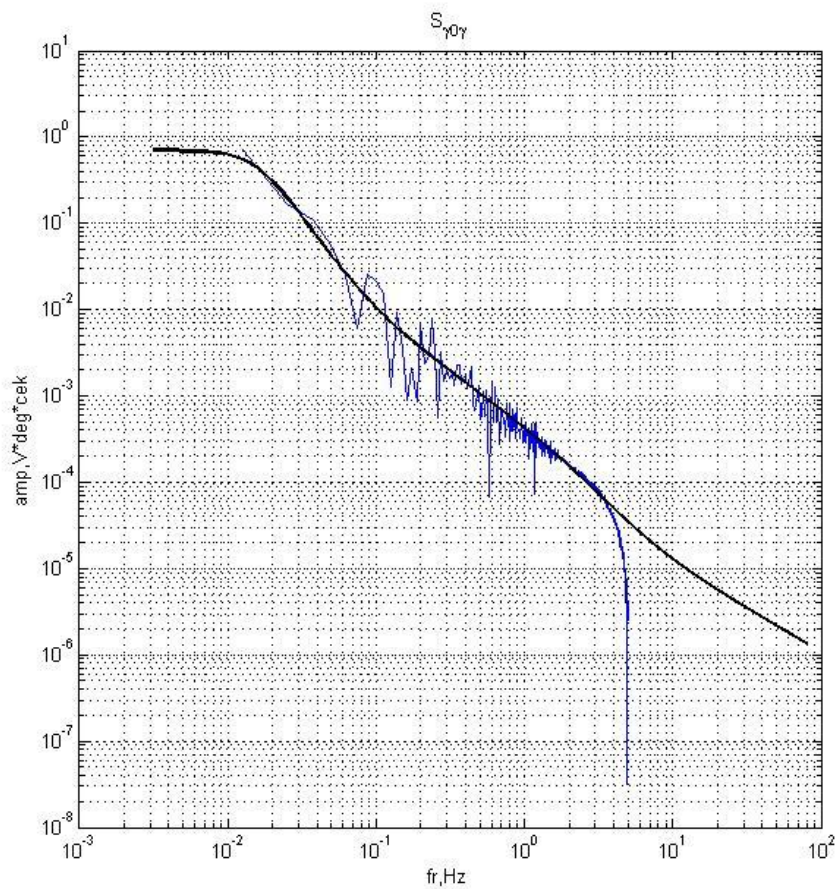


Рис. 48. Апроксимації амплітудної характеристики взаємна спектральної щільності вхід-вихід

Вираз для взаємної спектральної щільності між вхідним та вихідним сигналами:

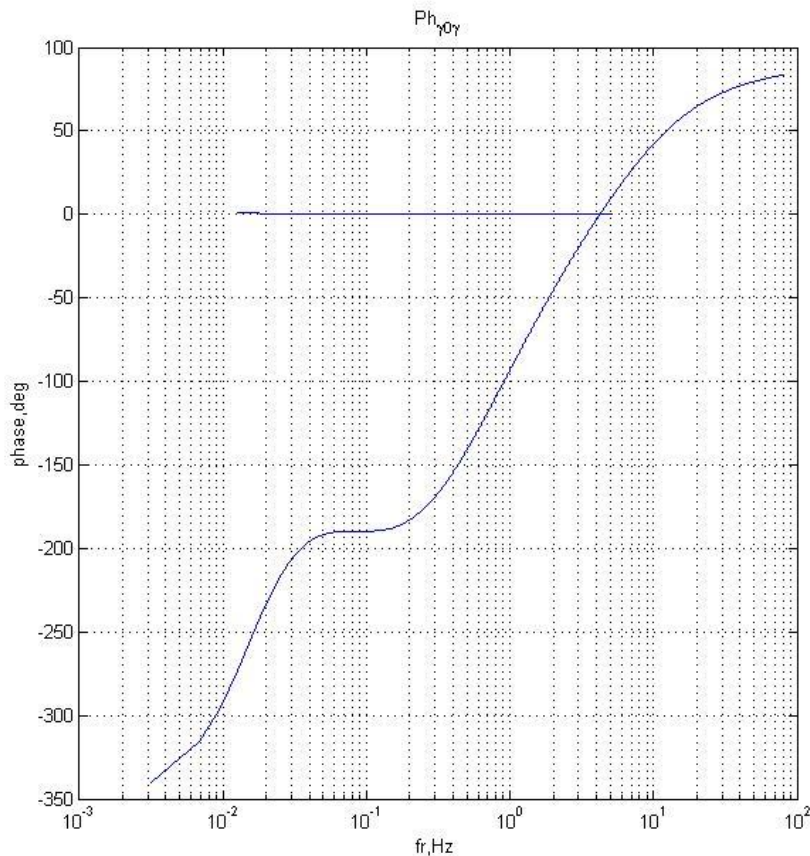


Рис. 49. Апроксимація фазової характеристики взаємна спектральної щільності вхід-вихід

За допомогою цього рисунку (рис. 49.) можна оцінити взаємну фазову характеристику між вхідним і вихідним сигналами в системі, що допомагає зрозуміти, як фаза вихідного сигналу змінюється відносно вхідного у різних частотних діапазонах. Це важливо для аналізу стійкості та динамічної поведінки системи, оскільки значні фазові зміщення можуть призвести до нестабільності. Крім того, фазова характеристика надає інформацію про тимчасові затримки в системі та допомагає у проектуванні коректорів для покращення її роботи. Аналіз цього графіку також може вказувати на наявність резонансних частот, що є критичним для уникнення небажаних коливань. Врахування фазових змін дозволяє точніше моделювати реальні умови роботи системи та забезпечувати її надійність.

Графічне зображення кривих взаємна спектральної щільності між виходом і входом по каналу крену представлено на рис. 50.

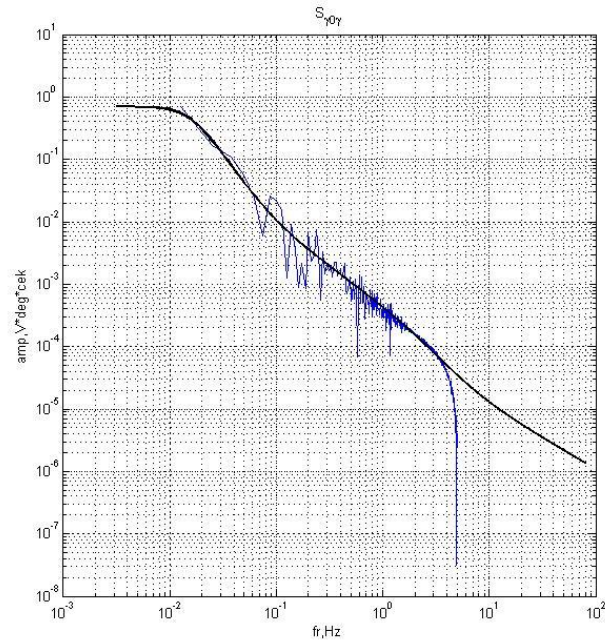


Рис. 50. Апроксимації амплітудної характеристики взаємна спектрально щільності вихід-вхід

Вираз для взаємної спектральної щільності між вихідним та вхідним сигналами:

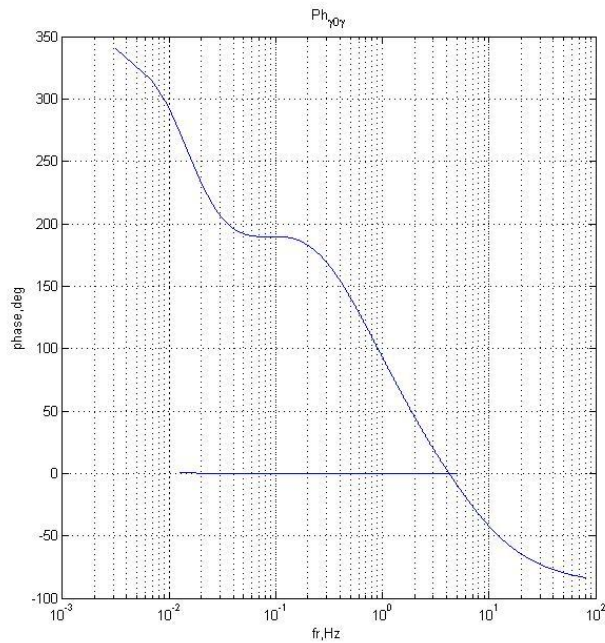


Рис. 51. Апроксимація фазової характеристики взаємна спектрально щільності вихід-вхід

Висновок до розділу:

На стенд задавали модель Драйдена турбулентності повітря. В ході проведеного дослідження були детально вивчені процеси первинної обробки даних, отриманих під час напівнатурного моделювання багатовимірною динамічного стенда-імітатора кутових положень по каналу крену. Були побудовані спектральні щільності для вхідного сигналу, що дозволило детально аналізувати його спектральну структуру, включаючи такі характеристики як амплітуда, частота та фаза.

На наступному етапі оброблялися спектральні щільності вхідних і вихідних сигналів, що дозволило порівняти їх спектральні структури та виявити можливі зміни або залежності між ними. Це дослідження дозволило зрозуміти систему більш детально та виявити відмінності між вхідними та вихідними сигналами. Отримані результати допомогли виявити потенційні області для покращення характеристик системи.

Було отримано математичні моделі у вигляді спектральних щільностей для вхідних та вихідних сигналів, а також взаємних спектральних щільностей між ними. Поставлені завдання були повністю виконані, а результати первинної обробки можуть бути використані на подальших етапах дослідження, таких як ідентифікація, синтез та модернізація динамічного багатовимірною стенда-імітатора по каналу крену. Ці моделі створюють основу для розробки більш складних алгоритмів керування та адаптації системи.

Таким чином, проведене дослідження забезпечило необхідні дані для подальшого вдосконалення системи, виявлення аномалій та оптимізації параметрів, що є важливим для покращення роботи квадрокоптера в умовах турбулентності повітря. Це дозволяє підвищити ефективність та безпеку експлуатації, особливо в складних метеорологічних умовах.

ВИСНОВКИ

У рамках дипломної роботи було проведено ґрунтовне дослідження обробки сигналів квадрокоптера, засноване на напівнатурному моделюванні по каналу крену.

Першим етапом дослідження було розглянуто основи безпілотних літальних апаратів та їх моделювання. Огляд БПЛА та аналіз різних типів мультикоптерів, зокрема квадрокоптера, дозволив зрозуміти їх характеристики, компоненти та структуру. Це забезпечило міцну теоретичну базу для подальшого аналізу та обробки сигналів.

У другому розділі були детально розглянуті методи обробки сигналів, такі як апроксимація, інтерполяція та метод найменших квадратів. Використання цих методів дозволило досягти високої точності в обробці даних та аналізі сигналів. Було показано, що кожен з методів має свої переваги, які можуть бути застосовані в залежності від конкретних умов і цілей дослідження.

Третій розділ присвячений первинній обробці сигналів квадрокоптера по каналу крену. У ході дослідження було детально вивчено процеси первинної обробки даних, включаючи побудову кривих спектральних щільностей та їх апроксимацію. Аналіз спектральної структури сигналів дозволив виявити важливі характеристики, такі як амплітуда, частота та фаза.

Дослідження спектральних щільностей вхідних і вихідних сигналів виявило їх структури, зміни та залежності, що допомогло зрозуміти систему та знайти можливості для покращення. Математичні моделі можна використовувати для ідентифікації, синтезу та модернізації, створюючи основу для складніших алгоритмів керування та адаптації. Це вдосконалило систему квадрокоптера, виявило аномалії та оптимізувало параметри, підвищуючи ефективність і безпеку в умовах турбулентності та складних метеоумов.

Кафедра АКСУ				НАУ 24.31.05.000 ПЗ			
<i>Виконав.</i>	<i>Грищук В.А.</i>			Висновки	<i>Літ.</i>	<i>Арк.</i>	<i>Аркушів</i>
<i>Керівник</i>	<i>Єрмолаєва О.В.</i>					73	74
<i>Консульт.</i>					151-403Б-СУ		
<i>Контрол.</i>	<i>Дивнич М.П.</i>						
<i>Зав. каф.</i>	<i>Мельник Ю.В.</i>						

СПИСОК БІБЛІОГРАФІЧНИХ ПОСИЛАНЬ ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Балакирев В. С., Дудников Є. Г., Цирлін А. М. Експериментальне визначення. Москва, 1967.
2. Введення в статистичну динаміку. Москва-Ленінград, 1952.
3. Єрмолаєва О. В., Безкоровайний Ю. М., Юрченко О. М. Методологічні основи оптимізації комплексів натурального та напівнатурного моделювання польоту при стохастичних впливах. Авіа-2003: V Міжнародна науково-технічна конференція, 23–25 квітня 2003 р.: тези доп.– К., 2003.– Т.2. – С.41-44.
4. Конспект лекцій. Курс 'Математичне моделювання', 2020. URL: https://kdrpm.pnu.edu.ua/wp-content/uploads/sites/55/2020/02/Konspekt_lect_MatModel_PrMat_Koledg.pdf
5. Сизиков В. С. Стійкі методи обробки результатів вимірювань. Санкт-Петербург, 1999.
6. Яковлєв Ю. С., Тимашов О. О., Єлісеєва О. В., Курзанцева Л. І. Математичні машини і системи, 2020, № 3. ISSN 1028-9763.
7. ArduPilot. Підключення ESC та моторів. URL: <https://ardupilot.org/copter/docs/connect-escs-and-motors.html>
8. Michael Smith. Анатомія дронів 101. URL: https://static.bhphotovideo.com/FrameWork/Product_Resources/monthlyPDF/winter2018/aerial.pdf
9. Oskar Liang. Типи багатороторних літаків. URL: <https://oscarliang.com/types-of-multicopter/>
10. Wikipedia. URL: <https://uk.wikipedia.org/wiki/%D0%86%D0%BD%D1%82%D0%B5%D1%80%D0%BF%D0%BE%D0%BB%D1%8F%D1%86%D1%96%D1%8F>