

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 тангажу.

Виконавець: _____ студент групи СУ-403Б Горбаненко Дмитро Валерійович

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

Горбаненка Дмитра Валерійовича

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

1. Тема кваліфікаційної роботи: Обробка сигналів за даними напівнатурного моделювання квадрокоптера по каналу тангажу 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 тангажу
4. Зміст пояснювальної записки: Вступ, Огляд різноманітності та класифікація коптерів, Методи і процедури обробки експериментальних даних, Обробка сигналів квадрокоптера по каналу тангажу, 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	13.05.24	
2	Аналіз літературних джерел	15.05.24 - 17.05.24	
3	Збір інформації	17.05.24 - 20.05.24	
4	Розробка змісту кваліфікаційної роботи	20.05.24 - 24.05.23	
5	Вступ	24.05.24 - 25.05.23	
6	Розділ 1. Огляд різноманітності та класифікація коптерів	25.05.24 - 27.05.23	
7	Розділ 2. Методи і процедури обробки експериментальних даних	27.05.24 - 30.05.23	
8	<u>Розділ 3. Обробка сигналів квадрокоптера по каналу тангажу</u>	26.05.24 - 02.06.23	
9	Оформлення роботи	02.05.24 - 04.06.24	

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

Керівник кваліфікаційної роботи _____ Єрмолаєва О.В.

(підпис керівника)

(П.І.Б.)

Завдання прийняв до виконання _____ Горбаненко Д.В.

(підпис випускника)

(П.І.Б.)

РЕФЕРАТ

Кваліфікаційна робота на тему «Обробка сигналів за даними напівнатурного моделювання квадрокоптера по каналу тангажу»: 67 сторінок, 43 рисунків, 8 таблиць, 12 літературних джерел.

Об'єкт дослідження – квадрокоптер, встановлений 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 тангажу.

Методи дослідження – метод узагальнених логарифмічних характеристик.

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

ЗМІСТ

ВСТУП.....	7
РОЗДІЛ 1. ОГЛЯД РІЗНОМАНІТНОСТІ ТА КЛАСИФІКАЦІЯ КОПТЕРІВ.....	8
1.1. Загальні положення про коптери.....	9
1.2. Різновид коптерів за масогабаритними характеристиками.....	10
1.3. Класифікація коптерів за призначенням.....	10
1.4. Конструктивні елементи коптерів.....	11
1.5. Типи коптерів за видом конструкції.....	17
1.6. Опис досліджуваного квадрокоптера.....	25
1.7. Натурне моделювання.....	29
1.8. Напівнатурне моделювання.....	31
1.9. Опис багатовимірною динамічного стенда-імітатора.....	32
РОЗДІЛ 2. МЕТОДИ І ПРОЦЕДУРИ ОБРОБКИ ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНИХ ДАНИХ.....	35
2.1. Апроксимація.....	36
2.1.1. Лінійна апроксимація (лінійне згладжування).....	36
2.1.2. Квадратична апроксимація.....	37
2.2. Інтерполяція. Екстраполяція.....	38
2.2.1. Лінійна інтерполяція.....	39
2.2.2. Кусочно-лінійна інтерполяція.....	40
2.2.3. Квадратична інтерполяція.....	40
2.2.4. Кусочно-квадратична інтерполяція.....	41
2.2.5. Інтерполяційний поліном Лагранжа.....	42
2.2.6. Інтерполяційний поліном Ньютона.....	43
2.3. Метод найменших квадратів.....	45
2.4. Метод узагальнених логарифмічних характеристик.....	46
РОЗДІЛ 3. ОБРОБКА СИГНАЛІВ КВАДРОКОПТЕРА ПО КАНАЛУ ТАНГАЖУ.....	52

3.1 Побудова спектральних щільностей вхідного та вихідного сигналів по каналу тангажу.....	53
3.2 Апроксимація логарифмічних кривих спектральних щільностей.....	56
3.3 Висновок до розділу.....	63
ВИСНОВКИ.....	64
СПИСОК БІБЛІГРАФІЧНИХ ПОСИЛАНЬ ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ.....	66

ВСТУП

З розвитком технологій коптери стають все більш потужними та ефективними, тому знаходять ще більше застосувань. Завдяки конструкційним та функціональним перевагам саме мультикоптери набули великої популярності. Простота конструкції, висока маневреність та стабільність у польоті стали основними причинами їх розповсюдженого використання. Паралельно із розвитком спектру застосувань коптерів, актуальним стає питання вдосконалення методів моделювання та обробки сигналів, що дозволяє підвищити точність та надійність цих апаратів.

Кваліфікаційна робота спрямована на дослідження методів обробки сигналів, що застосовуються для експериментальних масивів даних, які були отримані шляхом напівнатурного моделювання квадрокоптера.

Метою є отримання математичних моделей у вигляді спектральних та взаємна спектральних щільностей вхідних та вихідних сигналів квадрокоптера по каналу тангажу.

Вдосконалення систем управління та стабілізації коптерів вимагає розуміння їх конструктивних особливостей, динамічних характеристик та методів моделювання.

У цій роботі проводиться огляд різних видів коптерів, наведено їх основні компоненти та конструктивні особливості. Розглядається декілька методів та процедур обробки даних. Основна увага приділяється методу узагальнених логарифмічних характеристик, оскільки за допомогою цього методу будуть отримані результати в рамках цієї роботи. Очікується, що це дослідження сприятиме покращенню точності та надійності управління коптерами.

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

Кафедра АКСУ				НАУ 24.30.36.000 ПЗ			
<i>Виконав.</i>	<i>Горбаненко Д.В.</i>			ВСТУП	<i>Лім.</i>	<i>Арк.</i>	<i>Аркушів</i>
<i>Керівник</i>	<i>Єрмолаєва О.В.</i>					7	67
<i>Консульт.</i>	.				151-403Б-СУ		
<i>Контрол.</i>	<i>Дивнич М.П.</i>						
<i>Зав. каф.</i>	<i>Мельник Ю.В.</i>						

РОЗДІЛ 1 ОГЛЯД РІЗНОМАНІТНОСТІ ТА КЛАСИФІКАЦІЯ КОПТЕРІВ

Оскільки такі безпілотні літальні апарати як коптери набули високого розповсюдження, необхідно ознайомитись із цим поняттям більш детально. Метою цього розділу є надання загального уявлення про коптери, їхню структуру, принцип роботи та основні характеристики. Ознайомлення з цими аспектами допоможе краще зрозуміти потенціал та можливості цих безпілотних літальних апаратів у різних сферах.

У цьому розділі проводиться дослідження різноманіття коптерів за різними критеріями, що включає в себе їхні види за масогабаритними характеристиками, призначенням, конструкцією та іншими особливостями. Коптери можуть відрізнятися за розмірами, дальністю польоту, вантажопідйомністю, а також застосуванням у різних галузях, що визначає їхню функціональність та ефективність.

Окрім того, у цьому розділі розглянуто загальні принципи, які є типовими для багатьох видів коптерів. Наведено загальні конструктивні елементи та їх роль в роботі коптера. Розглянуто декілька коптерів-представників різних класів, аналізуючи технічні характеристики яких, можна приблизно визначити їх призначення.

В кінці розділу розглядаються поняття натурального та напівнатурного моделювання. Наведена в цьому розділі інформація про ці методи дасть чітко зрозуміти різницю між ними, їх переваги та недоліки.

Кафедра АКСУ				НАУ 24.30.36.000 ПЗ						
Виконав.	Горбаненко Д.В.			Розділ 1. Огляд різноманітності та класифікація коптерів	Літ.	Арк.	Аркушів			
Керівник	Єрмолаєва О.В.						8		67	
Консульт.					151-403Б-СУ					
Контрол.	Дивнич М.П.									
Зав. каф.	Мельник Ю.В.									

1.1. Загальні положення про коптери

Коптер - це літальний апарат, який піднімається та утримується у повітрі завдяки одному або декільком пропелерам. Вони також відомі як квадрокоптери, мультикоптери або дрони. Коптери використовуються для різних цілей, таких як аерофотозйомка, відеозйомка, мапування місцевості, розвідка, розваги, комерційні та військові місії.

Основною характеристикою коптерів є їх здатність стабільно утримуватися у повітрі та маневрувати в просторі завдяки зміні швидкості обертання пропелерів. Керування коптером зазвичай здійснюється за допомогою радіоуправління або автономної програми, яка встановлена в апараті. Коптери можуть мати різну кількість пропелерів, що впливає на їхні характеристики, такі як стабільність, підйомна сила та максимальна швидкість.

Такі апарати можуть відрізнятися показниками, але в їх основі лежать базові принципи [4]:

- принцип підйомної сили. Коптери піднімаються в повітря завдяки створенню підйомної сили пропелерами. Пропелери створюють тиск, який дозволяє коптеру підійматися у повітрі. Цей принцип діє на всі типи коптерів, незалежно від їхньої конструкції або кількості пропелерів;
- вміння витримувати задану висоту та швидкість польоту. Для забезпечення стабільного польоту коптери часто використовують системи стабілізації, такі як гіроскопи та акселерометри. Ці системи допомагають утримувати коптер у вертикальному положенні та грають роль у компенсуванні небажаних рухів;
- можливість встановлення на апарат додаткового обладнання. Наприклад, встановлення камери або наукового обладнання. Це вимагає розробки конструкцій, які здатні витримувати додаткове навантаження, зберігаючи при цьому адекватні характеристики стабільності та маневреності;
- енергопостачання. Коптери використовують акумулятори або інші джерела

енергії для живлення пропелерів та інших систем. Ефективність енергопостачання впливає на тривалість польоту та інші характеристики коптера.

1.2. Різновид коптерів за масогабаритними характеристиками

Функціональність коптера залежить від його масогабаритних характеристик. Прийнято розділяти їх на такі класи:

- міні. Такі коптери є компактними з обмеженим радіусом використання. Мають високу маневреність, але у відкритому просторі можуть бути нестійкими через погодні умови. Зазвичай представники такого класу використовуються як іграшки;
- легкі. Завдяки збільшеній потужності та легкій вазі, ці коптери можуть досягати значних швидкостей і виконувати складні маневри. Акумулятор має зменшені габарити, тому час використання досить обмежений. Застосування таких коптерів знаходять у перегонах або коли потрібна зйомка на великій швидкості;
- середні. Коптери цього класу мають більшу стійкість до впливу погодних умов, і також характеризуються більш тривалим часом роботи. Такий вид найчастіше використовується для професійних зйомок;
- важкі. Мають великий та важкий корпус, потужні двигуни, є стійкими до впливу погодних умов. Застосовуються для тривалих спостережень та наукових досліджень.

1.3. Класифікація коптерів за призначенням

Враховуючи функціональність коптерів, їх можна класифікувати за призначенням:

- розважальні коптери (іграшкові, гоночні). Іграшкові коптери призначені для

дітей та дорослих для розваг. Гоночні коптери легкі, високошвидкісні, розроблені для змагань. Відрізняються високою маневреністю та швидкістю;

- фотографічні та відеозйомкові коптери (аматорські, професійні). Аматорські коптери для зйомок зазвичай дешеві, тому оснащені дешевими компонентами та камерами середньої якості. Професійні використовуються коптери для зйомок професіоналами для кінематографії, телебачення та інших видів високоякісної зйомки. Мають стабілізаційні системи і високоякісні камери;
- рятувальні коптери. Використовуються в пошуково-рятувальних операціях, можуть бути оснащені тепловізорами, камерами та іншими сенсорами;
- наукові та дослідницькі коптери. Мають високу дальність польоту, стійкі до зовнішніх впливів та можуть бути оснащені різноманітними науковими інструментами для збору даних;
- логістичні коптери. Призначені для доставки товарів, особливо в важкодоступні райони. Їх вантажопідйомність може варіюватися від декількох кілограмів до кількох десятків кілограмів, залежно від моделі. Зазвичай мають велику дальність польоту;
- військові коптери (розвідувальні, ударні). Розвідувальні коптери використовуються для збору розвідувальної інформації, часто оснащені камерами та іншими розвідувальними пристроями. Ударні коптери оснащені зброєю для виконання бойових завдань.

1.4. Конструктивні елементи коптерів

Коптери можуть відрізнитися за типом конструкції залежно від їх призначення, технічних вимог та умов експлуатації. Конструктивні елементи коптера [3] включають в себе різноманітні компоненти, які працюють разом для забезпечення стабільного і керованого польоту. Нижче наведені основні

конструктивні елементи коптерів.



Рис. 1.1. Рама квадрокоптера

Рама (рис.1.1) є основною структурою коптера, на яку кріпляться всі інші компоненти. Вона повинна бути міцною та легкою, зазвичай виготовляється з матеріалів, таких як алюміній, пластик або карбон.



Рис. 1.2. Двигуни (а) та гвинти (б) для коптерів

Електричні двигуни (рис.1.2а) обертають гвинти (рис.1.2б), утворюючи гвинтомоторну пару. Для кожного гвинта встановлюється окремий двигун. Можуть бути безколекторними (найпоширеніші через високу ефективність) або

коллекторними.

Для ефективного польоту та витрат енергії, двигун повинен мати такі характеристики, які будуть задовільняти аеродинамічні властивості гвинта для створення тяги та розвитку швидкості. Також від правильної комбінації гвинтомоторної пари залежить, яку максимальну швидкість буде розвивати літальний апарат і якою буде його крейсерська швидкість.

В авіації гвинти використовуються для створення аеродинамічних сил, що призводять до руху літальних апаратів. Головною задачею гвинта є створення тяги. В залежності від типу літального апарату гвинти можуть створювати підйомну силу (гелікоптери, квадрокоптери) та забезпечувати поступальний рух (літаки, дирижаблі).

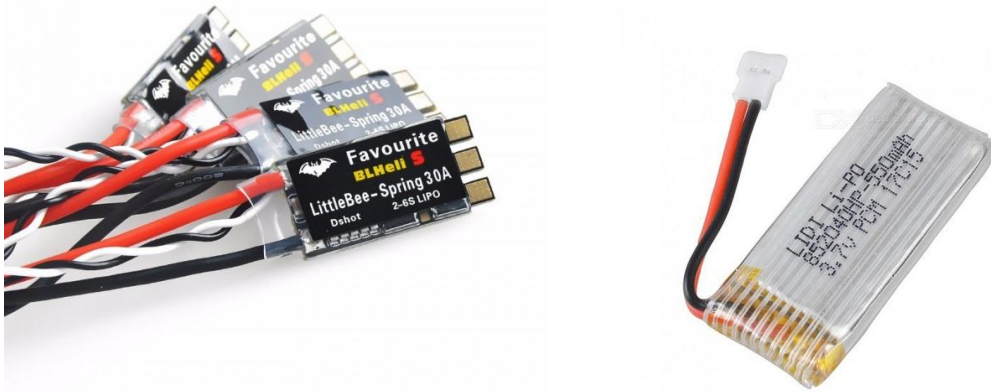
Зазвичай гвинти виготовляються з пластику, карбону. Бувають різних розмірів і форм, що впливає на характеристики польоту.

Гвинт можна описати [6] за допомогою коефіцієнта випередження, коефіцієнта тяги та коефіцієнта потужності. За цими трьома коефіцієнтами можна розрахувати ефективність,

Основні характеристики гвинта (за версією NASA):

- коефіцієнт тяги гвинта: $C_T = \frac{T}{\rho \cdot n^2 \cdot D^4}$;
- коефіцієнт споживаної потужності гвинта: $C_P = \frac{T}{\rho \cdot n^3 \cdot D^5}$;
- коефіцієнт випередження (крок гвинта): $J = \frac{V}{n \cdot D}$;
- коефіцієнт корисної дії $\eta = \frac{V}{n \cdot D} \cdot \frac{C_T}{C_P}$,

тут V – повітряна швидкість [м/с]; ρ – густина повітря [кг/м³]; P – споживана потужність [Вт]; T – тяга гвинта [Н]; D – діаметр гвинта [м]; n – кількість обертів [1/с].



а

б

Рис. 1.3. Регулятори обертів (а) та акумулятор (б) для коптерів

Регулятори обертів (рис.1.3а) (ESC) контролюють швидкість обертання моторів. Вони приймають сигнали від польотного контролера і регулюють подачу енергії до моторів.

Акумулятор (рис.1.3б) - Джерело живлення для моторів та електроніки коптера. Літій-полімерні (LiPo) батареї найчастіше використовуються через високу енергетичну щільність та легкість.



Рис. 1.4. Польотний контролер

Польотний контролер (рис.1.4) - центральний процесор коптера, який обробляє дані з датчиків та команд оператора, щоб стабілізувати політ і

виконувати маневри. Включає в себе акселерометри, гіроскопи та інші сенсори.

Основні функції, які виконує польотний контролер:

- збір інформації з датчиків (встановлених на контролері чи зовнішніх, таких як компас, GPS, гіроскопи тощо);
- визначення та розрахунок свого положення у просторі на основі даних з датчиків;
- збір інформації про зовнішні керуючі впливи (сигнал з пульта керування або наступний крок алгоритму програми/автопілотування);
- розрахунок проблем та Пропорційно-Інтегрально-Диференціальних (PID) коефіцієнтів відповідно до прошивки або програми автопілотування чи ручного управління;
- відправка керуючих/коригуючих сигналів на виконавчі механізми (наприклад, на регулятори обертів).

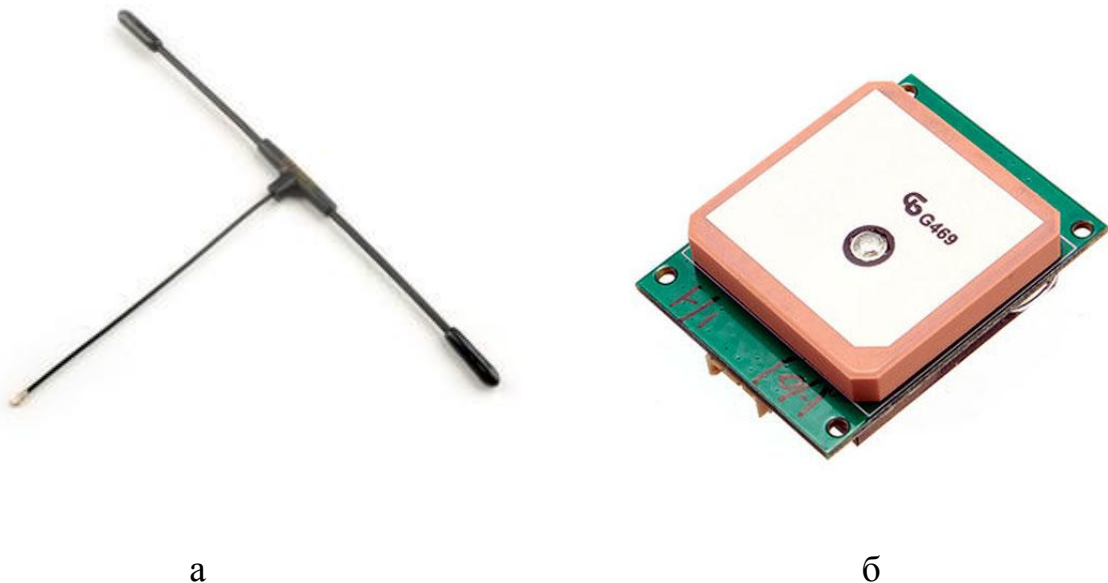


Рис. 1.5. Антена (а) та GPS модуль (б) для коптерів

Антени (рис.1.5а) використовуються для передачі та прийому сигналів між коптером та пультом управління, а іноді для передачі відеосигналу в реальному

часі.

GPS (рис.1.5б) модуль використовується для навігації та стабілізації коптера на місцевості.

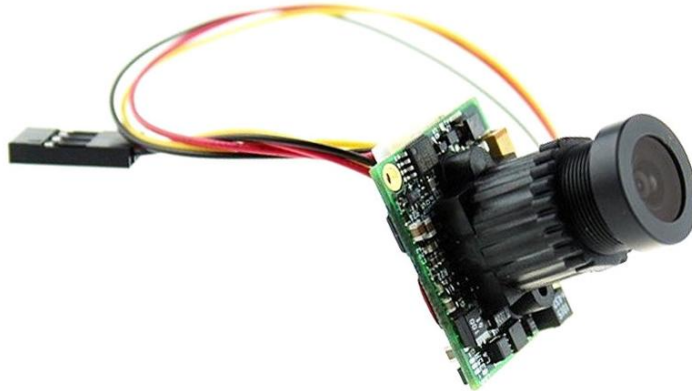


Рис. 1.6. Камера для коптерів

Камера (рис.1.6) є опціональним елементом. Може бути фіксованою або встановленою на стабілізуючі підвіски (гімбали) для зменшення вібрацій та покращення якості зображення.

Додаткові сенсори, такі як ультразвукові датчики висоти, барометри, магнітометри, які покращують стабілізацію та навігацію коптера.



Рис. 1.7. Пульт керування коптером

Керування коптером може здійснюватись наземним контролером (рис.1.7) (пульт управління), який зазвичай включає в себе джойстики, кнопки та дисплей для моніторингу польоту. Також коптер може керуватись автоматично алгоритмом заданої програми.

1.5. Типи коптерів за видом конструкції

Більшість коптерів спираються на загальні принципи функціонування, бувають різні за розміром, масштабом і призначенням. Конструктивні елементи також можуть відрізнятися в залежності від типу коптера. Тому доцільно дослідити різноманіття типів коптерів, враховуючи їхню конструкцію та кількість гвинтомоторних пар.

Нижче наведені типи коптерів за видом конструкції.

Однороторний коптер (рис.1.8) - це унікальний тип коптера, який відрізняється своєю конструкцією та робочим принципом. Він має один великий пропелер, що забезпечує підйомну силу та напрямок руху, та один маленький хвостовий пропелер для стабілізації та керування.

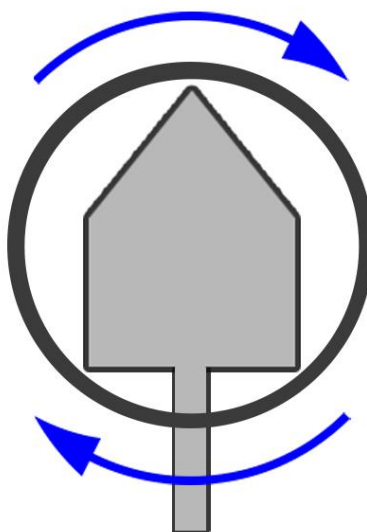


Рис. 1.8. Схематичне представлення однороторного типу коптера

Головний пропелер відповідає за генерацію підйомної сили та руху коптера вперед, назад або в бік. Він забезпечує основну тягу для польоту. Хвостовий пропелер зазвичай розташований вертикально і відповідає за стабілізацію та керування коптером.

Представником класу однороторного типу коптерів є PDH-GS120 (рис.1.9).



Рис. 1.9. Коптер PDH-GS120

Таблиця 1.1

Технічні характеристики Коптера PDH-GS120

Розміри	1847×439×739 мм
Вага	19 кг
Діаметр пропелера	Головний гвинт: 2204 мм Хвостовий гвинт: 390 мм
Тривалість польоту	Приблизно 150 хв
Максимальна швидкість	100 км/год

Квадрокоптер (рис.1.10) має чотири пропелери, розташовані в вершинах квадрата. Він є найпоширенішим типом мультикоптера завдяки своїй простоті конструкції та високій стабільності в польоті.

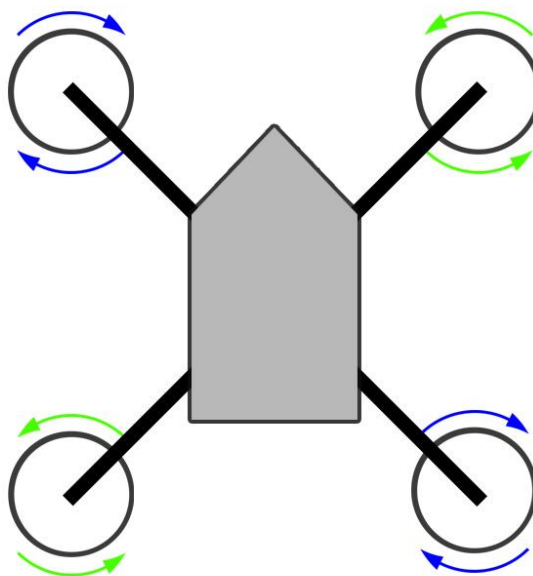


Рис. 1.10. Схематичне представлення квадрокоптера

Два пропелери обертаються за годинниковою стрілкою, а два - проти годинникової стрілки. Всі пропелери контролюються окремими електродвигунами, що дозволяє точно регулювати швидкість обертання кожного з них.

Для стабільного зависання в повітрі швидкість обертання пропелерів підтримується на одному рівні.

Квадрокоптер може рухатися вперед, назад та вбік, змінюючи швидкість обертання окремих пропелерів. Наприклад, обертання задніх пропелерів збільшується, а передніх - зменшується, нахилиючи коптер вперед.

Політний контролер аналізує дані з сенсорів і коригує швидкість обертання пропелерів для підтримання стабільного польоту та реагування на команди оператора.

Представник класу квадрокоптерів є DJI Mavic 3 Classic (рис.1.11).



Рис. 1.11. Квадрокоптер DJI Mavic 3 Classic

Таблиця 1.2

Технічні характеристики DJI Mavic 3 Classic

Розміри	347,5×283×107,7 мм (без пропелерів)
Злітна вага	895 г
Максимальна дальність польоту	30 км
Тривалість польоту	46 хвилин
Максимальна горизонтальна швидкість	19-21м/с
Максимальна висота зльоту	6000 м

Гексакоптер (рис.1.12) - це тип мультикоптера, який має шість пропелерів. Цей дизайн забезпечує підвищену стабільність, більшу вантажопідйомність та надійність порівняно з квадрокоптерами, роблячи їх ідеальними для професійних завдань, які вимагають більшої потужності та витривалості.

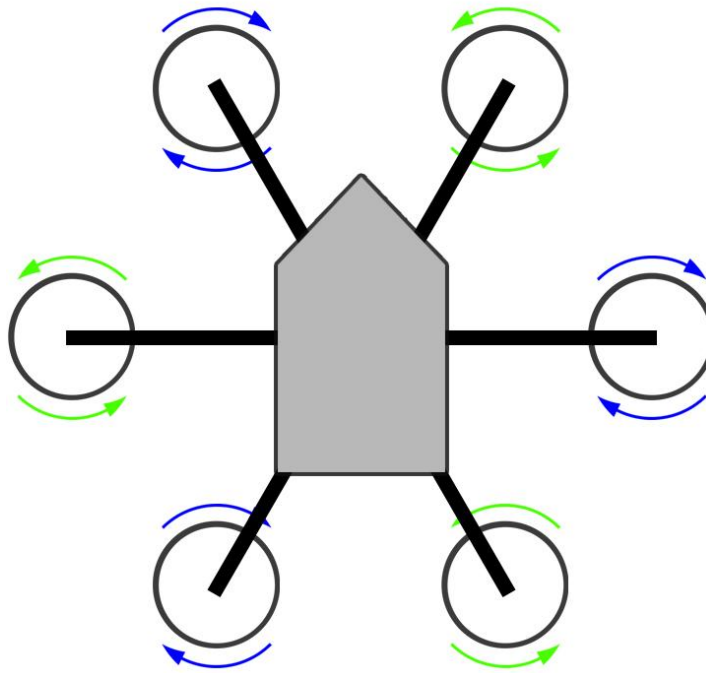


Рис. 1.12. Схематичне представлення гексакоптера

Три пропелери обертаються за годинниковою стрілкою, а три - проти годинникової стрілки. Це забезпечує баланс і стабільність під час польоту, нейтралізуючи обертові моменти.

Їх перевага над квадрокоптерами:

- підвищена стабільність та надійність;
- більша вантажопідйомність, що дозволяє використовувати більш важке обладнання;
- краща стійкість до вітру та несприятливих погодних умов.

Недоліки:

- вища вартість порівняно з квадрокоптерами;
- більша складність конструкції та управління;
- збільшене енергоспоживання, що може обмежувати час польоту.

Представником класу гексакоптерів DJI Matrice 600 Pro (рис.1.13).



Рис. 1.13. Гексакоптер DJI Matrice 600 Pro

Таблиця 1.3

Технічні характеристики DJI Matrice 600 Pro

Розміри	1668 мм × 1518 мм × 727 мм
Вага	9,5-10 кг (в залежності від типу батарей)
Максимальна висота зльоту над рівнем моря	4500 м (гвинти 2195)
Тривалість польоту	32-38 хв
Максимальна швидкість	65 км/год

Октокоптер (рис.1.14) - це тип безпілотного літального апарату, оснащений вісьмома пропелерами, розташованими симетрично в вершинах восьмикутника. Ця конструкція забезпечує високу стабільність, вантажопідйомність і надійність, що робить октокоптери придатними для професійних завдань, які потребують великих навантажень і тривалих польотів.

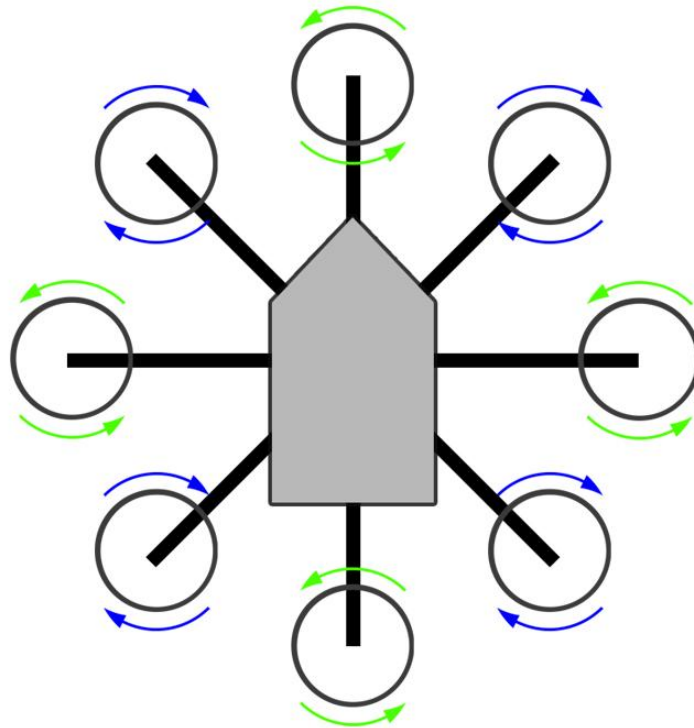


Рис. 1.14. Схематичне представлення октокоптера

Октокоптер використовує чотири пропелери, що обертаються за годинниковою стрілкою, і чотири, що обертаються проти годинникової стрілки. Це забезпечує баланс і нейтралізацію обертових моментів.

Завдяки восьми пропелерам, октокоптер може залишатися в повітрі і продовжувати стабільний політ навіть у разі відмови одного з двигунів.

Одним з недоліків використання октокоптерів є їх висока енергоспоживання, особливо порівняно з квадрокоптерами або гексакоптерами. Завдяки восьми пропелерам, октокоптер потребує більше енергії [1] для підтримання польоту та стабільності.

Представником класу є октокоптер FLYD-2400 (рис.1.15).



Рис. 1.15. Октокоптер FLYD-2400

Таблиця 1.4

Технічні характеристики FLYD-2400

Розміри	150 × 60 × 50 см
Вага порожнього	20 кг
Максимальна злітна вага	70 кг
Тривалість польоту	75 хв (без навантаження)
Швидкість польоту	0 ~10 м/с

Крім розглянутих видів коптерів існує ще багато різних та цікавих конструкцій, які варто навести. Наприклад, трикоптери та гібридні коптери, або коптери з класичною кількістю пропелерів, але іншої конструкції.

Трикоптер є не дуже поширеним видом [4], оскільки порівняно з іншими має більшу кількість недоліків. Вони, як правило, менш стабільні, через меншу кількість пропелерів, мають меншу масу порівняно з іншими більшими коптерами, що може зробити їх більш схильними до впливу турбулентних потоків. Також розподілення маси для такого типу коптера буде складнішим.

Гібридні коптери поєднують у собі риси коптерів і літаків. Вони можуть літати вертикально, але також мати можливість швидко переходити до

горизонтального польоту для досягнення великої швидкості і ефективності польоту.

Класичні квадрокоптери, гексакоптери та октокоптери можуть мати нестандартну будову (рис.1.16). Наприклад, гексакоптери та октокоптери, у яких пропелери розташовані не тільки на верхній площині, але і знизу, що дозволяє зменшити кількість плечей, на яких закріплені гвинти та двигуни. Кожна така пара гвинтів обертається в різні сторони, для компенсації обертового моменту.

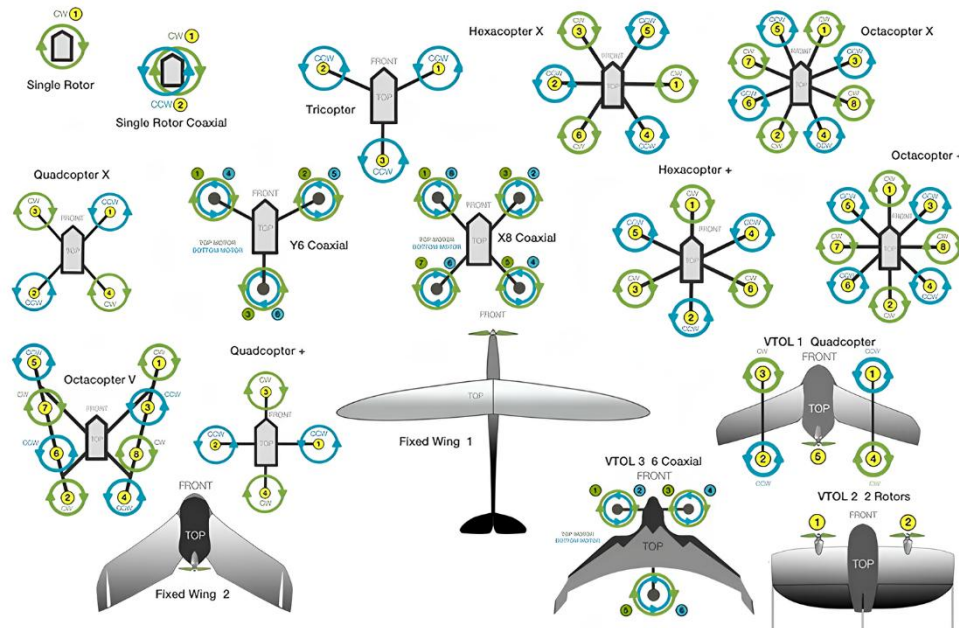


Рис. 1.16. Різні види коптерів

Фактично немає однозначної та універсальної [1] думки про те, який тип безпілотної літакої є найкращим: квадрокоптер, гексакоптер, трикоптер або октокоптер. При виборі такого пристрою розумно керуватися індивідуальними потребами та цілями, які треба досягти з його використанням.

1.6. Опис досліджуваного квадрокоптера

Квадрокоптер, який досліджується у роботі, не є серійним та зібраний із компонентів від різних виробників.

Всі елементи кріпляться до рами F450 (рис.1.17).



Рис. 1.17. Рама для квадрокоптера F450

Компоненти з яких збирається рама F450:

- верхня платформа 1 шт.;
- нижня платформа 1 шт.;
- гвинти: F-M2.5*6 - 24 шт.;
- промені x 4 шт.

Матеріал променів - високоміцний пластик, матеріал центральної бази та кріплень моторів - скловолокно, вага 290 грам. Відстань між двома протилежними осями двигунів 455 мм. Дозволяє будувати квадрокоптери як за схемою X (ікс), так і за схемою + (плюс).

До рами закріплені 4 безколекторних двигуна 2212 920KV (рис.1.18).

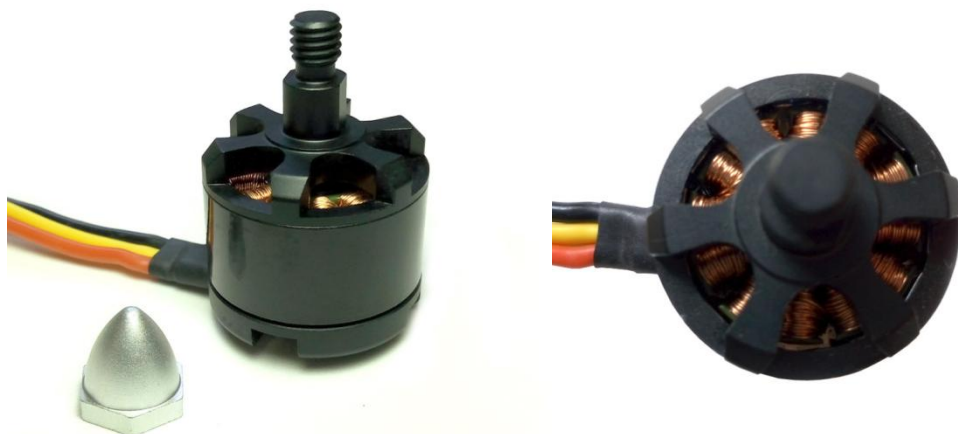


Рис. 1.18. Двигун 2212 920KV

Технічні характеристики 2212 920KV

Обертів на вольт (KV)	920
Розмір	2212
Напруга живлення	2S-4S (4S тільки з 9 дюймовими гвинтами)
Опір	0.17Ом
Максимальна потужність	165Вт
Споживання струму при простій	0.4А
Матеріал	6063 алюміній
Діаметр	28мм
Висота	24мм (без урахування валу)
Вага	51г

В якості центрального процесора коптера виступає польотний контролер SP Pro Racing F3 (копія) (рис.1.19).

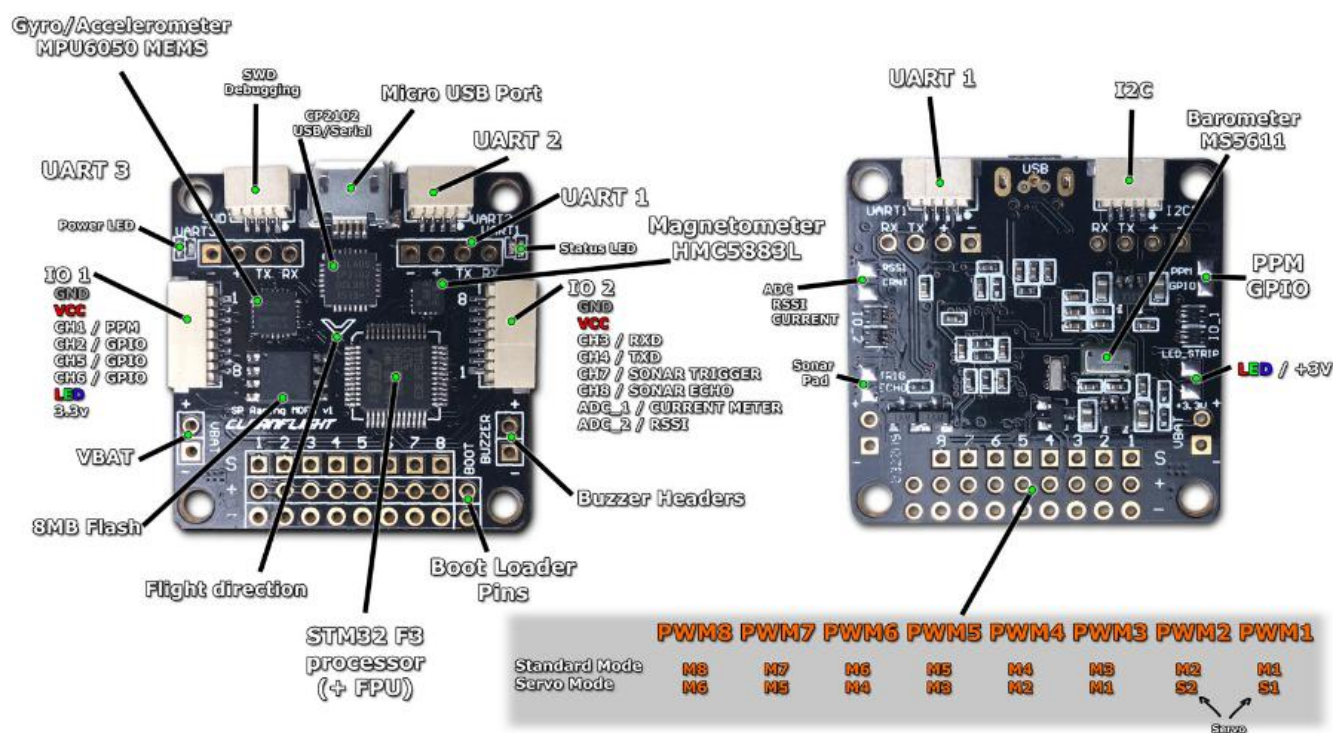


Рис. 1.19. Польотний контролер SP Pro Racing F3

Технічні характеристики SP Pro Racing F3

Розміри плати	36x36мм
Вага	6г
Процесор	STM32F303 CPU, 72Mhz inc FPU
Датчик акселерометра/гіроскопа	MPU6050

Особливості:

- політна чорна скринька записує в “логи” все, що відбувається;
- порт моніторингу напруги та струму батареї;
- OneShot ESC для швидкої реакції в керуванні двигунами;
- широка підтримка приймачів: SBus, SumH, SumD, Spektrum1024/2048, XBus, PPM, PWM.

Встановлені гвинти 1045 (рис.1.20) для двигунів із посадчним ключем.



Рис. 1.20. Гвинти 1045

Технічні характеристики Гвинтів 1045

Розмір (діагональний)	254мм
Вага	16г/пара
Матеріал (гвинти)	ABS пластик
Матеріал (втулки)	нейлон
Рекомендовані двигуни	A2208 / A2212 800...1200 kV
Рекомендована батарея	Li-Po 3-4S 2000...4000мАч

1.7. Натурне моделювання

Моделювання спрямоване на отримання, обробку, візуалізацію та використання інформації про взаємодію об'єктів між собою та їх навколишнім середовищем. Модель виступає [2] як інструмент для розуміння властивостей та закономірностей поведінки об'єкту. Основне призначення моделі в управлінні - передбачення реакції об'єкту на керуючі впливи.

Перехід від дослідження об'єкта до дослідження моделі та подальшого використання результатів на об'єкті вимагає, щоб модель була адекватною. Адекватність означає, що модель достатньо точно відтворює всі важливі властивості об'єкта для цілей конкретного дослідження. Це ключова властивість моделі, яка визначає її придатність для використання.

Натурне моделювання — це метод дослідження, що передбачає використання реальних об'єктів для вивчення явищ, процесів або систем з наступною обробкою результатів. Воно проводиться на реальному об'єкті з метою визначення деяких сторін його функціонування. Це може включати дослідження граничних режимів роботи об'єкта або визначення окремих характеристик реально діючого об'єкта. У багатьох випадках натурний експеримент може бути дуже тривалим або високовартісним.

Існує кілька типів [7] натурального моделювання (рис.1.21), залежно від мети і методів проведення. Основні типи включають науковий експеримент, комплексні випробування та виробничий експеримент.

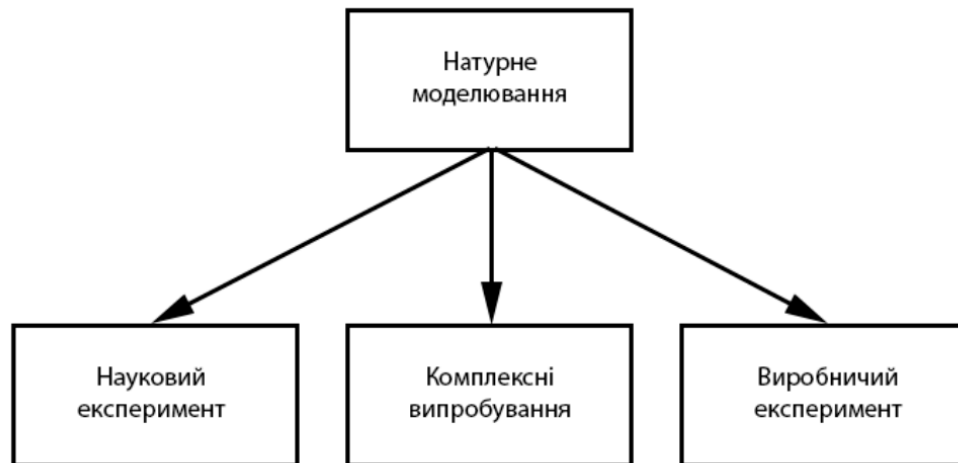


Рис. 1.21. Типи натурального моделювання

Науковий експеримент використовує різноманітні засоби обробки інформації та можливість активної участі людини з метою перевірки наукових гіпотез, розробки нових теорій або встановлення закономірностей. Під час експерименту проводяться збудовальні впливи на процес функціонування об'єкта з метою виявлення критичних ситуацій і визначення меж його стійкості. Цей процес характеризується широким використанням обчислювальної техніки, що сприяє як обробці експериментальних даних, так і організації та проведенню експериментів.

Комплексні випробування полягають у множинних повтореннях випробувань реальної системи, яка працює в нормальних умовах. Їх мета полягає у отриманні моделей, які оцінюють певні аспекти функціонування системи або її ефективність. Під час комплексних випробувань здійснюється аналіз та узагальнення інформації про спостережені закономірності.

Виробничий експеримент ґрунтується на узагальненні досвіду, накопиченого під час реального виробничого процесу. Його мета полягає в оцінці окремих властивостей системи або ефективності виконання заданих прикладних функцій. В ході виробничого експерименту використовуються дані та спостереження, отримані під час реальної експлуатації системи, для аналізу та визначення її характеристик.

1.8. Напівнатурне моделювання

Напівнатурне моделювання - це метод, при якому моделювання виконується з використанням реальної апаратури, при цьому частина системи моделюється, а інша є реальною. У замкнуту модель можуть входити імітатори впливів і завад, моделі зовнішнього середовища і процесів, точний математичний опис яких невідомий. У процесі напівнатурного моделювання ефективно поєднуються переваги математичного та натурального моделювання, що дозволяє досягти оптимальної взаємодії між обчислювальними та натурними експериментами.

Необхідність застосування такого методу виникає, якщо:

- об'єкт управління ще знаходиться на етапі проектування, тоді як елементи пристрою управління вже існують;
- елементи управління мають нелінійні характеристики, тертя, перешкоди, які не враховувалися при складанні їх рівнянь;
- проведення натурального експерименту є занадто дорогим або неможливим;
- об'єкт не може випробовуватись у лабораторних умовах.

Якщо математичне моделювання є найбільш ефективним на ранніх стадіях проектування, а натурне - на заключних, то напівнатурне моделювання займає своє місце на проміжних стадіях.

Для проведення напівнатурного експерименту повинна бути відповідна апаратура, наприклад:

- генератори зовнішнього керуючого впливу (імітація зовнішніх впливів на систему, дозволяючи досліджувати її реакції на різні умови);
- імітатори впливів і завад (штучні умови для оцінки стійкості та надійності системи);
- моделі зовнішнього середовища (відтворення умов, у яких функціонуватиме система);
- обчислювальні засоби (комп'ютерні моделі та симуляції, що забезпечують аналіз та узагальнення отриманих даних, а також взаємодію з реальними

компонентами системи);

- стенди-імітатори (спеціальні випробувальні стенди, які інтегрують реальні та змодельовані компоненти для проведення комплексних тестувань та досліджень системи в умовах, максимально наближених до реальних).

Напівнатурний метод моделювання дозволяє детально дослідити режими роботи системи. За допомогою використання імітаційних стендів і фізичної моделі об'єкта або його елемента, можна дослідити весь діапазон зміни досліджуваних параметрів, з можливістю зміни частини параметрів зовнішнього діяння, чого не завжди можна досягти натурними експериментами.

Напівнатурне моделювання має свої недоліки. По-перше, використання реальної апаратури та спеціалізованого обладнання може бути досить дорогим. По-друге, поєднання реальних та змодельованих компонентів потребує високого рівня технічної підготовки та складної інтеграції. Крім того, фізичні моделі критичних елементів можуть не покривати всі можливі сценарії або варіанти функціонування системи, що обмежує їх гнучкість. Ще одним недоліком є труднощі з масштабуванням, оскільки деякі системи можуть бути важко масштабувати до реальних умов через обмеження обладнання або ресурсів.

1.9. Опис багатовимірного динамічного стенда-імітатора

Багатовимірний динамічний стенд-імітатор — це технічне обладнання, яке використовується для моделювання та тестування динамічних процесів у різних системах та об'єктах. Такий стенд дозволяє створювати реалістичні умови експлуатації та навантаження для тестованих об'єктів.

Багатовимірність динамічного стенду-імітатора вказує на те, що він може моделювати рух у трьох або більше просторових вимірах. Для опису руху літальних апаратів у тривимірному просторі стенд здатен імітувати три основні типи руху крен, тангаж і ролання. Ці три типи руху можуть виникати як незалежно один від одного, так і в комбінації, утворюючи складний рух об'єкта у тривимірному просторі. Стенд дозволяє відтворювати різні умови руху, параметри середовища, дії зовнішніх факторів, динамічні умови роботи та

конфігурації систем, що допомагає вивчати взаємозв'язки між різними параметрами.

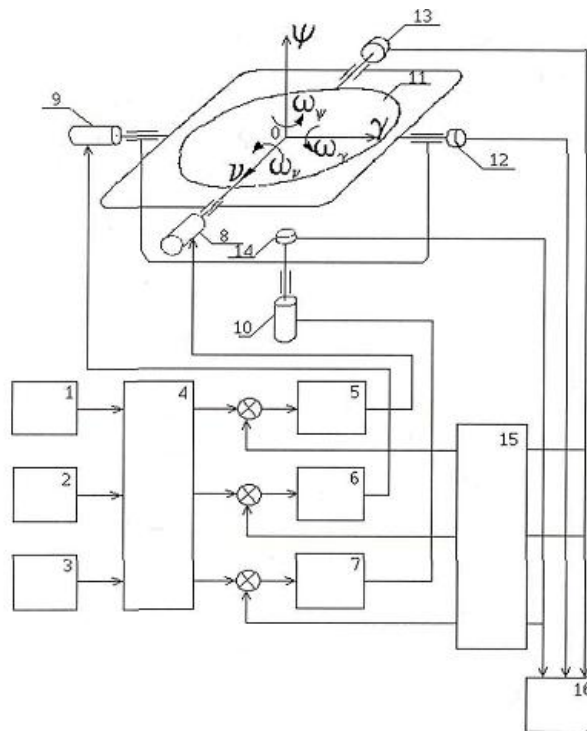


Рис. 1.22. Функціональна схема ДМС,

де 1,2,3 - задаючі генератори шуму; 4,15 - блоки системи управління; 5,6,7 - підсилювачі потужності та напруги; 8,9,10 - виконавчі двигуни; 11 - платформа стенда; 12,13,14 - датчики зворотних зв'язків; 16 - реєстратор або ПЕОМ.

Досліджувана система або об'єкт закріплюється на рухомій платформі ДМС (рис.1.22), для тестування використовуються стаціонарні сигнали з характеристиками, що найбільше наближені до реальних умов експлуатації. Оскільки багатомірний стаціонарний випадковий процес цілком визначається, завдання імітації рухів зводиться до відтворення кутових рухів платформою ДМС, які максимально наближені до рухів судна. Багатомірний стаціонарний випадковий сигнал, який подається на вхід ДМС, потрапляє до електронного формуючого фільтра Φ , який перетворює вектор r у відповідні електричні сигнали, що повністю відтворюють рух судна.

Механічні властивості системи, тобто вектор ψ та співвідношення корисного сигналу і перешкод виміру вектора вихідних реакцій, можуть

обмежувати точність імітації.

Платформа стенду-імітатора ДМС рухається за допомогою двигунів-актуаторів. Вони відповідають за зміну положення платформи, відтворюючи різні динамічні умови, що характерні для руху судна. Датчики зворотного зв'язку використовуються для вимірювання параметрів руху платформи стенду-імітатора. Інформація з датчиків надходить до реєстратора або ПЕОМ, що фіксує та аналізує інформацію про рух платформи це дозволяє здійснювати контроль та корекцію процесу моделювання.

Вимоги до точності стенду включають максимальну відповідність вимірювань реальним умовам та об'єктам, стабільність функціонування системи, точність роботи сенсорів і актуаторів, а також відповідність метрологічним стандартам для забезпечення достовірних результатів тестування і досліджень.

В рамках досліджень, які проводяться в даній кваліфікаційній роботі, на платформі стенда-імітатора розміщений квадрокоптер. На вхід стенду подається модель турбулентності повітря Драйдена. На виході отримуємо сигнал зміни положення квадрокоптера по каналу тангажу.

РОЗДІЛ 2

МЕТОДИ І ПРОЦЕДУРИ ОБРОБКИ ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНИХ ДАНИХ

Обробка експериментальних даних є важливим етапом в багатьох технологічних і наукових дослідженнях. Вона дозволяє аналізувати, інтерпретувати та знаходити закономірності в даних, отриманих під час експериментів. У цьому буде розглянуто декілька методів, що використовуються для обробки та аналізу експериментальних даних, зокрема методи апроксимації, інтерполяції, метод найменших квадратів та метод узагальнених логарифмічних характеристик.

Методи обробки даних дозволяють досліджувати характер поведінки системи за допомогою експериментальних даних. Вони можуть значно відрізнятися за складністю виконання і точністю результатів, тому для кожної конкретної системи необхідно підбирати методи, які будуть ефективні в застосуванні саме для неї. Вибір методів обробки даних визначається специфікою досліджуваної проблеми, точністю та надійністю доступних даних, а також необхідною швидкістю обчислень.

У розділі приділяється увага алгоритмам реалізації, формулам та ілюстраціям, які відносяться до відповідних методів.

Методи і процедури обробки експериментальних даних знаходять застосування у великій кількості галузей, а також застосовуються для обробки сигналів літальних апаратів. Завдяки одному з методів в даній кваліфікаційній роботі вдалося отримати математичні моделі для досліджуваних сигналів.

Кафедра АКСУ				НАУ 24.30.36.000 ПЗ							
Виконав.	Горбаненко Д.В.			Розділ 2. Методи і процедури обробки експериментальних даних	Літ.	Арк.	Аркушів				
Керівник	Єрмолаєва О.В.						35			67	
Консульт.	-				151-403Б-СУ						
Контрол.	Дивнич М.П.										
Зав. каф.	Мельник Ю.В.										

2.1. Апроксимація

Апроксимація — наближене вираження [5] одних математичних об'єктів іншими, більш простішими, які з певною точністю відображають поведінку початкової функції або даних. Апроксимація дозволяє зменшити складність аналізу та обчислень, полегшуючи розв'язання практичних задач. Тобто, деяка функція $y = f(x)$, апроксимується іншою функцією $\hat{y} = \varphi(x)$. Знайдена аналітична залежність не обов'язково повинна проходити через всі точки, але описує 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 та інші). Далі визначаються чисельні значення параметрів емпіричної формули, які найкраще апроксимують початкову залежність.

2.1.1. Лінійна апроксимація (лінійне згладжування)

Використовується коли стоїть задача провести пряму лінію через задані точки [9].

$$\hat{y}(x) = ax + b,$$

де a, b — коефіцієнти, які потрібно знайти.

Невідповідність між прямою $\hat{y}(x)$ та заданими значеннями y_i повинна бути мінімальною.

$$\sum_{i=0}^n [\hat{y}(x_i) - y_i]^2 = \min.$$

Цю пряму можна знайти використовуючи метод найменших квадратів.

$$\sum_{i=0}^n (ax_i + b - y_i)^2 = \min. \#(1)$$

Прирівнюючи похідні від (1) по a та b нулю, отримаємо:

$$\begin{aligned} \sum_{i=0}^n x(ax_i + b - y_i) &= 0, \\ \sum_{i=0}^n (ax_i + b - y_i) &= 0. \end{aligned} \#(2)$$

Записуємо (2) у вигляді системи двох алгебраїчних рівнянь відносно a та b :

$$\begin{cases} \left(\sum_{i=0}^n x_i^2 \right) a + \left(\sum_{i=0}^n x_i \right) b = \sum_{i=0}^n x_i y_i, \\ \left(\sum_{i=0}^n x_i \right) a + (n+1)b = \sum_{i=0}^n y_i. \end{cases}$$

Отримана лінія реалізує лінійну апроксимацію (рис.2.1), вона також може використовуватись для інтерполяції та екстраполяції.

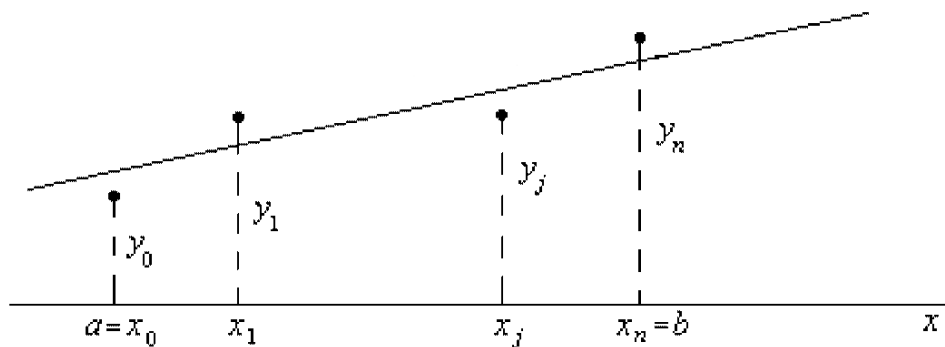


Рис. 2.1

2.1.2. Квадратична апроксимація.

Основна ідея полягає [9] в тому, щоб знайти поліном другого степеня, який найкраще підходить для опису заданих даних:

$$P(x) = ax^2 + bx + c,$$

де a, b, c – коефіцієнти, які потрібно знайти. Ці коефіцієнти можуть бути знайдені також за допомогою методу найменших квадратів.

$$\sum_{i=0}^n [\hat{y}(x_i) - y_i]^2 = \min.$$

Приклад квадратичної апроксимації наведено на рис. 2.2.

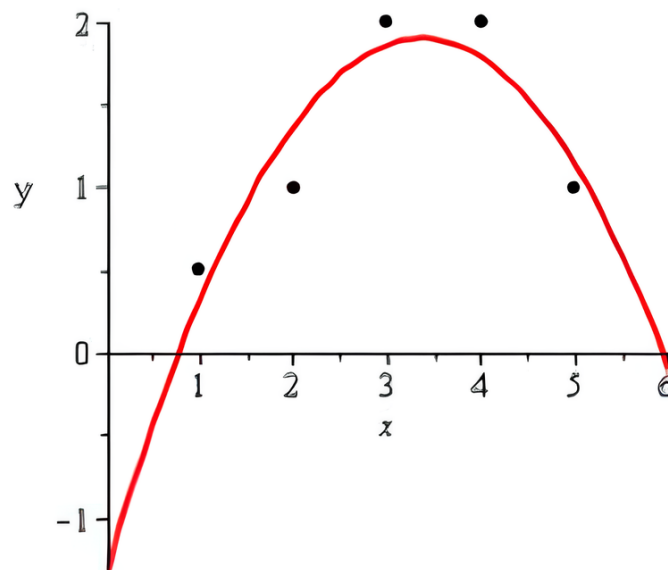


Рис. 2.2

2.2. Інтерполяція. Екстраполяція

Інтерполяція є одним із різновидів апроксимації, який полягає у побудові функції $f(x)$ [2], яка проходить через задані точки (x_i, y_i) на певному інтервалі $[a, b]$. Мета інтерполяції полягає в тому, щоб значення функції $f(x)$, у цих точках співпадали з експериментальними даними або значеннями функції, яку ми намагаємося описати. В решті точок відрізка функція наближено описує експериментальні дані з деякою похибкою.

У випадку коли значення функції знаходяться за межами заданого інтервалу, використовується екстраполяція. Екстраполяція дозволяє робити

припущення про значення функції за межами цього інтервалу.

2.2.1. Лінійна інтерполяція

Один з найпростіших видів інтерполяції. При лінійній інтерполяції функція $f(x)$ апроксимується двочленом $P(x) = ax + b$ через дві точки $(x_0; y_0)$ та $(x_n; y_n)$ (рис.2.3). Тобто, за допомогою поліному першої степені проводиться пряма лінія між початковою та кінцевою точкою, які належать відрізку. Коефіцієнти поліному визначаються формулами:

$$b = y_i - ax_i; a = \frac{y_{i+1} - y_i}{x_{i+1} - x_i}.$$

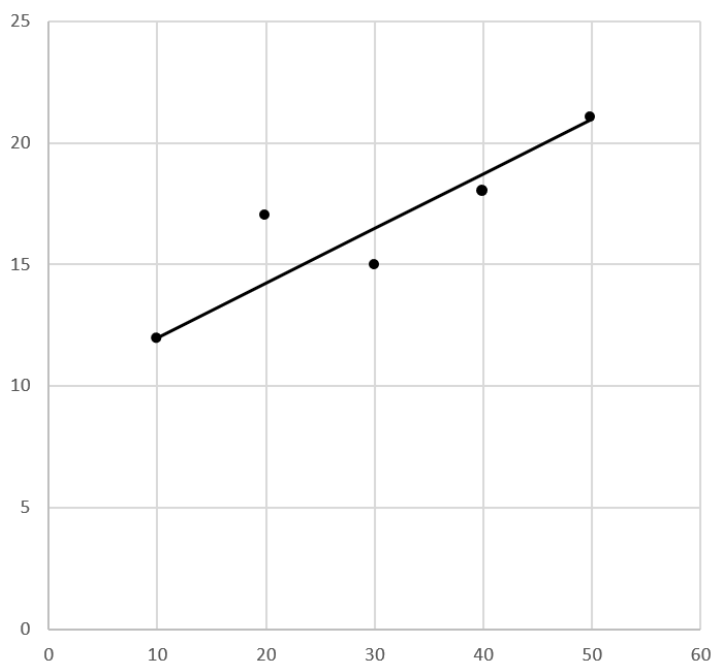


Рис. 2.3. Приклад лінійної інтерполяції

Недоліком такого методу є низька точність та недостатня гнучкість, особливо при опрацюванні нелінійних даних.

2.2.2. Кусочно-лінійна інтерполяція

Кусково-лінійна інтерполяція базується на тих самих принципах, що і лінійна інтерполяція, але замість побудови однієї прямої для всього інтервалу, вона використовує окремі лінійні відрізки [8] для кожного інтервалу між сусідніми точками $(x_i; y_i)$ та $(x_{i+1}; y_{i+1})$ (рис.2.4). Це забезпечує більш точну апроксимацію на локальних ділянках.

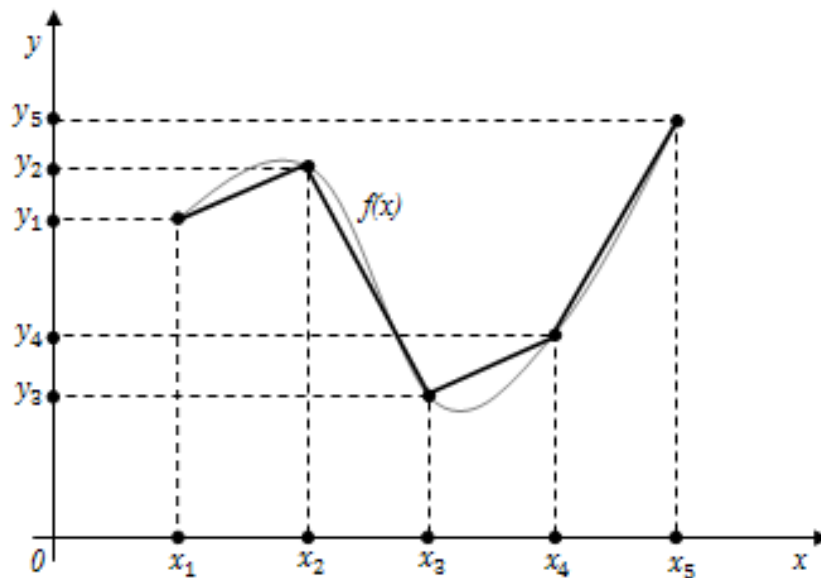


Рис. 2.4. Приклад кусочно-лінійної інтерполяції

Недоліками цього методу також є обмежена точність, несплавність функції, недостатня гнучкість.

2.2.3. Квадратична інтерполяція

Для знаходження значення функції $y(x)$ використовуються значення $y_{i-1} = y(x_{i-1})$, $y_i = y(x_i)$ та $y_{i+1} = y(x_{i+1})$, такі щоб $x \in [x_{i-1}, x_{i+1}]$. Через точки $y(x_{i-1})$, $y(x_i)$ і $y(x_{i+1})$ проводиться поліном 2-го порядку (рис.2.5).

Рівняння поліному має вигляд:

$$P(x) = y_{i-1} \frac{(x - x_i)(x - x_{i+1})}{(x_{i-1} - x_i)(x_{i-1} - x_{i+1})} + y_i \frac{(x - x_{i-1})(x - x_{i+1})}{(x_i - x_{i-1})(x_i - x_{i+1})} + y_{i+1} \frac{(x - x_{i-1})(x - x_i)}{(x_{i+1} - x_{i-1})(x_{i+1} - x_i)}$$

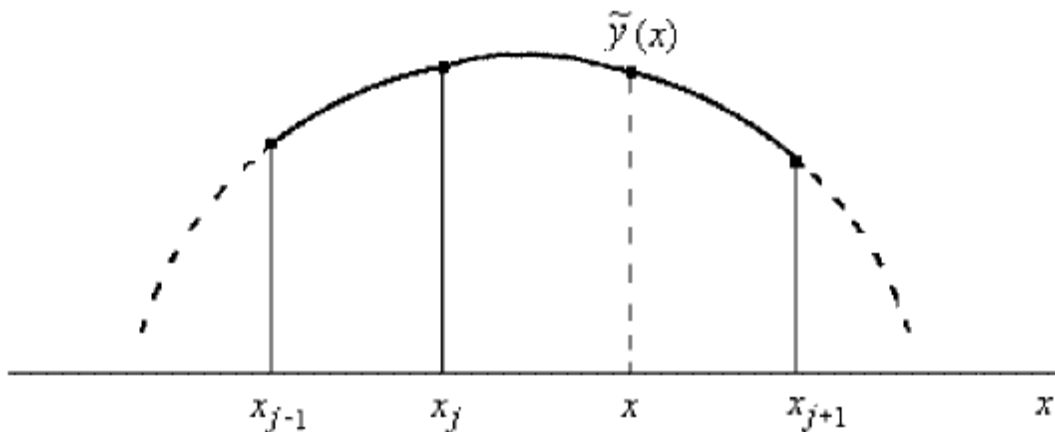


Рис. 2.5

2.2.4. Кусочно-квадратична інтерполяція

Кусочно-квадратична інтерполяція є розширенням кусочно-лінійної інтерполяції і використовує квадратичні поліноми (рис.2.6) для наближення функції на кожному інтервалі. Вона забезпечує кращу точність і гладкість наближення, особливо якщо дані мають значні коливання або зміни.

Подібно до кусочно-лінійної інтерполяції, для наближення на кожному окремому інтервалі $(x_i; x_{i+1})$ використовується квадратична функція $P(x) = ax^2 + bx + c$. Коефіцієнти a, b та c обчислюються таким чином, щоб поліном проходив через точки $(x_i; y_i)$ і $(x_{i+1}; y_{i+1})$. Зазвичай це вимагає розв'язання системи рівнянь або використання методів найменших квадратів для визначення оптимальних коефіцієнтів.

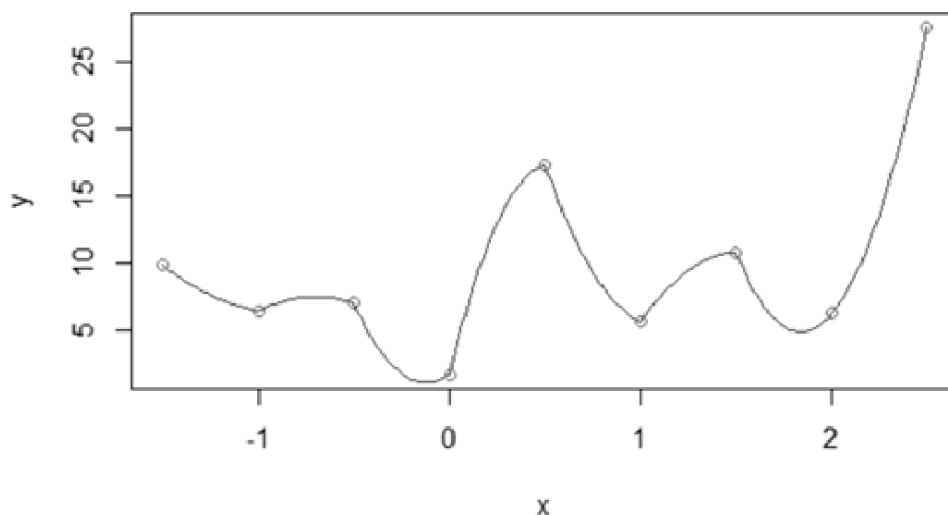


Рис. 2.6. Приклад кусочно-квадратичної інтерполяції

2.2.5. Інтерполяційний поліном Лагранжа

Інтерполяція Лагранжа - це метод поліноміальної інтерполяції, який дозволяє знайти поліном, що проходить через задані точки (рис.2.7). Поліном Лагранжа будується таким чином, щоб точно проходити через всі задані точки $(x_0; y_0), (x_1; y_1), \dots, (x_n; y_n)$.

Поліном Лагранжа має вигляд:

$$P_n(x) = \sum_{i=0}^n y_i \cdot L_i(x) = \sum_{i=0}^n y_i \cdot \frac{(x - x_0)(x - x_1) \dots (x - x_{i-1})(x - x_{i+1}) \dots (x - x_n)}{(x_i - x_0)(x_i - x_1) \dots (x_i - x_{i-1})(x_i - x_{i+1}) \dots (x_i - x_n)}$$

Найчастіше зустрічаються поліноми $P_1(x)$ та $P_2(x)$ вигляду:

1. У випадку з двома вузлами інтерполяції:

x_i	x_0	x_1
y_i	y_0	y_1

$$P_1(x) = y_0 \frac{(x - x_1)}{(x_0 - x_1)} + y_1 \frac{(x - x_0)}{(x_1 - x_0)}$$

2. У випадку з трьома вузлами інтерполяції:

x_i	x_0	x_1	x_2
y_i	y_0	y_1	y_2

$$P_2(x) = y_0 \frac{(x - x_1)(x - x_2)}{(x_0 - x_1)(x_0 - x_2)} + y_1 \frac{(x - x_0)(x - x_2)}{(x_1 - x_0)(x_1 - x_2)} + y_2 \frac{(x - x_0)(x - x_1)}{(x_2 - x_0)(x_2 - x_1)}$$

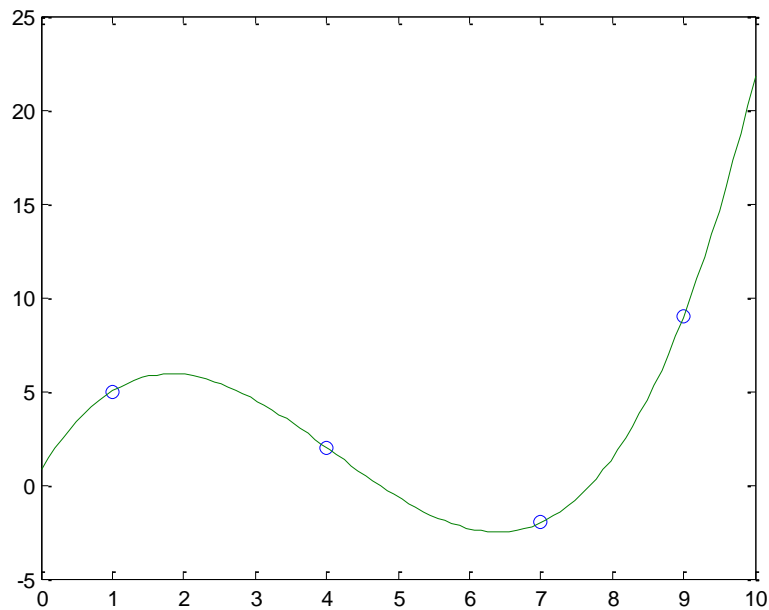


Рис. 2.7. Приклад інтерполяційного полінома Лагранжа 3-го порядку

2.2.6. Інтерполяційний поліном Ньютона

Інтерполяційний поліном Ньютона - це метод побудови інтерполяційного полінома (рис.2.8), який використовує різниці для обчислення коефіцієнтів. Поліном Ньютона має зручну форму для додавання нових точок без необхідності перераховувати всі коефіцієнти з нуля, як це потрібно в інтерполяції Лагранжа.

Для побудови інтерполяційного полінома у формі Ньютона використовують поняття розділеної різниці.

Розділена різниця у вузлах $x_i, i = \overline{0, n - 1}$ функції першого порядку:

$$f(x_i, x_{i+1}) = \frac{f(x_{i+1}) - f(x_i)}{x_{i+1} - x_i} = \frac{y_{i+1} - y_i}{x_{i+1} - x_i}, i = \overline{0, n - 1}.$$

Розділена різниця у вузлах $x_i, i = \overline{0, n - 2}$ функції другого порядку:

$$f(x_i, x_{i+1}, x_{i+2}) = \frac{f(x_{i+1}, x_{i+2}) - f(x_i, x_{i+1})}{x_{i+2} - x_i} = \frac{\frac{y_{i+2} - y_{i+1}}{x_{i+2} - x_{i+1}} - \frac{y_{i+1} - y_i}{x_{i+1} - x_i}}{x_{i+2} - x_i}, i = \overline{0, n-2}.$$

Розділена різниця n-го порядку у вузлі x_0 :

$$f(x_0, x_1, \dots, x_n) = \frac{f(x_1, \dots, x_n) - f(x_0, \dots, x_{n-1})}{x_n - x_0}.$$

Використовуючи поняття розділеної різниці, можна побудувати інтерполяційний поліном Ньютона:

$$N_n(x) = f(x_0) + f(x_0, x_1)(x - x_0) + f(x_0, x_1, x_2)(x - x_0)(x - x_1) + \dots + f(x_0, x_1, \dots, x_n)(x - x_0)(x - x_1) \dots (x - x_{n-1}).$$

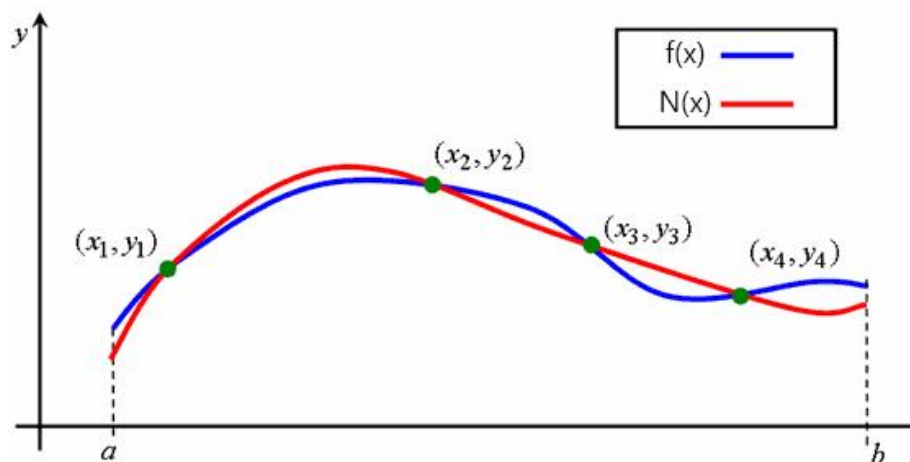


Рис. 2.8. Приклад інтерполяційного полінома Ньютона 3-го порядку

Для побудови інтерполяційного полінома Ньютона необхідно обчислювати розділені різниці, що може бути обчислювально затратним, особливо для великої кількості точок. Однак, з додаванням нових вузлів перші члени багаточлена Ньютона залишаються незмінними.

2.3. Метод найменших квадратів

Метод найменших квадратів може застосовуватись для апроксимації експериментальних даних певною функцією, яка описує поведінку явища в часі або просторі. Завдання методу найменших квадратів (МНК) полягає в знаходженні функції, яка описує процес. Така функція буде оптимальною, якщо сума квадратів відхилень між спостережуваними фактичними величинами і відповідними їм розрахунковими величинами апроксимації буде мінімальною (найменшою):

$$\sum_{i=1}^n (y_i - \hat{y})^2 \rightarrow \min.$$

Застосування методу найменших квадратів [11] може складатися з кількох етапів:

Перший етап. Треба визначити чи існує яка-небудь тенденція зміни ознаки y при зміні значення x .

Другий етап. Визначення траєкторної лінії, яка найкраще здатна описати залежність між змінними x та y .

Третій етап. Розрахунок параметрів регресійного рівняння, що буде характеризувати обрану лінію (аналітичну модель).

Для побудови рівняння регресії необхідно визначити коефіцієнти a , b і c . Ця задача вирішується за допомогою системи нормальних рівнянь.

Для лінійної форми зв'язку $\hat{y} = a + bx$ система нормальних рівнянь матиме вигляд:

$$\begin{cases} na + b \sum x = \sum y, \\ a \sum x + b \sum x^2 = \sum xy. \end{cases}$$

У лінійному рівнянні коефіцієнт b вказує на скільки одиниць (у середньому) зміниться y при зміні значення x на одиницю. Коефіцієнт a – це вільний член рівняння регресії.

Для параболічної форми зв'язку $\hat{y} = a + bx + cx^2$ система нормальних рівнянь матиме вигляд:

$$\begin{cases} na + b \sum x + c \sum x^2 = \sum y, \\ a \sum x + b \sum x^2 + c \sum x^3 = \sum yx, \\ a \sum x^2 + b \sum x^3 + c \sum x^4 = \sum yx^2. \end{cases}$$

Для гіперболічної форми зв'язку $\hat{y} = a + \frac{b}{x}$ система нормальних рівнянь матиме вигляд:

$$\begin{cases} na + b \sum \frac{1}{x} = \sum y, \\ a \sum \frac{1}{x} + b \sum \frac{1}{x^2} = \sum \frac{y}{x}. \end{cases}$$

Метод найменших квадратів може бути чутливим до аномальних або “викидних” значень у даних. Один або декілька таких “викидів” можуть суттєво вплинути на результати і привести до значного спотворення моделі.

Також цей метод є складним у застосуванні, коли мова йде про великі набори даних або високорозмірні задачі.

2.4. Метод узагальнених логарифмічних характеристик

Цей метод наближення вимагає завдання кривої спектральної щільності [10].

Для застосування цього методу необхідно задану криву спектральної

щільності $S(\omega)$ замінити логарифмічною кривою спектральної щільності:

$$L(\omega) = 10 \lg_{10} S(\omega).$$

Логарифмічна крива спектральної щільності $L(\omega)$ замінюється послідовністю прямолінійних відрізків, що сполучаються. Кожен з відрізків має в $6k$ децибел на октаву (k – будь-яке ціле число).

У результаті початкова крива $L(\omega)$ розпадається на суму напівнескінчених логарифмічних характеристик, подібних до тих, що застосовуються для знаходження фазової характеристики, яка відповідає заданій логарифмічній амплітудній характеристиці.

Далі необхідно знайти зручні математичні вирази для напівнескінчених логарифмічних характеристик. Для такого виразу можна обрати функцію вигляду:

$$B_{2k} \left(\frac{\omega}{\omega_i} \right) = 1 + \left(\frac{\omega}{\omega_i} \right)^{2k},$$

ω_i – частота в точці сполучення горизонтальної та похилої частини напівнескінченної логарифмічної характеристики.

Розглянемо функцію:

$$B_{2k}(\omega) = 1 + \omega^{2k}, \#(3)$$

Відповідна логарифмічна характеристика:

$$\Lambda_{2k}(\omega) = 10 \lg(1 + \omega^{2k}).$$
$$\begin{cases} \Lambda_{2k}(\omega) \approx 0 & \text{при } \omega \ll 1, \\ \Lambda_{2k}(\omega) \approx 20k \lg \omega & \text{при } \omega \gg 1, \\ \Lambda_{2k}(\omega) \approx 10 \lg 2 \approx 3 \text{ дБ} & \text{при } \omega = 1. \end{cases}$$

З цього слідує, що логарифмічна характеристика складається з горизонтальної частини та з похилої частини, що має нахил $6k$ децибел на

октаву. Обидві ці частини з'єднуються плавною кривою, що має максимальне відхилення від напівнескінченної характеристики в точці $\omega = 1$, що дорівнює 3 дБ, незалежно від значення k .

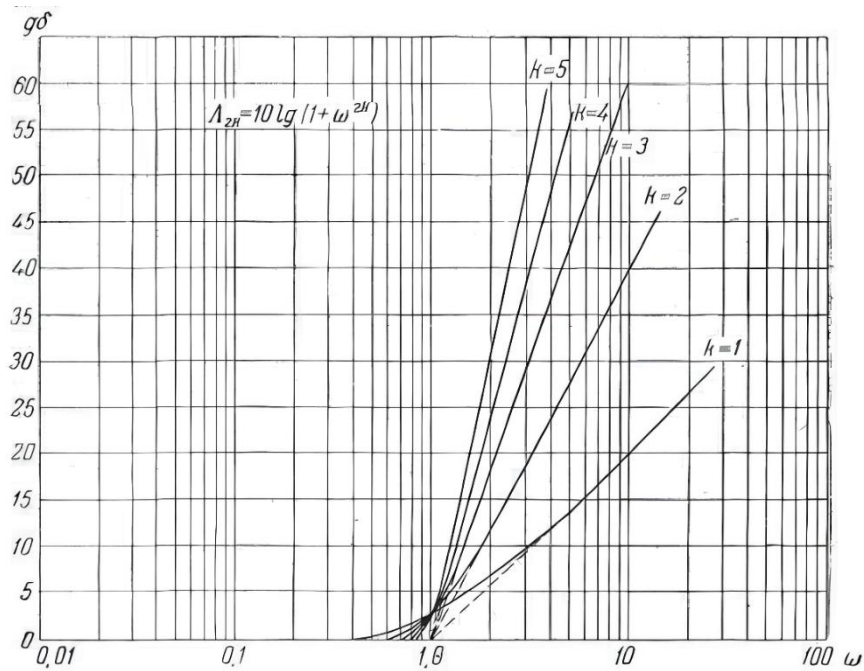


Рис. 2.9

На рис. 2.9 наведено приклади логарифмічних характеристик для $k = 1, 2, 3, 4, 5$. Слід зазначити, що ці криві симетричні щодо точки сполучення та що за межами октав в обидві сторони від точки сполучення функція $L_{2k}(\omega)$ відрізняється від відповідної горизонтальної або похилої частини напівнескінченної характеристики не більше ніж на 0,26 дБ.

Логарифмічні характеристики

$$L_{2k} \left(\frac{\omega}{\omega_i} \right) = 10 \lg \left[1 + \left(\frac{\omega}{\omega_i} \right)^{2k} \right],$$

відповідні точкам сполучення ω_i , відмінним від одиниці, будуть мати ті ж властивості.

Апроксимувавши задану криву $L(\omega)$ напівнескінченими характеристиками з нахилом $6k$ децибел на октаву ми можемо отримати вираз для $S(\omega)$ без будь-яких додаткових обчислень.

Припустимо, що сполучні частоти рівні $\omega_1, \omega_2, \omega_3, \omega_4, \omega_5$ і нахили відповідних напівнескінченних характеристик відповідно дорівнюють -12, +6, +12, -6, -12 дБ на октаву. Тоді

$$L(\omega) = 10 \lg S(\omega) \\ = -10 \lg \left[1 + \left(\frac{\omega}{\omega_1} \right)^4 \right] + 10 \lg \left[1 + \left(\frac{\omega}{\omega_2} \right)^2 \right] + 10 \lg \left[1 + \left(\frac{\omega}{\omega_3} \right)^4 \right] \\ - 10 \lg \left[1 + \left(\frac{\omega}{\omega_4} \right)^2 \right] - 10 \lg \left[1 + \left(\frac{\omega}{\omega_5} \right)^4 \right]$$

звідси,

$$S(\omega) = \frac{\left[1 + \left(\frac{\omega}{\omega_2} \right)^2 \right] \left[1 + \left(\frac{\omega}{\omega_3} \right)^4 \right]}{\left[1 + \left(\frac{\omega}{\omega_1} \right)^4 \right] \left[1 + \left(\frac{\omega}{\omega_4} \right)^2 \right] \left[1 + \left(\frac{\omega}{\omega_5} \right)^4 \right]} \cdot \#(4)$$

Залишається розкласти $S(\omega)$ на прості множники. Корені функції (3) можна обчислити наступним чином.

Характеристичне рівняння:

$$1 + \lambda^{2k} = 0$$

має корні

$$\lambda_k = \sqrt[2k]{-1},$$

але

$$-1 = e^{j\pi(1+2v)} = \cos \pi(1+2v) + j \sin \pi(1+2v)$$

з цього слідує

$$\lambda_k = e^{j \frac{\pi(1+2v)}{2k}} = \cos \frac{\pi(1+2v)}{2k} + j \sin \frac{\pi(1+2v)}{2k} \\ (v = 0, 1, 2, \dots, k-1).$$

Цей вираз графічно можна представити у вигляді векторів, рівних за

модулем і зрушених щодо один одного на кут $\frac{\pi}{k}$. Коріння (3) утворює симетричну зірку, вписану в коло одиничного радіусу. Якщо k парне, то одна пара коренів збігається з уявною віссю. Якщо частота сполучення ω_i відмінна від одиниці, то радіус кола дорівнює ω_i .

Нулі функції (3) розташовані симетрично щодо реальної осі. Таким чином:

$$B_{2k}(\omega) = C_k(j\omega)C_k^*(j\omega),$$

де функція $C_k(j\omega)$ містить усі нулі, розташовані у верхній напівплощині, а функція $C_k^*(j\omega)$ містить усі нулі, розташовані в нижній напівплощині.

В таблиці 2.1 приведені функції $C_k(j\omega)$ для $k = 1, 2, \dots, 8$, розкладені на множники.

Таблиця 2.1

k	$C_k(j\omega)$
1	$(1 + j\omega)$
2	$(1 + 1,4142j\omega - \omega^2)$
3	$(1 + j\omega)(1 + j\omega - \omega^2)$
4	$(1 + 0,7653j\omega - \omega^2)(1 + 1,8477j\omega - \omega^2)$
5	$(1 + j\omega)(1 + 0,6180j\omega - \omega^2)(1 + 1,6180j\omega - \omega^2)$
6	$(1 + 0,5176j\omega - \omega^2)(1 + 1,4142j\omega - \omega^2)(1 + 1,9318j\omega - \omega^2)$
7	$(1 + j\omega)(1 + 0,4449j\omega - \omega^2)(1 + 1,2465j\omega - \omega^2) \cdot$ $\cdot (1 + 1,8022j\omega - \omega^2)$
8	$(1 + 0,3896j\omega - \omega^2)(1 + 1,1110j\omega - \omega^2)(1 + 1,6630j\omega - \omega^2) \cdot$ $\cdot (1 + 1,9622j\omega - \omega^2)$

Користуючись таблицею, вираз (4) можна подати в наступному вигляді, якщо $\omega_1 = 1$; $\omega_2 = 2$; $\omega_3 = 5$; $\omega_4 = 10$; $\omega_5 = 20$:

$$S(\omega) = \left\{ \frac{\left(1 + j\frac{\omega}{2}\right) \left[1 + j\sqrt{2} \left(\frac{\omega}{5}\right) - \left(\frac{\omega}{5}\right)^2\right]}{\left(1 + \sqrt{2}j\omega - \omega^2\right) \left(1 + j\frac{\omega}{10}\right) \left[1 + j\sqrt{2} \left(\frac{\omega}{20}\right) - \left(\frac{\omega}{20}\right)^2\right]} \right\} \cdot \left\{ \frac{\left(1 - j\frac{\omega}{2}\right) \left[1 - j\sqrt{2} \left(\frac{\omega}{5}\right) - \left(\frac{\omega}{5}\right)^2\right]}{\left(1 - \sqrt{2}j\omega - \omega^2\right) \left(1 - j\frac{\omega}{10}\right) \left[1 - j\sqrt{2} \left(\frac{\omega}{20}\right) - \left(\frac{\omega}{20}\right)^2\right]} \right\}.$$

В (4) перший вираз у фігурних дужках містить усі нулі та полюси, розташовані у верхній напівплощині, а другий вираз у фігурних дужках містить усі нулі та полюси, розташовані в нижній напівплощині.

РОЗДІЛ 3

ОБРОБКА СИГНАЛІВ КВАДРОКОПТЕРА ПО КАНАЛУ ТАНГАЖУ

До сучасних коптерів висуваються високі точносні вимоги до управління та стабілізації, оскільки найчастіше вони використовуються в середовищі, у якому наявні збурення та завади. Це обумовлює необхідність детального аналізу та обробки сигналів управління. Аналіз сигналів дозволяє оцінити динамічні характеристики системи, виявити можливі проблеми в управлінні та оптимізувати алгоритми контролю.

Об'єктом дослідження є квадрокоптер, він розміщений на рухомій платформі стенда-імітатора, який відтворює кутові рухи по каналу тангажу. На вхід стенда-імітатора подається модель Драйдена. Вихідним сигналом є сигнал з польотного контролера коптера по каналу тангажу.

Проведене напівнатурне моделювання на стенді-імітаторі кутових положень, дозволило отримати масиви даних і побудувати осцилограми сигналів.

Обробка отриманих сигналів є складним завданням, оскільки масиви даних містять велику кількість інформації, сигнали можуть мати непередбачуваний характер, містити в собі велику кількість завад або бути складними для опису.

Основними завданнями цього розділу є отримання математичних моделей у вигляді спектральних та взаємна спектральних щільностей вхідних та вихідних сигналів квадрокоптера по каналу тангажу.

У розділі наведені всі етапи виконання обробки отриманих сигналів та відповідні ілюстрації.

Кафедра АКСУ				НАУ 24.30.36.000 ПЗ			
Виконав.	Горбаненко Д.В.			Розділ 3. Обробка сигналів квадрокоптера по каналу тангажу	Літ.	Арк.	Аркушів
Керівник	Єрмолаєва О.В.					52	67
Консульт.	-				151-403Б-СУ		
Контрол.	Дивнич М.П.						
Зав. каф.	Мельник Ю.В.						

3.1. Побудова спектральних щільностей вхідного та вихідного сигналів по каналу тангажу.

Результатом проведення напівнатурного моделювання є масиви даних, за допомогою яких в середовищі MATLAB було побудовано осцилограми вхідних та вихідних сигналів (рис. 3.1 та 3.2).

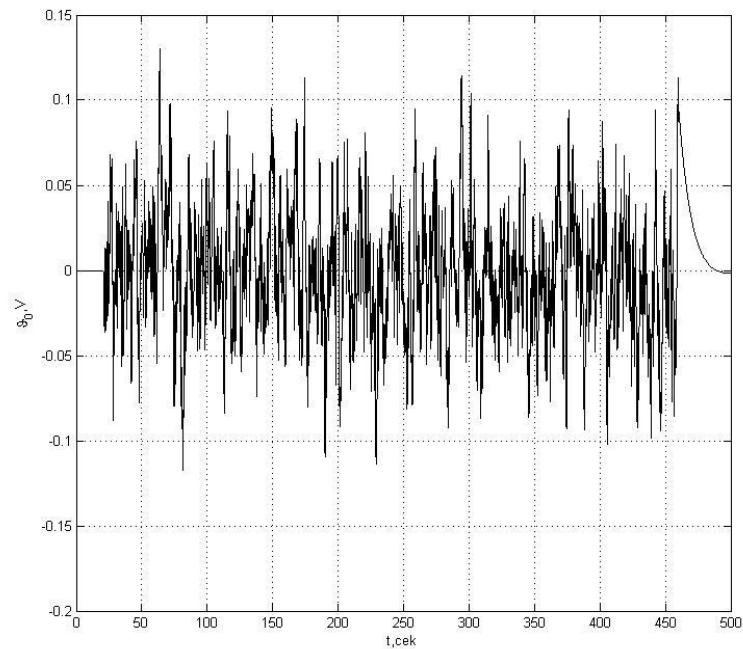


Рис. 3.1 Осцилограма вхідного сигналу по каналу тангажу

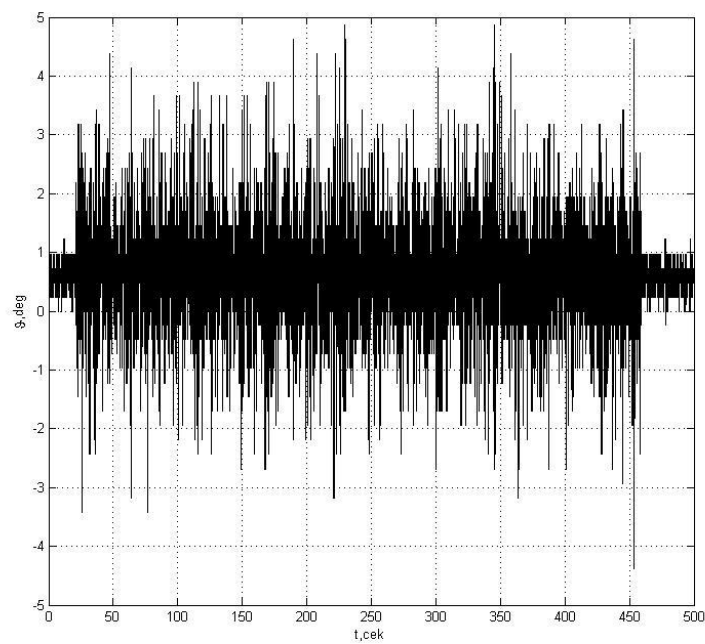


Рис. 3.2 Осцилограма вихідного сигналу по каналу тангажу

Вхідний сигнал має випадковий характер з високою частотою коливань. Вихідний сигнал також має випадковий характер, але з більшою амплітудою і з більш частими піками, що свідчить про високу чутливість системи реакції квадрокоптера до вхідних змін. На інтервалі від 400 секунд до 500 секунд вхідний та вихідний сигнали мають тенденцію до зменшення амплітуди на останніх секундах.

Для подальшої обробки вхідного та вихідного сигналів побудуємо криві спектральних та взаємна спектральних щільностей. Це можна зробити за допомогою функції `spectr`, яка була розроблена на кафедрі АКСУ. Функція `spectr` на першому кроці за векторами досліджуваних даних виконує розрахунок кореляційних та взаємних кореляційних функцій. На другому кроці до віднайдених функцій застосовують перетворення Фур'є. Перетворенням Фур'є кореляційної функції буде залежність для спектральної щільності. Таким чином у результаті роботи функції `spectr` визначаються графічні залежності для спектральних та взаємна спектральних щільностей.

На рис. 3.3 і 3.4 у логарифмічному масштабі показані спектральні щільності вхідного та вихідного сигналів по каналу тангажу.

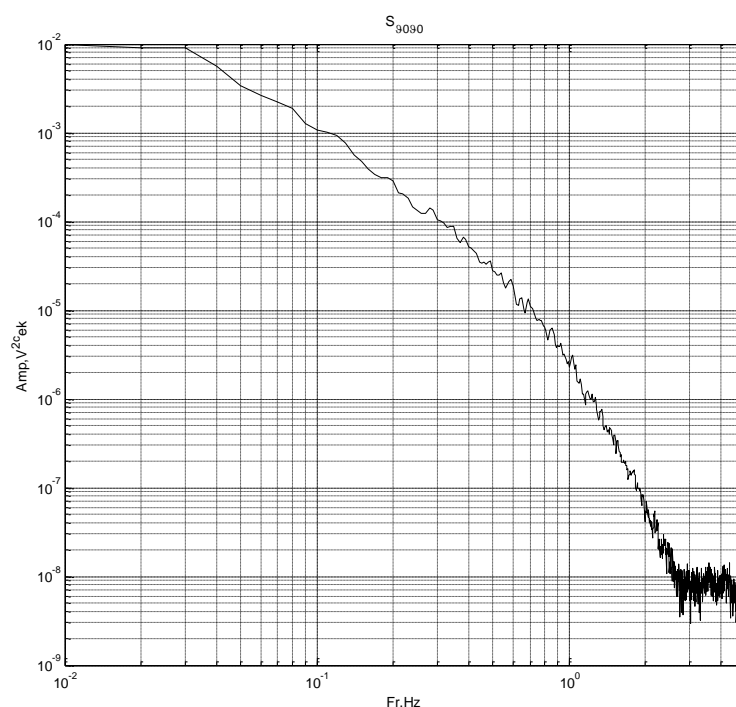


Рис. 3.3 Спектральна щільність вхідного сигналу по каналу тангажу.

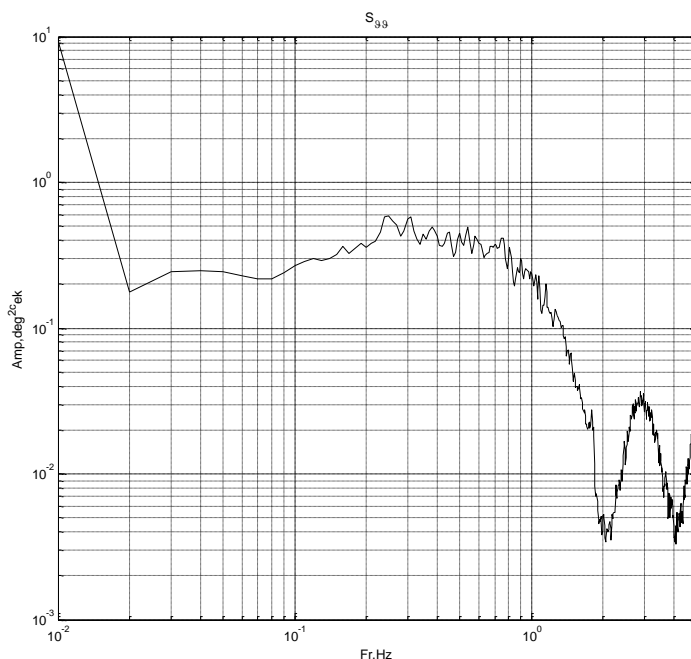
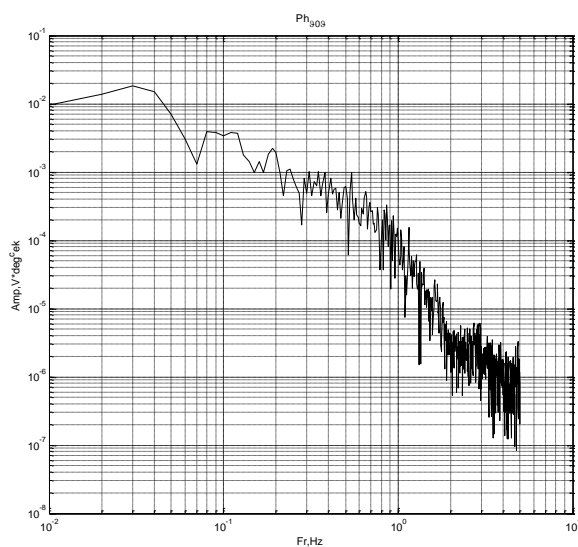


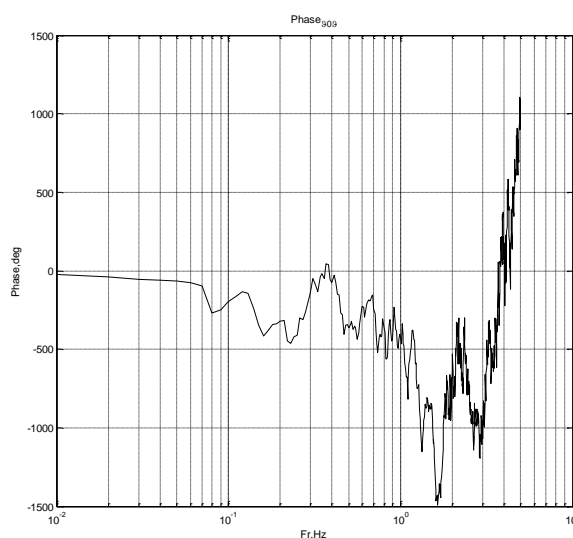
Рис. 3.4 Спектральна щільність вихідного сигналу по каналу тангажу.

Різкий спад на початку графіка спектральної щільності вихідного сигналу по каналу тангажу, можливо, пов'язаний з особливостями фільтрації та управління коптером, спрямованими на усунення низькочастотних збурень та забезпечення стабільного польоту.

На рис. 3.5 зображена побудована взаємна спектральна щільність між входом та виходом.



а



б

Рис. 3.5. Амплітудна (а) та фазова (б) характеристики взаємна спектральної щільності між

вхідним та вихідним сигналами по каналу тангажу

На рис. 3.6 зображена побудована взаємна спектральна щільність між ВИХОДОМ та ВХОДОМ.

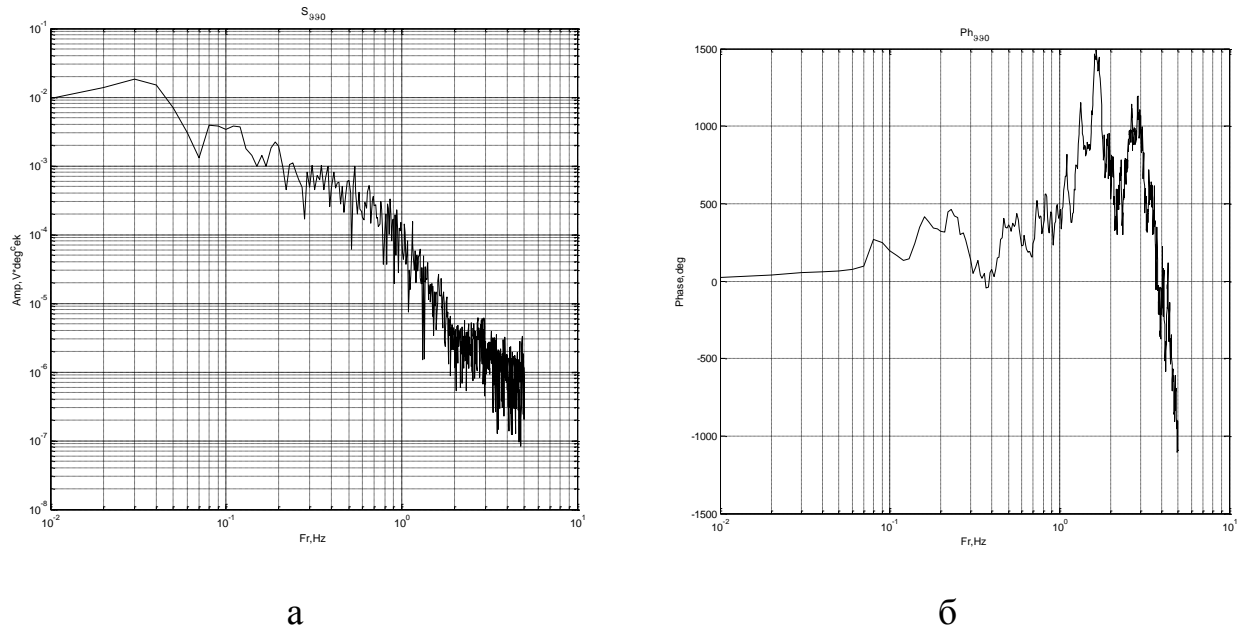


Рис. 3.6. Амплітудна (а) та фазова (б) характеристики взаємна спектральної щільності між вихідним та вхідним сигналами по каналу тангажу

3.2 Апроксимація логарифмічних кривих спектральних щільностей

Отримані спектральні щільності залежності амплітуди від частоти можна апроксимувати за допомогою методу узагальнених логарифмічних характеристик, щоб отримати математичну модель, яка найкраще описує залежність між змінними на основі наявних даних. Реалізація методу виконується в декілька етапів.

Спочатку на деякі ділянки логарифмічної кривої накладаються асимптоти (рис. 3.7 та 3.8), які представляють собою логарифмічні амплітудно-частотні характеристики стандартних динамічних ланок. Аналітична крива повинна щільно описувати зміну параметрів експериментальної логарифмічної кривої. На інтервалах, де трапляються інтенсивні перешкоди, необов'язково дотримуватись високої точності апроксимації.

Середньоквадратичне відхилення: $\sigma_{\vartheta_0\vartheta_0} = \sqrt{0,012 \cdot \pi} = 0,194$.

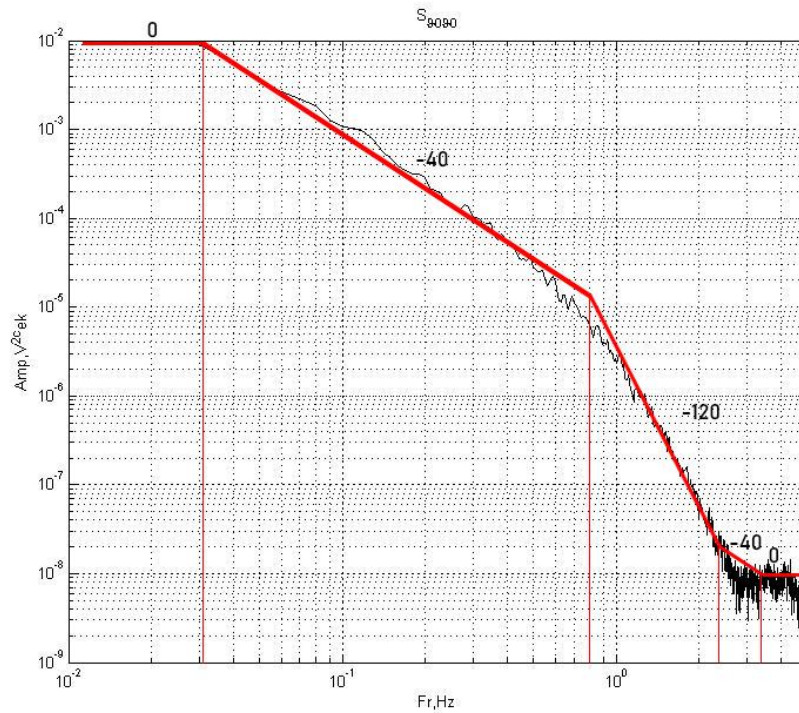


Рис. 3.7 Ілюстрація апроксимації спектральної щільності вхідного сигналу по каналу тангажу

Середньоквадратичне відхилення: $\sigma_{\vartheta_0\vartheta_0} = \sqrt{8,3 \cdot \pi} = 5,01$

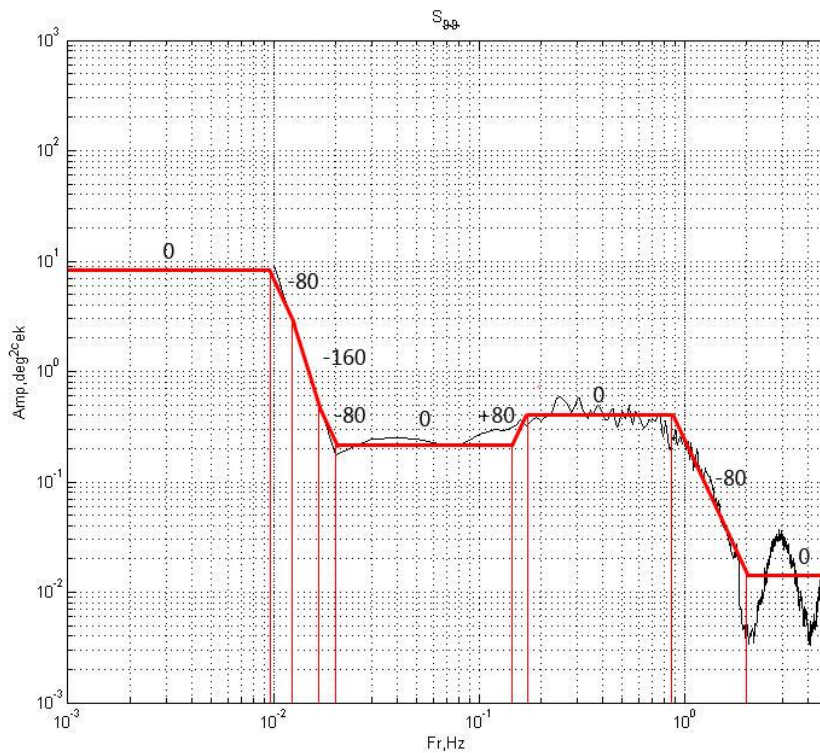


Рис. 3.8 Ілюстрація апроксимації спектральної щільності вихідного сигналу по каналу тангажу

На ділянках, де логарифмічна крива має відповідні “вигини”, встановлюються частоти зрізу, за допомогою яких визначаються постійні часу.

Визначення постійних часу типових ланок для спектральної щільності вхідного сигналу:

$$w_1 = 0,031 \text{ Гц} \rightarrow T_1 = \frac{1}{2\pi \cdot 0,031} = 5,134 \text{ сек},$$

$$w_2 = 0,8 \text{ Гц} \rightarrow T_2 = \frac{1}{2\pi \cdot 0,8} = 0,199 \text{ сек},$$

$$w_3 = 2,3 \text{ Гц} \rightarrow T_3 = \frac{1}{2\pi \cdot 2,3} = 0,0692 \text{ сек},$$

$$w_4 = 3,32 \text{ Гц} \rightarrow T_4 = \frac{1}{2\pi \cdot 3,32} = 0,048 \text{ сек}.$$

Визначення постійних часу типових ланок для спектральної щільності вихідного сигналу:

$$w_1 = 0,0094 \text{ Гц} \rightarrow T_1 = \frac{1}{2\pi \cdot 0,0094} = 16,93 \text{ сек},$$

$$w_2 = 0,012 \text{ Гц} \rightarrow T_2 = \frac{1}{2\pi \cdot 0,012} = 13,26 \text{ сек},$$

$$w_3 = 0,0155 \text{ Гц} \rightarrow T_2 = \frac{1}{2\pi \cdot 0,0155} = 10,268 \text{ сек},$$

$$w_4 = 0,02 \text{ Гц} \rightarrow T_4 = \frac{1}{2\pi \cdot 0,02} = 7,95775 \text{ сек},$$

$$w_5 = 0,135 \text{ Гц} \rightarrow T_5 = \frac{1}{2\pi \cdot 0,135} = 1,179 \text{ сек},$$

$$w_6 = 0,168 \text{ Гц} \rightarrow T_6 = \frac{1}{2\pi \cdot 0,168} = 0,947 \text{ сек},$$

$$w_7 = 0,85 \text{ Гц} \rightarrow T_7 = \frac{1}{2\pi \cdot 0,85} = 0,187 \text{ сек},$$

$$w_8 = 2 \text{ Гц} \rightarrow T_8 = \frac{1}{2\pi \cdot 2} = 0,07958 \text{ сек}.$$

Завдяки визначеним ланкам можна отримати попередній вигляд виразу

математичної моделі. Цю наближену модель необхідно підкоригувати у пакеті програм MATLAB шляхом підбору коефіцієнтів демпфування, таким чином, щоб апроксимуюча крива якомога щільніше описувала експериментальну логарифмічну криву.

На рис. 3.9 та 3.10 графічно представлені скореговані апроксимуючі криві, які накладені на логарифмічні криві спектральної щільності вхідного та вихідного сигналів.

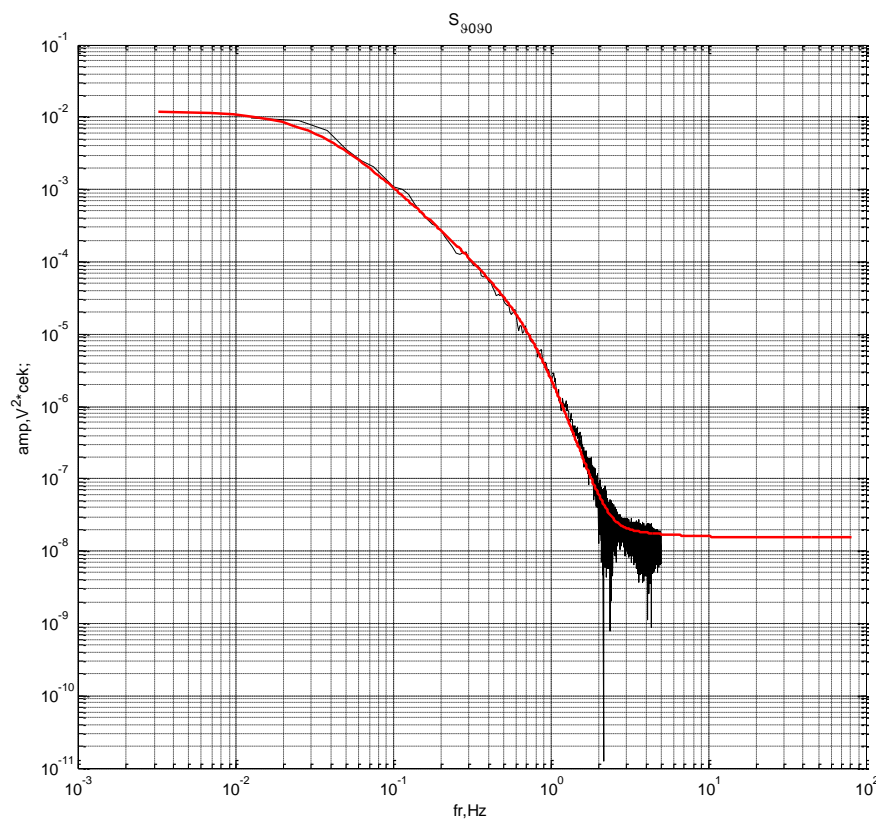


Рис. 3.9. Спектральна щільність вхідного сигналу по каналу тангажу

За результатами апроксимації отримана математична модель для спектральної щільності вхідного сигналу по каналу тангажу має вигляд:

$$S_{\vartheta_0\vartheta_0} = \frac{0,194^2}{\pi} \left| \frac{(0,0692^2 s^2 + 2 \cdot 0,45 \cdot 0,0692s + 1)(0,048s + 1)}{(5,134s + 1)(0,199^2 s^2 + 2 \cdot 0,8 \cdot 0,199s + 1)} \right|^2 \text{ (В}^2 \cdot \text{сек)}.$$

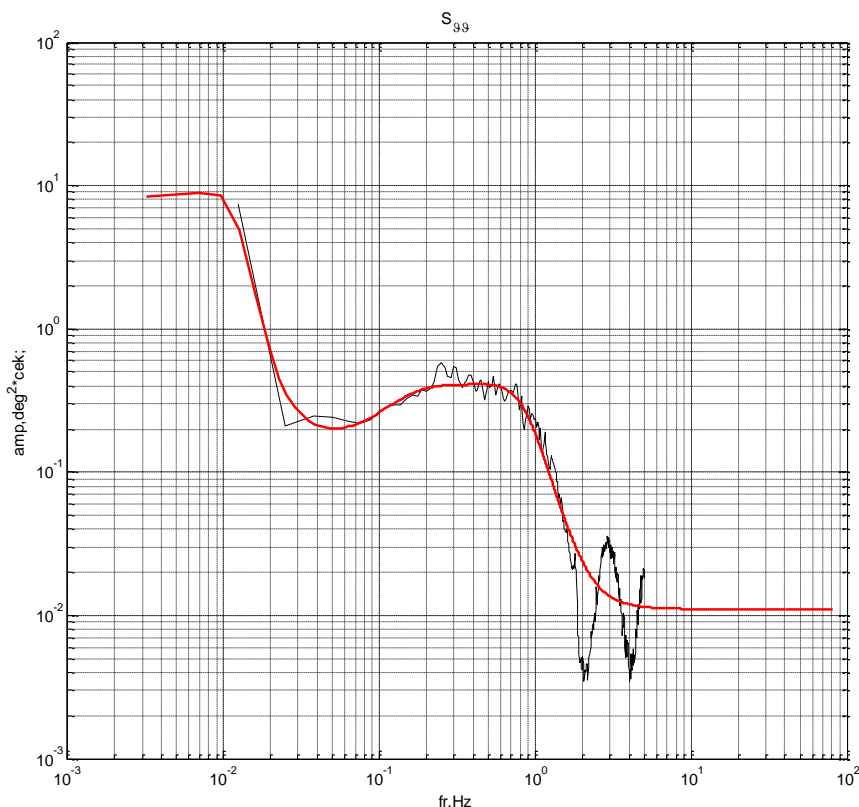


Рис. 3.10. Спектральна щільність вихідного сигналу по каналу тангажу

Вираз для спектральної щільності вихідного сигналу коптера по каналу тангажу має вигляд:

$$S_{\theta\theta} = \frac{5,01^2}{\pi} \left| \frac{(10,268^2 s^2 + 2 \cdot 0,67 \cdot 10,268s + 1)(7,967^2 s^2 + 2 \cdot 0,8 \cdot 7,957s + 1)}{(16,93^2 s^2 + 2 \cdot 0,8 \cdot 16,93s + 1)(13,26^2 s^2 + 2 \cdot 0,35 \cdot 13,26s + 1)} \right. \\ \left. \frac{(1,179^2 s^2 + 2 \cdot 1 \cdot 1,179s + 1)(0,07958^2 s^2 + 2 \cdot 0,7 \cdot 0,07958s + 1)}{(0,947^2 s^2 + 2 \cdot 0,81 \cdot 0,947s + 1)(0,187^2 s^2 + 2 \cdot 0,57 \cdot 0,187s + 1)} \right|^2 \text{ (град}^2 \cdot \text{сек)}.$$

За теоремою Вінера-Хінчина можна побудувати математичну модель та отримати графічне представлення апроксимації взаємна спектральних щільностей.

Коефіцієнт взаємозв'язку між вхідним та вихідним сигналами:

$$\mu \frac{\sigma_{\vartheta_0} \cdot \sigma_{\vartheta}}{\pi} = 0,0095,$$

$$\mu = \frac{0,0095 \cdot \pi}{\sigma_{\vartheta_0}} = \frac{0,0095 \cdot \pi}{0,194} \approx 0,031.$$

Графічне представлення накладання апроксимуючої кривої на експериментальну криву взаємна спектральної щільності між вхідним та вихідним сигналами наведено на рис. 3.11.

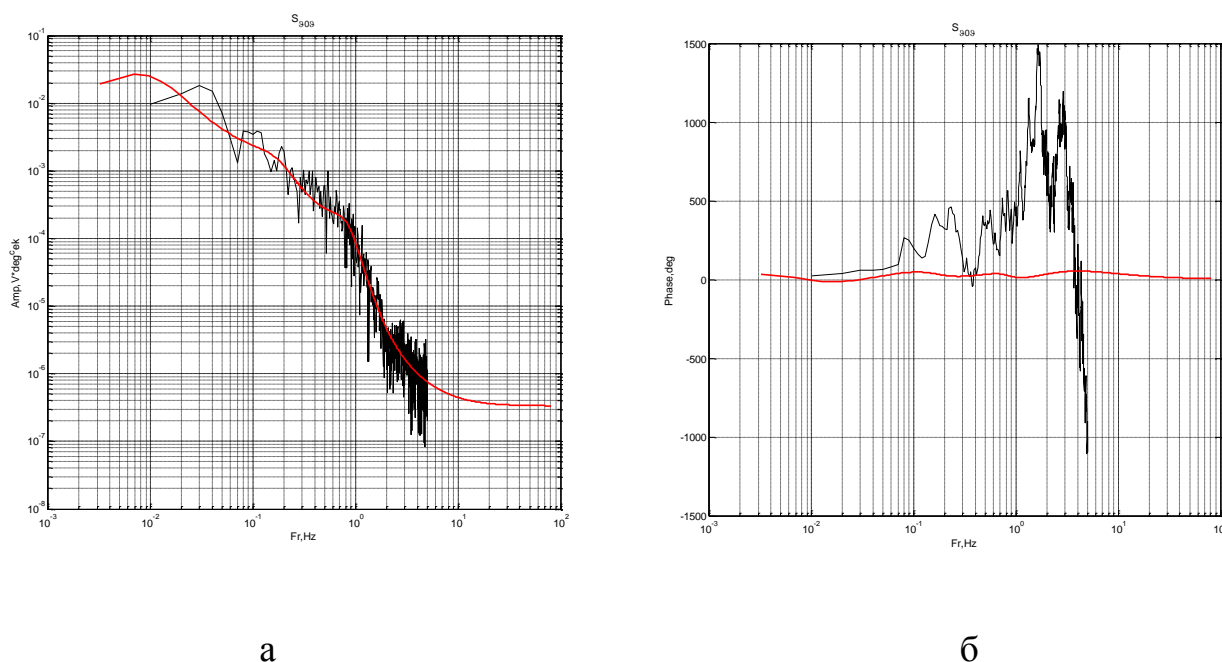


Рис. 3.11. Амплітудна (а) та фазова (б) характеристики взаємна спектральної щільності між вхідним та вихідним сигналами по каналу тангажу

Математична модель для взаємна спектральної щільності між вхідним та вихідним сигналами матиме вигляд:

$$S_{\theta_0\theta} = 0,031 \frac{0,194 \cdot 5,1}{\pi} \left| \frac{(0,0692^2 s^2 - 2 \cdot 1,8 \cdot 0,0692s + 1)(-0,048s + 1)}{(-5,134s + 1)(0,199^2 s^2 - 2 \cdot 0,6 \cdot 0,199s + 1)} \right. \\ \cdot \frac{(10,268^2 s^2 + 2 \cdot 6 \cdot 10,268s + 1)(7,967^2 s^2 + 2 \cdot 1 \cdot 7,957s + 1)}{(16,93^2 s^2 + 2 \cdot 0,85 \cdot 16,93s + 1)(13,26^2 s^2 + 2 \cdot 1 \cdot 13,26s + 1)} \\ \left. \cdot \frac{(1,179^2 s^2 + 2 \cdot 2 \cdot 1,179s + 1)(0,07958^2 s^2 + 2 \cdot 0,7 \cdot 0,07958s + 1)}{(0,947^2 s^2 + 2 \cdot 0,5 \cdot 0,947s + 1)(0,187^2 s^2 + 2 \cdot 0,3 \cdot 0,187s + 1)} \right|^2 \quad (\text{В} \cdot \text{град} \cdot \text{сек}).$$

Графічне представлення накладання апроксимуючої кривої на експериментальну криву взаємна спектральної щільності між вихідним та вхідним сигналами наведено на рис. 3.12.

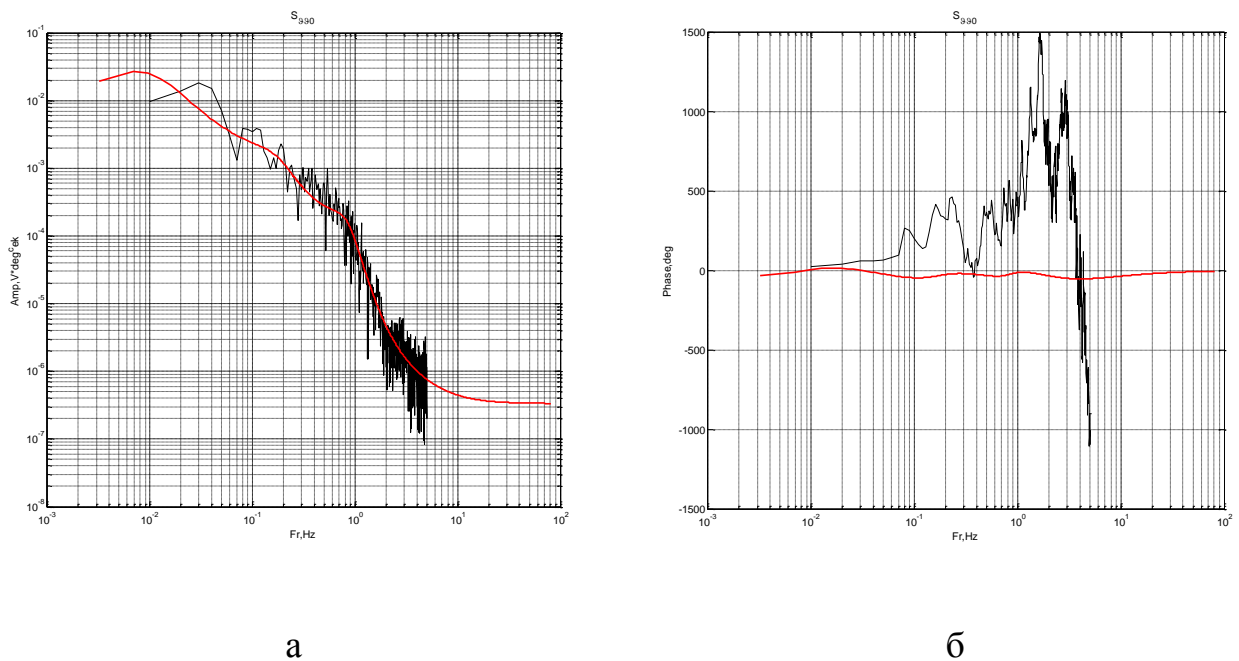


Рис. 3.12. Амплітудна (а) та фазова (б) характеристики взаємна спектральної щільності між вихідним та вхідним сигналами по каналу тангажу.

Математична модель для взаємна спектральної щільності між вихідним та вхідним сигналами матиме вигляд:

$$S_{\theta_0\theta} = 0,031 \frac{0,194 \cdot 5,1}{\pi} \left| \frac{(0,0692^2 s^2 + 2 \cdot 1,8 \cdot 0,0692s + 1)(0,048s + 1)}{(5,134s + 1)(0,199^2 s^2 + 2 \cdot 0,6 \cdot 0,199s + 1)} \right. \\ \cdot \frac{(10,268^2 s^2 - 2 \cdot 6 \cdot 10,268s + 1)(7,967^2 s^2 - 2 \cdot 1 \cdot 7,957s + 1)}{(16,93^2 s^2 - 2 \cdot 0,85 \cdot 16,93s + 1)(13,26^2 s^2 - 2 \cdot 1 \cdot 13,26s + 1)} \\ \left. \cdot \frac{(1,179^2 s^2 + 2 \cdot 2 \cdot 1,179s + 1)(0,07958^2 s^2 + 2 \cdot 0,7 \cdot 0,07958s + 1)}{(0,947^2 s^2 + 2 \cdot 0,5 \cdot 0,947s + 1)(0,187^2 s^2 + 2 \cdot 0,3 \cdot 0,187s + 1)} \right|^2 \quad (\text{В} \cdot \text{град} \cdot \text{сек}).$$

$$\frac{(1,179^2 s^2 - 2 \cdot 2 \cdot 1,179s + 1)(0,07958^2 s^2 - 2 \cdot 0,7 \cdot 0,07958s + 1)}{(0,947^2 s^2 - 2 \cdot 0,5 \cdot 0,947s + 1)(0,187^2 s^2 - 2 \cdot 0,3 \cdot 0,187s + 1)} \Big| ^2 \quad (\text{В} \cdot \text{град} \cdot \text{сек}).$$

3.3 Висновок до розділу:

За результатами проведення напівнатурного моделювання було зареєстровано вихідні та вхідні сигнали у вигляді масиву даних. Використовуючи ці масиви побудовано осцилограми вхідного та вихідного сигналів.

Для подальшої обробки сигналів були отримані криві спектральних та взаємна спектральних щільностей.

Процедура апроксимації виконана за допомогою методу узагальнених логарифмічних характеристик. Показані ілюстрації отриманих апроксимуючих кривих, які накладені на логарифмічні криві спектральної щільності вхідного та вихідного сигналів. Аналітичні криві щільно описують зміну параметрів експериментальних логарифмічних кривих.

Завдання кваліфікаційної роботи повністю виконане. Для вхідного та вихідного сигналів побудовано графічні залежності і отримано математичні моделі, які в подальшому можна використовувати в ідентифікації, синтезі та модернізації квадрокоптера.

ВИСНОВКИ

Основною метою роботи було проведення процедури обробки сигналів квадрокоптера по каналу тангажу за даними напівнатурного моделювання. Для ширшого розуміння про те, що досліджується у роботі, в перших двох розділах наведені теоретичні відомості про коптери та методи і процедури обробки експериментальних даних.

Перший розділ розкриває загальні поняття про коптери. Завдяки йому стає зрозуміло, який об'єкт досліджується в даній роботі, наведено інформацію про його можливі призначення та загальні принципи яким він підпорядковується. Також наведено опис досліджуваного коптера, з яких основних компонентів він складається. Важливими компонентами для проведення досліджень є польотний контролер та датчики квадрокоптера, завдяки їм було зареєстровано масиви вихідних даних про зміни кутового положення апарату.

Другий розділ присвячений методам обробки експериментальних даних. Наведені методи різної складності, кожен з них має свої можливості, гнучність та точність. Методом досліджень сигналів в рамках цієї роботи був метод узагальнених логаримфічних характеристик.

Третій розділ роботи є основним, в ньому проведено процедуру обробки вхідного та вихідного сигналів по каналу тангажу. По порядку розписані всі виконані етапи апроксимації, на ілюстраціях відображені результати та алгоритми виконання. Була досягнута головна мета обробки сигналів, а саме отримано математичні моделі, які описують поведінку квадрокоптера по каналу тангажу. Ці моделі в подальшому можна використовувати в ідентифікації, синтезі та модернізації квадрокоптера.

Кафедра АКСУ

НАУ 24.30.36.000 ПЗ

Виконав.	Горбаненко Д.В.			Висновки	Літ.	Арк.	Аркушів
Керівник	Єрмоласва О.В.					64	67
Консульт.	-				151-403Б-СУ		
Контрол.	Дивнич М.П.						
Зав. каф.	Мельник Ю.В.						

Усі питання та висновки, які наведені в роботі, дають можливість краще розуміти динаміку та поведінку коптерів, яким чином їх можна досліджувати та вдосконалювати. Ці питання є актуальними, оскільки масштаби використання безпілотних літальних апаратів тільки зростають.

Серед технічних досягнень, які пов'язані із дослідженнями в даній роботі, є віртуальні симуляції, в яких за допомогою математичних моделей були створені структури поведінки різних видів коптерів. Також на основі результатів подібних експериментів розробляються технологічні рішення, які модернізують систему стабілізації та керування літальних апаратів. Такі моделі дозволяють виявляти слабкі сторони певного коптера, що досліджується, і проводити їх корекцію ще до впровадження в реальні умови.

СПИСОК БІБЛІОГРАФІЧНИХ ПОСИЛАНЬ ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Квадрокоптер та гексакоптер URL-посилання:
<https://elitebike.ua/kvadrokopter-ili-geksakopter-cho-luchshe-vybrat-uk>.
2. Кветний Р. Н., Богач І. В., Бойко О. Р., Софіна О. Ю., Шушура О.М.
Комп'ютерне моделювання систем та процесів Методи обчислень.
3. Класифікація дронів та їх конструкція URL-посилання:
<https://kg.ua/news/klasifikaciya-droniv-ta-yih-konstrukciya>.
4. Класифікація дронів: URL-посилання: <https://www.bezpeka-shop.com/ua/blog/poleznye-sovety/klasifikatsiya-dronov-kakie-vidy-i-tipy-byvayut-chast-pervaya/>.
5. Методи обробки даних. URL-посилання: https://kivra.kpi.ua/wp-content/uploads/file/discipline/AOTI/AOTI_2_1.pdf.
6. Оцінка експлуатаційних властивостей гвинта. URL-посилання:
https://github.com/BezkorovainyiYurii/MDLARO_342/tree/main/lab02_drag.
7. Поняття і види моделювання URL-посилання:
https://kdrpm.pnu.edu.ua/wp-content/uploads/sites/55/2020/02/Konspect_lect_MatModel_PrMat_Koledg.pdf.
8. Ростислав Верещак Методи наближення функцій. URL-посилання:
<https://www.mathros.net.ua/linijna-interpoljacija.html>.
9. Сізіков В.С. Стійкі методи обробки результатів вимірів.
10. Солодовніков В.В. “Введення у статистичну динаміку систем автоматичного керування”

11. Тема 10. Статистичні методи аналізу кореляційних зв'язків URL-
посилання: <https://studfile.net/preview/2502081/>.

12. Approximation Methods. URL-посилання:
<http://fabcol.free.fr/pdf/lectnotes3.pdf>.