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

"___"_____2023р.

КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА

(ПОЯСНЮВАЛЬНА ЗАПИСКА)

ВИПУСКНИКА ОСВІТНЬОГО СТУПЕНЯ
“БАКАЛАВР”

Тема: Структурна ідентифікація багатовимірного динамічного стенда-імітатора кутових положень по каналу тангажу

Виконавець: студент Омельчук Владислав Васильович

Керівник: старший викладач Єрмолаєва Ольга Вікторівна

Нормоконтролер: _____ Дивнич М.П.
(підпис) (П.І.Б.)

Київ 2023

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

"_____"_____2023р.

ЗАВДАННЯ

на виконання кваліфікаційної роботи

Омельчука Владислава Васильовича

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

1. Тема кваліфікаційної роботи: Структурна ідентифікація багатовимірного динамічного стенда-імітатора кутових положень по каналу тангажу.

затверджена наказом ректора від «13» квітня 2023р. № 507/ст.

2. Термін виконання роботи: з 22 травня 2023р. по 18 червня 2023р.

3. Вихідні дані до роботи : на основі результатів первинної обробки вихідними даними є математичні моделі отримані методом узагальнених логарифмічних характеристик.

4. Зміст пояснювальної записки: Розділ 1 Опис стендів-імітаторів. Розділ 2 Методи та алгоритми структурної ідентифікації. Розділ 3 Структурна ідентифікація багатовимірного динамічного стенда-імітатора кутових положень по каналу тангажу.

5. Перелік обов'язкового графічного (ілюстративного) матеріалу: презентація складається з 14 слайдів.

6. Календарний план-графік:

№ пор	Завдання	Термін виконання	Відмітка про виконання
1	Отримання завдання на кваліфікаційну роботу	22.05.2023р.	*виконано*
2	Огляд літератури за темою	22.05.23 − 25.05.23	*виконано*
3	Аналіз стендів-імітаторів та тренажерів кутових положень	25.05.23−27.05.23	*виконано*
4	Оформлення та написання розділу «Стенди-імітатори та їх характеристики »	27.05.23−28.05.23	*виконано*
5	Аналіз методів та алгоритмів структурної ідентифікації	28.05.23−29.05.23	*виконано*
6	Дослідження методу структурної ідентифікації моделей динаміки багатовимірного об’єкта при неконт-рольованих впливах	30.05.23−31.05.23	*виконано*
7	Оформлення та написання розділу «Методи та алгоритми структурної ідентифікації »	01.06.23−03.06.23	*виконано*
8	Проведення структурної ідентифікації багатовимірного динамічного стенда-імітатора по каналу тангажу в пакеті Matlab	04.06.23−06.06.23	*виконано*
9	Аналіз отриманих результатів	07.06.23−09.06.23	*виконано*
10	Розробка слайдів та написання доповіді	10.06.23−11.06.23	*виконано*
11	Попередній захист кваліфікаційної роботи	12.06.2023р.	*виконано*
12	Корегування роботи за результатами попереднього захисту	12.06.2023р.	*виконано*
13	Остаточне оформлення кваліфікаційної роботи та слайдів	13.06.2023р.	*виконано*
14	Передати кваліфікаційну роботу керівнику для написання відгуку	16.06.2023	*виконано*
15	Захист кваліфікаційної роботи	20.06.2023р.	*виконано*

7. Дата видачі завдання: «22» травня 2023 р.

Керівник кваліфікаційної роботи _____ Єрмолаєва О.В.

(підпис керівника) (П.І.Б.)

Завдання прийняв до виконання _____ Омельчук В.В

(підпис керівника) (П.І.Б.)

РЕФЕРАТ

Омельчук Владислав. Структурна ідентифікація багатовимірного динамічного стенда-імітатора кутових положень по каналу тангажу. – Кваліфікаційна робота за спеціальністю 151 «Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології». Національний авіаційний університет Міністерства освіти і науки України, м. Київ, 2022. Кваліфікаційна робота містить 83 сторінки, 1 таблицю, 17 рисунків, список використаних джерел з 10 найменуваннь.

Об'єкт дослідження є багатовимірний динамічний стенд - імітатор кутових положень по каналу тангажу.

Предметом дослідження є методи та алгоритми структурної ідентифікації.

Мета дослідження – проведення структурної ідентифікації багатовимірного динамічного стенда-імітатора кутових положень по каналу тангажу та визначення передавальної функції даного стенда знаючи вхідні та вихідні дані. Для того, щоб забезпечити точність, надійність та достовірність вимірювань, що проводяться за допомогою стенда та можливість його вдосконалення.

При написанні роботи використовувалися методи дослідження: метод структурної ідентифікації моделей динаміки багатовимірного стенда-імітатора при неконтрольованих впливах.

Ключові слова: структурна ідентифікація, динамічний багатовимірний стенд, апроксимація, стенд-імітатор кутових положень по каналу тангажу, тестування, системи управління, експлуатація, регулювання.

Рекомендації щодо використання результатів: матеріали роботи можуть бути використані при дослідженні та розробці сучасних стендів-імітаторів та експлуатації динамічних систем управління. Також для навчання персоналу та створення адекватних тестових середовищ для успішного використання стендів-імітаторів та вдосконалення алгоритмів.

ЗМІСТ

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ ТА СКОРОЧЕНЬ..... 8

ВСТУП..... 9

РОЗДІЛ 1.СТЕНДИ–ІМІТАТОРИ ТА ЇХ ХАРАКТЕРИСТИКИ..... 12

1.1 Загальний опис стендів-імітаторів 12

1.1.1 Опис стендів-імітаторів за областю застосування та призначенням..... 13

1.1.2 Опис стендів-імітаторів за кількістю осей 13

1.1.3 Опис стендів-імітаторів за функціональними можливостями 15

1.1.4Опис стендів-імітаторів за маштабом..... 16

1.1.5 Опис стендів-імітаторів за складністю 17

1.2. Опис та проблематика розробки стендів 18

1.2.1. Опис поворотного стенда СТА-10..... 18

1.2.2 Основні характеристики стенду 19

1.2.3 Способи вимірювання характеристик поворотного стенду СТА-10 20

1.2.4 Основні вимоги до випробуваних стендів ЛА 21

1.2.5 Проблеми при розробці та експлуатації стендів-імітаторів 23

1.3.Конструкція та динамічні характеристики досліджуваного стенда 24

Висновки до розділу 1: 29

РОЗДІЛ 2.ОПИС МЕТОДІВ ІДЕНТИФІКАЦІЇ 30

2.1 Основні поняття ідентифікації..... 30

2.1.1 Схема ідентифікації моделі..... 31

2.1.2 Основні задачі ідентифікації..... 32

2.2 Класифікація методів ідентифікації..... 35

2.2.1 Структурна ідентифікація 35

2.2.2 Параметрична ідентифікація 36
2.2.3 Структурно-параметрична ідентифікація 38
2.2.4 Фізична ідентифікація 39
2.2.5 Статична ідентифікація 40
2.2.6 Оптимальна ідентифікація 42
2.2.7 Адаптивна ідентифікація 43
2.3 Алгоритми структурної ідентифікації 44
2.3.1 Метод найменших квадратів (МНК) 45
2.3.2 Метод допоміжних змінних (МДЗ) 47
2.3.3. Метод структурної ідентифікації моделей динаміки багатовимірного об’єкта при неконтрольованих впливах 49
Висновки до розділу 2 51
РОЗДІЛ 3. СТРУКТУРНА ІДЕНТИФІКАЦІЯ БАГАТОВИМІРНОГО ДИНАМІЧНОГО СТЕНДА-ІМІТАТОРА КУТОВИХ ПОЛОЖЕНЬ ПО КАНАЛУ ТАНГАЖУ 51
3.1 Побудова за результатами моделювання осцилограм вхідних і вихідних сигналів 53
3.2 Побудова особистих спектральних щільностей вхідного та вихідного сигналів по каналу тангажу 54
3.3 Побудова взаємних спектральних щільностей вхідного та вихідного сигналів по каналу тангажу та їх фазових характеристик 55
3.4. Структурна ідентифікація стенда-імітатора кутових положень 57
Висновки до 3 розділу: 60
ВИСНОВКИ 61
ПЕРЕЛІК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ 63
ДОДАТОК А 64

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ ТА СКОРОЧЕНЬ

ДБС − Динамічний багатовимірний стенд

ЛА − Літальний апарат

СТА − Стенд технічний аналізатор

ПЕОМ − Персональних електронних обчислювальних машин

ДС − Динамічний стенд

ФФ − Формуючий фільтр

МНК − Метод найменших квадратів

МДЗ − Метод допоміжних змінних

ВСТУП

Актуальність теми. Вимірювання кутових положень і використання стендів-імітаторів є важливою задачею в багатьох галузях науки та техніки. Точність і достовірність вимірювання кутових положень мають вирішальне значення для багатьох додатків і систем, в галузях таких як авіація, космічна техніка, обробка металів і багато інших.

В авіаційній промисловості точне вимірювання кутових положень використовується для навігації, стабілізації та контролю польоту літаків. Навігаційні системи повинні чітко визначати орієнтацію повітряних суден у просторі, а для цього необхідні надійні та правильні вимірювання кутових положень.

Структурна ідентифікація багатовимірного динамічного стенда-імітатора кутових положень по каналу тангажу є дуже актуальною і важливою в контексті сучасних наукових та технічних вимог. Вона відображає потребу у вдосконаленні та оптимізації стендів-імітаторів для вимірювання кутових положень і створення більш сучасних і надійних систем.

Одним з ключових аспектів вимірювання кутових положень є стабільність та точність вимірювального пристрою. Динамічні стенди-імітатори кутових положень по каналу тангажу використовуються для симуляції різних рухів і викликання відповідних вимірювань. Однак, вони можуть піддаватися впливу різних факторів, таких як температурні зміни, механічні напруги, шуми, які можуть вплинути на вимірювання кутових положень.

Тому, розробка структурної ідентифікації багатовимірного динамічного стенда-імітатора кутових положень по каналу тангажу має на меті встановити

залежності між вхідними сигналами та вихідними результатами вимірювання. Це дозволить виявити можливі неточності, помилки та некоректності у роботі стенда та вжити відповідних заходів для їхнього усунення.

Подальша розробка та вдосконалення таких методів і технік структурної ідентифікації динамічних стендів-імітаторів кутових положень по каналу тангажу може мати безліч практичних застосувань. Вона допоможе поліпшити точність і надійність вимірювань, забезпечити більш точну калібрування та налаштування стендів-імітаторів. Це зробить їх більш ефективними та надійними для вимірювання кутових положень у різних додатках і дослідженнях.

Крім того, розробка структурної ідентифікації динамічних стендів-імітаторів кутових положень є важливою з практичної точки зору. Вона може допомогти виявити та вирішити проблеми, пов’язані зі зміною параметрів стенда, зносом та старінням елементів, а також ефектами зовнішніх впливів. Це дозволить забезпечити тривалий та стабільний функціонал стенда протягом його експлуатаційного терміну.

Враховуючи поширеність вимірювання кутових положень у різних галузях, таких як авіація, космічна техніка, робототехніка, обробка металів та інші, важливо мати надійні та точні засоби вимірювання. Тому дослідження, що спрямовані на структурну ідентифікацію багатомірних динамічних стендів-імітаторів кутових положень по каналу тангажу, є дуже актуальними і мають великий потенціал для вдосконалення і оптимізації вимірювальних систем.

Тому, дана робота має значну актуальність і може сприяти розвитку наукових досліджень і практичного застосування в області вимірювання кутових положень за допомогою стендів-імітаторів.

Мета і задачі роботи. Мета роботи полягає в дослідженні стенда-імітатора кутових положень по каналу тангажу та визначити передавальну функцію даного стенда знаючи вхідні та вихідні дані, для того щоб провести структурну

ідентифікацію, щоб забезпечити точність, надійність та достовірність вимірювань, що проводяться за допомогою стенда.

Завдання дипломної роботи:

1. Опис та дослідження стендів-імітаторів та тренажерів кутового положення.
2. Дослідження методів ідентифікації багатомірних динамічних стендів-імітаторів кутових положень.
3. Дослідження методу структурної ідентифікації моделей динаміки багатовимірного об’єкта при неконтрольованих впливах
4. Структурна ідентифікація стенда-імітатора за каналом тангажу.
5. Побудова графічних залежностей в середовищі Matlab для багатовимірного динамічного стенду-імітатора кутових положень по каналу тангажу.
6. Аналіз проведеного дослідження.
7. Формулювання висновків на основі отриманих результатів.

РОЗДІЛ 1

СТЕНДИ–ІМІТАТОРИ ТА ЇХ ХАРАКТЕРИСТИКИ

1.1 Загальний опис стендів-імітаторів

Стенди-імітатори є інноваційними інженерними пристроями, які використовуються для симуляції різних процесів, умов або систем з метою тестування, навчання та досліджень. Вони є важливим інструментом у багатьох галузях, таких як промисловість, транспорт, авіація, електроніка, медицина та багато інших.

Необхідність використання стендів-імітаторів обумовлена декількома факторами. Перш за все, вони дозволяють проводити тестування нових продуктів або систем у контрольованому середовищі, що дозволяє виявити потенційні проблеми та вдосконалити їх перед впровадженням у реальні умови. Використання стендів-імітаторів також забезпечує безпечне середовище для тренування персоналу, що дозволяє знизити ризик непередбачених ситуацій в реальних умовах і запобігти можливим небезпекам. Крім того, стенди-імітатори дозволяють проводити дослідження та аналізувати різні сценарії без необхідності втручання в реальні системи або процеси.

Стенд-імітатор - це спеціальна система, яка створена для імітації певних процесів або умов, щоб забезпечити практичну симуляцію реального середовища. Він дозволяє відтворювати певні сценарії, рухи, дії або положення, які можуть виникнути у реальній ситуації.

Стенди-імітатори поділяються за областю застосування, кількістю осей, призначенням, функціональними можливостями, маштабом та складністю.

1.1.1 Опис стендів-імітаторів за областю застосування та призначенням

Стенди-імітатори застосовуються в різних галузях та областях:

- авіаційна промисловість : вони використовуються для моделювання польотів, навчання пілотів та розробки авіаційних систем.

-автомобілебудування: стенди-імітатори допомагають проводити випробування двигунів, електронних систем та безпеки.

- енергетична промисловість: вони використовуються для моделювання та оптимізації роботи електроенергетичних систем, включаючи розподілену генерацію та управління енергопотоками.

- медицина: для навчання та тренування медичного персоналу, моделювання біологічних процесів та розробки нових медичних пристроїв. Вони використовуються в виробничих галузях для оптимізації процесів виробництва, навчання персоналу та контролю якості.

1.1.2 Опис стендів-імітаторів за кількістю осей

Одновісні стенди: Ці стенди моделюють рух тільки по одній осі. Наприклад, одновісні стенди можуть моделювати рух вгору-вниз, рух підйому-опускання або рух вперед-назад.

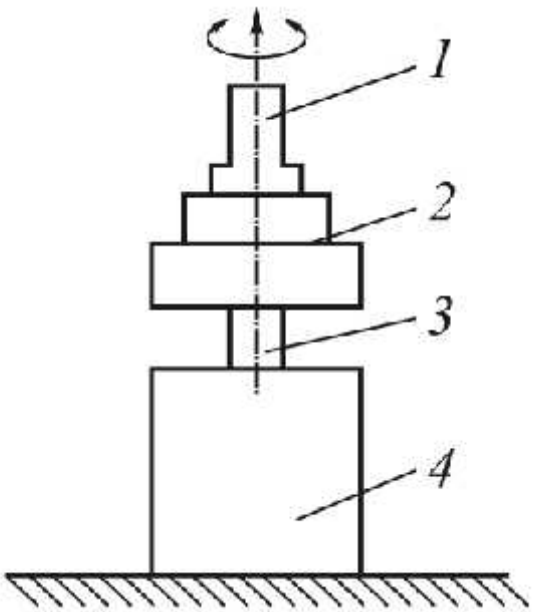


Рис.1.1. Схема одновісної поворотної установки

На рис.1.1 позначено: 1 – об’єкт випробувань, 2 – монтажне пристосування, 3– відліковий пристрій і струмопідведення, 4 – двигун.

Двовісні стенди: Ці стенди можуть моделювати рух по двом незалежним осям. Вони здатні імітувати рух у двох площинах.

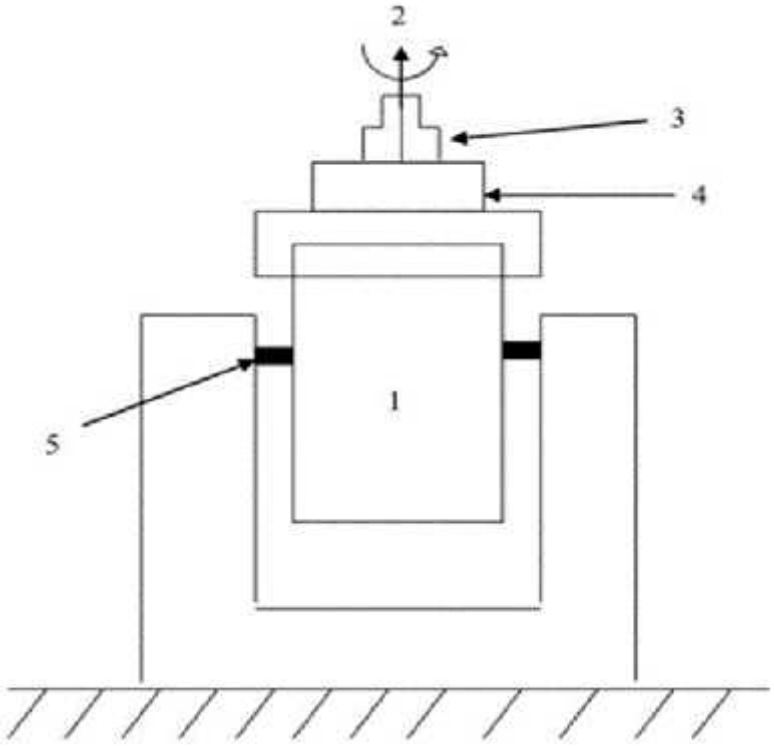


Рис.1.2. Схема двовісної поворотної установки

Тут позначено: 1 - електропривід повороту осі обертання стенду, струмовідводи та шкала відліку кутів повороту, 2 - вісь чутливості гіроскопа, 3 – гіроскоп, 4 - пристосування для встановлення чутливих елементів та перехідна пластина для монтажу, 5 – горизонтальна цапфа та шкала відліку кутів повороту.

Кут між віссю обертання столу і площиною горизонту, коли вісь обертання столу встановлена паралельно осі обертання Землі, має дорівнювати географічній широті місця випробувань.

Тривісні стенди: Ці стенди можуть моделювати рух по трьом незалежним осям. Вони здатні імітувати тривимірний рух, включаючи рух вгору-вниз, вперед-назад та поперековий рух.

Тривісна поворотна установка призначена для випробування блоку інерційних датчиків або інерційних вимірювальних модулів. Тривісна поворотна установка містить три рамки карданного підвісу, рухом яких можна управляти – задавати певні кути повороту або задану кутову швидкість обертання (на рис. 1.3 позначено 1 – об’єкт випробувань, 2 – внутрішня, 3 – середня і 4 – зовнішня вісь обертання).

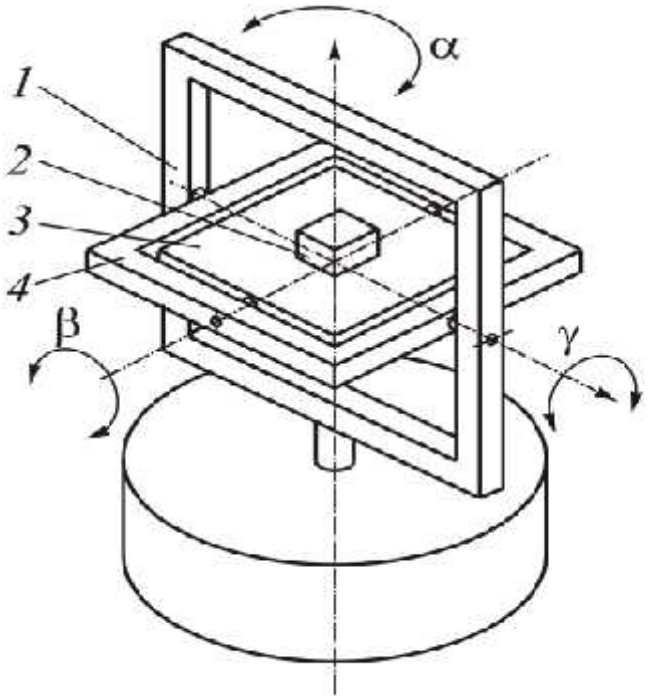


Рис.1.3. Схема тривісної поворотної установки

Багато-вісні стенди: Мають більше трьох незалежних осей і дозволяють більш докладне моделювання руху або динаміки складних систем. Наприклад, стенди для випробування руху мульти-вісних рухомих платформ.

1.1.3 Опис стендів-імітаторів за функціональними можливостями

Класифікація стендів-імітаторів за функціональними можливостями:

а) Моделювання процесів: Стенди-імітатори здатні моделювати різні процеси, які відтворюють реальні умови або ситуації. Наприклад, в авіаційній галузі

стенди-імітатори можуть моделювати польотні умови, поведінку повітряного судна та різні аспекти авіаційних систем.

б) Симуляція реальних умов: Стенди-імітатори можуть створювати умови, які досить точно відтворюють реальні ситуації або середовища. Наприклад, у медичній галузі стенди-імітатори можуть симулювати фізіологічні процеси в організмі, що дозволяє медичним працівникам тренуватися в обробці реальних медичних ситуацій.

в) Тестування та валідація: Стенди-імітатори дозволяють проводити випробування та перевірку різних систем, пристроїв або компонентів. Вони дозволяють встановити, чи працює система правильно, перевірити її функціональність, надійність та відповідність вимогам.

г) Тренування та навчання: Стенди-імітатори використовуються для тренування та навчання персоналу. Вони дозволяють симулювати різні сценарії, ситуації або події, що допомагає навчати працівників реагувати на них, розвивати необхідні навички та вміння.

д) Оптимізація та вдосконалення: Стенди-імітатори використовуються для оптимізації та вдосконалення роботи систем, процесів або пристроїв. Вони дозволяють проводити дослідження, експерименти та аналіз для виявлення можливих поліпшень, змін або оптимальних рішень.

1.1.4 Опис стендів-імітаторів за маштабом

Розподіл стендів-імітаторів на різні категорії за маштабом їх функціональності та обсягом модельованих систем. Кожна категорія має свої особливості та застосування в різних галузях. Давайте розпочнемо з опису найменшої категорії:

а) Мікро-масштабні стенди-імітатори: ці стенди-імітатори призначені для моделювання дуже малих систем або компонентів. Вони знаходять застосування, наприклад, у дослідженні мікроелектроніки або наноматеріалів. Такі стенди-імітатори мають високу точність та деталізацію.

б) Лабораторні стенди-імітатори: ці стенди-імітатори розташовані у спеціальних лабораторних умовах і призначені для проведення досліджень, експериментів та аналізу різних систем або процесів. Вони забезпечують можливість вивчення фізичних, хімічних або біологічних процесів з високою деталізацією.

в) Промислові стенди-імітатори: ці стенди-імітатори використовуються в промислових умовах для тестування, валідації та оптимізації різних систем або пристроїв. Вони можуть включати реальні компоненти, датчики, контрольні системи та інші елементи, що забезпечують моделювання реального середовища.

г) Комплексні системи стендів-імітаторів: ці стенди-імітатори складаються зі зв’язаних між собою підсистем і модулів, що дозволяє моделювати складні багатокомпонентні системи. Вони знаходять застосування, наприклад, у тестуванні та розробці комп’ютерних систем, автомобільних електронних систем або супутникових систем.

1.1.5 Опис стендів-імітаторів за складністю

Стенди-імітатори постійно вдосконалюються, та виконують все більш складні задачі з тестування. Від простих систем, що моделюють базові процеси, до надзвичайно складних систем, які відтворюють повністю реальні сценарії ЛА.

Дані стенди-імітатори поділяються на :

а) Прості - це найбільш базовий рівень стендів-імітаторів, які зазвичай мають обмежену функціональність і складаються з основних компонентів, необхідних для моделювання певного процесу або системи. Вони можуть використовуватися для базових тестів та експериментів.

б) Середньої складності - такі стенди-імітатори вже мають більш розширену функціональність та складаються з додаткових компонентів і модулів. Вони можуть включати в себе реалістичні симулятори, додаткові датчики, інтерфейси управління та можливості взаємодії зі зовнішніми системами.

в) Складні стенди-імітатори - дані стенди-імітатори представляють собою комплексні системи з багатьма компонентами, підсистемами та модулями. Вони здатні забезпечувати високий рівень деталізації та точності моделювання. Вони можуть мати розширені функціональні можливості, включаючи взаємодію з реальними пристроями, інтеграцію зі зовнішніми системами та підтримку різних сценаріїв тестування.

г)Надзвичайно складні стенди-імітатори - такі стенди використовуються в авіації, космічній промисловості та обороні, є найбільш складними та передовими системами у своїх галузях. Вони використовуються для повного моделювання реальних систем і забезпечують високу точність, реалістичність та можливості відтворення складних сценаріїв.

1.2. Опис та проблематика розробки стендів

1.2.1. Опис поворотного стенда СТА-10

Рис.1.4.Тривісний поворотний стенд СТА-10

1.2.2 Основні характеристики стенду

Основні конт рольовані характеристики стенду СТА-10 наведено у табл.1Таблиця 1

Найменування характеристики	Значення		
	Внутрішня вісь	Вісь нахилу	Вісь повороту
Неортогональність осей стенду, ″, не більше	10		–
	–	15	
Діапазон обертання, °	необмежений		
Абсолютна похибка кутового позиціонування, ″, не більше	10		
Діапазон задання кутової швидкості, °/с	0,001 …1200	0,001 …1200	0,001 …600
Допустимі відхилення кутової швидкості від заданого значення, %			
) в діапазоні від 0,001 до 0,01°/с	±5,0	±5,0	±5,0
) в діапазоні від 0,01 до 5°/с	±1,0	±1,0	±1,0
) в діапазоні від 5 до 50°/с	±0,5	±0,5	±0,5
) в діапазоні від 50 до 600°/с	±0,1	±0,1	±0,1
) в діапазоні від 600 до 1200°/с	±0,05	±0,05	–

Основні контрольовані характеристики стенду СТА-10

На внутрішній осі та осі нахилу стенду використовуються інкрементні оптоелектронні датчики кута ЛІР-3170 з підшипником та порожнім вихідним валом із вбудованою муфтою. Межа допустимої абсолютної похибки датчиків становить ±2 ″ (при дотриманні ексцентриситету осей обертання вихідного валу датчика та валу підшипника ±0,1 мм).

На осі повороту використовується модульний датчик кута з однією головкою, що зчитує .Похибка градуювання його лімба становить ±0,38”. Для збільшення точності позиціонування по внутрішній осі та осі нахилу у стенді застосовуються двох-направлені радіально-упорні кулькові підшипники із зазором менше 2 мкм, а по осі повороту – комбінований роликовий підшипник із попереднім натягом.

1.2.3 Способи вимірювання характеристик поворотного стенду СТА-10

Вимірювання кутової швидкості: при вимірюванні застосовуються інкрементні енкодери для вимірювання кутової швидкості обертання осей стенду. Інкрементні енкодери, які застосовувалися у конструкції стенду, мають можливість передавати імпульс при проходженні нульової мітки на шкалі енкодера. Таким чином, за допомогою частотометра вимірюється період обертання T (час між двома імпульсами) кожної осі стенду.

Абсолютне $\Delta\omega^A$ і відносне $\Delta\omega$ значення кутової швидкості вираховується по наступним формулам:

$$\Delta\omega = \left|\frac{\Delta\omega^A}{\omega_0}\right| \cdot 100\%$$

$$\Delta\omega^A = |\omega_0 - 360°/\,T|,$$

де ω_0 – задане значення кутової швидкості .

Вимірювання кутового положення: при вимірюванні цієї характеристики застосовуються датчики кутового положення (наприклад, потенціометри) для вимірювання кутового положення осей стенду. Датчики відображають значення кута повороту осей і передають цю інформацію для подальшого аналізу та використання.

Для даної характеристики нам потрібно, досліджувати тип датчика, його вхідний сигнал та функцію передачі даного сигналу. Після оцінки, можна перейти до дослідження, а потім до аналізу отриманих результатів.

Вимірювання статичного та динамічного нахилу: застосування датчиків для нахилу вимірювання статичного та динамічного нахилу стенду. Ці датчики дозволяють визначити кут нахилу стенду відносно горизонтальної площини. Принцип роботи датчиків нахилу базується на вимірюванні гравітаційної сили або відхилення рідини при нахилі стенду.

Залежно від конкретного застосування, можуть використовуватися різні типи датчиків. Процес вимірювання нахилу полягає в зчитуванні вихідного сигналу з датчика нахилу та перетворенні його в відповідний кут нахилу. Для цього можуть використовуватися математичні алгоритми та калібрування датчика.

1.2.4 Основні вимоги до випробуваних стендів ЛА

Вимоги до випробувальних стендів є ключовим аспектом у розробці та випробуванні літаків. Відповідно до вимог авіаційних стандартів та вимог замовників, стенди повинні забезпечувати ефективне та надійне випробування різних систем та компонентів літака. Дотримання вимог до стендів дозволяє забезпечити високу якість та безпеку випробувань, а також знизити ризик непередбачених проблем у подальшому експлуатаційному періоді.

Іспитові стенди повинні задовольняти ряд вимог:

Іспитові стенди повинні забезпечувати ідентичність або динамічну подібність експлуатаційних процесів, щоб забезпечити точність вимірювань та аналізу впливу на апарат. Важливо мінімізувати побічні впливи на випробуваний апарат, забезпечуючи безпеку та роботоспособність ЛА під час проведення випробувань.

Ефективне використання іспитових стендів передбачає проведення випробувань у короткі терміни з мінімальними витратами коштів, що дозволяє збільшити продуктивність та ефективність процесу. Стенди повинні мати достатню потужність для проведення випробувань, забезпечуючи необхідну енергію для функціонування апарату під час тестування, також повинні забезпечити високу продуктивність та точність вимірювань.

Довговічність стендів при роботі в не сприятливих умовах, таких як підвищена вологість або запиленість, є важливою вимогою для забезпечення стабільності та надійності процесу випробувань.

При таких умовах дуже тяжко ЛА зберігати стабільність характеристик в межах встановленого допуску навіть при зміні маси апарата або навантаження, що дозволяє отримувати надійні та повторювані результати. Тому, ми й проводимо дуже важливу роботу на етапі розробки стендів та при тестуванні за допомогою стендів-імітаторів.

Простота виготовлення та економічність стендів забезпечують їх доступність та використання в широкому спектрі випробувань. Завдяки цьому, повинні мати можливість відтворювати навантаження та забезпечувати стабільний режим з заданою точністю протягом певного часу, що відповідає вимогам нормативно-технічної документації. І при використанні вони повинні надавати інформацію в зручній формі для оперативного використання та аналізу результатів випробувань

Простота та зручність у керуванні заданим іспитовим режимом дозволяє ефективно виконувати та контролювати процес випробувань, і повинні надавати можливість ручного та автоматичного керування, щоб забезпечити гнучкість та автоматизацію вимірювань та процедур. Важливо надавати можливість відтворення та вимірювання параметрів фактичного запасу міцності та стійкості апарата з використанням коефіцієнта безпеки, що перевищує аналогічний параметр апарата в 1,5...3 рази для забезпечення безпеки та надійності його роботи.

1.2.5 Проблеми при розробці та експлуатації стендів-імітаторів

а) Недостатня точність моделей: Розробка точних моделей, які достовірно відтворюють реальні умови, може бути складною задачею. Неправильні або неповні моделі можуть призводити до неточностей та недоліків в роботі стенду-імітатора.

б) Неповна або некоректна імітація реальних умов: Відтворення реальних умов у стенді-імітаторі може бути складним завданням. Некоректна імітація може призводити до неправильних результатів тестування та недостовірної оцінки функціональності системи.

в) Складність підтримки та оновлення: Стенди-імітатори можуть потребувати постійного оновлення та підтримки. Це може включати вдосконалення моделей та алгоритмів, усунення помилок, оновлення апаратного та програмного забезпечення. Забезпечення безперебійної роботи та актуальності стенду може бути викликом для розробників та операторів.

г) Обмеження у доступі до реальних даних або систем: В деяких випадках можуть виникати обмеження у доступі до реальних даних або систем, які необхідні для відтворення реальних умов на стенді-імітаторі. Це може ускладнити розробку та перевірку працездатності системи.

Фактори, які можуть вплинути на розробку стендів-імітаторів:

Витрати на розробку та підтримку стендів: Розробка та підтримка стендів-імітаторів можуть вимагати значних витрат. Це можуть бути витрати на закупівлю апаратного та програмного забезпечення, навчання персоналу, інфраструктуру та інші витрати.

Навчання персоналу: Використання стендів-імітаторів може вимагати спеціалізованого навчання персоналу. Необхідно забезпечити, щоб персонал був кваліфікованим і розумів принципи роботи стенду-імітатора, а також вмів ефективно користуватись ним.

Організація тестових середовищ: Для ефективного використання стендів-імітаторів необхідно створити адекватні тестові середовища, що дозволять проводити реалістичні тести та експерименти. Це може вимагати додаткових зусиль та ресурсів для налагодження тестового середовища.

Способи вирішення проблем та покращення розробки стендів-імітаторів:

а) Покращення моделей та алгоритмів: Розробники можуть працювати над вдосконаленням моделей та алгоритмів, щоб забезпечити більш точну та достовірну імітацію реальних умов.

б) Збільшення точності та достовірності даних: Для покращення роботи стендів-імітаторів важливо забезпечити точність та достовірність вхідних даних, які використовуються для імітації реальних умов.

в) Використання потужних та сумісних технологій: Використання сучасних технологій та забезпечення сумісності з реальними системами може поліпшити ефективність та надійність стенду-імітатора.

г) Навчання персоналу та підтримка спеціалізованих команд: Інвестування в навчання персоналу та формування спеціалізованих команд, які займаються розробкою та експлуатацією стендів-імітаторів, може допомогти вирішувати технічні та організаційні проблеми.

д) Регулярне тестування та оновлення: Важливо регулярно проводити тестування стендів-імітаторів та вносити оновлення для виправлення помилок, поліпшення функціональності та забезпечення актуальності**.**

1.3. Конструкція та динамічні характеристики досліджуваного ДБС

В сучасному світі найважливішою вимогою, що ставиться до сучасних багатовимірних динамічних стендів-імітаторів, є імітація рухів у максимальній подібності між реальними рухами об’єкту. Це особливо важливо при розробці конкурентоздатних комплексів для моделювання, при надзвичайно складних умовах. Тому вони вимагають нових алгоритмів для управління імітаторами (динамічними стендами), які забезпечать оптимальні значення критеріїв якості та

безпеки. Ці алгоритми спрямовані на досягнення максимальної точності імітації програмних рухів, враховуючи стохастичні збурення та завади вимірювань.

В даній кваліфікаційній роботі ми будемо використовувати для імітації рухів складний багатовимірний динамічний стенд-імітатор для вимірювання кутових положень по каналу тангажу, який враховує випадкові впливи.

Дослідження, як теоретичні, так і експериментальні, показують, що точність більшості гіроскопічних систем залежить від руху їхнього розташування на борту судна під час руху. Більшість збурюючих факторів, пов’язаних з технологією виготовлення і експлуатацією систем, проявляються тільки під час випадкового руху розташування. Тому головними вимогами до наземних випробувань бортових кібернетичних комплексів є максимально точна імітація реальних умов та рухів.

Основною проблемою під час реального руху гіроскопічних приладів, що вони попадають під вплив збурень, що мають стохастичний характер. Під час проведення тестувань існуючих випробувальних стендів, призначених для випробування гіроприладів на вплив кутових “відхилень” судна, вони показали що на даний час мають перевагу детерміновані стимулюючі впливи.

Розглянуті конструктивні особливості нашого сденда-імітатора включають триступеневий кардановий підвіс платформи, де по осях встановлені двигуни з приводами і датчики вихідних реакцій, а також підсилювачі потужності.

Принципова схема стенда використовується для оцінки лініаризованості моделі даної частини стенда та конкретизації параметрів шляхом проведення етапу ідентифікації моделі динаміки стенда. Розроблені алгоритми та методика ідентифікації застосовуються при гармонійних впливах для отримання моделей багатовимірних електромеханічних об’єктів з урахуванням механічних (інерційних, гіроскопічних) перехресних зв’язків.

Стенд має оптимальну систему управління, яка реалізована на аналоговій елементній базі. Така система управління також може бути реалізована в

дискретному вигляді, оскільки робочий діапазон програмних сигналів стенда набагато нижче можливих частот дискретизації. З метою досягнення оптимальної точності імітації стохастичних рухів судна навколо центра мас у збуреному русі пропонується використовувати динамічний стенд-імітатор, функціональна схема якого показана на Рис.1.5.

Для випробування приладів і систем, які закріплюються на рухомій платформі ДС, як впливи ми використовуємо стаціонарні сигнали. Так як багатомірний стаціонарний випадковий процес цілком визначений, задача імітації експлуатаційних рухів зводиться до відтворення платформою ДБС таких кутових рухів, які максимально наближені до кутових рухів судна. Виходячи з цього, на вхід ДБС подається багатомірний стаціонарний випадковий сигнал r, наприклад, вектор “білих” шумів. Він надходить також в електронний формуючий фільтр ФФ, що перетворить вектор r в електричні сигнали, які повністю відповідають імітуючому руху судна.

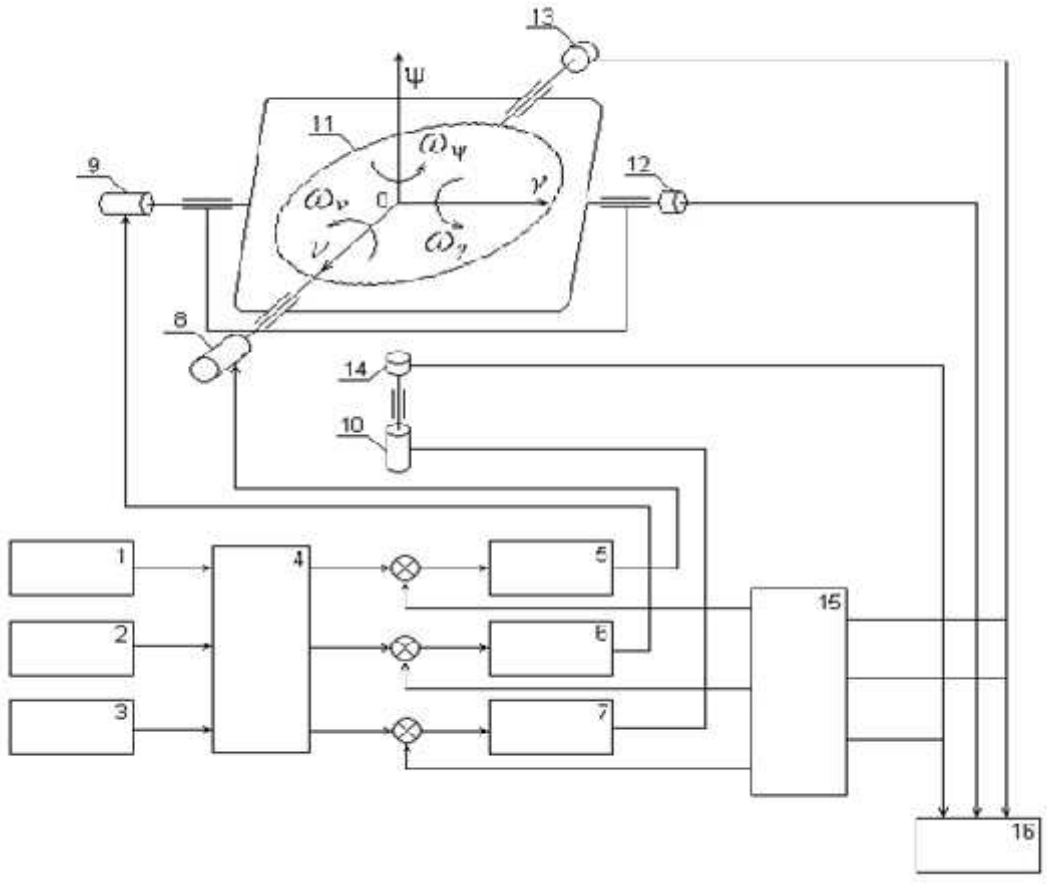


Рис.1.5. Функціональна схема ДБС

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.

Основною особливістю пропонованого ДБС є те, що він являє собою не просто електричний, а оптимальний електромеханічний формуючий фільтр, що перетворює вектор електричних сигналів r, у вектор механічних рухів платформи x, який відповідає реальному збуреному кутовому руху судна в конкретному режимі руху. Точність імітації обмежена тільки властивостями механічної системи, тобто вектором ψ та співвідношенням корисного сигналу і перешкод виміру вектора вихідних реакцій.

У зв’язку з технічним прогресом і постійним зростанням вимог до точності бортових навігаційних і керуючих систем рухомих об’єктів, у процесі модернізації цих систем і комплексів стає необхідним проводити динамічну атестацію. Суть такої атестації полягає в тому, що випробуваний виріб встановлюється на багатовимірний стенд-імітатор, який імітує натурні рухи рухомого об’єкта в заданому збуреному русі. Сигнали, які характеризують збурений рух об’єкта, представляють собою багатовимірний стохастичний процес з відомими характеристиками, які були визначені під час випробування прототипів об’єкта на стенді-імітаторі. Після експерименту проводиться ідентифікація моделей динаміки виробу, включаючи матриці спектральних

щільностей неконтрольованого вектора збурень, що діють на виріб під час його функціонування в динамічних умовах, близьких до умов, що імітуються на стенді.

У зв’язку з технічним прогресом і постійним зростанням вимог до точності бортових навігаційних і керуючих систем рухомих об’єктів, у процесі модернізації цих систем і комплексів стає необхідним проводити динамічну атестацію. Суть такої атестації полягає в тому, що випробуваний виріб встановлюється на багатовимірний стенд-імітатор, який імітує натурні рухи рухомого об’єкта в заданому збуреному русі. Сигнали, які характеризують збурений рух об’єкта, представляють собою багатовимірний стохастичний процес з відомими характеристиками, які були визначені під час випробування прототипів об’єкта на стенді-імітаторі. Після експерименту проводиться ідентифікація моделей динаміки виробу, включаючи матриці спектральних щільностей неконтрольованого вектора збурень, що діють на виріб під час його функціонування в динамічних умовах, близьких до умов, що імітуються на стенді.

Неможливо безпосередньо встановити моделі динаміки суден різних класів, проте можна отримати такі моделі в побічному порядку. В результаті дисертаційних досліджень, проведених на кораблі "Юрій Гагарін", застосовуючи спеціальні оптичні системи для вимірювання деформацій, були отримані результати в різних експлуатаційних режимах. Враховуючи, що хвилювання океану (моря) характеризується еліптичними циклічними рухами води і що навіть "важке" судно практично не впливає на динамічні характеристики хвилювання, була розроблена орієнтовна модель динаміки кутової качки корабля. Ширина полоси пропускання діючого стенду більша за основну частоту хвилювання океану, тому для імітації качки судна не потрібно змінювати структуру управління стендом і вводити гнучкі зворотні зв’язки.

Використовуваний для моделювання стенд-імітатор повністю задовольняє вимогам ідентифікації об’єкту при низьких динамічних характеристиках, а його

вартість значно нижча за імпортні аналоги. Таким чином, цей метод є економічно доцільним. Щоб сформувати вхідні сигнали для стенд-імітатора, які мають частоту хвилювання близько 0,1 Гц, використовується послідовний моделюючий фільтр з комп'ютерного псевдобілого шуму.

Висновки до розділу 1:

В даному розділі ми розглянули динамічний багатовимірний стенд-імітатор по каналу тангажу (ДБС) та його структурну дійшли висновку, що розробка та використання стендів-імітаторів має свої переваги, але також може викликати деякі проблеми і вимагати додаткових зусиль та ресурсів. Незважаючи на те, що стенди-імітатори дозволяють проводити тестування та експерименти в контрольованому середовищі, їхні результати можуть бути неповними або недостовірними, оскільки імітація реальних умов завжди має свої обмеження.

Стенди-імітатори потребують постійного оновлення та підтримки, оскільки дана галузь інтенсивно розвивається, створюються нові моделі та алгоритми для вирішення все складніших задач в екстримальних умовах, через це виникає багато відхилень при роботі стендів-імітаторів, тому апаратне та програмне забезпечення потребує паралеьно з розробкою також тестування систем управління . Це може створювати нові виклики для розробників та операторів стенду. Існують обмеження у доступі до реальних даних або систем, що можуть ускладнювати розробку та перевірку працездатності системи на стенді-імітаторі. Навчання персоналу та створення адекватних тестових середовищ є також важливими аспектами для успішного використання стендів-імітаторів.

Ураховуючи ці фактори, розробники та оператори стендів-імітаторів можуть покращити їх ефективність та надійність шляхом вдосконалення моделей та алгоритмів, забезпечення точності та достовірності даних, використання сучасних технологій та навчання персоналу. Регулярне тестування та оновлення стендів-імітаторів також є необхідною складовою для забезпечення їхньої функціональності та актуальності.

РОЗДІЛ 2

ОПИС МЕТОДІВ ІДЕНТИФІКАЦІЇ

2.1 Основні поняття ідентифікації

Методи обробки сигналів та ідентифікації є ключовими складовими сучасних наукових та технологічних дисциплін, які дозволяють аналізувати, маніпулювати та розпізнавати сигнали для отримання цінної інформації та виявлення характеристик систем і процесів.

Ідентифікація – це процедура побудови моделі об’єкта за результатами вимірювання та обробки вхідних та вихідних сигналів об’єкту для визначення параметрів або характеристик цієї системи. Підхід до побудови моделі на основі ідентифікації називають також експериментальним підходом, на відміну від аналітичного підходу, коли модель виводиться на підставі основних законів фізики, хімії, електротехніки, матеріального чи енергетичного балансу.

Обробка сигналів включає набір технік та алгоритмів, які застосовуються для оптимального отримання, модифікації, аналізу та інтерпретації сигналів різного типу. Ці методи можуть бути застосовані до сигналів, отриманих з різних джерел, таких як мікрофони, камери, датчики тощо. Це дозволяє розпізнавати та аналізувати властивості реальних систем на основі спостережень і побудованих моделей.

Використання методів обробки сигналів і ідентифікації має велике значення в багатьох наукових, технологічних та інженерних областях. Ось декілька прикладів, де ці методи є незамінними:

Системи управління: Методи ідентифікації дозволяють аналізувати та моделювати динаміку систем, визначати їхні параметри та побудову керуючих

алгоритмів. Це може бути застосовано в автоматичному керуванні, робототехніці, промисловому управлінні тощо.

Аналіз сигналів: Методи обробки сигналів використовуються для аналізу даних у різних доменах, включаючи фізику, фінанси, метеорологію, геологію та інші наукові галузі. Вони допомагають виділяти тренди, шаблони, аномалії та робити прогнози на основі доступних даних.

Обробка зображень: Методи обробки сигналів застосовуються для покращення зображень, видалення шуму, виявлення об’єктів, відстеження руху, розпізнавання образів та інших задач обробки зображень.

Критерій якості ідентифікації, що характеризує адекватність моделі реальному об’єкта, представляє собою середні втрати. Чим менші середні втрати, тим вища якість ідентифікації. Мінімізація функціоналу ідентифікації, що відповідає покращенню якості ідентифікації, здійснюється шляхом правильного вибору структури моделі та зміни значень її параметрів. Процедура зміни реалізується алгоритмом ідентифікації.

2.1.1 Схема ідентифікації моделі

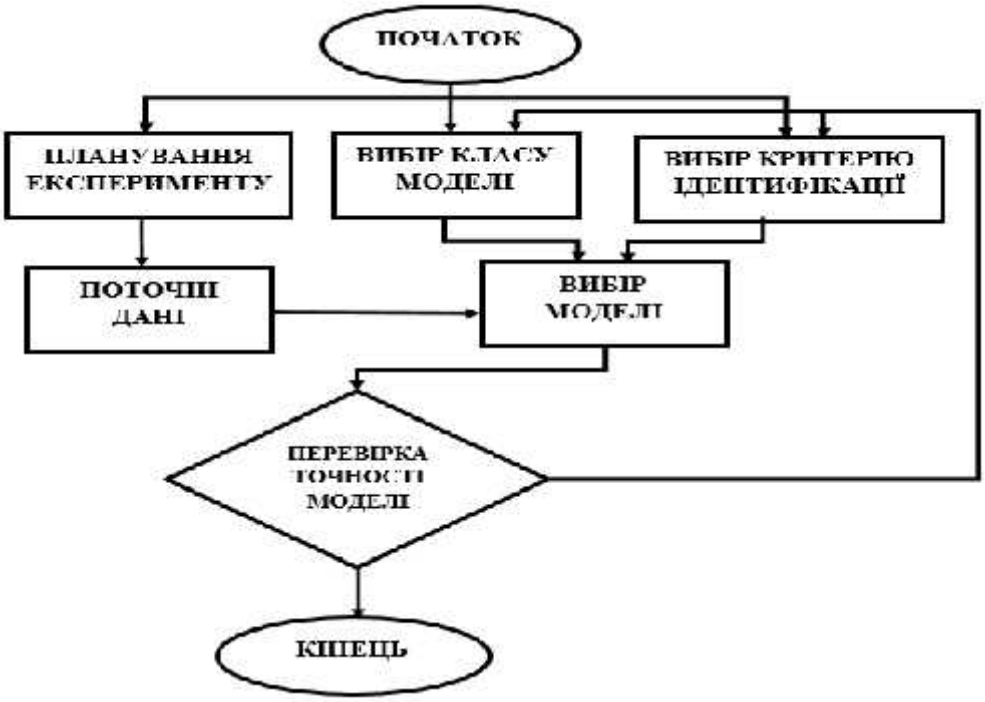


Рис.2.1. Загальна схема ідентифікації моделі

Методи ідентифікації варіюються в залежності від форми представлення математичних моделей, таких як звичайні диференціальні рівняння, різницеві рівняння, згорткові рівняння та інші. При цьому жоден з методів ідентифікації не є універсальним для ідентифікації всіх видів математичних моделей, а використовується в окремих областях застосування.

Для ідентифікації стендів-імітаторів кутових положень можуть застосовуватися основні методи ідентифікації включають: структурну, параметричну, структурно-параметричну, фізичну, статичну, модельну, гібридну (поєднання декількох методів),фізико-статичну, оптимальну, адаптивну ідентифікацію.

2.1.2 Основні задачі ідентифікації

Існують різні постановки задачі ідентифікації. Загалом, задача ідентифікації полягає в визначенні оператора об’єкта, який перетворює вхідні сигнали (впливи) на вихідні. Виокремлюють структурну та параметричну ідентифікацію так як це основні методи ідентифікації.

Під час структурної ідентифікації визначають структуру та тип оператора об’єкта, а також вибирають математичну модель, що найкраще відповідає об’єкту. Після визначення математичної моделі об’єкта проводиться параметрична ідентифікація, яка полягає у визначенні числових значень параметрів цієї моделі.

Однією з основних задач структурної ідентифікації є представлення реального об’єкта управління у вигляді математичної моделі. Конкретний вибір математичної моделі залежить від типу об’єкта. Наприклад, для великих систем і об’єктів, таких як соціальні, виробничі або фінансово-економічні, можуть використовуватись семіотичні (знакові) і лінгвістичні моделі, що базуються на теорії множин і абстрактній алгебрі. Основна мета структурної ідентифікації полягає у знаходженні адекватної математичної моделі, яка би відображала властивості і поведінку реального об’єкта управління.

Для математичного моделювання технічних систем, в задачах управління, часто використовуються диференціальні рівняння звичайних та частинних похідних. При вирішенні задач управління надається перевага моделям, які описуються диференціальними рівняннями звичайних похідних і знаходяться в просторі станів. Такі структуровані моделі дозволяють більш ефективно аналізувати та управляти системою, описуючи залежність між станами системи та їх похідними від часу.

Під ідентифікацією ми розуміємо процес визначення параметрів моделей об’єктів, враховуючи, що рівняння моделей вже відомі та задаються за допомогою загальної структурної схеми об’єкта (рис. 1.2). Таким чином, ми будемо досліджувати питання параметричної ідентифікації. Цей процес передбачає визначення числових значень параметрів моделей, які найкраще відповідають експериментальним даним або спостереженням, з метою досягнення кращої узгодженості між моделлю та реальним об’єктом управління.

Метою параметричної ідентифікації є знаходження таких параметрів, які забезпечують найкраще узгодження між математичною моделлю і реальним об’єктом. Це дозволяє нам отримати більш точну і адекватну модель об’єкта.

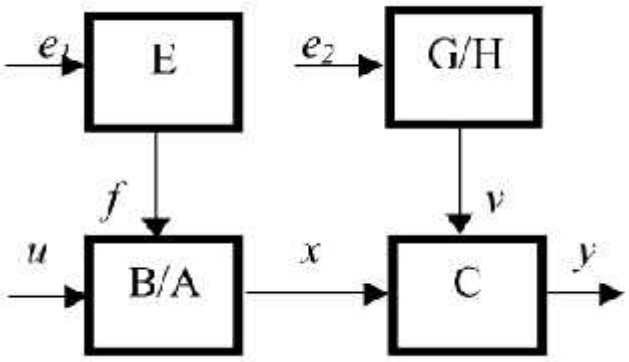


Рис2.2.Загальна структурної схема об’єкта

На схемі застосовуються наступні позначення:

u та *y* - спостережувані вхідний та вихідний сигнали;

x - ненаглядна (прихована) змінна, яка оцінюється опосередковано за допомогою сигналів *u* та *y*, що отримуються в результаті перетворення в системі операторами A, B та H;

e_1 та e_2 - ненаглядні спотворення (випадкові процеси, схожі на білий шум);

f та *v* - ненаглядні спотворення (корельовані у часі випадкові сигнали, які в деяких випадках містять детерміновані компоненти);

A, B, C, E, G, H - оператори, структура яких відома, але параметри невідомі.

Основними постановками задач ідентифікації є:

- ідентифікація або визначення характеристик об’єкта (на основі значень *u* і *y* визначити оператори A, B і C);
- генерація випадкових сигналів з заданими характеристиками або визначення характеристик сигналів (на основі значень *f* або *v* визначити оператори E або G, H);
- спостереження за прихованими змінними або визначення змінних стану (на основі спостережуваних *u* і *y* та відомих операторів A, B, C, E, G, H визначити *x*).

Розв’язання вищезазначених задач ідентифікації здійснюється за допомогою параметричних і непараметричних методів. Параметричні методи дозволяють визначити коефіцієнти передавальної функції або рівняння об’єкта безпосередньо. Непараметричні методи використовуються для визначення часових або частотних характеристик об’єктів, а також характеристик випадкових процесів, що виникають у цих об’єктах.

Отримані характеристики використовуються для визначення передавальної функції або рівняння об’єкта. В сучасний час параметричні методи ідентифікації мають ширше застосування.

2.2 Класифікація методів ідентифікації

2.2.1 Структурна ідентифікація

Структурна ідентифікація є одним з методів ідентифікації систем, який спрямований на визначення або встановлення структури системи на основі доступних даних і спостережень. Основна мета структурної ідентифікації полягає у виявленні залежностей та взаємозв’язків між різними компонентами або елементами системи.

Процес структурної ідентифікації містить декілька етапів:

а) *Збір даних* - це крок передбачає збір наявних даних про систему, які можуть бути результатом експериментів, спостережень або інших джерел. Ці дані можуть включати вимірювання, часові ряди, спектральні аналізи та інші спостереження, які можуть вплинути на ідентифікацію.

б) *Аналіз даних* - етап після збору даних проводиться їх аналіз з метою виявлення взаємозв’язків між різними змінними та компонентами системи. Використовуються статистичні методи, алгоритми аналізу даних, спектральний аналіз та інші методи для виявлення закономірностей.

в) *Моделювання* - даний етап заснований на основі виявлених взаємозв’язків та закономірностей розробляються математичні моделі, які описують структуру системи. Ці моделі можуть бути у вигляді рівнянь, блок-схем, графів або інших представлень, які відображають взаємозв’язки між компонентами системи.

г) *Вибір оптимальної структури* - під час даного етапу застосовуються різні критерії для вибору оптимальної структури системи. Це можуть бути інформаційні критерії, такі як критерій Акаіке (AIC) або критерій Байєса (BIC), або інші критерії, що враховують точність моделі, складність та інші фактори.

д) Валідація моделі - є заключним етапом після вибору оптимальної структури системи проводиться валідація моделі, тобто перевірка її адекватності та точності. Це може включати порівняння прогнозних результатів моделі з експериментальними даними або застосування інших методів перевірки.

Структурна ідентифікація має широке застосування в авіаційній індустрії, де важливо мати точну модель системи для прогнозування її поведінки та вдосконалення її ефективності. Декілька прикладів застосування структурної ідентифікації в авіації:

Визначення структури авіаційного літального апарата (ЛА): структурна ідентифікація дозволяє визначити блоки та їх взаємозв'язки, які впливають на поведінку ЛА. Наприклад, визначення впливу аеродинамічних характеристик, систем управління, двигунів та інших компонентів на керованість та стійкість ЛА.

Розробка систем автоматичного керування: структурна ідентифікація використовується для визначення структури та параметрів систем автоматичного керування, що забезпечують оптимальне керування ЛА. Наприклад, визначення впливу різних режимів роботи системи керування на тримання заданої траєкторії чи стабілізацію положення ЛА.

Діагностика та прогнозування недоліків: структурна ідентифікація допомагає визначити зв'язки між станами системи та виявити можливі несправності. Наприклад, визначення залежності між параметрами двигуна ЛА та його ефективністю, що дозволяє виявити відхилення та прогнозувати можливі несправності двигуна.

2.2.2 Параметрична ідентифікація

Параметрична ідентифікація є методом ідентифікації, який використовується для визначення параметрів математичної моделі на основі експерименту. У авіаційній сфері параметрична ідентифікація може

використовуватися для оцінки параметрів динамічних моделей літальних апаратів, систем управління, аеродинамічних характеристик і мета цієї ідентифікації полягає у підборі та встановлені таких значень параметрів моделі, які краще відповідають експериментальним даним або спостереженням.

Процес параметричної ідентифікації включає наступні етапи:

а) *Вибір математичної моделі,* на початку даного етапу вибирається математична модель системи, яка найкраще описує її поведінку. Це може бути лінійна або нелінійна модель, диференціальні рівняння, статистичні моделі, апроксимаційні моделі. Вибір моделі залежить від характеру системи та мети ідентифікації.

б) *Визначення параметрів моделі,* під час цього етапу досліджуємо параметри моделі, які є величинами, що визначають її структуру та характеристики. Наприклад, це можуть бути коефіцієнти перед диференціальними рівняннями, ваги у лінійних моделях, параметри розподілу у статистичних моделях тощо. Задача полягає у визначенні оптимальних значень цих параметрів на основі доступних даних для ідентифікації.

в*) Формулювання цільової функції,* в цьому етапі цільова функція визначає міру відповідності між експериментальними даними і прогнозними значеннями, отриманими з моделі. Ця функція може включати різні параметри, такі як середньоквадратичне відхилення, максимальна абсолютна помилка, логарифмічна ймовірність. Задача полягає у мінімізації цільової функції для знаходження оптимальних значень параметрів моделі.

г) *Методи оптимізації,* даний етап призначений для вирішення задачі параметричної ідентифікації використовуються методи оптимізації, які дозволяють знаходити мінімум цільової функції. Це можуть бути методи градієнтного спуску, метод Нелдера-Міда, метод налагодження, еволюційні алгоритми . Вибір методу залежить від складності задачі, кількості параметрів та інших факторів.

д) *Валідація моделі*, заключний етап після визначення оптимальних значень параметрів моделі проводиться валідація, що полягає у перевірці адекватності та точності моделі. Це може включати порівняння прогнозних результатів моделі з експериментальними даними, перевірку статистичних характеристик, проведення тестів на різних наборах даних.

Прикладом використання параметричної ідентифікації в авіації може бути визначення аеродинамічних характеристик літального апарату. Збираються експериментальні дані про поведінку апарату у різних умовах польоту, таких як кут нахилу, швидкість, висота тощо. На основі цих даних за допомогою параметричної ідентифікації визначаються параметри математичної моделі, що описує аеродинаміку апарату. Знання цих параметрів дозволяє вдосконалити проектування та управління літаками, покращити їх ефективність та безпеку польотів.

2.2.3 Структурно-параметрична ідентифікація

Структурно-параметрична ідентифікація є методом, який поєднує в собі елементи структурної і параметричної ідентифікації. Головна мета цього методу полягає в одночасному визначенні як структури моделі, так і її параметрів на основі експериментальних даних.

Завдяки, такому підходу поєднання двох методів ми краще зможемо провести більш точну ідентифікацію стенда-імітатора та максимально ефективно скористатись результатами експериментального дослідження. Цей метод дозволяє враховувати взаємозв’язки між структурою системи та значеннями її параметрів, що дозволяє досягти більш точного та адекватного опису реального об’єкта.

Прикладом застосування структурно-параметричної ідентифікації в авіації може бути визначення параметрів системи управління літаком. Модель системи може включати такі компоненти, як аеродинамічні характеристики, маса та

інерція літака, динаміка керування тощо. Використовуючи структурно-параметричну ідентифікацію, можна визначити оптимальні значення параметрів цієї моделі, які забезпечать бажану поведінку системи управління літаком при різних умовах польоту.

2.2.4 Фізична ідентифікація

Фізична ідентифікація - це метод ідентифікації, який базується на фізичних принципах та властивостях системи. Даний метод базується на використанні знань про фізичні процеси та взаємозв'язки між компонентами системи для визначення параметрів моделі.

Основна ідея фізичної ідентифікації полягає в тому, що нам відомі фізичні закони та співвідношення використовуються для побудови математичної моделі системи. Ця модель потім порівнюється з експериментальними даними для визначення значень параметрів системи.

Процес фізичної ідентифікації може включати наступні етапи:

а) *Формулювання фізичних законів*, на першому етапі визначаються основні фізичні закони та співвідношення, які описують систему. Це можуть бути рівняння руху, закони збереження енергії, маси, моменту та інших фізичних законів. Важливо враховувати особливості конкретної системи та взаємодії її компонентів.

б) *Побудова математичної моделі*, цей важливий етап під час якого на основі фізичних законів вибудовується математична модель системи. Ця модель може бути диференціальними рівняннями, алгебраїчними співвідношеннями або комбінацією обох. Важливо враховувати параметри системи, які потрібно визначити для того чи іншого об'єкту моделювання.

в) *Визначення параметрів моделі*, на цьому етапі визначаються значення параметрів моделі, які потрібно встановити, щоб забезпечити відповідність моделі реальній системі. Це можуть бути фізичні характеристики, властивості

матеріалів, геометричні параметри. Визначення параметрів може здійснюватися за допомогою експериментальних даних, спеціальних вимірювань або методів оптимізації, які найкраще підходять для оцінки.

г) *Порівняння з експериментальними даними*, це останній етап мета якого полягає в порівнянні результатів моделі з експериментальними даними. Це дозволяє оцінити точність моделі та визначити, наскільки добре вона відображає реальну систему. Якщо результати не задовольняють, можуть вноситися корективи до моделі або змінюватися значення параметрів, до тих пір поки результати не будуть задовольняти потреби ЛА.

Фізична ідентифікація використовується в різних галузях, включаючи фізику, інженерію, енергетику, авіацію, робототехніку та інші. Вона дозволяє отримати актуальну інформацію про роботу системи, встановити значення параметрів та здійснити прогнози її поведінки.

2.2.5 Статична ідентифікація

Статична ідентифікація - це метод ідентифікації, який базується на аналізі статичних даних системи без залучення динамічних процесів. Вона використовується для визначення параметрів моделі системи шляхом спостереження та аналізу її статичних відповідей на зовнішні вхідні сигнали.

Основна ідея статичної ідентифікації полягає в тому, що аналізуються вихідні дані системи, отримані при різних значеннях вхідних сигналів або вхідних збуджень. Ці дані використовуються для визначення значень параметрів моделі системи.

Процес статичної ідентифікації може включати наступні етапи:

а) На етапі *збору даних*, збираються експериментальні дані, які включають вихідні значення системи при різних вхідних сигналах або збудженнях. Ці дані можуть бути отримані з реальних вимірювань або з експериментів на модельних системах.

б) На етапі, *побудови математичної моделі*, на основі зібраних даних будується математична модель системи. Ця модель може бути простою функціональною залежністю або складатися з системи алгебраїчних рівнянь. Важливо враховувати параметри моделі, які потрібно визначити.

в) На етапі, *оцінки параметрів моделі*, використовуються методи оцінки параметрів для визначення значень параметрів моделі системи. Це може включати методи оптимізації, методи найменших квадратів або інші підходи для знаходження оптимальних значень параметрів.

г) На заключному етапі, *порівняння з експериментальними даними*, потрібно порівняти результати моделі з експериментальними даними. Це дозволяє оцінити точність моделі та визначити, наскільки добре вона відображає реальну систему. Якщо результати не задовольняють, можуть вноситися корективи до моделі або змінюватися значення параметрів.

Застосування в авіації

Статична ідентифікація моделі стендів-імітаторів в авіації відноситься до процесу встановлення ідентичності конкретного повітряного судна або типу судна, які моделюються на стендах-імітаторах. Цей процес може включати розпізнавання зовнішнього вигляду, характеристик та особливостей судна.

Дана ідентифікація моделі стендів-імітаторів використовується в авіації для тренування пілотів, щоб вони могли ознайомитись з різними типами повітряних суден. Пілоти можуть навчатися розпізнавати і реагувати на різні моделі суден, враховуючи їхні характеристики, особливості та поведінку в різних ситуаціях.

Завдяки даному методу можна тестувати різні системи, які використовуються в авіації. Наприклад, системи автоматичного посадки або системи контролю повітряного руху можуть бути перевірені на ефективність та правильну реакцію на різні типи повітряних суден.

Також, статична ідентифікація моделі стендів-імітаторів може бути використана в дослідженнях та розвитку нових технологій і систем в авіації. Вона дозволяє випробовувати різні конфігурації та характеристики суден для оцінки їхньої ефективності та впливу на системи та процеси, що стосуються авіації.

2.2.6 Оптимальна ідентифікація

Оптимальна ідентифікація - це метод ідентифікації, який базується на використанні оптимальних алгоритмів та критеріїв для визначення параметрів системи з найкращою точністю та ефективністю.

У оптимальній ідентифікації використовуються математичні моделі, які описують поведінку системи. Ці моделі включають рівняння, які відображають взаємозв’язки між вимірювальними змінними та параметрами системи. Ці параметри потрібно визначити на основі доступних експериментальних даних.

Оптимальна ідентифікація базується на формалізації задачі ідентифікації як оптимізаційної задачі. Вона включає в себе вибір оптимального критерію, який відображає відповідність між експериментальними даними та результатами моделі. Критерій може включати такі параметри, як середня квадратична помилка, максимальна помилка, максимальна ймовірність тощо.

Застосування оптимальних алгоритмів, таких як алгоритми оптимізації, стохастичні алгоритми, алгоритми на основі градієнта, дозволяє знайти найкращі значення параметрів моделі, які найточніше відображають експериментальні дані. Це забезпечує оптимальну точність ідентифікації і знижує помилки прогнозування.

Оптимальна ідентифікація може бути складним завданням, особливо при великій кількості параметрів системи або обмежених ресурсах обчислювальної потужності. Вона вимагає ретельного аналізу моделей, вибору підходящих критеріїв та оптимізаційних алгоритмів. Однак, при правильному застосуванні,

оптимальна ідентифікація дозволяє досягти найкращої точності та ефективності визначення параметрів системи.

Застосування в авіації

Оптимальна ідентифікація моделі стендів-імітаторів в авіації застосовується для досягнення найкращих результатів у визначенні та розпізнаванні конкретної моделі повітряного судна на стенді-імітаторі. Дана ідентифікація моделі дозволяє досягти максимальної точності у визначенні типу і параметрів модельованого повітряного судна. Це важливо для забезпечення реалістичності тренування пілотів, валідації систем або проведення досліджень.

Застосування оптимальної ідентифікації допомагає пілотам отримувати максимальну користь від тренування. Відповідна ідентифікація моделей суден дозволяє створювати реалістичні ситуації та умови, що сприяють розвитку навичок пілотів і підвищенню безпеки в авіації.

Також, ідентифікація може бути використана в процесі розробки та тестування нових технологій в авіації. Вона дозволяє оцінювати ефективність нових систем або конфігурацій повітряних суден та впливати на розвиток авіаційної технології.

2.2.7 Адаптивна ідентифікація

Адаптивна ідентифікація- це метод ідентифікації, який використовується для визначення параметрів системи в режимі реального часу з можливістю адаптації до змін у системі або оточуючому середовищі.

У адаптивній ідентифікації модель системи постійно оновлюється на основі нових вхідних та вихідних даних, що надходять з системи. Цей процес адаптації дозволяє підлаштовувати параметри моделі до реальних умов роботи системи і забезпечує більш точне відображення її поведінки.

Адаптивна ідентифікація включає в себе використання алгоритмів адаптації, які змінюють параметри моделі відповідно до нових даних. Ці алгоритми можуть бути основаними на різних підходах, таких як методи градієнтного спуску, рекурентні алгоритми найменших квадратів, фільтри Калмана та інші. Вони дозволяють постійно оновлювати параметри моделі для досягнення найкращої відповідності між спостережуваними та прогнозованими значеннями.

Однією з переваг адаптивної ідентифікації є її здатність працювати в змінних умовах і з різноманітними типами систем. Вона дозволяє виявляти та компенсувати зміни в системі, що виникають внаслідок зношування, змін у навколишньому середовищі, змін в параметрах системи тощо. Це робить адаптивну ідентифікацію особливо корисною для систем, які піддаються змінам протягом часу.

Принципово важливим елементом адаптивної ідентифікації є механізм оцінки якості прогнозування та контролю над процесом адаптації. Це дозволяє визначати, наскільки добре модель системи відповідає реальним даним і робити корекції для покращення точності.

Адаптивна ідентифікація знаходить застосування у багатьох галузях, включаючи автоматичне керування, прогнозування, системи штучного інтелекту та багато інших. Вона дозволяє створювати гнучкі та ефективні системи, які можуть адаптуватись до змінних умов та вимог оточуючого середовища.

2.3 Алгоритми структурної ідентифікації

Методи параметричної ідентифікації широко використовуються для розв’язання практичних завдань ідентифікації лінійних та нелінійних систем. Питанню оцінювання параметрів присвячено багато досліджень, починаючи з розробки К. Гауссом методу найменших квадратів у 1795 році. На сьогоднішній день існує безліч різних підходів, методів та способів параметричної ідентифікації [9].

Однак, основні методи, такі як метод найменших квадратів, метод допоміжних змінних та метод максимальної правдоподібності, хоч і є ефективними, але не завжди забезпечують оптимальні результати в усіх випадках. У деяких ситуаціях може виникати потреба у доповненнях до цих методів, які дозволять отримати кращі результати або розширити їх можливості.

Давайте розглянемо основні методи структурної ідентифікації, такі як метод найменших квадратів, метод допоміжних змінних та метод максимальної правдоподібності, метод структурної ідентифікації моделей динаміки об’єкта при врахуванні контрольованих та неконтрольованих випадкових збурень та метод структурної ідентифікації моделей динаміки об’єкта при випадкових впливах та неповній вихідній інформації. Дані методи використовують для поліпшення результатів ідентифікації. Розуміння різних методів та їхній вибір у конкретних ситуаціях може допомогти досягти більш точних та надійних результатів ідентифікації систем.

2.3.1 Метод найменших квадратів (МНК)

Метод найменших квадратів (МНК) є статистичним методом, який використовується для знаходження оптимального математичного опису між залежними та незалежними змінними. Він широко застосовується в економічних, фізичних та інженерних дослідженнях для побудови лінійних або нелинійних моделей залежності між змінними [9]**.**

Реалізація рекурентного алгоритму методу найменших квадратів (МНК)

Розглянемо, даний метод на прикладі простої моделі: $y = k$.

Після проведення *N* вимірів було здійснено оцінку параметра *k* за допомогою рекурентного методу найменших квадратів (МНК):

$$k_N = \frac{\sum_{i-1}^{N} x_i y_i}{\sum_{i-1}^{N} x_i^2}$$

Допустимо, що ми отримали нові дані від ще одного вимірювання x_{N+1}, y_{N+1} .

Отримаємо рекуррентну формулу:

$$k_{N+1} = k_N + f(x_{N+1}, y_{N+1})$$

Далі для для отримання уточненого значення параметра моделі беремо попереднє значення додаємо коефіцієнт, який залежить від нових вимірів. Запишемо формулу МНК для(N+) - го виміру:

$$k_{N+1} = \frac{\sum_{i-1}^{N} x_i y_i + x_{N+1} y_{N+1}}{\sum_{i-1}^{N} x_i^2 + x_{N+1}^2}$$

Додамо до нашої формули вираз зі знаком плюс і мінус, отримаємо:

$$k_{N+1} = \frac{\sum_{i-1}^{N} x_i y_i}{\sum_{i-1}^{N} x_i^2} + \frac{\sum_{i-1}^{N} x_i y_i + x_{N+1} y_{N+1}}{\sum_{i-1}^{N} x_i^2 + x_{N+1}^2} - \frac{\sum_{i-1}^{N} x_i y_i}{\sum_{i-1}^{N} x_i^2} =$$

$$= k_N + \frac{\sum_{i-1}^{N} x_i^2 (\sum_{i-1}^{N} x_i y_i + x_{N+1} y_{N+1}) - \sum_{i-1}^{N} x_i^2 \cdot \sum_{i-1}^{N} x_i y_i - \sum_{i-1}^{N} x_i y_i \cdot x_{N+1}^2}{\sum_{i-1}^{N} x_i^2 \cdot (\sum_{i-1}^{N} x_i^2 + x_{N+1}^2)} =$$

$$= k_N + \frac{\sum_{i-1}^{N} x_i^2 \cdot \left(\sum_{i-1}^{N} x_i y_i + x_{N+1} y_{N+1} - \sum_{i-1}^{N} x_i y_i - k_N x_{N+1}^2\right)}{\sum_{i-1}^{N} x_i^2 \cdot (\sum_{i-1}^{N} x_i^2 + x_{N+1}^2)} =$$

$$= k_N + \frac{x_{N+1} (y_{N+1} - k_N x_{N+1})}{\sum_{i-1}^{N} x_i^2 + x_{N+1}^2}$$

Отримали необхідну рекурентну формулу. Зверніть увагу, що в чисельнику стоїть різниця між виміряним вихідним сигналом на (N+1)-му кроці та його розрахунковим значенням, обчисленим за значенням попередньої моделі. Якщо ця різниця дорівнює нулю, то модель ідеальна і $k_{N+1} = k_N$.

Рекуррентний алгоритм МНК після нового запису k_{N+1} і поперднього k_N, якщо $k_{N+1} = \hat{\theta}(k+1)$, $k_N = \hat{\theta}(k)$, Ψ^T – відомі коефіцієнти моделі об’єкта за вимірюваним значенням керованого ***y*** і керуючого ***u*** сигналів.

$$\hat{\theta}(k+1) = \hat{\theta}(k) + \gamma(k)\left[y(k+1) - \Psi^T(k+1)\hat{\theta}(k)\right] \qquad (2.3.4)$$

Звідси вектор корекції :

$$\gamma(k) = \frac{\mathrm{P}(k)\Psi(k+1)}{\Psi^T(k+1)\mathrm{P}(k)\Psi(k+1)+1} \qquad (2.3.5)$$

Рекурентний алгоритм методу найменших квадратів (МНК) реалізується в наступній послідовності:

1.Отримання нових даних, $y_{N+1}, x_1[N-1], \dots, x_k[N-1]$;

2. Розрахунок вектора коефіцієнтів k_{N+1} ;

3.Запишемо нові значення k_{N+1} на місце k_N ;

4. Розрахунок за допомогою формули Вутбері оберненої матриці з врахуванням всіх змін на $(N+1)$-му кроці ;

5. Перепишемо нові значення оберненої матриці, замінивши значення попередньої матриці.

Таким чином, для реалізації алгоритму використовується не тільки особиста формула рекуррентного МНК, а також формула обрахунку оберненої матриці. Даний алгоритм, можна застосовати для побудови лінійних та нелинійних моделей залежностей і дозволяє отримати оптимальні параметри цих моделей на основі доступних даних.

2.3.2 Метод допоміжних змінних (МДЗ)

Метод допоміжних змінних (МДЗ) використовується, коли існує кореляція між сигналом шуму *e(k)* і елементами вектору $\Psi(k+1)$ і модель об’єкта представлена в повному виді:

$$y(z) = \frac{B(z)}{A(z)} z^{-a} u(z) + \frac{D(z)}{C(z)} e(z)$$

Алгоритм ідентифікації за МДЗ подібний до алгоритму МНК. Для реалізації алгоритму ми вводимо вектор допоміжних змінних [9].

$$\Lambda^T(k) = [-h(k-1), \dots - h(k-n), u(k-d-1), \dots u(k-d-n)]$$

в якості яких використовуються вихідні сигнали моделі з параметрами $\hat{\theta}_b(k)$,

$$h(k) = \Lambda^T(k)\hat{\theta}_b(k)$$

З метою зменшення ступеня кореляції між вспоміжними змінними та помилкою, в [9] параметри додаткової моделі визначаються як вихід низькочастотного дискретного фільтра першого порядку з запізненням, на вхід якого подається оцінка параметрів об’єкта.

$$\hat{\theta}_b(k) = (1-\beta)\hat{\theta}_b(k-1) + \beta\hat{\theta}(k-\eta),\ 0{,}01 \le \beta \le 0{,}1$$

Обчислення вектора корекції:

$$\gamma(k) = \frac{\mathrm{P}(k)\Lambda(k+1)}{\Psi^T(k+1)\mathrm{P}(k)\Lambda(k+1)+1'},$$

останнє значення вектора $\mathrm{P}(k+1)$:

$$P(k+1) = [I - \gamma(k)\Lambda^T(k+1)]P(k)$$

Оцінка вектора параметрів обчислюється аналогічно МНК за формулою (2.3.4)

МДЗ дозволяє обчислити лише оцінки параметрів об’єкта ідентифікації. У разі якщо потрібні оцінки параметрів моделі формуючого фільтра шуму можна скористатися МНК. Модель шуму є стаціонарним авторегресійним процесом зі ковзним середнімзначенням:

$$y(k) + c_1 y(k-1) + \cdots + c_p\big(y(k-p) = v(k) + d_1 v(k-1) + \cdots + d_p v(k-p).$$

Вводячи вектор даних отримаємо :

$$\varphi^T(k) = [-y(k-1), \dots - y(k-p), v(k-1), \dots v(k-p)]$$

і вектор параметрів:

$$p^T = [c_1, \dots c_p, d_1, \dots d_p]$$

Після всіх обчислень отримаємо нову оцінку вектора даних:

$$\varphi^T(k+1) = [-y(k), \dots - y(k-p+1), \hat{v}(k), \dots \hat{v}(k-p+1)].$$

Вихідні значення беремо:

$$\hat{v}(0) = y(0);\ \hat{\theta}(0) = 0;\ P(0) = \alpha\ .$$

Алгоритм ідентифікації за методом допоміжних змінних схожий на МНК. У МДЗ можна обчислити лише оцінки параметрів об’єкта, а МНК дозволяє отримати оцінки параметрів моделі формувального фільтра шуму. Вибір методу залежить від потреб задачі та враховуванням формувального фільтра шуму.

2.3.3. Метод структурної ідентифікації моделей динаміки багатовимірного об’єкта при неконтрольованих впливах

Під час експериментальної оцінки динамічних властивостей багатовимірного об’єкта (рис.5.5), такого як літак або пілот у системі управління, можливо виміряти лише його вхідні сигнали *u* та вихідні сигнали *x*. Збурення, що впливає на об’єкт, зазвичай не можна виміряти безпосередньо. Очевидно, що виміри проводяться з певними недосконалостями і супроводжуються завадами. Для оцінки сталого режиму роботи необхідно, щоб об’єкт був стійким. Припускається, що вхід *u* та збурення *ψ* є некорельованими (це спостерігається у відкритих системах або в оптимальних системах стабілізації), а також, що завади та збурення є некорельовані між собою (вони викликані різними фізичними факторами) [10].

Нехай об’єкт ідентифікації описується рівнянням:

$$\boldsymbol{P}(s)\boldsymbol{x}(s) = \boldsymbol{M}(s)\boldsymbol{u}(s) + \boldsymbol{\Psi}(s)\boldsymbol{\Delta}(s), \qquad (10)$$

де $\boldsymbol{P}$ і $\boldsymbol{M}$ – шукані операторні поліноми аргумента S , які характеризують структуру системи;
$\boldsymbol{u}$ та $\boldsymbol{x}$ – сигнали на вході і виході системи відповідно;

– неконтролюючі збурення в системі, які можна представити у вигляді $\cdot = \boldsymbol{\Psi}$, де $\boldsymbol{\Delta}$ - Фур'є - образ "білого" шуму $\boldsymbol{\delta(t)\Psi}$, а $\cdot$ – передаточна функція формуючого фільтра ;

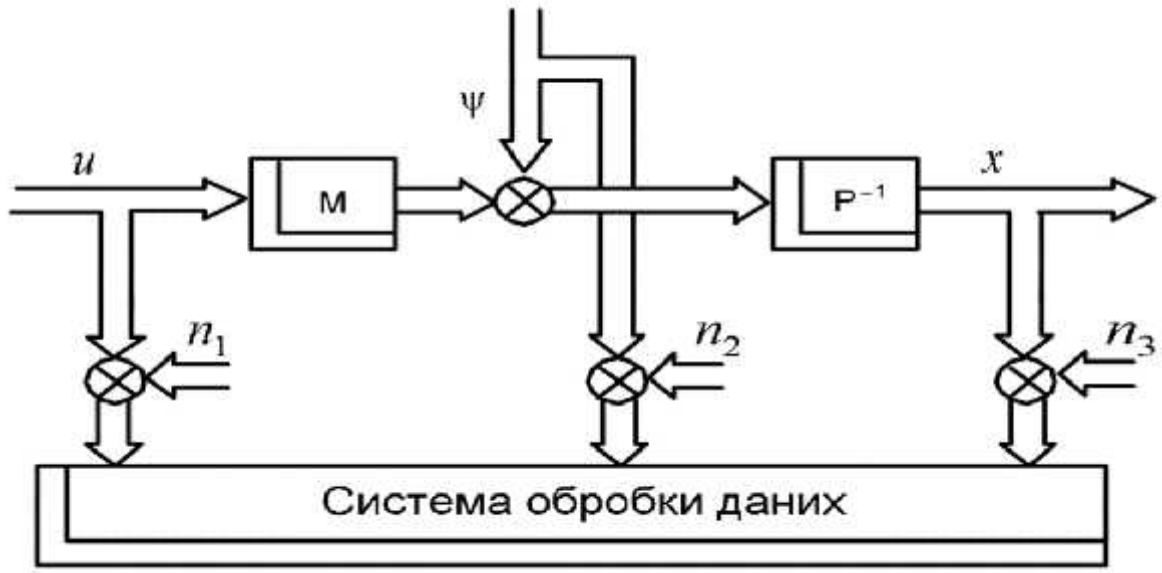


Рис.2.3. Структурна схема, що пояснює метод, що обговорюється.

Спрощуємо вираз опускаючи аргумент S і виріщуємо рівняння відносно x:

Звідси отримаємо вираз:
$x = P^{-1}M + P^{-1}\psi$ (10)

Тоді, за допомогою теореми Вінера-Хінчина запишемо наступні матриці спектральних і взаємно спектральних щільностей для ідентифікованої системи:

$$S'_x = P^{-1}MS'_u\ M_□P_□^{-1} + P^{-1}\Psi S'_\Delta\ \Psi_□P_□P_□^{-1}$$

$$S'_u = P^{-1}MS'_u\ , \qquad S'_x = S'_u\ M_□P_□^{-1}$$

$$S'_u = P^{-1}\Psi S'_\Delta\ , \qquad S'_x = S'_\Delta\ \Psi_□P_□^{-1}$$

За результатами обробки експериментальних даних знаходимо передавальні функції об' єкта по сигналу управління і передавальну функцію об'єкта по збуренню:

$$P^{-1}M = S'_u\ (S'_u\ )^{-1} \quad M_□P_□^{-1} = (S'_u\ )^{-1}\ S'_x$$
$$P^{-1}\Psi = S'_v\ (S'_\Delta\ )^{-1} \quad \Psi_□P_□^{-1} = (S'_{\Delta A})^{-1}\ S'_x$$

Висновки до розділу 2

В даному розділі ми розглянули, які існують методи ідентифікації для стендів-імітаторів та ЛА. Також, описали всі етапи процесу ідентифікації для кожного із методів. І дійшли висновку, що вибір конкретного методу ідентифікації залежить від характеристик стенду-імітатора, доступності даних та особливостей досліджуваної проблеми. Важливо враховувати такі фактори, як складність моделі стенду, кількість доступних даних для навчання, обчислювальні можливості та обмеження.

Після вибору методу ідентифікації важливо провести дослідження та аналіз його ефективності. Це може включати порівняння отриманих результатів з очікуваними або з використанням інших методів ідентифікації. Оцінка точності та надійності ідентифікації є важливим етапом дослідження.

Для підтвердження результатів структурної ідентифікації ми використаємо метод структурної ідентифікації моделей динаміки багатовимірного об’єкта при неконтрольованих впливах. Також можуть, на дослідження впливати різні зовнішні фактори та фізичні властивості самих стендів.

У практичній частині дипломної роботи важливо, за отриманою інформацією в даному розділі, оцінити вибраний метод ідентифікації, провести експерименти з його використанням на стенді-імітаторі та надати аналіз отриманих результатів. Це допоможе підтвердити ефективність та точність обраного методу в контексті структурної ідентифікації багатовимірного динамічного стенду-імітатора кутових положень по каналу тангажу.

РОЗДІЛ 3
СТРУКТУРНА ІДЕНТИФІКАЦІЯ БАГАТОВИМІРНОГО ДИНАМІЧНОГО СТЕНДА-ІМІТАТОРА КУТОВИХ ПОЛОЖЕНЬ ПО КАНАЛУ ТАНГАЖУ

Структурна ідентифікація багатовимірного динамічного стенда-імітатора кутових положень по каналу тангажу - це процес визначення внутрішньої структури та параметрів системи, яка моделює рух по каналу тангажу на багатомірному динамічному стенді-імітаторі.

Задача структурної ідентифікації полягає в перевірці ефективності та точності в умовах існуючих систем навігації та управління рухомими об’єктами, які наближені до реальних умов експлуатації. Для цього використовується метод структурної ідентифікації динамічних моделей об’єкта, який враховує контрольовані та неконтрольовані випадкові збурення.

Один зі способів вирішення цієї задачі - застосування стендів-імітаторів, що дозволяють емулювати реальні умови та проводити випробування дослідницьких та готових зразків систем навігації та управління.

За допомогою багатовимірного динамічного стенда-імітатора кутових положень по каналу тангажу були відпрацьовані сигнали по каналу тангажу в умовах морської качки. І для зареєстрованих сигналів необхідно виконати процедуру первинної обробки, яка у межах даної роботи складається з наступних пунктів :

а) Побудова за результатами моделювання осцилограм вхідних і вихідних сигналів;

б) Побудова власних та взаємних спектральних щільностей для вхідних і вихідних сигналів;

в) Виконання структурної ідентифікації на основі отриманих результатів апроксимації кривих власних та взаємних спектральних щільностей для отримання моделей динаміки сигналів;

г) Розрахунки дисперсії помилки та відносної дисперсії помилки між вхідним та вихідним сигналами системи.

Заключним етапом являється оцінка та аналіз отриманих результатів та формулювання висновків стосовно виконаної роботи. Усі розрахунки проводяться у пакеті MATLAB за складеною програмою, код програми наведений у додатках роботи.

3.1 Побудова за результатами моделювання осцилограм вхідних і вихідних сигналів

На рис. 3.1 та 3.2 зображено осцилограми залежності вхідного *x* та вихідного *y* сигналу від часу t по каналу тангажу, які побудовані з використанням середовища MATLAB :

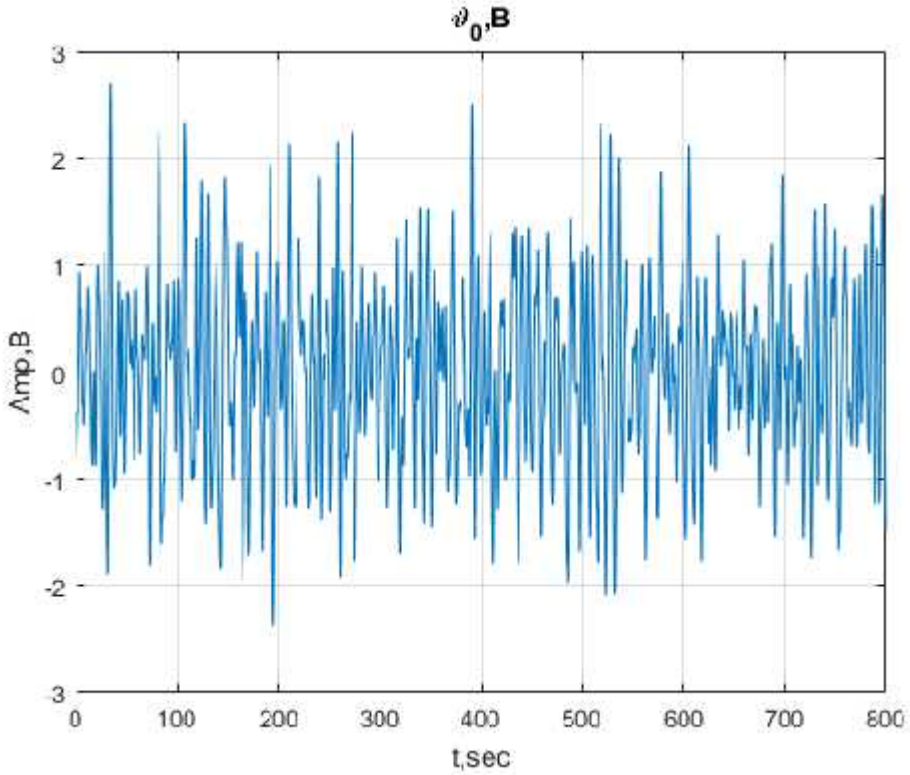


Рис.3.1.Графік залежності вхідного сигналу від часу

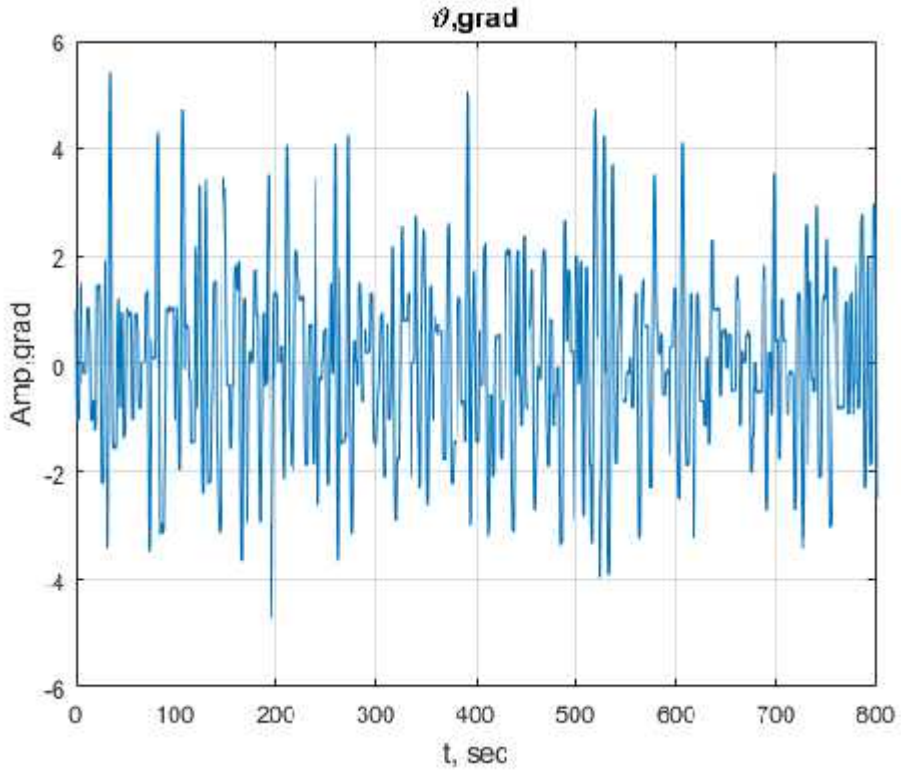


Рис.3.2.Графік вихідного сигналу від часу

Побудувавши графічні залежності можна зробити висновок, що обидва досліджувані сигнали є випадковими. На етапі обробки і подальшому дослідженні стохастичних даних будемо використовувати статичні методи. Для обробки випадкових процесів скористаємося функціями спектральних та взаємних спектральних щільностей.

Для аналізу спектральних та взаємних спектральних щільностей застосовується функція spectr. Ця функція обчислює кореляційні та взаємні кореляційні функції на основі вхідних даних. Наступним кроком є застосування перетворення Фур'є до відповідних функцій. Перетворення Фур'є кореляційної функції дозволяє отримати власну спектральну щільність.

Спектральна щільність вказує, як потужності сигналу розподіляються по різних частотах. Графічне представлення спектральної щільності дозволяє нам візуалізувати, які частоти вносять найбільший вклад в нашу систему. Це може бути корисно при аналізі частотних складових сигналу або виявленні недоліків, які можуть вказувати на присутність певних змін у системі.

3.2 Побудова особистих спектральних щільностей вхідного та вихідного сигналів по каналу тангажу

На рис. 3.3 та 3.4 у логарифмічному масштабі зображено власні спектральні щільності вхідного та вихідного сигналів

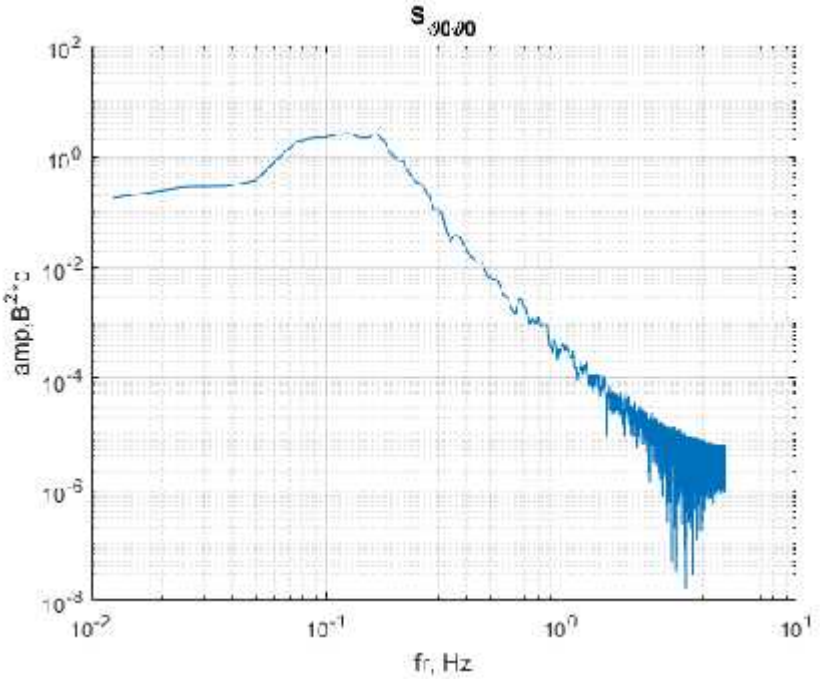


Рис.3.3. Особиста спектральна щільність вхідного сигналу по тангажу

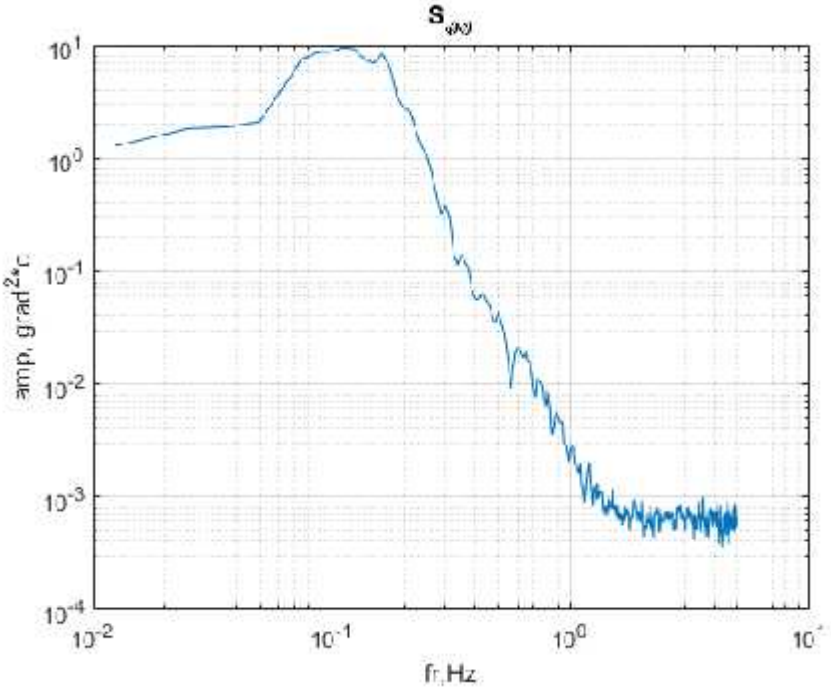


Рис.3.4. Особиста спектральна щільність вихідного сигналу по тангажу

3.3 Побудова взаємних спектральних щільностей вхідного та вихідного сигналів по каналу тангажу та їх фазових характеристик

На рис. 3.5 та 3.7 побудовані у логарифмічному масштабі взаємні спектральні щільності,а на рис.3.6 та 3.8 зображені їх фазові харектеристики для вхідного та вихідного сигналів відповідно.

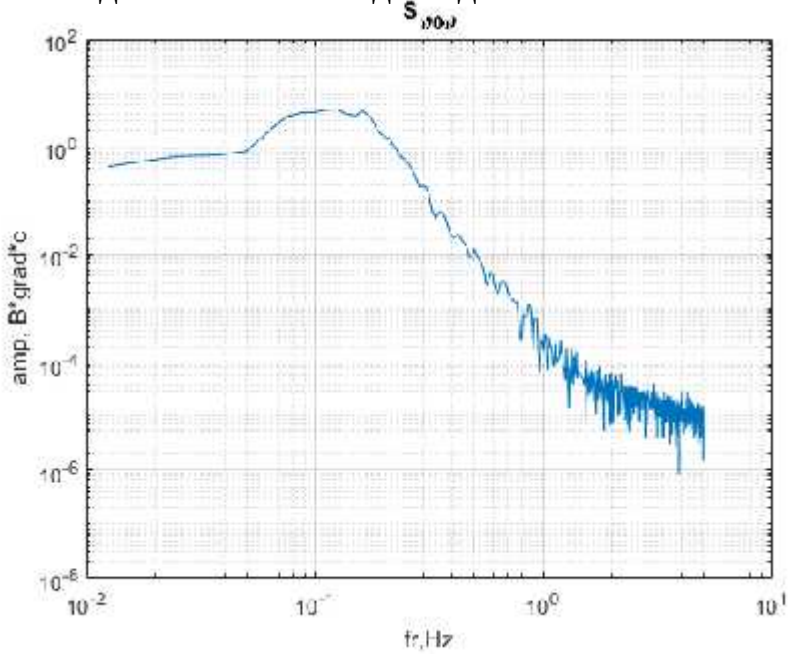


Рис.3.5. Графік взаємної спектральної щільності вхідного та вихідного сигналів

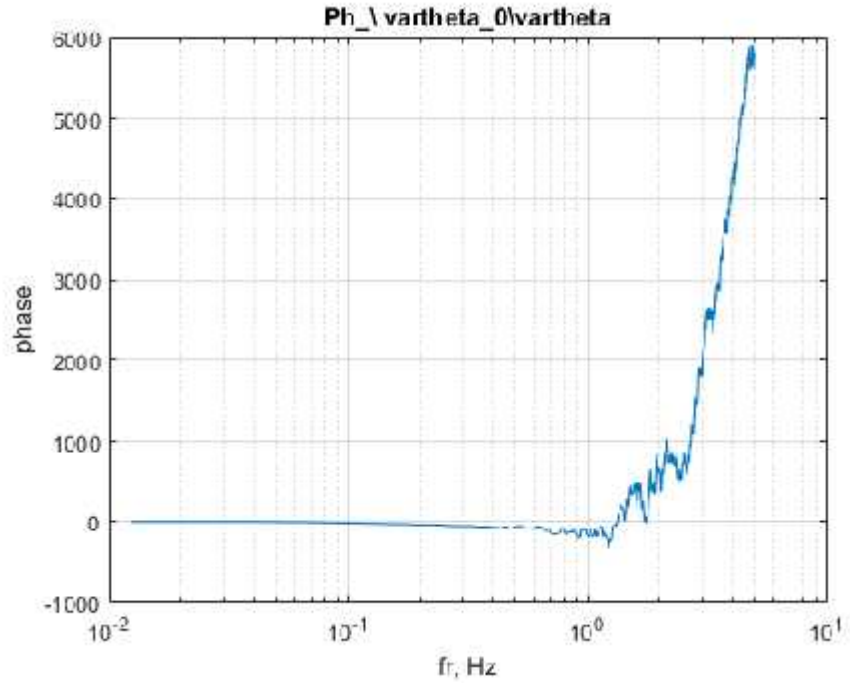


Рис.3 ного

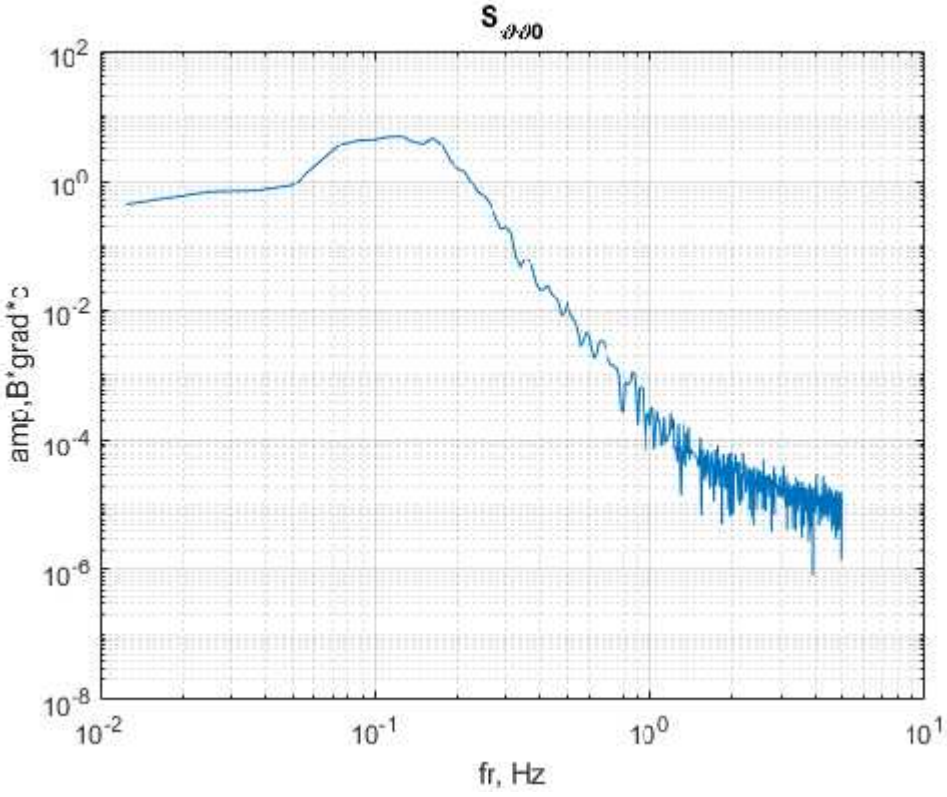


Рис.3.7. Графік взаємної спектральної щільності вихідного та вхідного сигналів

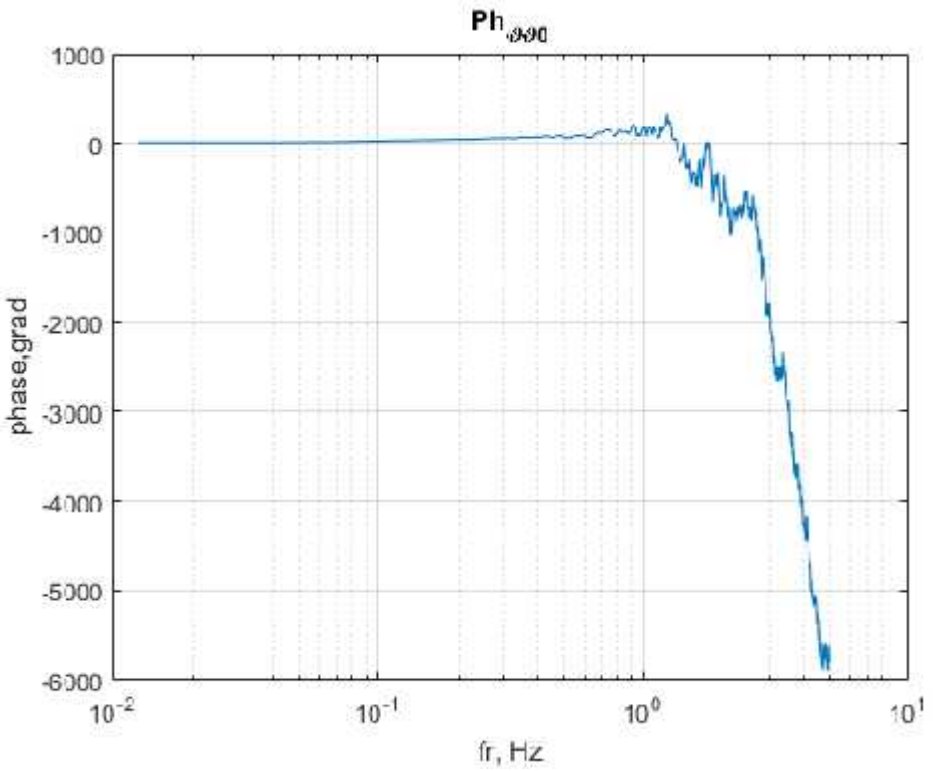


Рис.3.8. Графік фазової характеристики взаємної спектральної щільності вихідного та вхідного сигналів

Фазові характеристики взаємної спектральної щільності надають нам інформацію про зсуви фази між різними частотними компонентами сигналу. Це нам потрібно для визначення часових затримок, фазових різниць або фазової взаємодії між сигналами.

3.4. Структурна ідентифікація стенда-імітатора кутових положень

У результаті отримали спектральні та взаємно спектральні щільності сигналів у вигляді графічних залежностей (Рис. 3.1 – Рис. 3.8). Після проведення апроксимації отриманих графіків, складаються моделі динаміки у вигляді

спектральних та взаємно спектральних щільностей сигналів. В результаті апроксимації графічних залежностей методом структурної ідентифікації моделей динаміки об’єкта при врахуванні неконтрольованих випадкових збурень були побудовані моделі динаміки для вхідного та вихідного сигналу по каналу тангажу у вигляді математичних виразів для спектральних та взаємних спектральних щільностей.

Результати апроксимації на основі яких будемо проводити ідентифікацію:

Спектральна щільність вхідного сигналу

$$S_{\vartheta_0\vartheta_0} = \frac{1.9^2}{\pi}\left|\frac{27.59S^2 - 1.149}{4.324S^6 + 1.592S^4 + 4.441e - 16S^3 + 1.279S^2 - 1}\right|^2 \qquad (\text{В}^2 \cdot \text{сек})$$

Спектральна щільність вихідного сигналу

$$S_{\vartheta} = \frac{0.75^2}{\pi}\left|\frac{12.94S^2 - 0.179}{18.94S^6 + 3.988S^4 - 0.7577S^2 - 1}\right|^2 \qquad (\text{град}^2 \cdot \text{сек})$$

Взаємно спектральна щільність вхід-вихід

$$S_{\vartheta_c\vartheta} = \frac{1.9^2 0.75^2}{\pi}\frac{5.379S^2 - 0.1197S - 0.1996}{|4.324S^6 + 4.441e - 16S^5 + 1.592S^4 + 1.279S^2 - 1|^2} \qquad (\text{В} \cdot \text{град} \cdot \text{сек})$$

Взаємно спектральна щільність вихід-вхід

$$S_{\vartheta_c\vartheta} = \frac{1.9^2 0.75^2}{\pi}\frac{5.379S^2 - 0.1197S - 0.1996}{|4.324S^6 + 4.441e - 16S^5 + 1.592S^4 + 1.279S^2 - 1|^2} \qquad (\text{В} \cdot \text{град} \cdot \text{сек})$$

Шляхом визначення передавальних функцій та їх перемноження була отримана передавальна функція вхід-вихід для неконтрольованого впливу системи. Це дозволяє описати залежність вхідного та вихідного сигналів системи.

Подальше обчислення спектральної щільності неконтрольованого впливу дає інформацію про розподіл енергії сигналу в різних частотних діапазонах. Це допомагає вивчити характерні частоти та амплітуди сигналу.

Кореляційна функція між вхідним та вихідним сигналами :

$$W_{\vartheta} = w31 \cdot w32 \cdot w33 \cdot w34$$

Формула для обчислення взаємно спектральної щільності $S_{\vartheta_0\vartheta}$ на основі кореляційної функції w та стандартних відхилень вхідного та вихідного сигналів: $S_{\vartheta_0\vartheta} = 0.44 \cdot \left(s \; _u \cdot \frac{s \; _x}{p}\right) \cdot W_{\vartheta}$,

де w – кореляційна функція , $s \; _u$ – стандартне відхилення вхідного сигналу , $s \; _x$ - стандартне відхилення вихідного сигналу.

Функція $S_{\vartheta_0\vartheta}$ взаємно спектральної щільності для вхідного та вихідного сигналів при неконтрольованому впливі системи має вигляд:

$$S_{\vartheta_0\vartheta} = \frac{1.9^2 0.75^2}{\pi} \frac{5.379S^2 - 0.1197S - 0.1996}{|4.324S^6 + 4.441e-16S^5 + 1.592S^4 + 1.279S^2 - 1|^2}$$

Далі транспонуємо нашу кореляційну функцію між вхідним та вихідним сигналами і отримаємо нову:

$$W_{\vartheta} = W_{\vartheta}'$$

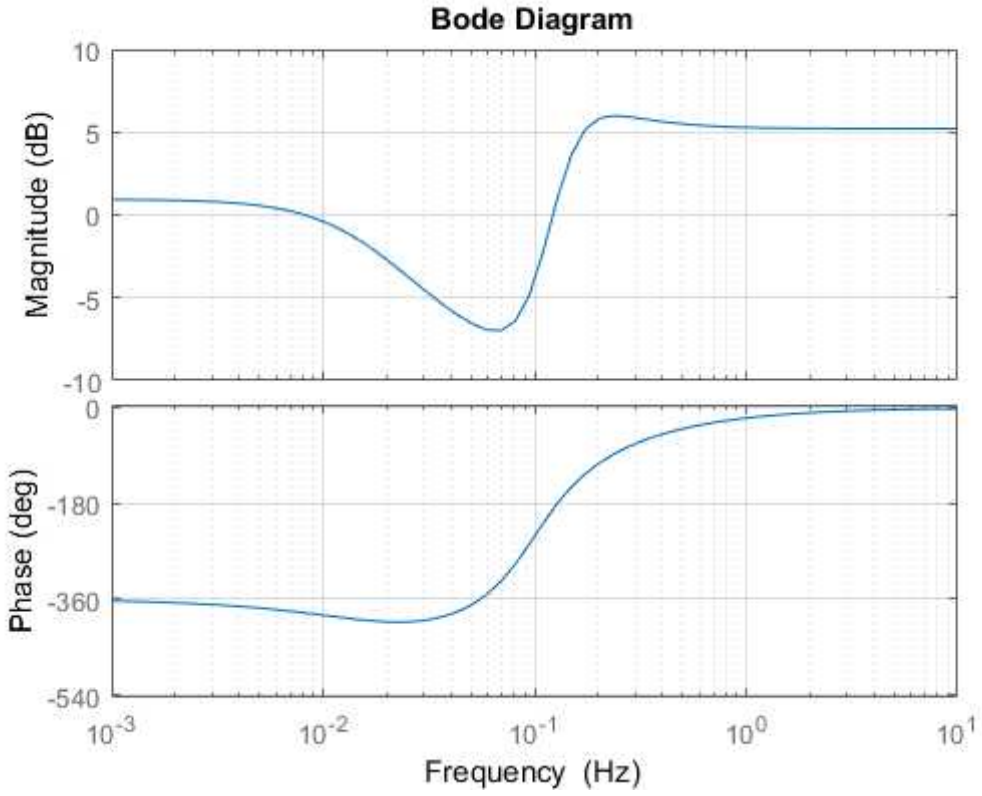
Отримана кореляційна функція має вигляд:

$$W_{\vartheta} = \frac{1.8213\,(S + 0.5882)^2\,(S + 0.1818)(S - 0.2041)(S^2 + 0.6293S + 0.3906)^2}{(S - 0.625)(S + 0.625)(S + 0.1176)^2(S^2 + 0.8833S + 0.7695)(S^2 - 0.8833S + 0.7695)}$$

В результаті виконання процедури структурної ідентифікації отримаємо:

$$S_{\xi} = \frac{1.46^2}{\pi}\left|\frac{(3.18s + 1)(2.74s + 1)(0.99s + 1)}{(2.04^2s^2 + 2 \cdot 0.92 \cdot 2.04s + 1)(1.62^2s^2 + 2 \cdot 0.14 \cdot 1.62s + 1)}\right|^2$$

, де S_{ξ} - спектральна щільність неконтрольованого збурення, діючого на багатомірний динамічний стенд-імітатор кутових положень



Дисперсія помилки по каналу тангажа визначається за допомогою функції *coloss*, яка обчислює показники якості системи на основі передавальних функцій *bse i ase*. Формула для обчислення має наступний вигляд:

$$Er = \frac{c \quad (bs\ ,as\ )}{p} = 0.4337$$

e - відносна дисперсія помилки БДС (канал тангажа) і визначається як відношення дисперсії помилки *Err* до стандартного відхилення вхідного сигналу *sigma_x*. В результаті отримали формулу та результат :

$$e = Er\ /s \quad _x = 0.2283$$

Висновки до 3 розділу:

В даному розділі ми систематично вирішили завдання структурної ідентифікації для динамічного багатовимірного стенда-імітатора (ДБС) по каналу тангажу. Тоді, на основі результатів апроксимації графічних залежностей методом структурної ідентифікації моделей динаміки об’єкта при врахуванні неконтрольованих випадкових збурень були побудовані моделі динаміки для вхідного та вихідного сигналу по каналу тангажу у вигляді математичних виразів для спектральних та взаємних спектральних щільностей.

Результатом застосування алгоритму структурної ідентифікації було отримано передавальну функцію ДБС каналу тангажа та спектральну щільність неконтрольованих збурень, що впливають на об’єкт управління (ДБС). Також були визначені дисперсія помилки та відносна дисперсія помилки (ДБС) по каналу тангажа.

Отже, поставлене завдання структурної ідентифікації було повністю виконано, що підтверджує успішне вирішення задачі ідентифікації для даної системи.

ВИСНОВКИ

У результаті нашого проведеного дослідження та аналізу отриманих результатів, ми прийшли до висновку у нашій кваліфікаційній роботі, що для досягнення точності, надійності та достовірності вимірювань за допомогою багатовимірного динамічного стенду-імітатора кутових положень по каналу тангажу необхідно використовувати методи структурної ідентифікації такі, які найбільш точніше описують роботу даного стенду.

Під час виконання роботи ми дослідили динамічний багатовимірний стенд-імітатор по каналу тангажу та визначили, що використання стендів-імітаторів має свої переваги, але може викликати проблеми та вимагати додаткових ресурсів під час вдосконалення та експлуатації. Описали основні характеристики стендів-імітаторів та їхні обмеження.

Також, розглянули різні методи ідентифікації для стендів-імітаторів та динамічних об’єктів, а також проаналізували етапи процесу ідентифікації. Визначили, що вибір методу ідентифікації залежить від характеристик стенду-імітатора та особливостей проблеми, а також важливо провести дослідження та оцінку ефективності обраного методу.

На основі отриманих результатів від апроксимації провели структурну ідентифікацію для багатовимірного динамічного стенда-імітатора кутових положень по каналу тангажу за допомогою розробленої програми та алгоритму. Під час дослідження застосовали метод структурної ідентифікації моделей динаміки багатовимірного стенда-імітатора при неконтрольованих впливах. І дійшли висновку, що даний метод є ефективним для досягнення точності та надійності вимірювань на ДБС.

В ході кваліфікаційної роботи, ми побудували графічні залежності в середовищі Matlab маючи вхідні та вихідні дані. Отримали передавальну функцію ДБС по каналу тангажу та спектральну щільність неконтрольованих збурень. Визначили дисперсію помилки та відносну дисперсію помилки.

Результати отримані під час проведення структурної ідентифікації можуть бути використані при розробці, тестуванні та перевірці систем управління для покращення точності, надійності та ефективності багатовимірних динамічних стендів-імітаторів. Отримані результати дослідження можуть бути використані, як основа для подальших досліджень та розвитку методів структурної ідентифікації. Це може сприяти розширенню та вдосконаленню технік ідентифікації в різних галузях, де вимагається точне моделювання та контроль динамічних систем.

ПЕРЕЛІК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. Блохін Л.М., Буриченко М.Ю. Статична динаміка систем управління: Підручник. Київ: НАУ, 2003. 208 с.

2. Веремеенко К.К., Галай И.А. Разработка алгоритма калибровки инерциальной навигационной системы на двухосном испытательном стенде. Труды МАИ. 2013. №63. [Электронный ресурс].

3 Галеев А.Г., Захаров Ю.В., Макаров В.П., Родченко В.В. Проектирование испытательных стендов для экспериментальной отработки объектов ракетно-космической техники. - 2014. - 283 с.

4. Чернышев А.В. Проектирование стендов для испытаний и контроля бортовых систем летательных аппаратов. – М.: Машиностроение, 1983.

5. Андриевская Н.В., Матушкин Н.Н., Южаков А.А. Идентификация систем управления: Учебное пособие. - 2012. - 170 с.

6. Семенов А.Д., Артамонов Д.В., Брюхачев А.В. Идентификация объектов управления: Учебное пособие. - 2003. - 211 с.

7. Дилигенская, А.Н. Идентификация объектов управления. 2009. - 136 с.

8. Коновалов В.И. Идентификация и диагностика систем: учебное пособие. 2010. – 163 с.

9. Марценюк Є.О. Методи параметричної ідентифікації моделей дискретних динамічних систем, що гарантують задану точність: дисертація. Тернопіль: Видавництво Тернопільського національного економічного університету, 2010. 142 с.

10. В.В.Аврутов. Випробування і контроль приладів і систем: підручник. Ст. 28-31. Електронне мережне навчальне видання.

ДОДАТОК А

Лістинг коду програми для дослідження ідентифікації багатовимірного динамічного стенду-імітатора кутових положень по каналу тангажу.

Додаток А.1. Код програми для апроксимації та ідентифікації

```
load('M2_V_inp.txt')
x =  M2_V_inp;
dt = 0.1;
t= 0:0.1:dt*8000;
figure(1);
plot(t,x), grid on
%pi(300);
xlabel('t,sec')
ylabel('Amp,B')
title('\vartheta_0, B')

load('m2gr_out.txt')
y=m2gr_out;
t=0:0.1:dt*8000;
figure(2)
plot(t,y),grid on
xlabel('t, sec')
ylabel('Amp,grad')
title('\vartheta,grad')


% Особиста спектральна  щільність  входу
[Fxx, Axx, Pxx]=spectr(x,x,dt,400);
figure(3)
loglog(Fxx,Axx),grid on
xlabel('fr, Hz')
ylabel('amp,B^2*c');
title('S_\vartheta_0_\vartheta_0');


% Особиста спектральна  щільність  виходу
[Fyy, Ayy, Pyy]=spectr(y,y,dt,400);
figure(4)
loglog(Fyy,Ayy), grid on
xlabel('fr,Hz')
ylabel('amp, grad^2*c');
title('S_\vartheta_\vartheta');
```

```
 % Взаємна спектральна  щільність  вхід - вихід
[Fxy, Axy, Pxy]=spectr(y,x,dt,400);
 figure(5)
loglog(Fxy,Axy), grid on
xlabel('fr,Hz')
ylabel('amp, B*grad*c');
title('S_\vartheta_0_\vartheta');

figure(6)
semilogx(Fxy,Pxy),grid on
xlabel('fr, Hz')
ylabel('phase');
title('Ph_\vartheta_0_\vartheta')

 % Взаємна спектральна  щільність   вихід - вхід
[Fyx, Ayx, Pyx]=spectr(x,y,dt,400);
 figure(7)
loglog(Fyx,Ayx), grid on
xlabel('fr, Hz')
ylabel('amp,B*grad*c');
title('S_\vartheta_\vartheta_0');

figure(8)
semilogx(Fyx,Pyx),grid on
xlabel('fr, Hz')
ylabel('phase,grad');
title('Ph_\vartheta_\vartheta_0')

% Вхід
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
%   sigma_u=0.75 % почаок по у
%   ω1= 0.03;       T1=1/2πω1  =  5.5;
%   ω2= 0.09 ;      T2=1/2πω2  =  1.8;
%   ω3= 0.13;       T3=1/2πω3  =  1.27;
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%


%результат апроксимації
%Вхід
sigma_u = 0.75;
w11 = tf([8.5 1], [1.7 1]);
w12 = tf([1], [1.6^2 2^0.01*1.6 1])
```

```
w123 = w11 * w12;
wu = w123 * w123;
Su = (sigma_u^2/pi) * wu;
Suu = zpk(Su);

% побудова апроксимованих спектральних щільностей
[num, den] = tfdata(Su);
[mg, ph, fr] = bode(num, den, t);

% спектральна щільність
[Fxx, Axx, Pxx] = spectr(x, x, dt, 400);
figure(9)
loglog(Fxx, Axx), hold on
loglog(fr/(2*pi), mg), grid on
xlabel('fr, Hz');
ylabel('amp,B^2*c');
title('s_\vartheta_0_\vartheta_0');


%Вихід
 %%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
 % sigma_x = 1.9
 % ω1=0.03;     T1=1/2πω1  =  4.9;
 % ω2=0.1 ;     T2=1/2πω2  =  1.6;
 % ω3=0.14;     T3=1/2πω3  =  1.14;
 %%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%

%результат апроксимації
%вихід
sigma_x= 1.9;
w21=tf([4.9 1],[1.6 1]);
w22=tf([1],[1.14^2 2^0.01*1.14 1]);
w213=w11*w12;
wx=w213*w213';
Sx=(sigma_x^2/pi)*wx
Sxx=zpk(Sx)

%побудова апраксимованих спект.щільностей
%вихід
[num1,den1]=tfdata(Sx);
[mg1,ph1,fr1]=bode(num1,den1,t);

%спектральна щільність
[Fyy,Ayy,Pyy]=spectr(y,y,dt,400);
figure(10)
```

```
loglog(Fyy,Ayy),hold on;
loglog(fr1/(2*pi),mg1),grid on
xlabel('fr,Hz');
ylabel('amp,grad^2*c');
title('S_\vartheta_\vartheta');

% Вхід-вихід
w31 = tf([ -4.9 1 ],[1.6 1]);
w32 = tf([5.5 1 ],[-1.6 1]);
w33 = tf([1],[1.14^2   2^0.01*1.14   1]);
w34 = tf([1],[1.14^2   -2^0.01*1.14 1]);
wux = w31*w32*w33*w34;
Sux = 0.44*(sigma_u*sigma_x/pi)* wux
Sux = zpk(Sux)

% Вхід-вихід
[num2 , den2] = tfdata(Sux);
[mg2, ph2, fr2]=bode(num2, den2, t);
%Взаїмна спектральна щільність вхід - вихід
[Fxy,Axy,Pxy]=spectr(y,x,dt,400);
figure(11)
loglog(Fxy,Axy),hold on;
loglog(fr2/(2*pi),mg2),grid on
xlabel('fr,Hz');
ylabel('amp, B*grad*c');
title('S_\vartheta_0_\vartheta');

figure(12)
semilogx(Fxy,Axy),  hold on
semilogx(fr2/(2*pi),ph2),  grid on
xlabel('fr,  Hz');
ylabel('Phase, grad ');
title('Ph_\vartheta_0_\vartheta');

% Вихід-вхід
wxu =wux'
Sxu = 0.44*(sigma_u * sigma_x/ pi)*wxu
Sxu = zpk(Sxu)

% Вихід-вхід
[num3 , den3] = tfdata(Sxu);
[mg3, ph3, fr3]=bode(num3, den3, t);
```

```
%Взаїмна спектральна щільність  вихід-вхід
[Fyx,Ayx,Pyx]=spectr(x,y,dt,400);
figure(13)
loglog(Fxy,Axy),hold on;
loglog(fr2/(2*pi),mg3),grid on
xlabel('fr,Hz');
ylabel('amp, B*grad*c');
title('S_\vartheta_0_\vartheta');
figure(14)
semilogx(Fxy,Axy),  hold on
semilogx(fr2/(2*pi),ph3),  grid on
xlabel('fr,  Hz');
ylabel('Phase, grad ');
title('Ph_\vartheta_0_\vartheta');

%Процедура індефікації
%Передавальна функція
Ww1=Sxu'*inv(Suu);
W1=minreal(Ww1)
[nimw,denw]=tfdata(Ww1,'v')
W=zpk(W1)
W_=minreal(W, 0.001)
figure(15)
bode(W_)

%Визначимо спектральну щільність формування впливу

%Спектральна щільність впливу вихід-вхід
SS=minreal(Sxx-Sxu'*inv(Suu)*Sxu);
SS1=zpk(SS)
%sysy3=SS;
%sy3=smpolym(sysy3);
%Ss=sy3;
Ss=minreal(SS1,0.1)

%проведемо факторизацію
[num4,den4]=tfdata(Ss,'v');
num=smpoly(num4);
den=smpoly(den4);
[bpk,apk] = sfp(num,den);
Sksi_x=tf(bpk,apk);
[numsp,densp]=tfdata(Sux,'v')
Sksi_x_=tf(numsp,densp);
```

```
see1=Sxx-Sxu-Sxu'+Suu;
se=minreal(see1, 0.1);
[numse,dense]=tfdata(se,'v');
%numse=smpoly(numse);
%dense=smpoly(dense);
[bse,ase]=sfp(numse,dense);
Err=coloss(bse,ase)/pi
e=Err/sigma_x
%Err-дисперсія
%e-відносна похібка
```

Додаток А.2. Код функції - coloss

```
function s = coloss (b, a)

% АЛГОРИТМ  ОБЧИСЛЕННЯ ДИСПЕРСІЙНОГО ІНТЕГРАЛУ ВІД ДРФ
s = 0.0;                %встановлюємо для змінної s - початкове значення;
if all(b)               %Перевіряємо чи всі значення чисельника більші від 0
N = length(a);          %Обчислюємо  розмірності полінома знаменника (N) за
Nb = length(b);         %Обчислюємо  розмірності полінома чисельника (Nb);

b0 = zeros(1,(N-Nb-1)); %Створюємо  масив з нулів  розмірністю  1 на(N-Nb-1)
b = [b0,b];             %Об'єднання масивів  b0 і b

%За допомогою циклу for ми перебираємо всі коефіцієнти поліному знаменника
for k = 1:N

% І будемо перевіряти стійкість системи,  якщо a(k) менше або дорівнює 0.0,
%встановлюється значення s як NaN (не число),і  виводиться повідомлення про
%нестійкість системи і зупиняємо цикл і повертаємо функцію

if (a(k) <= 0.0)
 s = NaN;
 disp('Система нестійка.');  return;   end;

% В іншому випадку обчислюємо змінні alfa, beta і  s
     alfa = a(k)/a(k+1);
     beta = b(k)/a(k+1);
     s = s + beta*beta/alfa;
     k2 = k + 2;

% Якщо k2 більше ніж розмірність полінома знаменника цикл зупиняємо
     if (k2 > N)
   break;
```

```
end;

% Далі якщо умови всі виконуються для стійкості, проходимо по поліному через
% вкладений цикл  for де початкове значення k2 з кроком 2 і кінцеве значення
% дорівнює (N-1) і обчислюємо оновлені коефіцієнти   a(i) і b(i)

 for i = k2:2:(N-1)
     a(i) = a(i) - alfa*a(i+1);
     b(i) = b(i) - beta*a(i+1);
    end;
end;


%Далі присвоюємо обчислене значення інтегралу поділивши на 2
   s = s/2.0;
else
%В іншому випадку якщо, ніяка умова не виконується
%повертаємо функцію і зупиняємо виконання програми
   return;
end;

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
% ОБЧИСЛЕННЯ ДИСПЕРСІЙНОГО ІНТЕГРАЛУ ВІД ДРФ
% дробово-раціональної функції комплексної змінної s = jw
%
%    s = coloss(b,a)
%
%   Вхідні змінні:
%    a - коефіцієнти полінома знаменника
%          a(1)*s^N + a(2)*s^(N-1)+...+a(N+1);
%    b - коефіцієнти полінома чисельника
%          b(1)*s^(N-1) + b(2)*s^(N-2)+...+b(N);
%    (N - степінь поліному знаменника).
%
% Вихідні змінні:
%       s - обчислене ЗНАЧЕННЯ ІНТЕГРАЛУ
%
% Алгоритм наведено з книги
%   Острем К. ВВЕДЕНИЕ В СТОХАСТИЧЕСКУЮ ТЕОРИЮ УПРАВЛЕНИЯ.
%   -М.:Мир, 1973. 321 с.
%  Програма-прототип COLOSS з цієї книги (стор. 153) , М.В.  NAU, Kiev, 2000
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
```

Додаток А.3. Код функції - sfp

```
function[bf,af]=sfp(b,a)
% Перетворюємо масив  b  в поліном за допомогою функції fpoly  і присвоюємо
%його змінній  bf

bf=fpoly(b);
%   Перевіряємо перший коефіцієнт поліному, якщо він дорівнює нулю, тоді
%   створюється масив af з одним елементом [1], що вказує на поліном з одним
%   членом 1. Після цього функція завершується і повертає результат.

if(bf(1)==0)
af=[1];
return;
end;

%   В іншому випадку  перетворюємо масив a на поліном і присвоюємо його
%   змінній af і повертає отриманий поліном
af=fpoly(a)
```

Додаток А.4. Код функції - fpoly

```
function fp=fpoly(p);
% Вхідним параметром (p)  функції є  масив коефіцієнтів поліному
%  Знаходження і сортування коренів поліному
%  Спочатку для p1 знаходимо кількість коефіцієнтів  поліному  за  допомогою
% функції length() і також знаходимо  самі корені за  допомогою функції roots()
% дані функції є стандартними в пакеті MATLAB

p1=length(p);
r=roots(p);
% Перевіряємо за допомогою функції isempty(), якщо поліном в нас порожній
if isempty(r)

%Тоді створюємом поліном fp з одним коренем, що є квадратним коренем
%абсолютної величини останнього коефіцієнта p(p1) і повертаємо поліном
 fp=[sqrt(abs(p(p1)))];
 return;
 end;
```

```
% Якщо корені знайдені, вони сортуються за алгоритмом  спочатку корені з
%нульовою дійсною частиною, а  потім від'ємні корені.
n=length(r);     % Обчислення кількості елементів у масиві r (кількість коренів)
j=1;             % Лічильник для масиву rf
flag=1;          % Змінна-прапорець для визначення, чи додавати наступний
                 % корінь до rf (1 - додати, -1 - не додавати)
%Проходимо по кожному кореню полінома
for i=1:n
%Якщо дійсна частина кореня дорівнює 0 і flag > 0
   if (real(r(i))==0)&(flag>0)
      rf(j)=r(i);                % Додати корінь до масиву rf
      flag=flag*(-1);            % Зміна значення flag на протилежне
      j=j+1;                     % Збільшення лічильника j

elseif (real(r(i))<0);           % Якщо дійсна частина кореня менше 0
      rf(j)=r(i);                % Додати корінь до масиву rf
      j=j+1;                     % Збільшення лічильника j
   end
end;
%  Після завершення циклу отримуємо масив rf, який містить відфільтровані
%  корені поліному r. Додаткові елементи масиву rf, які не були заповнені,
%  матимуть значення 0 (ініціалізовані за допомогою zeros(1, n)).
% Створення поліному за допомогою функції MATLAB  poly()  з відсортованих
%коренів масиву rf
fp=poly(rf);

%  Обчислення індексу коефіцієнта для належного масштабування поліному за
допомогою коефіцієнта p(p1 - n)
fp=fp*sqrt(abs(p(p1-n)));
```

Додаток А.5. Код функції - smpolym

```
% Функція для скорочення нульових елементів системи
function sy = smpolym(sysy)

tol  =  1e-10 ;              % Поріг для визначення нульових елементів

%   Отримаємо чисельникові та знаменникові коефіцієнти системи
%    передавання sysy за допомогою функції tfdata з опцією 'v', яка
%   повертає коефіцієнти у векторному форматі
```

```
[numS, denS] = tfdata(sysy, 'v');

%   Застосуємо функцію smpoly до чисельникових коефіцієнтів numS
%   та знаменникових коефіцієнтів denSдля скорочення нульових
% елементів з використанням порогу tol

 %  Оновлені коефіцієнти зберігаємо в змінних bsy і asy
bsy = smpoly(numS, tol);
asy = smpoly(denS, tol);

% Створення нової системи передавання sy за допомогою функції tf з
%  оновленими чисельниковими коефіцієнтами bsy та знаменниковими
% коефіцієнтами asy
sy = tf (bsy, asy);

%Отримана система sy міститиме скорочені коефіцієнти.
```

Додаток А.6. Код функції - sfp

```
% %%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
% ФАКТОРИЗАЦІЯ ДРОБОВО-РАЦІОНАЛЬНОЇ ФУНКЦІЇ (ДРФ)
%
%         [bf,af]=sfp(b,a);
%
% Вхідні змінні:
%   b - вектор-стовпчик коефіцієнтів полінома чисельника ДРФ
%   a - вектор-стовпчик коефіцієнтів полінома знаменника ДРФ
% Вихідні змінні:
%   bf - вектор-стовпчик коефіцієнтів полінома чисельника ДРФ,
%       де всі нулі та полюси розташовані в правій півплощіні
%   cf - вектор-стовпчик коефіцієнтів полінома знаменника цієї ДРФ
% Алгоритм:
% 1.Обчислює нулі та полюси ДРФ,
% 2.Визначає нулі та полюси, розташовані в правій півплощині
%   комплексного змінного
% 3.Обчислює коефіцієнти поліному за вектором визначених коренів
%*****************************************************************
% M.Burichenko, NAU, Kiev, 2000.
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%

%Оголошення функції spf з вхідним параметром W і вихідним параметром Wf
function [ Wf ] = spf ( W )

% Знаходимо та сортуємо корені полінома
% Факторізуємо ДРФ, повертаємо нову систему передаточних функцій Wf
```

```
% Отримаємо  коефіцієнти системи за допомогою функції tfdata()
[b,a]=tfdata(W,'v');
% Якщо, перший елемент чисельника b   дорівнює нулю, тоді ми його видаляємо
if (b(1)==0) b(1)=[]; end;
% До чисельника b для знаходимо і сортуємо корені поліному
bf = fpoly(b);
%Якщо, перший елемент чисельника bf   дорівнює нулю, тоді ми його повертаємо
if (bf(1)==0) af=[1]; return;
  end;
% Для знаменника   знаходимо і сортуємо   корені поліному
af = fpoly(a);
% Створення нової системи передаточних функцій Wf з чисельника bf та
%  знаменника af за допомогою функції tf
Wf=tf(bf,af);

function fp = fpoly(p);
% Знайти та сортувати корені полінома
% Факторізувати ДРФ

pl = length(p);% Обчислення кількості елементів у масиві p (кількість коренів)
r = roots(p);
% Перевіряємо за допомогою функції isempty(), якщо поліном в нас порожній
if isempty(r)

%Тоді створюємом поліном fp з одним коренем, що є квадратним коренем
%абсолютної величини останнього коефіцієнта p(p1) і повертаємо поліном
fp = [sqrt(abs(p(pl)))];return;
  end
% Якщо корені знайдені, вони сортуються за алгоритмом  спочатку корені з
нульовою дійсною частиною, а  потім від'ємні корені.
n = length(r);    % Обчислення кількості елементів у масиві r (кількість коренів)
j = 1;            % Лічильник для масиву rf
flag = 1;         % Змінна-прапорець для визначення, чи додавати наступний
                    корінь до rf (1 - додати, -1 - не додавати)

%Проходимо по кожному кореню полінома
for i = 1:n

%   Якщо дійсна частина кореня дорівнює 0 і flag > 0
if (real(r(i))==0)&(flag>0)
      rf(j) = r(i);                    % Додати корінь до масиву rf
      flag = flag * (-1);              % Зміна значення flag на протилежне
```

```
      j = j + 1;                          % Збільшення лічильника j
   elseif (real(r(i)) < 0) ;              % Якщо дійсна частина кореня менше 0
      rf(j) = r(i);                       % Додати корінь до масиву rf
      j = j + 1;                          % Збільшення лічильника j
   end
end
%  Після завершення циклу отримуємо масив rf, який містить відфільтровані
%  корені поліному r. Додаткові елементи масиву rf, які не були заповнені,
%  матимуть значення 0 (ініціалізовані за допомогою zeros(1, n)).

% Створення поліному за допомогою функції MATLAB  poly()  з відсортованих
%коренів масиву rf
fp = poly(rf);
%  Обчислення індексу коефіцієнта для належного масштабування поліному за
допомогою коефіцієнта p(p1 - n)
fp = fp * sqrt(abs(p(p1 - n)));
```

Додаток А.7. Код функції - smpoly

```
function p=smpoly(p,varargin)
% Функція для скорочення нульових елементів поліному.
% Приймає вхідні параметри:
%   p - поліном,  varargin - додаткові аргументи (толерантність tol).
% Повертає:   p - скорочений поліном.

if nargin==1

% Встановлюємо значення толерантності за замовчуванням,якщо відсутній
% другий аргумент
   tol=1e-10;
else

% Використовуємо переданий другий аргумент як значення  толерантності
tol=varargin{1};
end

% Знаходимо індекси елементів поліному, які менші за задану толерантність
j=find(abs(p)<tol);

p(j)=0   % Замінюємо ці елементи на нуль
```

Додаток А.8. Код функції - spectr

```
function [f,a,p]=spectr(x,y,T,m);

% Функція для обчислення спектру сигналу.
```

```
% Приймає вхідні параметри:
% x - вектор x, y - вектор y, T - період сигналу, m - кількість гармонік.
% Повертає:
% f - вектор частот, a - вектор амплітуд, p - вектор фазових кутів.

N=length(x);     % Визначаємо довжину вектору x

for i=0:m,
p=[0:(N-i-1)];
p=p+1;

% Обчислюємо коефіцієнт sxy за формулою:
sxy(i+1) = 1/(N-i-1) *sum(x(p) .* y(p + i));


% Обчислюємо коефіцієнт syx за формулою:
syx(i+1)=1/(N-i-1)*sum(x(p+i).*y(p));
end;


i=[0:m];   % Встановлюємо значення для індексу i


% Обчислюємо ваговий коефіцієнт vm за формулою:
vm=0.54+0.46*cos(pi*i/m);


sxym=vm.*sxy;      % Обчислюємо взважений коефіцієнт sxym
syxm=vm.*syx;      % Обчислюємо взважений коефіцієнт syxm
Axy=sxym+syxm; % Обчислюємо коефіцієнт Axy
Bxy=sxym-syxm; % Обчислюємо коефіцієнт Bxy

for k=0:m,
% Обчислюємо значення частоти f за формулою:
f(k+1)=k/(2*m*T);

i=[1:m-1];        % Встановлюємо значення для індексу i

% Обчислюємо коефіцієнт Cxy за формулою:

Cxy(k+1)=T/2*(Axy(1)+2*sum(Axy(i+1).*cos(2*pi*f(k+1)*T*i))+Axy(m+1)*cos(2*
pi*f(k+1)*T*m));
```

```
% Обчислюємо коефіцієнт Qxy за формулою:
Qxy(k+1)=T/2*(Bxy(1)+2*sum(Bxy(i+1).*sin(2*pi*f(k+1)*T*i))+Bxy(m+1)*sin(2*p
i*f(k+1)*T*m));
end;



a=abs(Cxy+j*Qxy);        % Обчислюємо амплітуду a
% Обчислюємо фазовий кут p та перетворюємо його в градуси
p=unwrap(angle(Cxy+j*Qxy))*180/pi;
```