

СХІДНОУКРАЇНСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ

імені ВОЛОДИМИРА ДАЛЯ

(м. Сєвєродонецьк)

Факультет Інформаційних технологій та електроніки
(повне найменування факультету)

Кафедра Програмування та математики
(повна назва кафедри)

ПОЯСНЮВАЛЬНА ЗАПИСКА

до дипломної роботи

освітньо-кваліфікаційного рівня магістр
(бакалавр, спеціаліст, магістр)

спеціальності 171 – Електроніка
(шифр і назва спеціальності)

на тему Розробка та дослідження пристрою для визначення місцеположення об'єкта на основі використання мікроелектромеханічних систем

Виконав: студент групи Ел-13м

Паєранд Є.Ю.
(прізвище, та ініціали)

(підпис)

Керівник Марченко Д.М.
(прізвище та ініціали)

(підпис)

Завідувач кафедри Лифар В. О.
(прізвище та ініціали)

(підпис)

Рецензент Самойлова Ж.Г.
(прізвище та ініціали)

(підпис)

Сєвєродонецьк - 2019

СХІДНОУКРАЇНСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
імені ВОЛОДИМИРА ДАЛЯ
(м. Сєвєродонецьк)

Факультет Інформаційних технологій та електроніки

Кафедра Програмування та математики

Освітньо-кваліфікаційний рівень магістр
(бакалавр, спеціаліст, магістр)

Спеціальність 171 – Електроніка
(шифр і назва)

ЗАТВЕРДЖУЮ

Завідувач кафедри

_____ В.О.Лифар

“ _____ ” _____ 2019 року

З А В Д А Н Н Я

НА ДИПЛОМНУ РОБОТУ СТУДЕНТУ

Паєранду Євгену Юрійовичу

(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема роботи Розробка та дослідження пристрою для визначення місцеположення об'єкта на основі використання мікроелектромеханічних систем

керівник роботи Марченко Дмитро Миколайович, д.т.н., професор
(прізвище, ім'я, по батькові, науковий ступінь, вчене звання)

затверджені наказом вищого навчального закладу від “21” листопада 2018 року № 245/48

2. Строк подання студентом роботи 15.01.2019

3. Вихідні дані до роботи Матеріали науково-дослідної практики

4. Зміст розрахунково-пояснювальної записки (перелік питань, які потрібно розробити)

1) Огляд пристроїв та систем для визначення положення об'єкта;

2) Моделювання системи обробки даних і системи відстеження параметрів відхилення рухомого об'єкта за допомогою систем автоматизованого проектування;

3) Перевірка результатів моделювання.

5. Перелік графічного матеріалу (з точним зазначенням обов'язкових креслень)

6. Дата видачі завдання 01.09.2018

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№ з/п	Назва етапів дипломної роботи	Строк виконання етапів роботи	Примітка
1	Актуальність теми і постановка завдань дослідження	03.09.18-10.09.18	
2	Аналіз розробок та досліджень.	11.09.18-30.09.18	
3	Вибір середовища для моделювання.	01.10.18-10.10.18	
4	Моделювання системи відстеження параметрів відхилення рухомого об'єкта	15.10.18-30.11.18	
5	Оцінка фазових змінних	01.12.18-14.12.18	
6	Перевірка результатів моделювання	15.12.18-31.12.18	
7	Оформлення пояснювальної записки	01.01.19-15.01.19	

Студент Паеранд Є.Ю.
(підпис) (прізвище та ініціали)

Керівник роботи Марченко Д.М.
(підпис)

ЗМІСТ

ВСТУП.....	6
1 ПЕРШИЙ РОЗДІЛ.....	8
ОГЛЯД ПРИСТРОЇВ ТА СИСТЕМ ДЛЯ ВИЗНАЧЕННЯ ПОЛОЖЕННЯ ОБ'ЄКТА.....	8
1.1 Передумови виникнення мікроелектромеханічних систем.....	8
1.2 Матеріали для виготовлення та переваги застосування мікроеле- ктромеханічних систем.....	11
1.3 Конструкція та принцип дії мікроелектромеханічного гіроскопа..	14
1.4 Конструкція та принцип дії мікроелектромеханічного акселеро- метра.....	24
1.5 Система визначення координат місцеположення об'єкта.....	31
1.5.1 Оцінка кутів по вихідному сигналу гіроскопа.....	33
1.5.2 Оцінка кутів по вихідному сигналу акселерометра.....	34
1.5.3 Оцінка кута за результатами обробки сигналів від гірос- копа та акселерометра.....	35
1.6 Висновки за розділом.....	37
2 ДРУГИЙ РОЗДІЛ.....	39
МОДЕЛЮВАННЯ СИСТЕМИ ОБРОБКИ ДАНИХ І СИСТЕМИ ВІДС- ТЕЖЕННЯ ПАРАМЕТРІВ ВІДХИЛЕННЯ РУХОМОГО ОБ'ЄКТА ЗА ДОПОМОГОЮ СИСТЕМ АВТОМАТИЗОВАНОГО ПРОЕКТУВАННЯ	39
2.1 Вибір середовища для моделювання.....	39
2.2 Модель системи обробки даних та її аналіз.....	42
2.2.1 Блоки обробки даних.....	50
2.2.1.1 Фільтри першого порядку.....	51
2.2.1.2 Фільтри другого порядку.....	53
2.2.1.3 Фільтр Калмана.....	56
2.3 Моделювання системи відстеження параметрів відхилення рухомого об'єкта	63

	5
2.3.1 Опис системи.....	63
2.3.2 Постановка задачі.....	65
2.3.3 Зведення задачі стеження до задачі стабілізації.....	66
2.3.4 Формування канонічного перетворення подібності.....	68
2.3.5 Стабілізація системи.....	69
2.3.6 Оцінка фазових змінних.....	71
2.3.6.1 Оцінка стану параметра β	71
2.3.6.2 Оцінка стану параметра $\Delta\varphi$	72
2.3.6.3 Формування регулятора для вихідної системи.....	72
2.3.7 Опис моделі в середовищі Simulink.....	72
2.3.8 Результати моделювання.....	79
2.3.9 Висновки за розділом	83
3 ТРЕТІЙ РОЗДІЛ	85
ПЕРЕВІРКА РЕЗУЛЬТАТІВ МОДЕЛЮВАННЯ.....	85
3.1 Опис системи визначення кута на базі мікроелектромеханічного гіроскопа.....	85
3.2 Опис плати вводу-виводу PCI - 1711/1731.....	87
3.3 Висновки за розділом.....	93
ВИСНОВКИ.....	94
ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ	97

ВСТУП

Актуальність теми. У сучасній техніці все частіше застосовуються навігаційні системи, призначені для орієнтації в незнайомій місцевості, пошуку оптимального маршруту і т.д. Переважна більшість таких систем основана на системі глобального супутникового позиціювання (GPS). Однак така система має істотний недолік - неможливість роботи в зоні невпевненого прийому сигналу із супутників, в умовах мегаполіса, в тунелях, підземних гаражах і т.д. Іноді виявляється, що точність визначення і відстеження координат з використанням GPS недостатня для роботи системи в цілому.

У даних ситуаціях знаходять застосування гіроскопічні датчики (мікроелектромеханічні гіроскопи та акселерометри), які дозволяють відстежити швидкість і напрямок переміщення об'єкта без участі супутникових систем.

Мікроелектромеханічні елементи (гіроскоп, акселерометр та ін.) - перспективні прилади сучасної мікросистемної техніки, які інтенсивно і динамічно розвивається в науково-технічному спрямуванні, створення яких ознаменувала революційний процес у сучасній інерціальній технології. Мікроелектромеханічні гіроскопи характеризуються унікально малими масою і габаритами, низьким споживанням електроенергії, можливістю функціонування в жорстких умовах експлуатації та на кілька порядків меншою вартістю, ніж їхні традиційні аналоги. Застосування мікроелектромеханічних систем дозволяє вирішувати проблему кардинального вдосконалення існуючих і створення принципово нових систем стабілізації, орієнтації, навігації та управління об'єктами різного призначення, забезпечує суттєве поліпшення їх технічних характеристик. Використання мікроелектромеханічних гіроскопів і акселерометрів дозволяє створювати малогабаритні системи орієнтації та навігації низької вартості для суден, літальних апаратів різного призначення, мобільних роботів, автомобілів.

Метою роботи розробка та дослідження системи визначення кутового відхилення шляхом моделювання і фізичного експерименту.

Завдання роботи формулюються виходячи з мети роботи:

- дослідження існуючих систем визначення кутового відхилення;
- вивчення проблем при розробці систем визначення координат місцеположення об'єкта та шляхи усунення виникаючих похибок;
- моделювання системи обробки даних і визначення місцеположення об'єкта за допомогою систем автоматизованого проектування;
- перевірка результатів моделювання;
- комплексний аналіз результатів.

Об'єктом дослідження є системи визначення місцеположення об'єкта на базі мікроелектромеханічних гіроскопів та акселерометрів.

Предметом дослідження є сигнали кутового відхилення, які отримані в результаті роботи системи визначення місцеположення шляхом моделювання та експериментальним шляхом.

Наукова новизна отриманих результатів полягає в наступному:

- розглянуто особливості спільного використання мікроелектромеханічного гіроскопа та акселерометра при побудові електронних систем визначення кута (місцеположення об'єкта);
- побудована та проаналізована модель обробки даних, що дозволяє коригувати, фільтрувати, комбінувати спільний результат роботи двох мікроелектромеханічних елементів з метою досягнення найкращих результатів;
- побудована та проаналізована модель системи відстеження параметрів відхилення рухомого об'єкта з урахуванням даних, отриманих на попередньому кроці (в попередній моделі). Ця модель дозволяє відстежувати характер руху об'єкта залежно від швидкості (прискорення) та траєкторії.

Практичне значення отриманих результатів полягає в тому, що отриманні результати можуть бути використані для підвищення ефективності навігаційних систем, що працюють без зв'язку із супутниками.

Структура та об'єм роботи. Кваліфікаційна робота складається з вступу, трьох розділів і висновків. Загальний обсяг роботи – 99 сторінок, вміщує 61 рисунок та 22 найменування використаних бібліографічних джерел.

1 ПЕРШИЙ РОЗДІЛ

ОГЛЯД ПРИСТРОЇВ ТА СИСТЕМ ДЛЯ ВИЗНАЧЕННЯ ОБ'ЄКТА

1.1 Передумови появи мікроелектромеханічних систем

Мікроелектромеханічні системи (MEMS) є результатом однієї з найбільш передових технологій, що дозволяє не тільки значно поліпшити характеристики електронної апаратури, але й створювати пристрої для вирішення завдань в зовсім нових галузях. MEMS-пристрої являють собою електронні схеми, механічні вузли та чутливі елементи, виконані у вигляді одного компонента з використанням технологічних прийомів, які застосовуються для виробництва мікросхем.

Мікроелектромеханічні системи фактично еволюціонували паралельно з напівпровідниковою технологією. У другій половині 40-х років минулого століття вже була відкрита основа ключових технологічних процесів для створення MEMS-пристроїв та сучасних напівпровідникових приладів - анізотропне травлення кремнію. У сучасній MEMS-технології цей прийом дозволяє отримувати «від'єднані» від підкладки (напівпровідникового кристалу, на якому реалізується пристрій) мікродеталі за рахунок попереднього формування та наступного видалення травленням спеціальних «жертвних» шарів. Сьогодні за допомогою анізотропного травлення можна, наприклад, єдиними технологічними прийомами створити на кристалі мікросхеми нерухомих вал з надітою на нього шестерней, яка вільно обертається.

Друга найважливіша передумова появи мікроелектромеханічних систем виникла буквально через кілька років після розробки техніки анізотропного травлення: 1 квітня 1954 р. в журналі Physical Review доктор Чарльз С. Сміт опублікував статтю з результатами своїх, більш ніж річної давності, досліджень п'езорезистивного ефекту в напівпровідниках - германії та кремнії. Вчений відкрив, що зміна електричного опору кристалів цих напівпровідни-

ків при докладанні механічного навантаження до них може бути в кілька десятків разів більшим, ніж, наприклад, для металів. Звісно, відкриття Сміта не залишилося непоміченим і всього через чотири роки після публікації вже декілька компаній серійно випускали напівпровідникові тензодатчики. З 1958 р. починається перший етап мікроелектромеханічної гонки, який закінчується в 1971 р., коли в університеті Case Western Reserve був виготовлений фактично перший повністю завершений твердотільний MEMS - датчик тиску з цифровим виходом. У цій мікросхемі анізотропним травленням був створений від'єднаний від підкладки (основи) приймач тиску - кремнієва діафрагма з резистивних датчиком і на тому ж кристалі реалізовані всі необхідні для перетворення струму через датчик у частоту імпульсного сигналу електронні схеми. Таке об'єднання - датчика (або виконавчого механізму - актуатора, або одночасно датчика та актуатора) та керуючої-обробної електроніки в пристрої, яке випускається за один технологічний цикл, і стало, мабуть, найважливішою особливістю мікроелектромеханічної системи. Перша мікроелектромеханічна система виявилася занадто чутливою та підданою дії всіляких перешкод, що стимулювало подальші дослідження і в решті решт створення мікроелектромеханічних систем, датчики яких ґрунтуються на інших фізичних принципах.

Однак технологічні передумови - це далеко не завжди найголовніше. Головною ідеологічною передумовою мікроелектромеханічних систем вважаються слова великого фізика Річарда Фейнман «Більш ніж достатньо місця за межею», сказані ним в Каліфорнійському технологічному інституті на щорічних зборах Американського фізичного товариства в кінці 1959 року. Варто сказати про те, що поширений переклад назви («There's Plenty of Room at the Bottom») цього опублікованого в 1960 р. короткого виступу не враховує контекстної семантики слова "bottom", підкресленої в першому ж реченні, де Фейнман говорить про відсутність межі, обмеження для фізиків-експериментаторів, які домагаються надвисоких тисків або сверхчистого вакууму (як епітет, що підкреслює це, він використовує слово bottomless). «Ви-

зьмемо якусь машину, - говорить Фейнман, - наприклад автомобіль, і задамося питанням, що заважає нам створити нескінченно малу її копію? Припустимо, конструкція якогось реального автомобіля вимагає певної точності виготовлення його деталей, наприклад 0,0004 дюйма (близько 0,01 мм) ... Якщо ми можемо відобразити таку точність виготовлення (0,0004 дюйми) в, скажімо, точність на рівні 10 атомів, це дозволить зменшити габарити автомобіля в 4000 раз і зробити його працездатну копію довжиною приблизно 1 мм. Очевидно, що якщо ви створите таку конструкцію машини, яка буде менш чутлива до точності деталей (що, загалом, не є невиконаним завданням), ви отримаєте можливість зробити ще меншу копію (при тій же точності копіювання)». Ці слова Фейнмана повністю визначають два основні шляхи розвитку мікроелектромеханічних систем - зниження похибки виготовлення окремих мікродеталей за рахунок вдосконалення технології виробництва та створення заснованих на зовсім інших (у порівнянні з макроаналогами) фізичних принципах деталей.

В історії розвитку MEMS-технології, на думку провідних сучасних фахівців, можна виділити чотири вже пройдених етапи. На першому нетривалому етапі - дослідницькому (з середини 50-х до початку 60-х років минулого століття) - основні зусилля до формування вигляду майбутньої технології доклали як наукові підрозділи великих компаній (у першу чергу знаменита Bell Laboratories), так і, власне, промислові компанії і академічна наука. Специфіка цього періоду полягає в тому, що головна увага приділялася затребуваним у часи холодної війни технологіями подвійного призначення, перш за все створення точних і дешевих датчиків різних типів (проекування перспективних реактивних бойових літаків, наприклад, вимагало проведення значного числа експериментів), придатних до масового виробництва. Не дивно, що другий етап розвитку технології пов'язують виключно з потужними промисловими (чи точніше - з військово-промисловими) компаніями: знамениті Fairchild, Westinghouse, Honeywell поспішали комерціалізувати перші експериментальні напрацювання. На комерціалізацію пішли довгі 10 років - і тіль-

ки до початку сімдесятих років академічна наука стала отримувати цільове фінансування від промисловості для вирішення завдань скорочення вартості та розширення областей застосування MEMS-пристроїв. Ще через десять років цей етап був подоланий. З кінця дев'яностих років минулого століття триває, можна сказати, мікромеханічна епоха. І при цьому навіть спокушеним користувачам hi-tech-пристроїв про неї практично нічого не відомо [1].

1.2 Матеріали для виготовлення та переваги застосування мікроелектромеханічних систем

При створенні мікроелектромеханічних систем використовується величезна кількість різноманітних матеріалів. Їх можна розділити на дві групи. Першу групу складають конструкційні (композиційні) матеріали, які виконують функції несучих конструкцій для механічних рухомих частин, опор, струмовідводів або змазки. До неї входять: скло, деякі види пластику, монокристалічний кремній, полікристалічний кремній, пористий кремній, діоксид та нітрид кремнію, поліамід, вольфрам, нікель, мідь, золото та вуглець.

Для тривалого функціонування мікроелектромеханічних машин в агресивних середовищах безсумнівний інтерес представляє композиція «карбід кремнію на нітриду алюмінію», де карбід кремнію є відмінним напівпровідником, а нітрид алюмінію - діелектриком з п'єзоелектричними властивостями. До того ж, обидва матеріали оптично активні, в тому числі в ультрафіолетової області спектра, мають високу теплопровідність і температуру Дебая, що характеризує стійкість матеріалу до зовнішніх впливів (термічних, хімічних, радіаційних).

Другу групу утворюють так звані активні або «інтелектуальні» матеріали, які виконують в мікроелектромеханічних системах функції джерел руху, механізмів передачі руху, сенсорних і активних середовищ, геометричної та об'ємної пам'яті, і виконують ці функції за рахунок електростатичних, електромеханічних, п'єзоелектричних, магнітних та оптичних явищ і сил. До цих

«розумних» матеріалів можна віднести різні сплави титану та нікелю, окис цинку, кварц, п'єзокераміку. Як згадувалося вище, мікроелектромеханічні системи виготовляються за допомогою тих же технологічних прийомів, що й інтегральні мікросхеми (ІМС), тому мікроелектромеханічні системи успадковують більшість переваг ІМС у порівнянні зі схемами з дискретних компонентів. До даних достоїнств додаються й ті, які викликані можливістю інтеграції електроніки з механічними, оптичними та іншими вузлами. Основними перевагами технології мікроелектромеханічних систем є:

Малий розкид параметрів у межах виробу. Виготовлення компонентів в єдиному технологічному циклі дозволяє отримувати практично однакові параметри у однакових компонентів. При цьому значно спрощується завдання компенсації технологічного розкиду параметрів схемотехнічними або конструкторськими методами.

Висока технологічність і повторюваність. При виготовленні мікроелектромеханічних систем в основному застосовуються добре відпрацьовані і керовані технологічні процеси, що дозволяє отримувати вироби з бажаними характеристиками. Відсутність складальних операцій підвищує технологічність складних систем і збільшує гнучкість конструювання пристроїв, побудованих на основі MEMS.

Мініатюрність. Застосування технології мікросхем дозволяє отримувати мікромеханічні та оптичні вузли значно менших розмірів, ніж це можливо за традиційними технологіями.

Висока функціональність. Мініатюрність виробу і можливість виготовлення датчиків, обробляючих схем та виконавчих механізмів в одному пристрої дозволяє створювати закінчені системи досить великої складності в одному корпусі, порівнянному за розмірами з ІМС. Це відкриває широкі можливості перед розробниками кінцевих пристроїв, оскільки дозволяє виконувати розробку на основі готових рішень не в обмеженій електронній частині пристрою, а на рівні закінчених функціональних модулів.

Поліпшені характеристики функціонування. Електронна частина а також електричні канали зв'язку з датчиками і механізмами, які виконані за інтегральною технологією мають малі розміри дозволяють поліпшити такі характеристики, як робочі частоти, електромагнітну сумісність, співвідношення сигнал / шум і т.п. Застосування механічно керованої оптики дозволяє використовувати мікроелектромеханічні системи для обробки оптичних сигналів без перетворення сигналу з оптичного в електричний і навпаки. Висока точність і повторюваність чутливих елементів і їх інтегральне виготовлення разом з оброблювальною схемою дозволяє значно підвищити точність вимірів. Також повторюваність і точність виконання механічних компонентів покращує їх характеристики.

Висока надійність і стійкість до зовнішніх впливів. Факторів, які призводять до підвищення надійності та стійкості до зовнішніх впливів виробів при застосуванні мікроелектромеханічних систем, досить багато, і вони залежать від конкретного типу виробу та його застосування. Як і для мікросхем, надійність мікроелектромеханічних систем вище, ніж надійність аналогічних систем, зібраних з дискретних компонентів завдяки інтегральній технології. Механічні вузли мікроелектромеханічних систем в умовах вібрацій і ударів, як правило, працюють краще завдяки малим розмірам і масі, а також завдяки тому факту, що механічні вузли розташовані в корпусі, амортизованому завдяки виводам і конструкції напівпровідника. Також більшою надійністю та довговічністю володіють оптичні системи, оскільки вони розташовуються в герметичному корпусі малих розмірів, і вплив середовища на оптичні поверхні мінімальний.

Низька вартість. Як і для ІМС, вартість пристроїв на основі мікроелектромеханічних систем значно нижче, ніж пристроїв, побудованих без застосування інтегральної технології, що відбувається в першу чергу завдяки високій технологічності та можливості конструювання на основі функціонально закінчених компонентів, які випускаються серійно. Застосування мікроелектромеханічних систем зменшує вартість як механічної, так і електронної

частин пристрою, оскільки оброблююча електроніка інтегрована в MEMS-компонент, що дозволяє уникнути додаткових з'єднань і, в деяких випадках, узгоджуваних схем. Слід зазначити, що виграш у вартості кінцевого виробу при застосуванні мікроелектромеханічних систем у великій мірі залежить від серійності самого виробу і компонентів мікроелектромеханічних систем, які в нього входять. Як і ІМС, технологія мікроелектромеханічних систем вимагає досить складного і дорогого обладнання та виправдовує себе при достатніх обсягах випуску.

Основні переваги мікроелектромеханічних систем визначили області застосування, в яких вони до цього часу отримали найбільш широке поширення. Це ті області, в яких потрібні або прості, але мініатюрні і повторювані вироби при досить великих обсягах випуску та обмеження на вартість кінцевого виробу, або складні спеціалізовані високоточні, свехмікромініатюрні і високонадійні вироби: автомобільна електроніка, мобільні телефони і мініатюрні побутові пристрої, ноутбуки, телекомунікаційні пристрої, а також військова, медична, наукова та інша спеціалізована техніка.

1.3 Конструкція та принцип дії мікроелектромеханічного гіроскопа

Гіроскоп (від гіро ... і ... скоп), тверде тіло, яке швидко обертається, вісь обертання якого може змінювати свій напрям у просторі. Гіроскоп володіє рядом цікавих властивостей, спостережуваних у обертальних небесних тіл, у артилерійських снарядів, у дитячого вовчка, у роторів турбін, встановлених на судах та ін. На властивостях гіроскопа засновані різноманітні пристрої або прилади, які широко застосовуються в сучасній техніці для автоматичного керування рухом літаків, морських суден, ракет, торпед та інших об'єктів, для визначення горизонту або географічного меридіана, для вимірювання поступальних або кутових швидкостей рухомих об'єктів (наприклад, ракет) та ін.

Властивості гіроскопа проявляються при виконанні двох умов:

1) вісь обертання гіроскопа повинна мати можливість змінювати свій напрям в просторі;

2) кутова швидкість обертання гіроскопів навколо своєї вісі повинна бути набагато більше в порівнянні з тією кутовою швидкістю, яку буде мати сама вісь при зміні свого напрямку.

Найпростішим гіроскопом є дитячий вовчок, який швидко обертається навколо своєї вісі OA (рисунок 1.1); вісь OA може змінювати своє положення в просторі, оскільки її кінець A не закріплений. У гіроскопів, які застосовуються в техніці, вільний поворот вісі можна забезпечити, закріпивши її в рамках (кільцях) 1 і 2 так званого карданового підвісу (рисунок 1.2), який дозволяє вісі AB зайняти будь-яке положення в просторі. Такий гіроскоп має три ступеня свободи: він може здійснювати три незалежних поворотів навколо вісей AB , DE і GK , що перетинаються в центрі підвісу O , який залишається по відношенню до основи нерухомим. Якщо центр ваги гіроскопа збігається з центром O , то гіроскоп називається астатичним (врівноваженим), в іншому випадку - важким.



Рисунок 1.1 - Вовчок (OA – вісь вовчка, P - сила тяжіння)

Перша властивість урівноваженого гіроскопа з трьома ступенями свободи полягає в тому, що його вісь прагне стійко зберігати у світовому просторі завданий початковий напрямок. Якщо ця вісь спочатку спрямована на якусь зірку, то при будь-яких переміщеннях підстави приладу та випадкових поштовхах вона буде продовжувати вказувати на цю зірку, змінюючи свою орієнтування щодо земних осей. Вперше цю властивість гіроскопа викорис-

товував французький вчений Л. Фуко для експериментального доказу обертання Землі навколо її вісі (1852 рік). Звідси і сама назва «гіроскоп», що в перекладі означає «спостерігати обертання».

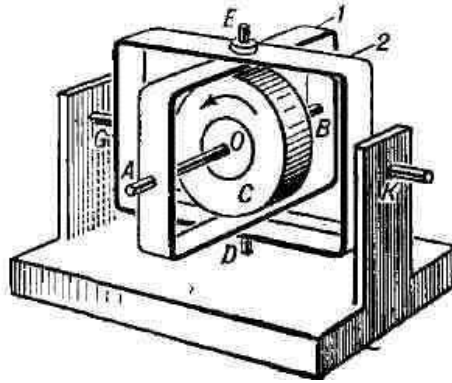


Рисунок 1.2 - Гіроскоп в кардановом підвісі

Друга властивість гіроскопа виявляється, коли на його вісь (або рамку) починають діяти сила або пара сил, які прагнуть привести вісь в рух (тобто створюють обертовий момент щодо центру підвісу). Під дією сили P (рисунок 1.3) кінець A вісі AB гіроскопа буде відхилитися не в сторону дії сили, як це було б при роторі, який не обертається, а в напрямку, який перпендикулярний до цієї сили. В результаті гіроскоп разом з рамкою 1 почне обертатися навколо вісі DE , притому не прискорено, а з постійною кутовою швидкістю. Це обертання називається прецесією; воно відбувається тим повільніше, чим швидше обертається навколо своєї вісі AB сам гіроскоп. Якщо в якийсь момент часу дія сили припиниться, то одночасно припиниться прецесія і вісь AB миттєво зупиниться, тобто прецесійний рух гіроскопа безінерційний.

Ротор C , окрім обертання навколо своєї вісі AB , може разом з рамкою 1 обертатися навколо вісі DE і разом з рамкою 2 - навколо вісі GK ; отже, вісь ротора може зайняти будь-яке положення в просторі. O - центр підвісу, який співпадає з центром тяжіння гіроскопа.

Величина кутовий швидкості прецесії визначається за формулою:

$$\omega = \frac{M}{I \cdot \Omega \cdot \sin \alpha} \quad \text{або} \quad \omega = \frac{P \cdot h}{I \cdot \Omega}, \quad (1.1)$$

де M - момент сили P відносно центру O , Ω -кутова швидкість власного обертання гіроскопа навколо вісі AB , I - момент інерції гіроскопа щодо тієї ж вісі, $h = AO$ - відстань від точки дії сили до центру підвісу гіроскопа; друга рівність має місце, коли сила P діє паралельно вісі DE . З формули (1.1) безпосередньо видно, що прецесія відбувається тим повільніше, чим більше Ω , точніше, чим більше величина $H = I\Omega$ (власний кінетичний момент гіроскопа). Поряд з прецесією вісь гіроскопа при дії на неї сили може ще здійснювати нутацію - невеликі, але швидкі (зазвичай непомітні на око) коливання вісі близько її середнього напрямку. Розмахи цих коливань у швидко обертового гіроскопа дуже малі та внаслідок неминучої наявності опорів швидко загасають. Це дозволяє при вирішенні більшості технічних завдань знехтувати нутацією і побудувати так звану елементарну теорію гіроскопів, що враховує тільки прецесію, швидкість якої визначається формулою (1.1).

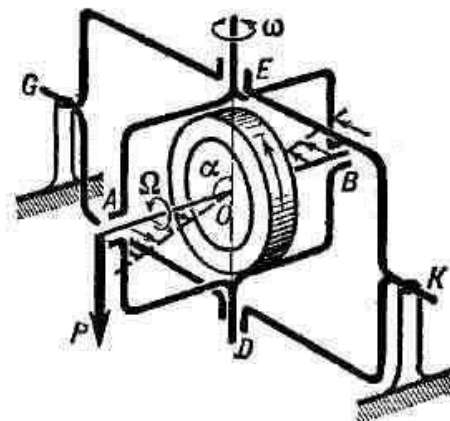


Рисунок 1.3 - Дія сили P на гіроскоп з ротором, який обертається (вісь AB рухається перпендикулярно напрямку P)

Теорія гіроскопів є найважливішим розділом динаміки твердого тіла, яке має нерухому точку. Перераховані властивості гіроскопа являють собою наслідки законів, яким підпорядковується рух такого тіла. Перша з властивостей гіроскопа з трьома ступенями свободи є прояв закону збереження кінетичного моменту, а друга властивість - прояв однієї з теорем динаміки, відповідно до якої зміна в часі кінетичного моменту тіла дорівнює моменту сили, що діє на нього [2].

Мікроелектромеханічні гіроскопи (МЕМГ) - перспективні прилади сучасної мікросистемної техніки, які інтенсивно і динамічно розвиваються в науково-технічному спрямуванні. Створення МЕМГ ознаменувала революційний процес у сучасній інерціальній технології. МЕМГ характеризуються унікально малими масою і габаритами, низьким споживанням електроенергії, можливістю функціонування в жорстких умовах експлуатації і меншою вартістю, в порівнянні з традиційними аналогами. МЕМГ знаходять застосування у багатьох галузях науки і техніки. Застосування МЕМГ дозволяє вирішувати проблему кардинального вдосконалення існуючих і створення принципово нових систем стабілізації, орієнтації, навігації та управління об'єктами різного призначення, забезпечує суттєве поліпшення їх технічних характеристик. Використання МЕМГ дозволяє створювати малогабаритні системи орієнтації та навігації невисокій вартості для суден, літальних апаратів різного призначення, мобільних роботів, автомобілів.

Дослідження та розробки МЕМГ проводяться багатьма зарубіжними фірмами та вітчизняними науковими центрами, підприємствами та університетами. При створенні промислових зразків МЕМГ вирішуються багато теоретичних, схемотехнічних і конструкторсько-технологічних проблем. До теперішнього часу вирішені основні питання принципів побудови МЕМГ, створені експериментальні зразки МЕМГ, освоєно серійний випуск МЕМГ рядом зарубіжних фірм і на перший план виступає проблема підвищення точності МЕМГ і створення приборів навігаційного класу точності [3]. Підвищення точності МЕМГ дозволить використовувати їх у нових галузях цивільної та військової техніки, зокрема для забезпечення навігації та управління малими рухомими об'єктами. Прикладами таких об'єктів є безпілотні літальні апарати або «інтелектуальні снаряди» [4].

Практично всі MEMS-гіроскопи є вібраційні. Це означає, що в кожному з них є робоче тіло, яке, в простому випадку, здійснює зворотно-поступальний рух в одній площині. Якщо поставити це тіло на обертальну платформу, площина якої збігається з площиною коливань, то на масу, яка

коливається, почне діяти сила Коріоліса $F_c = 2m\Omega v \sin \varphi$, де Ω - вектор кутової швидкості (перпендикулярний площині обертання); v - вектор лінійної швидкості тіла відносно платформи, яка обертається; m - маса тіла; φ - кут між векторами лінійної та кутової швидкості. Отже, сила Коріоліса спрямована перпендикулярно напрямку коливань (рисунок 1.4) та осі обертання. При протилежних напрямках руху сила Коріоліса також діє в протилежних напрямках. На цьому і заснований принцип вібраційного гіроскопа.

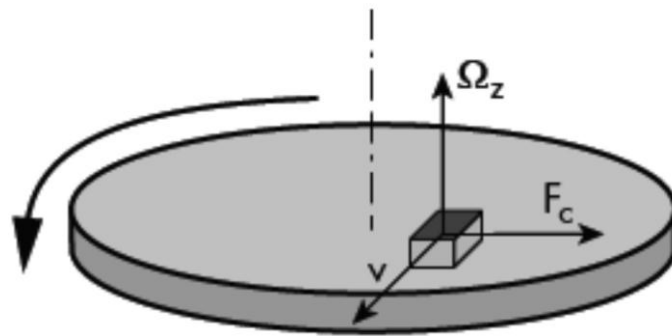


Рисунок 1.4 - Принцип дії вібраційного гіроскопа

Визначивши силу Коріоліса і знаючи лінійну швидкість тіла, нескладно визначити кутову швидкість і її зміну (кутове прискорення). Задача спрощується, якщо лінійна швидкість коливань v змінюється за синусоїдальним законом $v = v_0 \cdot \sin \omega t$. Тоді визначення прискорення Коріоліса зводиться до детектування сигналу Ω , який модулює несучу з частотою ω : $a_c = 2v_0\Omega \sin \omega t$. Ця задача давно й успішно вирішується в радіотехніці, зокрема, за допомогою квадратурних модуляторів/демодуляторів.

У MEMS-гіроскопах напрямки коливань - як первинних, так і спричинених прискоренням Коріоліса, - лежать в площині підкладки. Значних успіхів цій області досягла компанія Analog Devices, якій вдалося створити технологію інтегрованих MEMS та на її основі виробляти гіроскопи серій ADXRS і ADIS.

Основний елемент гіроскопа - це закріплена на гнучких підвісках рамка, всередині якої здійснює поступально - коливальний рух певна маса (рисунок 1.5). Для визначеності припустимо, що коливання відбуваються вздовж вісі X. Підвіс рамки допускає її коливання тільки вздовж вісі Y. Коливання маси збуджуються електростатично, за допомогою зубців.

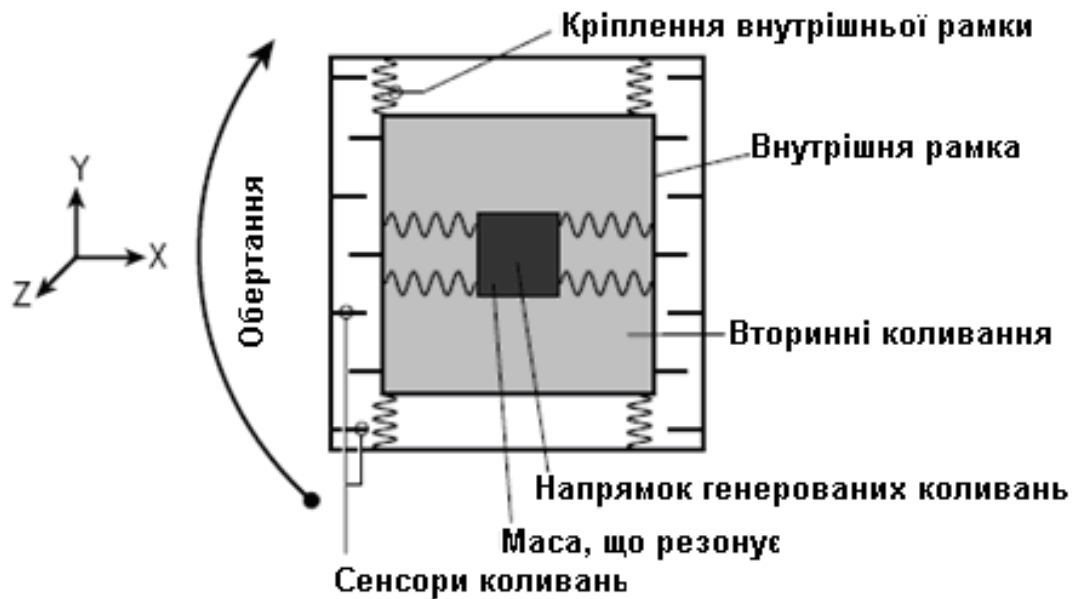


Рисунок 1.5 - Принцип роботи вібраційного гіроскопа за технологією MEMS

На зовнішній поверхні рамки та на її основі розташовані зубчасті контакти, що утворюють систему плоских конденсаторів. При коливаннях рамки щодо підкладки (основи) відстані між цими зубцями змінюються, відповідно змінюється і ємність. Коли підкладка нерухома (або рухається прямолінійно і рівномірно) - рамка не коливається. Якщо ж почати обертати таку структуру навколо вісі Z, то під дією сили Коріоліса виникнуть вимушені коливання рамки вздовж вісі Y [5].

Гіроскоп ADXRS являє собою інтегральну мікросхему; він виконаний на одному кристалі кремнію і включає в себе всі необхідні електронні схеми формування сигналу. На рисунку 1.6 представлена технологічна структура гіроскопа.

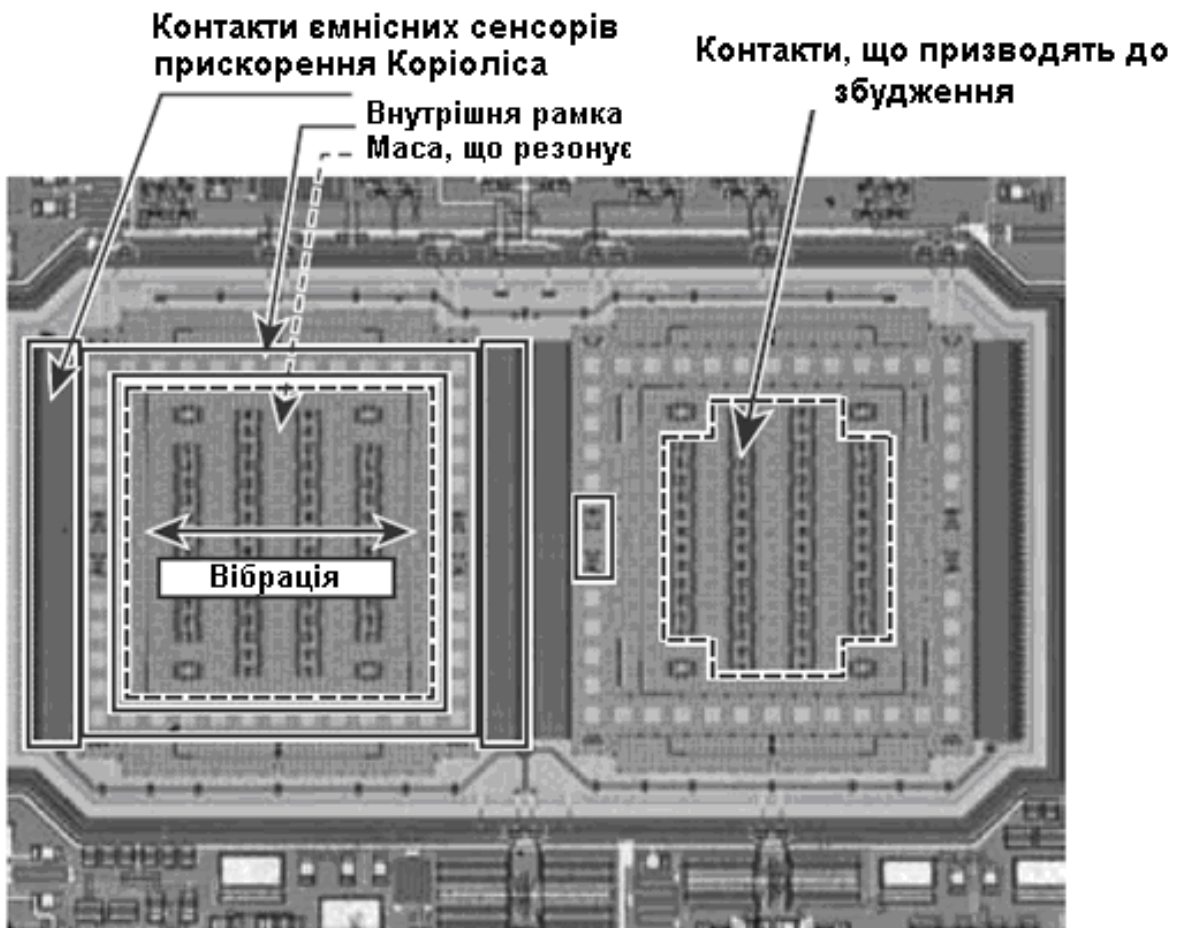


Рисунок 1.6 – Зовнішній вигляд кристалу мікроелектромеханічного гіроскопа при великому збільшенні

Дві мікромеханічні структури з полікристалічного кремнію забезпечені спеціальними збудливими рамками, які за допомогою електричного сигналу наводяться в резонанс. Коливання мікромеханічних елементів мають досить високу частоту і амплітуду, щоб при кутовому обертанні приладу сила Коріоліса, що діє на ці елементи, досягала помітної величини. По краях кожної рамки, що коливаються, перпендикулярно напрямку коливань, розташовані рухливі зубці, які чергуються з нерухомими зубцями (фіксованими на кремнієвій підкладці); таким чином, утворюється структура, ємність якої змінюється у відповідності з величиною сили Коріоліса.

Отриманий з ємнісного датчика високочастотний сигнал надходить на каскади посилення та демодуляції, в підсумку на виході мікросхеми отримується сигнал напруги, пропорційний кутовій швидкості (рисунок 1.7). Мак-

симальна швидкість обертання, яка фіксується, (тобто динамічний діапазон датчика кутової швидкості) становить у гіроскопів ADXRS150 і ADXRS300 відповідно 150 град/с і 300 град/с.

Наявність всередині мікросхеми двох перпендикулярно розташованих однотипних датчиків дозволяє уникнути впливу на вихідний сигнал гіроскопів вібрації і прискорення. Схеми формування сигналу, розташовані на цьому ж кристалі, дозволяють зберегти якість сигналу в умовах "шумового" оточення (електромагнітних перешкод, шумів цифрових схем і т.д.).

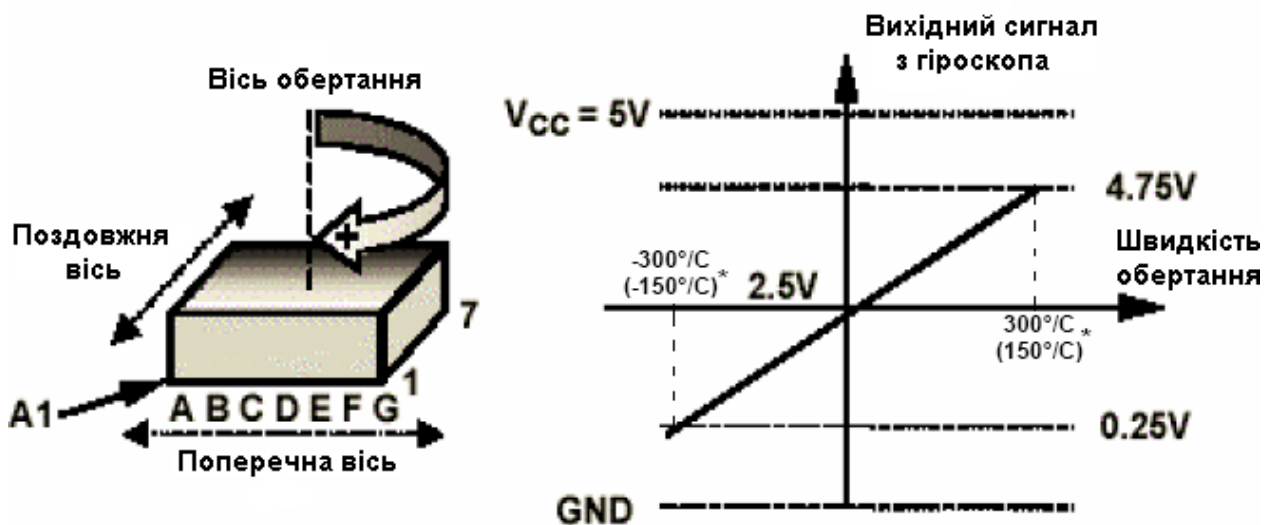


Рисунок 7 - Сигнал кутової швидкості на виході мікроелектромеханічного гіроскопа

Для схеми збудження чутливих елементів потрібна напруга живлення 14-16 В. Так як на мікросхему подається напруга +5 В, для одержання більш високої напруги живлення на кристалі є схема «зарядового насоса» з конденсаторами, які перемикаються. Якщо є зовнішня напруга живлення величиною 14-16 В, то можна використовувати його, і при цьому позбутися необхідності підключення декількох додаткових зовнішніх конденсаторів [6].

На рисунку 1.8 представлена структурна схема мікроелектромеханічного гіроскопа із зовнішніми елементами.

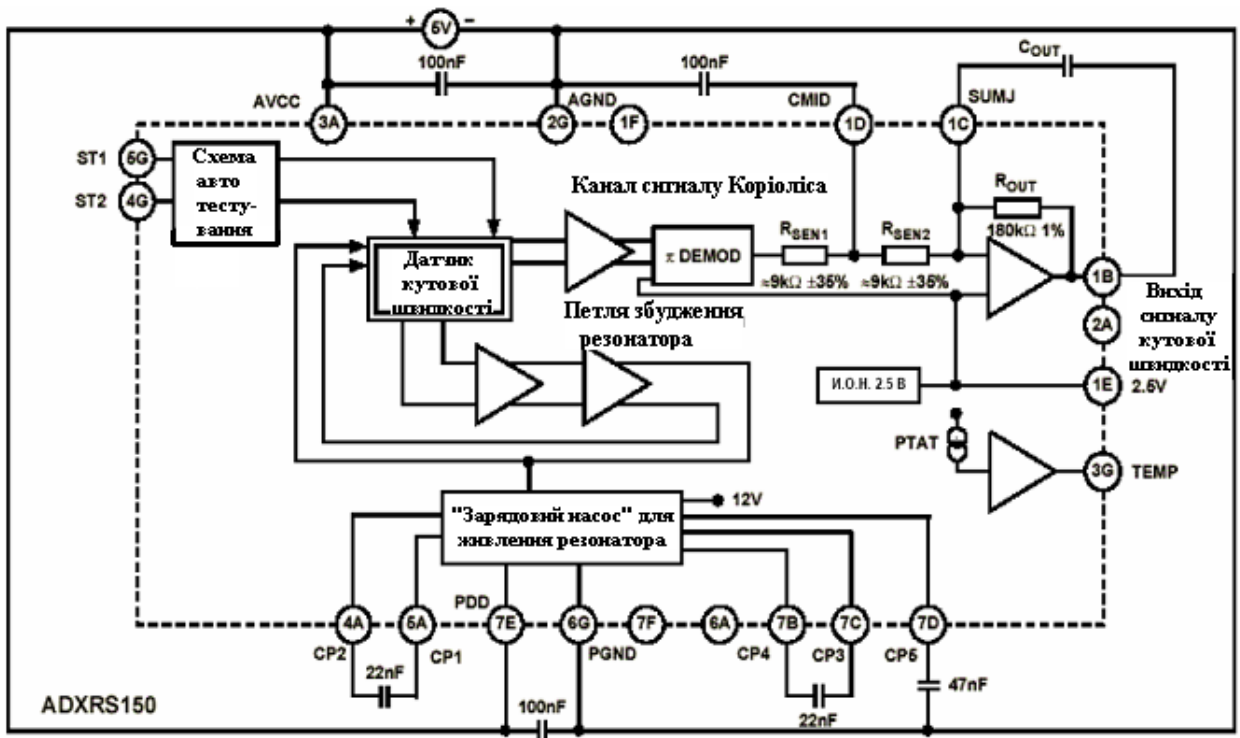


Рисунок 1.8 – Структурна схема мікроелектромеханічного гіроскопа із зовнішніми елементами

На рисунку 1.9 представлена послідовність об’єктів та параметрів при отриманні даних, а саме величини зміни кута.

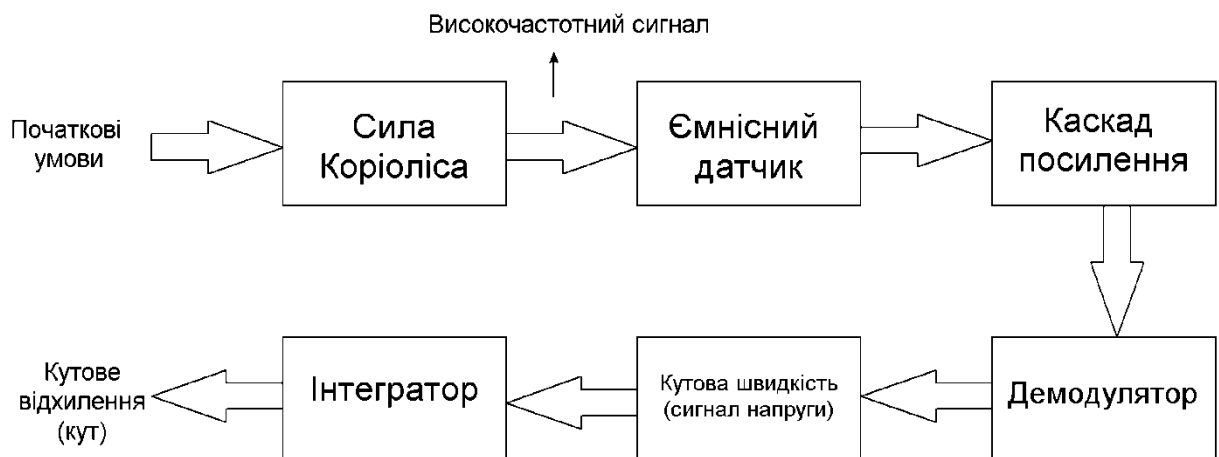


Рисунок 1.9 - Структурна схема послідовності об’єктів та параметрів при отриманні значення кутового відхилення

1.4 Конструкція та принцип дії мікроелектромеханічного акселерометра

Спільно з гіроскопами в системах визначення кутового положення використовуються акселерометри - прилади для вимірювання прискорень і перевантажень. Гіроскоп забезпечує точну оцінку кутового положення в динаміці, а акселерометр - у статиці. Тому, для отримання більш якісного сигналу кутового відхилення можливо спроектувати систему визначення координат місця розташування об'єкта, яка обробляє дані з акселерометра в статиці і з гіроскопів в динаміці. Розглянемо конструкцію і принцип дії акселерометра.

Акселерометр (від лат. *Accelero* - прискорює і *metreo* - вимірюємо) - прилад, яким вимірюють прискорення або перевантаження, що виникають під час випробування різних машин та їхніх систем. Одно- та багатовісні моделі можуть визначати величину та напрям прискорення у вигляді векторної величини і тому можуть бути використані для визначення орієнтації, вібрації й ударів. На рисунку 1.10 приведена структура найпростішого акселерометра.

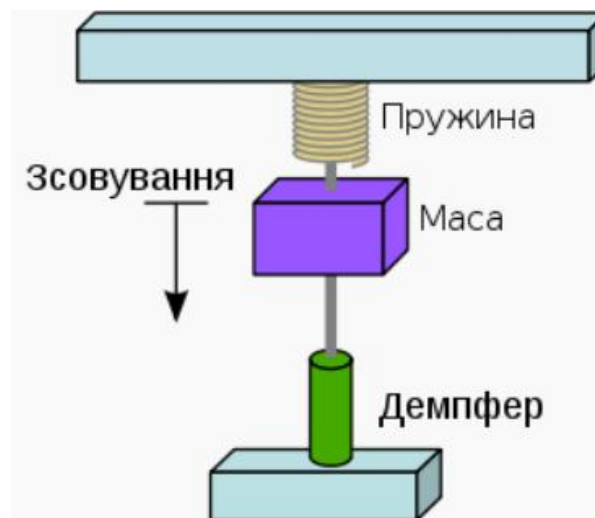


Рисунок 1.10 - Структура найпростішого акселерометра

Акселерометр може застосовуватися як для вимірювання проєкцій абсолютного лінійного прискорення, так і для непрямих вимірювань проєкції гравітаційного прискорення. Акселерометри входять до складу інерційних навігаційних систем, де отримані з їх допомогою вимірювання обробляють, отримуючи інерційну швидкість і координати носія.

В останні роки технологічний рівень мікромеханічних акселерометрів значно виріс. Нові інтегральні акселерометри, як правило, створюються на одному кристалі. Це означає розміщення на одному кристалі як сенсорних елементів, що є чутливими у напрямках трьох вимірювальних осей, так і обробних пристроїв, і забезпечує виконання однієї ІС функцій датчика та електричної схеми обробки сигналу, для якої необхідно лише декілька зовнішніх дискретних компонентів. MEMS-акселерометри з інтегрованою електронікою забезпечують функції самотестування, калібрування, програмування.

Існують різні фізичні принципи та схеми детектування, які успішно застосовуються для створення акселерометрів: п'єзоелектричні, пьезорезистивні, ємнісні, електромагнітні, магнітні (ефекту Холла, магніторезистори і т. п.), резонансні і конвекційні (теплові акселерометра Memsic).

Розроблено безліч альтернативних технологій акселерометра - індуктивні, магнітострикційні, пристрої на поверхневих акустичних хвилях, оптичні, тунельні [9-12].

Багато нових технологій підходять для створення однокришталевих мікромеханічних структур і інтегральних мікромеханічних акселерометрів з готовим виходом (під мікромеханічними розуміються структури, які здійснюють мікропереміщення - порядку мкм і менше).

На сучасному ринку інерційного зчитування найбільше поширення отримали ємнісні MEMS-акселерометри - датчики прискорення, які засновані на ємнісному перетворенні мікропереміщень інерційної маси. Причини їх комерційного успіху - простота сенсорного елемента, відсутність необхідності в матеріалах із спеціальними властивостями, висока чутливість, мале енергоспоживання, хороша температурна стабільність, поліпшені шумові характеристики, малий дрейф і низька ціна.

Ємнісні датчики використовуються для вирішення широкого кола завдань - цей тип пристроїв дозволяє визначати положення, переміщення, прискорення і багато інших параметрів. Застосування ємнісної технології в електроніці асоціюється саме з акселерометрами, які отримали найбільш широке

розповсюдження завдяки їх високій чутливості, стабільності при детектуванні статичного прискорення, малого дрейфу, низькою температурної чутливості, малою споживаною потужністю, високій надійності, гарним шумові властивостям, точності, низької ціні. На рисунку 1.11 представлена фізична модель вимірювальної структури акселерометра з ємнісним датчиком.

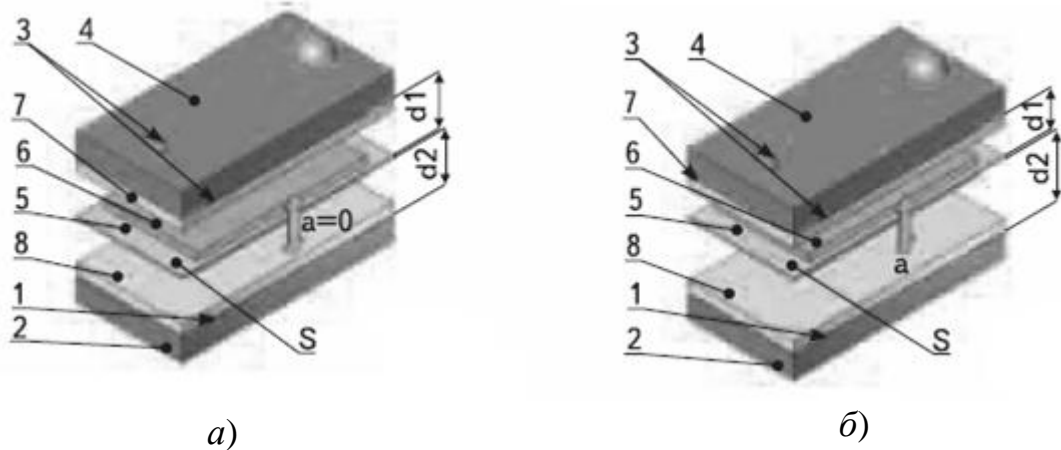


Рисунок 1.11 - Фізична модель вимірювальної структури:

a) акселерометр у стані спокою; *б)* акселерометр під дією прискорення a ; 1,3 - нерухомі металеві обкладки; 2,4 - зафіксовані друковані плати; 5 - рухома обкладка; 6 - інерційна маса (метал або діелектрик); 7,8 - шари діелектрика; S - фіксована площа перекриття обкладинок; d_1 , d_2 - змінні відстані між обкладинками.

На рисунку 1.12 представлена еквівалентна електрична схема акселерометра.

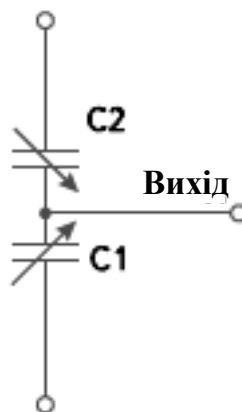


Рисунок 1.12 - Еквівалентна електрична схема

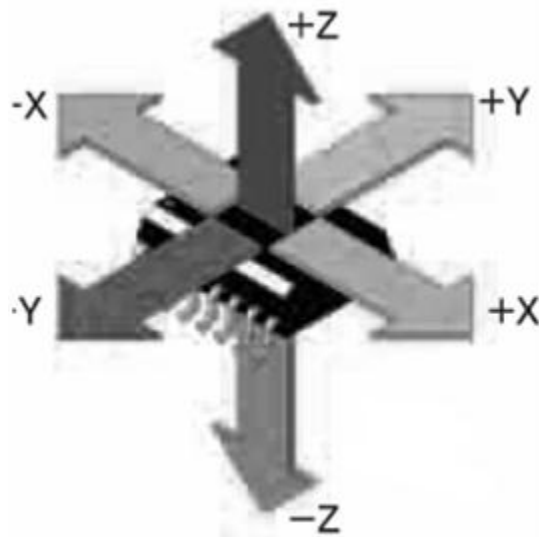


Рисунок 1.13 - Розміщення вимірювальних вісей та ступенів свободи щодо корпусу інтегральної мікросхеми.

У порівнянні з п'єзоелектричними датчиками, яким потрібні тільки спеціальні матеріали і динамічний вхід мінімальної частоти, ємнісні акселерометри можуть бути побудовані на кремнії і забезпечують здатність детектування DC-прискорення без ослаблення сигналу і значущого нульового зміщення (що важливо, наприклад, у системах інерційної навігації).

У порівнянні з недорогими мікромеханічними п'єзорезистивними акселерометрами, які можуть ефективно використовуватися в комбінації з мостовою обробною електронікою невеликої вартості, причому саме в низькочастотних або статичних вимірах прискорення, ємнісні датчики мають низьку температурну чутливість. Температурний коефіцієнт опору легованого кремнію на два порядки вище, ніж температурний коефіцієнт ємності, незважаючи на зміни в геометрії ємнісного акселерометра внаслідок температурного розширення.

Принцип дії ємнісного акселерометра (variable capacitance) заснований на зміні ємності чутливого елемента з електродами при переміщенні інерційної маси, що є його частиною під дією прискорення.

Більшість MEMS-акселерометрів використовує принцип, в якому прискорення змінює відстань d між обкладинками і, таким чином, ємність конденсатора. Датчик перетворює зміну ємності акселерометра у вихідний сигнал - електричний заряд, напругу або струм.

Типовий ємнісний сенсорний елемент складається з двох фіксованих електродів - між ними підвішені рухома обкладка, навантажена інерційною масою, яка представляє собою спільний електрод ємнісного півмосту (рисунок 1.11).

Диференційний режим з'єднання двох конденсаторів $C1$ і $C2$ (рисунок 1.12) дозволяє збільшити амплітуду та покращити лінійність сигналу, так як залежність ємності від переміщення є нелінійною.

Більшість диференційних ємнісних акселерометрів об'єднує електроніку, яка завершує міст Уїтстона (аналогічно п'єзорезистивним датчикам) і обробляє сигнал, використовуючи, наприклад, співвідношення $C1/C2$ або $(C1 - C2)/(C1 + C2)$.

Пояснити дане твердження допоможе відомий вираз для ємності плоского конденсатора:

$$C = \frac{\varepsilon \cdot \varepsilon_0 \cdot S}{d}, \quad (1.2)$$

де ε - відносна діелектрична проникність матеріалу; ε_0 - діелектрична постійна; S - площа перекриття обкладинок; d - відстань між обкладинками.

Багато переваг та недоліків ємнісних датчиків впливають з їхньої фізичної природи.

Так, ємнісні структури прості у конструюванні - в залежності від розміщення ємнісного чутливого елемента щодо ІС або друкованої плати, вони дозволяють фіксувати прискорення в напрямку будь-який із шести ступенів свободи (рисунок 1.13). З розвитком технологій MEMS дана перевага допов-

нилася можливістю визначати значення по трьом вимірювальним вісям за допомогою лише однієї ІС.

Інша значуща перевага ємнісних акселерометрів - температурний дрейф конденсаторів невеликої ємності та, отже, схема температурної компенсації мінімальна. Ємнісні датчики забезпечують широкий робочий температурний діапазон, але важливо підкреслити, що відносно нечутливі до температурних варіацій ємнісні акселерометри з газовим демпфуванням, оскільки частотна смуга ємнісного акселерометра також температурно чутлива (в'язкість демпфуючої рідини є функцією температури).

Ємнісні MEMS-акселерометри вимірюють прискорення в діапазоні від 2 g/c (аж до статичного) до кількох сотень g/c, на частотах, як правило, до 1 кГц.

Оскільки частотна смуга ємнісних акселерометрів обмежена значеннями в кілька кГц, для опису цього типу датчиків використовується динамічна модель. У динаміці, в умовах відсутності демпфування, на частотах, значно нижче резонансної, чутливість акселерометра не залежить від частоти збудження. Навпаки, збудження системи на частотах, близьких до резонансної частоти, буде утворювати дуже великі амплітуди коливань, для запобігання яких в систему вводиться демпфування.

У динамічній моделі (рисунок 1.14) акселерометр являє собою коливальну систему з коефіцієнтом демпфування λ «пружина-маса-демпфери», в якій переміщення інерційної маси щодо корпусу моделюються диференціальним рівнянням другого порядку:

$$m \cdot \ddot{x} + \lambda \cdot \dot{x} + k \cdot x = m \cdot a$$

З виразу для чутливості акселерометра

$$S = \frac{x}{a} = \frac{m}{k} = \frac{1}{\omega^2}$$

видно також, що існує компроміс між шириною смуги пропускання (динамічним діапазоном) та чутливістю ємнісного акселерометра. У залежності від коефіцієнта демпфування, частотна смуга пропускання акселерометра зазвичай знаходиться в діапазоні 0,2-0,5 від резонансної частоти ω . Для досягнення оптимально плоскої робочої частотної смуги декремент загасання ξ вибирається рівним $\sqrt{2}/2$ [13, 14].

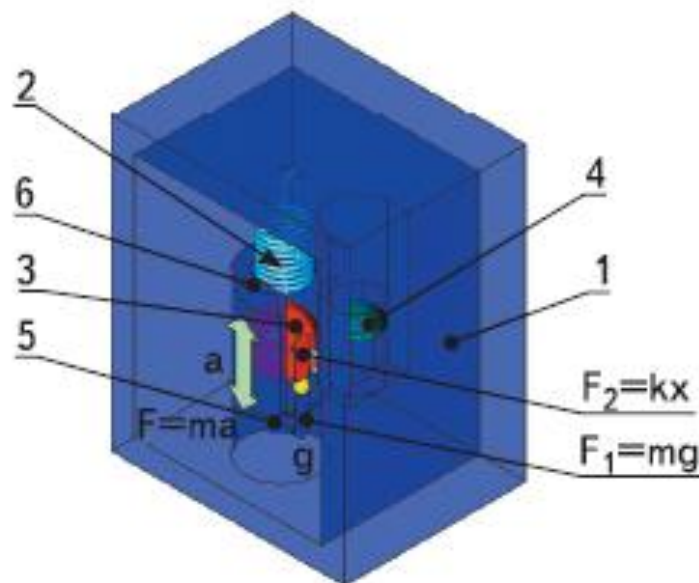


Рисунок 1.14 - Фізична модель акселерометра з демпфуванням та обмеженням робочого діапазону прискорень, що детектуються:

а - напрямок прискорення, що діє на датчик; 1 - корпус пристрою; 2 - пружина; 3 - інерційна маса; 4 - демпфери; 5, 6 - механічні обмежники переміщень при перевантаженнях (на виході за припустимі межі робочого прискорення a , детектуємого датчиком).

Демпфування регулюється тиском газу в корпусі пристрою і геометрією сейсмічної маси

Ємнісні пристрої зчитування дозволяють легко електрично ізолювати структурні компоненти акселерометра, але отримана структура датчика в те-

орії не призначена для детектування великих переміщень і відстані між обкладинками падають до значень, які важко виміряти.

Природа ємнісної структури також передбачає використання механічних обмежувачів переміщень маси при виході за робочі межі датчика (великих прискорень або частот, що є близькими до резонансної).

Важливою властивістю ємнісних акселерометрів є те, що вони можуть протистояти ударам в 5000 g / с або вище.

Крім нелінійності, як видно з (1.2), ємнісні акселерометри відрізняє чутливість до забруднень, вологості та присутність поблизу обкладинок різних матеріалів, які змінюють властивості діелектричної матеріалу і ємнісний зв'язок, тому в електроніці акселерометри припускають саме спеціалізований дизайн і надійну інкапсуляцію [15].

1.5 Система визначення координат місця розташування об'єкта

При побудові систем визначення координат місцезнаходження необхідно знати кут відхилення об'єкта від заданого початкового стану. Вихідний сигнал з гіроскопів є пропорційним кутовій швидкості. Величина кутовий швидкості - це похідна кута за часом. Відповідно, кут - це інтеграл від кутової швидкості за часом.

Інтегрування за часом - лінійна операція. Це означає, що обчислюваний інтеграл є сумою інтегралів від всіх складових вихідного сигналу гіроскопа, що інтегрується.

До складу вихідного сигналу входять наступні складові:

- 1) корисний сигнал, що відповідає поточній кутовій швидкості;
- 2) дрейф кутової швидкості гіроскопа;
- 3) шум.

Дрейф кутовий швидкості - це величина відхилення кутової швидкості в нерухомому стані гіроскопа.

Шум мікроелектромеханічного гіроскопа - це деякий випадковий додток, який швидко змінюється та який присутній у вихідному сигналі. Наявність такого додатку обумовлено дуже багатьма факторами. Однак шум принципово не усунути. Вдосконалення техніки дозволяє лише зменшувати шум, але не дозволяє виключити його повністю.

Операція інтегрування створює деякі неприємні властивості, а саме:

- 1) необхідно знання початкових умов, а саме кутового положення об'єкта в момент початку інтегрування;
- 2) інтеграл від помилки i є сума, пропорційна часу інтегрування, тобто, обчислений кут з часом буде все більше відхилятися від істинного кута;
- 3) інтеграл від шуму, який швидко змінюється, є випадковою величиною з дисперсією, яка пропорційна часу інтегрування, тому ймовірність відхилення обчисленого кута від істинного значення на будь-яку наперед задану величину наростає з часом [7].

Для рішення задачі корекції вихідного сигналу кутовий швидкості застосовується зворотній зв'язок. Інтеграл вихідного сигналу постійно зіставляється з даними про кут, який визначається, від якого-небудь ще джерела інформації, наприклад, від акселерометра. Результати зіставлення накопичуються за тривалий час, та по накопиченим результатам зіставлення коректується вихідний сигнал мікроелектромеханічного гіроскопа, а разом з ним і обчислюваний інтеграл. Схема корекції вихідного сигналу наведена на рисунку 1.15.

Схема на рисунку 1.15 являє собою звичайне слідкуючі кільце і може проектуватися та аналізуватися за методиками теорії автоматичного керування. Важливою особливістю схеми є те, що якщо фільтр коригуючого сигналу містить інтегратор, то пропадає ненульова складова сигналу мікроелектромеханічного гіроскопа, яка відповідає нульовій кутовій швидкості. Для коригування вихідного сигналу кута спільно з гіроскопами в системах визначення кутового положення використовуються акселерометри (як згадувалося вище).

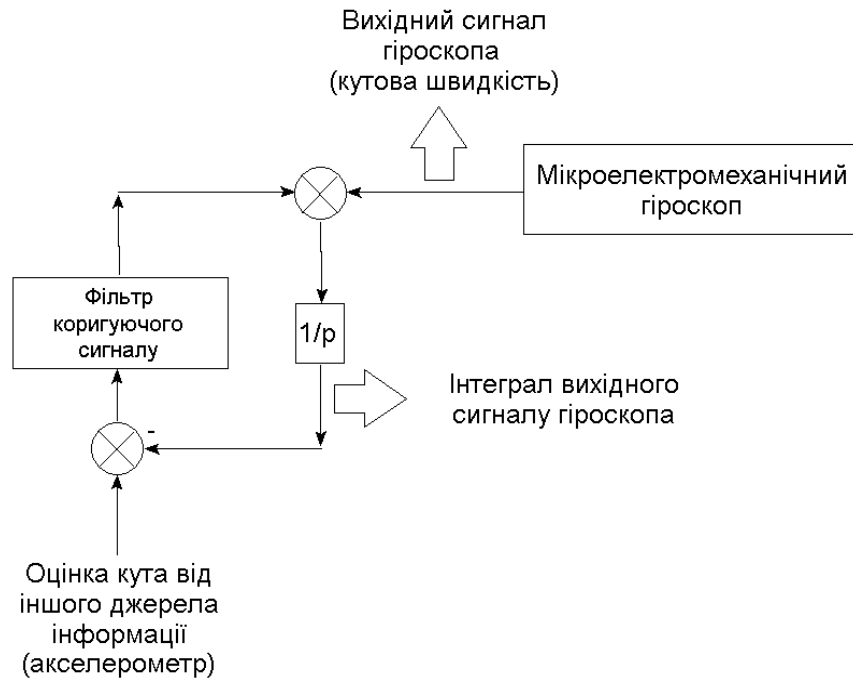


Рисунок 1.15 - Схема корекції вихідного сигналу кутовий швидкості

1.5.1 Оцінка кутів по вихідному сигналу гіроскопа

Інтегрування вихідного сигналу гіроскопа протягом тривалого часу дає позитивні результати кутового відхилення, а при нульовому рівні шуму результат є оптимальним.

На жаль, датчик кутової швидкості (гіроскоп) не є ідеальними. При інтегруванні кутової швидкості також інтегрується величина початкового відхилення або ненульовий рівень шуму. Інтегрування цієї величини призводить до збільшення помилки кута, що вимірюється. Так як величина дрейфу не велика її не можливо усунути шляхом вирахування з вихідного сигналу гіроскопа. У виразах (1.3) і (1.4) величини початкового відхилення по вісях X і Y позначені як $\theta(t_0)$ і $\phi(t_0)$ відповідно.

$$\bar{\theta}(t) = \int_{t_0}^t q(t) dt + \theta(t_0), \quad (1.3)$$

де θ - абсолютний подовжній кут і q - подовжня кутова швидкість.

$$\bar{\varphi}(t) = \int_{t_0}^t p(t) dt + \varphi(t_0), \quad (1.4)$$

де ϕ - абсолютний поперечний кут і p - поперечна кутова швидкість.

Таким чином, в результаті інтегрування кутової швидкості з'являється кутовий дрейф, який складає (приблизно) 1 градус за хвилину (в залежності від типу використовуваного гіроскопа). Для коригування кутової помилки можна використовувати акселерометр.

1.5.2 Оцінка кутів по вихідному сигналу акселерометра

Акселерометр - прилад для вимірювання прискорень і перевантажень. Цей пристрій зазвичай є досить «шумним» і вихідний сигнал повинен коригуватися (фільтруватися). У багатьох ситуація прискорення системи може бути розглянута як менша величина в порівнянні з силою тяжіння. Якщо в системі не відбувається змін швидкості та орієнтації, (зависання вертольота, літак у прямому польоті і т.п.), можна отримати величину подовжнього і поперечного абсолютного кута, використовуючи обмірюваний вектор сили тяжіння.

Якщо a_x - прискорення по вісі X, яке вимірюється з акселерометра, a_y - прискорення по вісі Y, яке вимірюється з акселерометра, а a_z - прискорення по осі Z, яке вимірюється з акселерометра, то використовуючи даний вектор прискорення (тобто гравітації), за виразами (1.5) і (1.6) ми отримуємо кути відхилення θ та φ .

$$\bar{\theta}(t) = \arctg \left(\frac{a_z}{a_x} \right) \quad (1.5)$$

$$\bar{\varphi}(t) = \arctg \left(\frac{a_z}{a_y} \right) \quad (1.6)$$

Потрібно відзначити, що коли вісі a_z і a_y знаходяться в горизонтальній площині, результат не визначений, тобто величина подовжнього і поперечного кутів не визначені (наприклад, літак, у якого носова частина перпендикулярна горизонту), тому що тангенс 90 градусів не існує. При обробці результатів необхідно враховувати зміщення вісей, яке необхідно компенсувати.

Першим недоліком оцінки кута за допомогою акселерометра є чутливість системи до прискорення. Другий недолік - зашумлений результат, що безпосередньо йде від датчика. Цей шум стає ще більше, якщо акселерометр розташований на вібруючому об'єкті (вібрація двигунів, вібрація від зміщення). Фільтр низьких частот може знизити рівень шуму, але також може додати затримку, яка може негативно вплинути.

1.5.3 Оцінка кута за результатами обробки сигналів від гіроскопа та акселерометра

Отримане значення кутової координати тільки від гіроскопа або акселерометра не є найкращим результатом. Але особливості цих двох типів датчиків доповнюють один одного. Гіроскоп забезпечує точну оцінку кутового відхилення в динаміці, а акселерометр - в статиці.

Тому можливо спроектувати систему визначення кутового відхилення, що дозволяє обробляти дані з акселерометра в статиці та з гіроскопа в динаміці. Якщо така система регулярно піддається прискоренню, то при вимірюванні кута необхідно використовувати дані з гіроскопа, щоб усунути помилки, викликані прискоренням і навпаки.

Можна сказати, що чим більше результат роботи системи по визначенню координати кута залежить від акселерометра, то тим більше результуюча величина піддається помилці з-за прискорення системи та через шум від акселерометра. Чим більше результат залежить від роботи гіроскопа, тим більше часу необхідно для коректування остаточного значення кутового положення.

Таким чином, в алгоритмі обробки спільних результатів необхідно взяти до уваги динамічні особливості системи [16].

На рисунку 1.16 зображена структурна схема системи визначення місцеположення об'єкта.

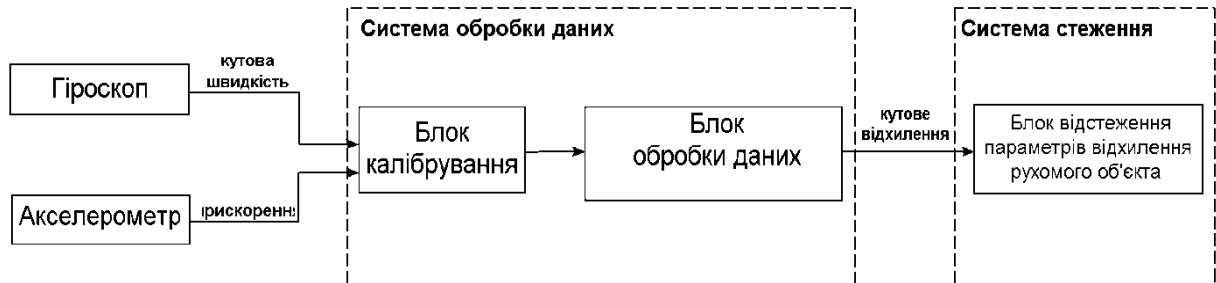


Рисунок 1.16 - Структура системи визначення місцеположення об'єкта

Система визначення координат місцеположення об'єкта може бути реалізована за допомогою двовісного гіроскопа або двох одновісних гіроскопів (вимірюється відхилення кута та кутова швидкість), тривісного акселерометра (вимірюється прискорення та гравітаційна сила) і контролера (обробка сигналів). На рисунку 1.17 представлена можлива схема з'єднання елементів такої системи.

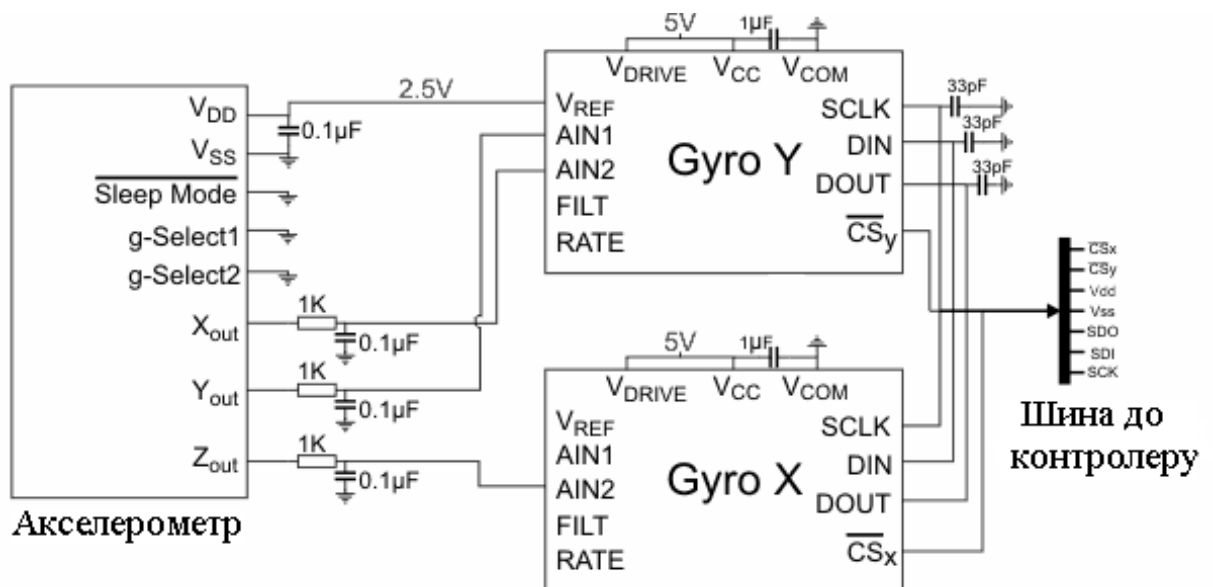


Рисунок 1.17 - Схема з'єднання тривісного акселерометра і двовісних гіроскопів

1.6 Висновки за розділом

У сучасній техніці все частіше застосовуються навігаційні системи, які призначені для орієнтації в просторі, пошуку оптимального маршруту і т.д. Переважна більшість таких систем базується на системі глобального супутникового позиціонування (GPS). Однак така система має істотний недолік - неможливість роботи в зоні невпевненого прийому сигналу із супутників, в умовах мегаполіса, в тунелях, підземних гаражах і т.д. Іноді виявляється, що точність визначення і відстеження координат з використанням GPS недостатня для роботи системи в цілому.

У даних ситуаціях знаходять застосування гіроскопічні датчики (мікроелектромеханічні гіроскопи та акселерометри), які дозволяють відстежити швидкість і напрямок переміщення об'єкта без участі супутникових систем.

Аналіз існуючих схемних рішень показав, що спільне використання мікроелектромеханічного гіроскопа та акселерометра і застосування фільтрів дозволяють значно зменшити відхилення вихідного сигналу через дрейфи та шуми при побудові систем визначення координат місцеположення об'єкта.

Показані способи отримання величини кутового відхилення від мікроелектромеханічного гіроскопа та акселерометра (інтегрування сигналу кутової швидкості від гіроскопа та обчислення арктангенсу відношення прискорень, значення яких отримані від акселерометра) з сигналу вихідної швидкості та прискорення відповідно, а також результат їх спільного використання в системі визначення місцеположення об'єкта.

Запропонована структурна схема системи визначення місцеположення об'єкта, яка включає блок калібрування, блоки обробки даних, блок визначення місцеположення об'єкта і можлива принципова схема з'єднання елементів такої системи.

Дослідження та розробки мікроелектромеханічних гіроскопів і акселерометрів проводяться багатьма зарубіжними фірмами та вітчизняними науковими центрами, підприємствами та університетами. Створення промисло-

вих зразків даних елементів ґрунтується на вирішенні багатьох теоретичних, схемотехнічних та конструкторсько-технологічних проблем. До теперішнього часу вирішені основні питання принципів побудови мікроелектромеханічних гіроскопів і акселерометрів, створені експериментальні зразки, освоєно серійний випуск рядом зарубіжних фірм і на перший план виступає проблема підвищення точності мікроелектромеханічних гіроскопів і акселерометрів та створення приборів навігаційного класу точності. Підвищення точності цих мікроелектромеханічних елементів дозволить використовувати їх у нових галузях цивільної та військової техніки.

2 ДРУГИЙ РОЗДІЛ

МОДЕЛЮВАННЯ СИСТЕМИ ОБРОБКИ ДАНИХ І СИСТЕМИ ВІДСТЕЖЕННЯ ПАРАМЕТРІВ ВІДХИЛЕННЯ РУХОМОГО ОБ'ЄКТА

2.1 Вибір середовища для моделювання

Застосування ЕОМ при проектно-конструкторських роботах у своєму розвитку пройшло кілька стадій та зазнало значних змін. З появою обчислювальної техніки був зроблений акцент на автоматизацію проектних завдань, які мають чітко виражений розрахунковий характер, коли реалізовувалися методики, орієнтовані на ручне проектування. Потім, у міру накопичення досвіду, стали створювати програми автоматизованих розрахунків на основі методів обчислювальної математики (параметрична оптимізація, метод кінцевих елементів і т. п.). З впровадженням спеціалізованих термінальних пристроїв з'являються універсальні програми для вирішення як розрахункових, так і деяких рутинних проектних завдань (виготовлення креслень, специфікацій, текстових документів і т. п.). В останні роки велика увага приділяється автоматизації розрахунково-конструкторських робіт при проектуванні типових вузлів та агрегатів, коли синтез конструкції проводиться евристичний, а основні параметри вибираються та оптимізуються в інтерактивному режимі діалогу проектувальника та ЕОМ.

Різні можливості та межі застосування обчислювальної техніки для автоматизації проектування визначаються рівнем формалізації науково-технічних знань в конкретній галузі. Чим глибше розроблена теорія того чи іншого класу технічних систем, тим більші можливості об'єктивно існують для автоматизації процесу їх проектування.

Однак на всіх стадіях автоматизації проектування інженеру крім вивчення інструкцій з експлуатації та написання програм доводиться пізнавати ряд по суті справи непотрібних йому подробиць системних програм та мов

програмування. Крім того, при використанні в проектуванні спеціалізованих по об'єктах розрізнених пакетів прикладних програм (ППП) інженер змушений щоразу знову кодувати і вводити інформацію згідно інструкції ППП. Відмічені недоліки призводять до того, що часткова («позадачна») автоматизація не зробила істотного впливу на підвищення якості та продуктивності проектування технічних систем і засобів в цілому.

Вирішення проблем автоматизації проектування за допомогою ЕОМ ґрунтується на системному підході, тобто на створення та впровадження САПР - систем автоматизованого проектування технічних об'єктів, які вирішують весь комплекс завдань від аналізу завдання до розробки повного обсягу конструкторської та технологічної документації. Це досягається за рахунок об'єднання сучасних технічних засобів і математичного забезпечення, параметри та характеристики яких обираються з максимальним урахуванням особливостей задач проектно-конструкторського процесу. САПР представляє собою великі організаційно-технічні системи, складаються з комплексу засобів автоматизації проектування, взаємопов'язаного з підрозділами конкретної проектною організацією.

Під автоматизацією проектування розуміють систематичне застосування ЕОМ у процесі проектування при науково обґрунтованому розподілі функцій між проектувальником і ЕОМ та науково обґрунтованому виборі методів машинного рішення задач.

Мета автоматизації - підвищити якість проектування, знизити матеріальні витрати на нього, скоротити терміни проектування і ліквідувати зростання числа інженерно-технічних працівників, зайнятих проектуванням і конструюванням.

Під науково - обґрунтованому розподілі функцій між людиною і ЕОМ розуміється, що людина повинна вирішувати завдання, які мають творчий характер, а ЕОМ - завдання, вирішення яких піддається алгоритмізації.

Істотною відмінністю автоматизованого проектування от не автоматизованого є можливість заміни дорогого та такого, що займає багато часу фі-

зичного моделювання - математичним моделюванням. При цьому слід мати на увазі одну важливу обставину: велике число варіантів при проектуванні. Тому не можна ставити завдання створення універсальної САПР, а необхідно вирішувати питання проектування для конкретного застосування.

Для вирішення завдань моделювання в роботі використана середовище Simulink пакету MatLAB.

Однією з основних причин широкого використання пакета MATLAB є великий набір засобів, який він надає користувачу для вирішення різноманітних завдань у різних прикладних галузях людської діяльності. Серед цих засобів особливе місце займає підсистема Simulink.

Основні властивості підсистеми Simulink:

1) включає в себе велику бібліотеку блоків (безперервні елементи, дискретні елементи, математичні функції, засоби відображення та багато інших блоків), які можна використовувати для графічної побудови систем;

2) надає можливість моделювання лінійних, нелінійних, безперервних, дискретних та гібридних систем;

3) блок-діаграми можуть бути об'єднані в складові блоки, що дозволяє використовувати ієрархічне представлення структури моделі, тим самим забезпечуючи спрощений погляд на компоненти і підсистеми;

4) містить засоби для створення користувальницьких блоків і бібліотек блоків [17].

Simulink забезпечує інтерактивне середовище для моделювання, при цьому поведінка моделі та результати її функціонування відображаються в процесі роботи, та існує можливість змінювати параметри моделі навіть в той момент, коли вона виконується.

При моделюванні з використанням Simulink реалізується принцип візуального програмування, відповідно до якого користувач на екрані з бібліотеки стандартних блоків створює модель пристрою і здійснює розрахунки. При цьому, на відміну від класичних засобів моделювання, користувачеві не потрібно досконально вивчати мову програмування та чисельні методи матема-

тики, а досить загальних знань потрібних при роботі на комп'ютері та, звісно, знань тієї предметної області в якій він працює.

Simulink є досить самостійним інструментом MATLAB та при роботі з ним зовсім не потрібно знати сам MATLAB та інші його програми. З іншого боку доступ до функцій MATLAB та іншим його інструментам залишається відкритим і їх можна використовувати в Simulink. Частина що входить до складу пакетів має інструменти, що вбудовуються в Simulink (наприклад, LTI-Viewer програми Control System Toolbox - пакет для розробки систем управління). Є також додаткові бібліотеки блоків для різних областей застосування (наприклад, Power System Blockset - моделювання електротехнічних пристроїв, Digital Signal Processing Blockset - набір блоків для розробки цифрових пристроїв і т.д).

При роботі з Simulink користувач має можливість модернізувати бібліотечні блоки, створювати свої власні, а також складати нові бібліотеки блоків.

При моделюванні користувач може вибирати метод розв'язання диференціальних рівнянь, а також спосіб зміни модельного часу (з фіксованим або змінним кроком). У ході моделювання є можливість стежити за процесами, що відбуваються в системі. Для цього використовуються спеціальні пристрої спостереження, що входять до складу бібліотеки Simulink. Результати моделювання можуть бути представлені у вигляді графіків або таблиць.

Перевага Simulink полягає також у тому, що він дозволяє поповнювати бібліотеки блоків за допомогою підпрограм написаних як на мові MATLAB, так і на мовах C ++, Fortran та Ada [18].

2.2 Модель системи обробки даних та її аналіз

В роботі було побудовано модель системи обробки даних, яка використовується для корегування значень вихідних сигналів мікроелектромеханічного гіроскопа та акселерометра і для отримання сигналу кутового відхилення. Значення сигналу з гіроскопа корегується на величину відхилення кут-

вої швидкості в нерухомому стані гіроскопа. Для акселерометра необхідна тільки незначна корекція для вирівнювання зміщення вісей. Також модель дозволяє усунути шуми та вібрації у вихідних сигналах. Скореговані сигнали кутової швидкості та прискорення обробляються для отримання оцінки кутового зміщення (кута). Фільтрація сигналів у моделі здійснюється фільтрами першого порядку, другого порядку та фільтром Калмана. На рисунку 2.1 представлена модель обробки даних з акселерометра та гіроскопа.

У побудованій моделі є блок вихідних сигналів 1 (які зняті безпосередньо з гіроскопа та акселерометра), блок калібрування 2, який необхідний для корегування вихідних сигналів та блоки обробки даних 3, 4, 5 (які відрізняються способом фільтрації). Вихідним сигналом моделі є сигнал кутового відхилення. На рисунках 2.2 і 2.3 представлені сигнали з гіроскопа та акселерометра, зняті в статичних експериментах. На рисунках 2.4, 2.5, 2.6 - в динамічних експериментах.

Аналіз роботи моделі проводиться з джерелом даних Simulink_Dynamic_Calibration2.mat - перший динамічний експеримент, в ході якого вимірювальна система повертається на 90° з інтервалом 5 секунд. Сигнали з акселерометра та гіроскопа представлені на рисунках 2.2 – 2.6.

Для компенсації величини кутового дрейфу, а також похибок від вібрацій та шуму в загальній системі використовується блок калібрування. Вихідне значення кутової швидкості з гіроскопа на практиці не відповідає значенню з документації. Діапазон, що вимірюється $D_{np(Y)}$ для вісі Y становить ± 524 °/с з чутливістю $g_{np(Y)} = 0,26$ °/с, а для вісі X $D_{np(X)} = \pm 188$ °/с з чутливістю $g_{np(X)} = 0,09$ °/с (у документації $D_T = \pm 80$ °/с з чутливістю $g_m = 0,039$ °/с). Виходячи з наведених значень розраховуються поправочні коефіцієнти k_1 і k_2 :

$$k_1 = \frac{D_{np(X)}}{D_T} = \frac{188}{80} = 2,35 \quad ; \quad k_2 = \frac{D_{np(Y)}}{D_T} = \frac{524}{80} = 6,55$$

$$g_T \cdot k_1 = g_{np(X)} \quad ; \quad g_T \cdot k_2 = g_{np(Y)}$$

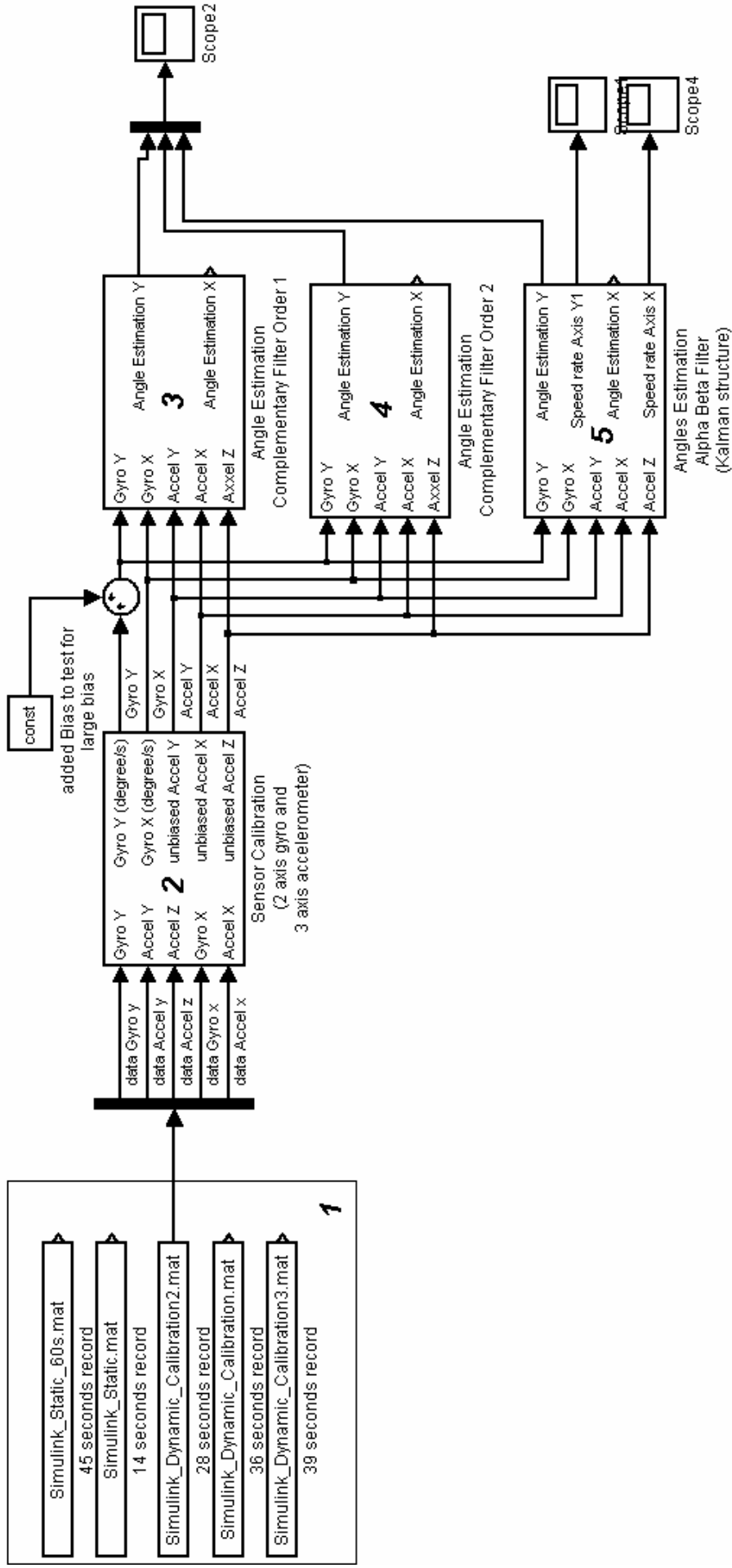


Рисунок 2.1 - Модель обработки данных в Simulink

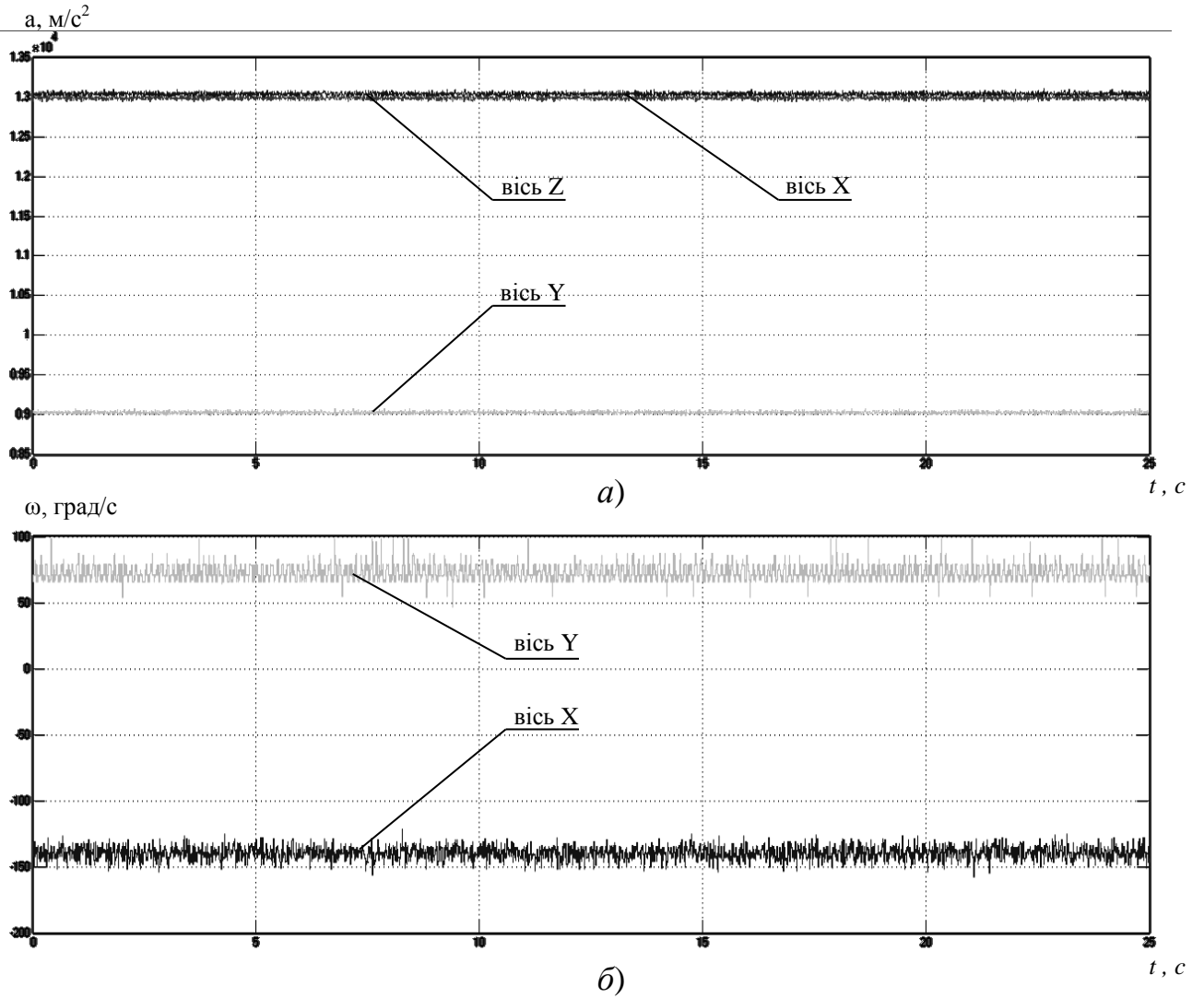


Рисунок 2.2 – Вихідні сигнали з гіроскопа та акселерометра
(перший статичний експеримент):

а) сигнали з тривісного акселерометра;

б) сигнали з двовісного гіроскопа.

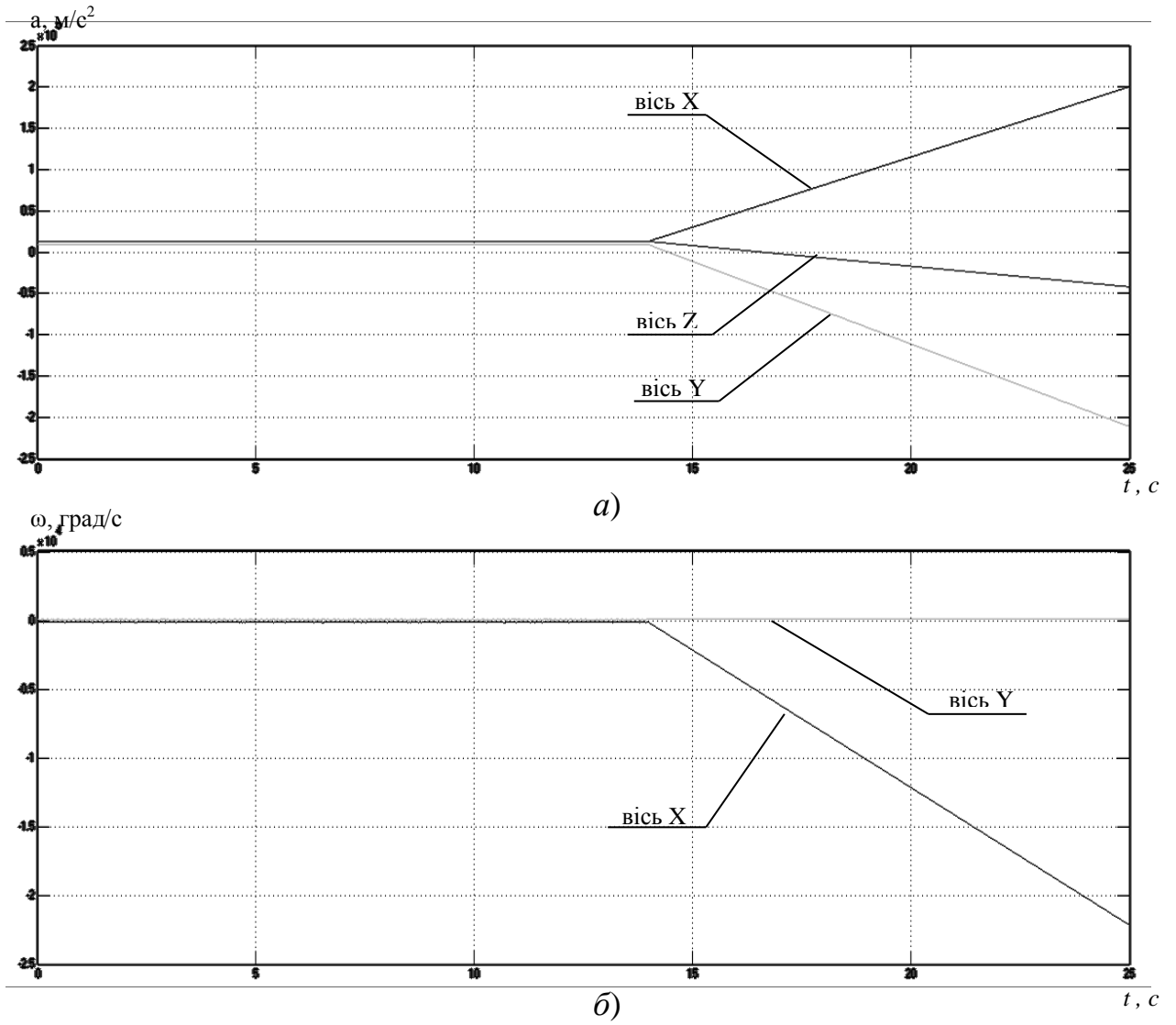


Рисунок 2.3 - Вихідні сигнали з гіроскопа та акселерометра
(другий статичний експеримент):

- а) сигнали з тривісного акселерометра;
- б) сигнали з двовісного гіроскопа

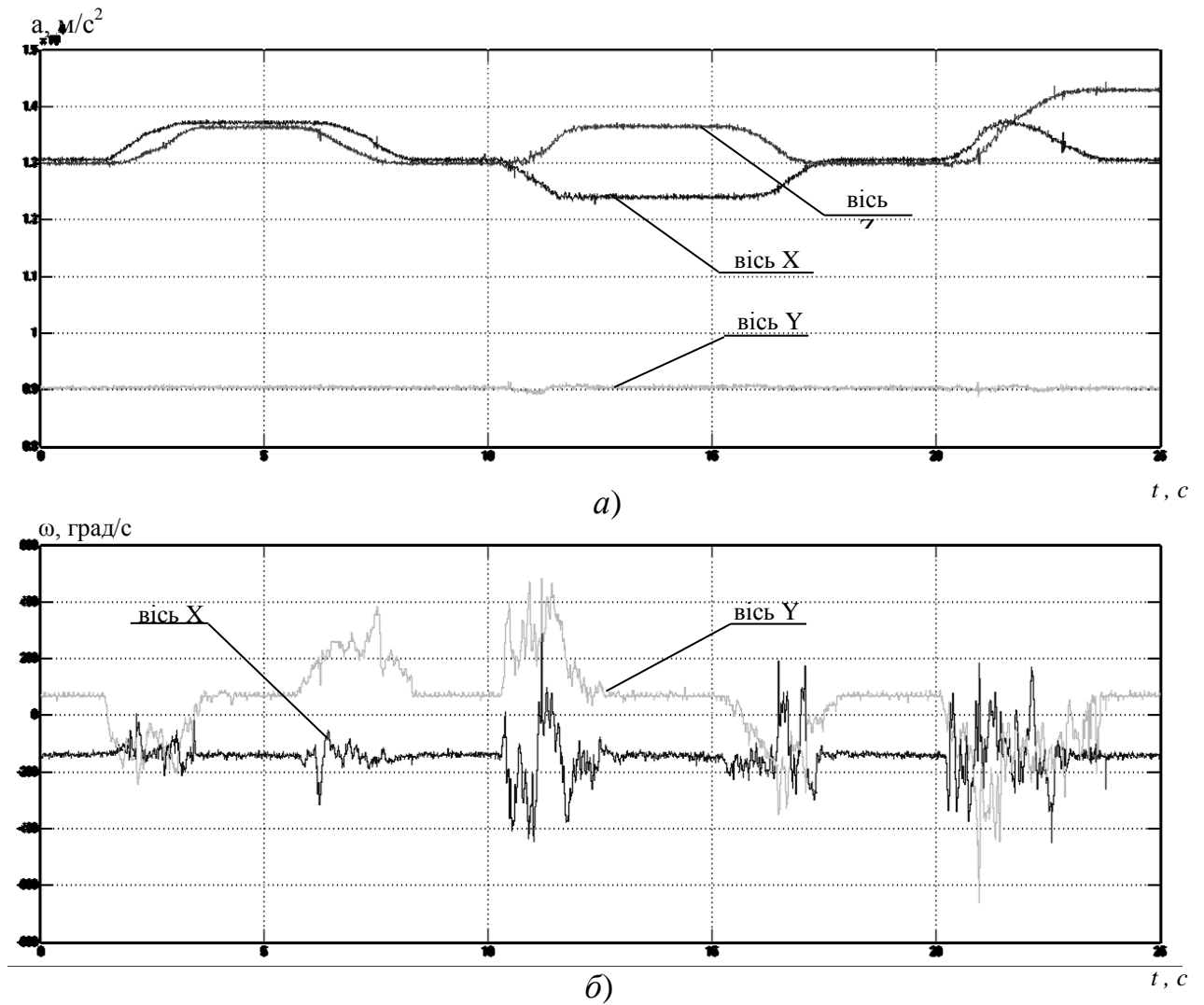


Рисунок 2.4 - Вихідні сигнали з гіроскопа та акселерометра
(перший динамічний експеримент):

- а) сигнали з тривісного акселерометра;
- б) сигнали з двовісного гіроскопа.

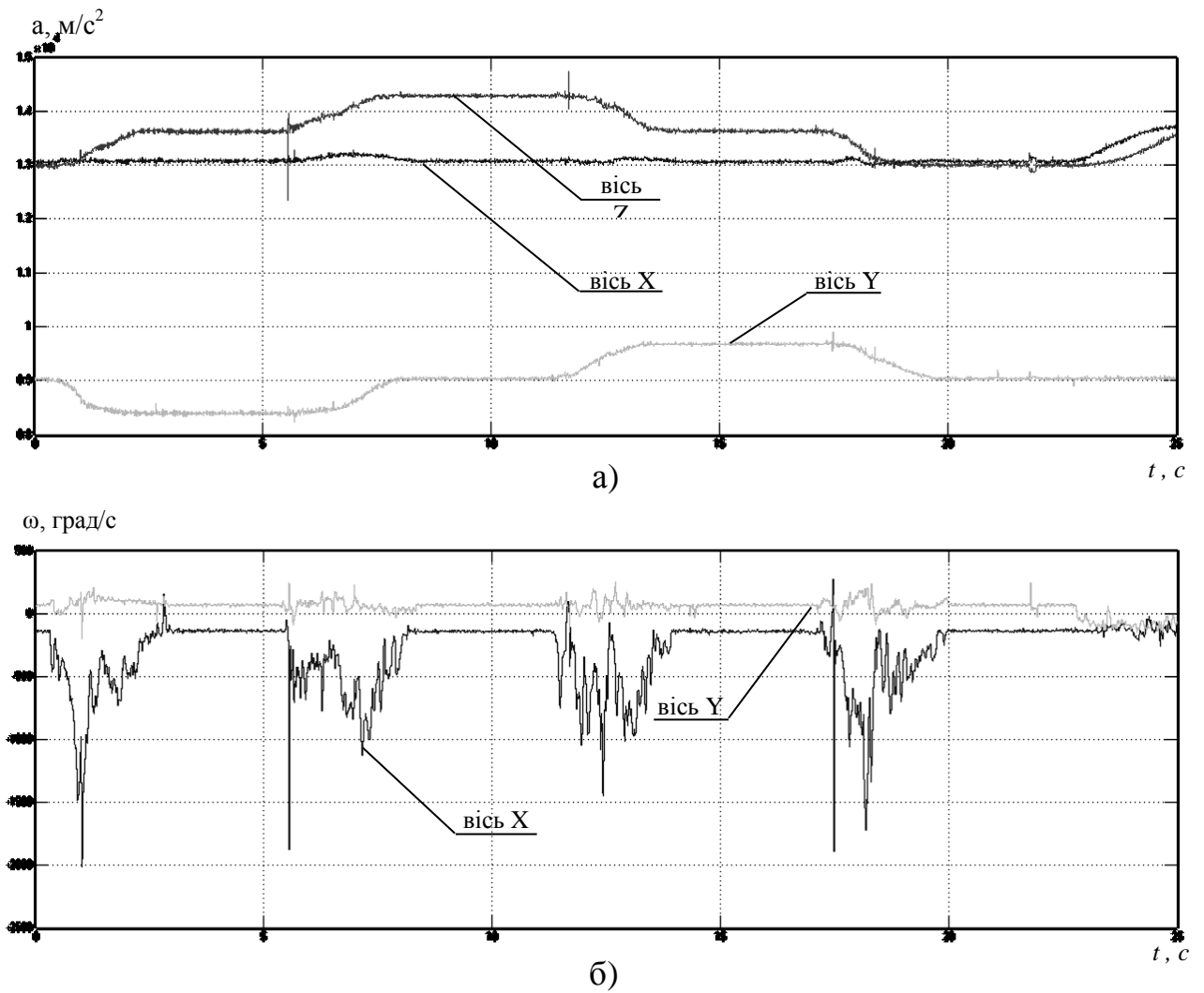


Рисунок 2.5 - Вихідні сигнали з гіроскопа та акселерометра (другий динамічний експеримент):

- а) сигнали з тривісного акселерометра;
- б) сигнали з двовісного гіроскопа.

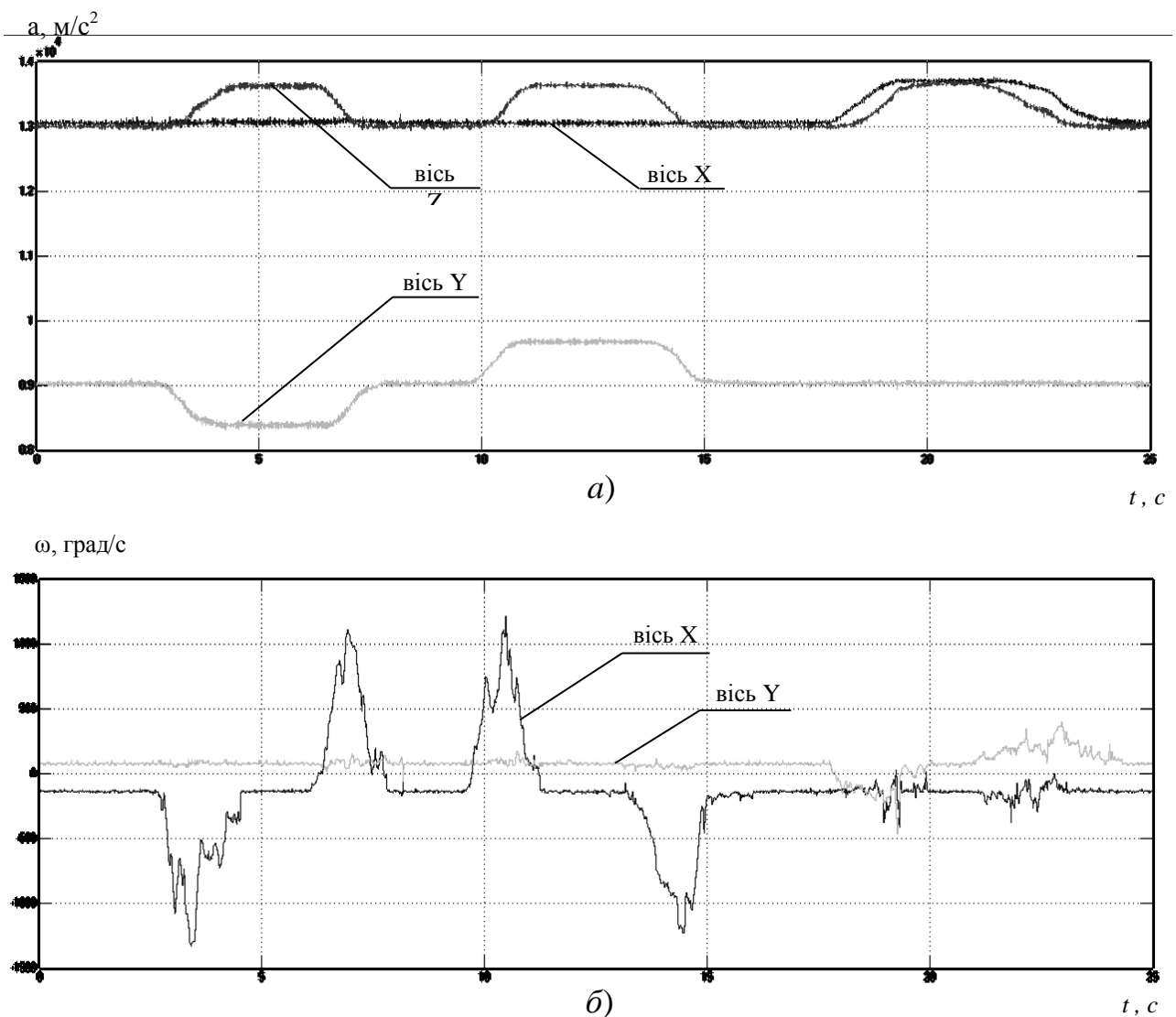


Рисунок 2.6 - Вихідні сигнали з гіроскопа та акселерометра
(третій динамічний експеримент):

- а) сигнали з трьохвісного акселерометра;
- б) сигнали з двовісного гіроскопа.

Для акселерометра точного калібрування по вісях не потрібно. Необхідна тільки незначна корекція для вирівнювання зміщення вісей.

Блок 2 на рисунку 2.1 - це блок калібрування, який коригує дані. На рисунку 2.7 представлена модель даного блоку.

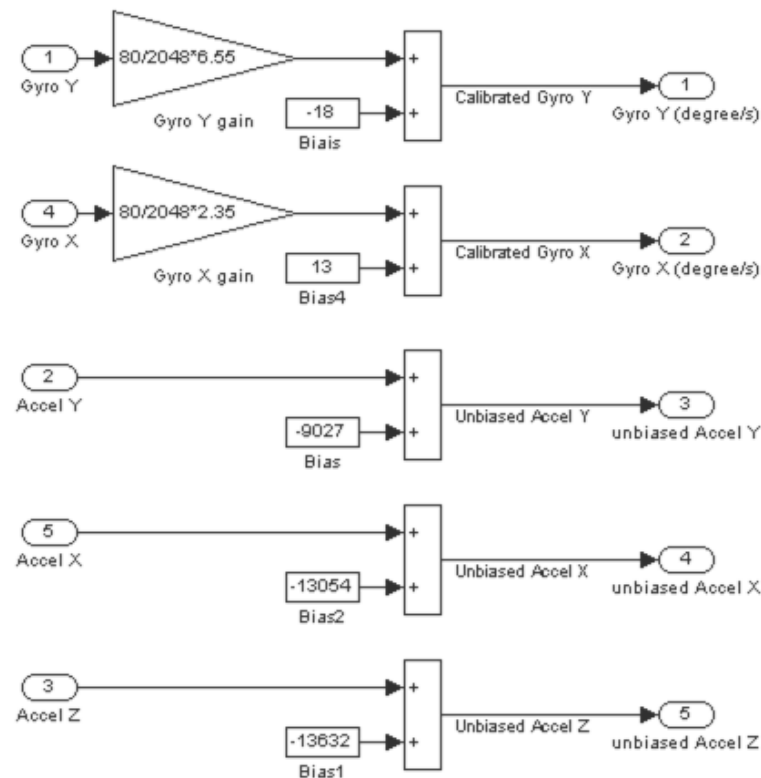


Рисунок 2.7 - Модель блоку калібрування

Блоки обробки даних 3, 4, 5 на рисунку 2.1 комбінують кутові оцінки від гіроскопа і акселерометра. Високочастотна складова сигналу від гіроскопа складається з низькочастотною складовою від акселерометра. Виділення корисної частини сигналу здійснюється за допомогою фільтрів. Розглянемо докладніше ті фільтри, які були використані при побудові моделі.

2.2.1 Блоки обробки даних

Для фільтрації сигналів у блоках обробки даних можуть використовуватися фільтри першого порядку, другого порядку, фільтр Калмана. Для виділення корисного сигналу від гіроскопа використовуються фільтри високих частот. У акселерометра корисним сигналом є низькочастотна складова, тому використовуються фільтри низьких частот.

2.2.1.1 Фільтри першого порядку

Передавальна функція фільтрів низьких частот:

$$W(s) = \frac{0.5}{s + 0.5}$$

Передавальна функція фільтрів високих частот:

$$W(s) = \frac{s}{s + 0.5}$$

На рисунку 2.8 представлені частотні характеристики даних фільтрів.

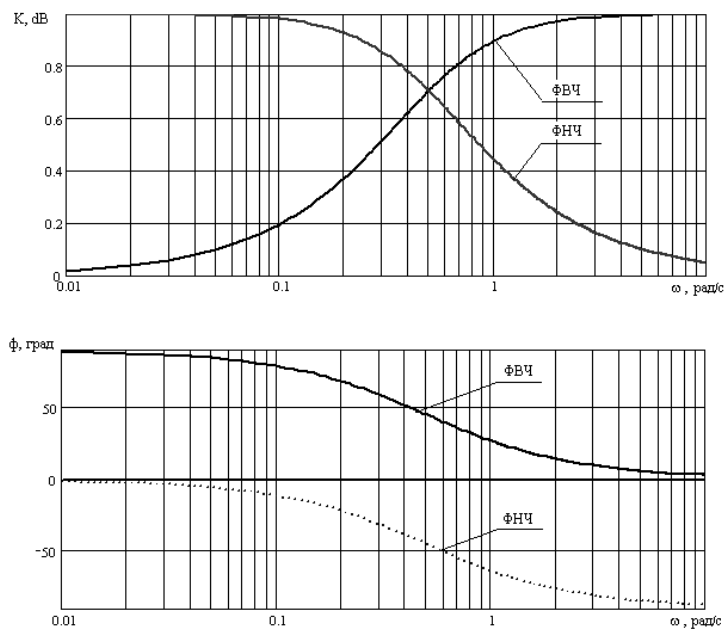


Рисунок 2.8 - АЧХ і ФЧХ фільтрів першого порядку

Модель блоку обробки даних 3 представлена на рисунку 2.9. Цей блок визначає зміну кута по вісі Y, обчислюючи арктангенс відношення величин з акселерометра (a_x до a_z), а також визначає зміну кута по вісі Y, шляхом інтегрування величини кутовий швидкості. Під час обробки сигналів з гіроскопа та акселерометра для усунення шуму використовуються фільтри високих та низьких частот 1-го порядку.

Використання фільтра 1-го порядку дає позитивні результати, але помилка у встановленому стані все-таки присутня (внаслідок наростання величини відхилення в процесі інтегрування). Фільтр 2-го порядку здатний усунути таку статичну помилку.

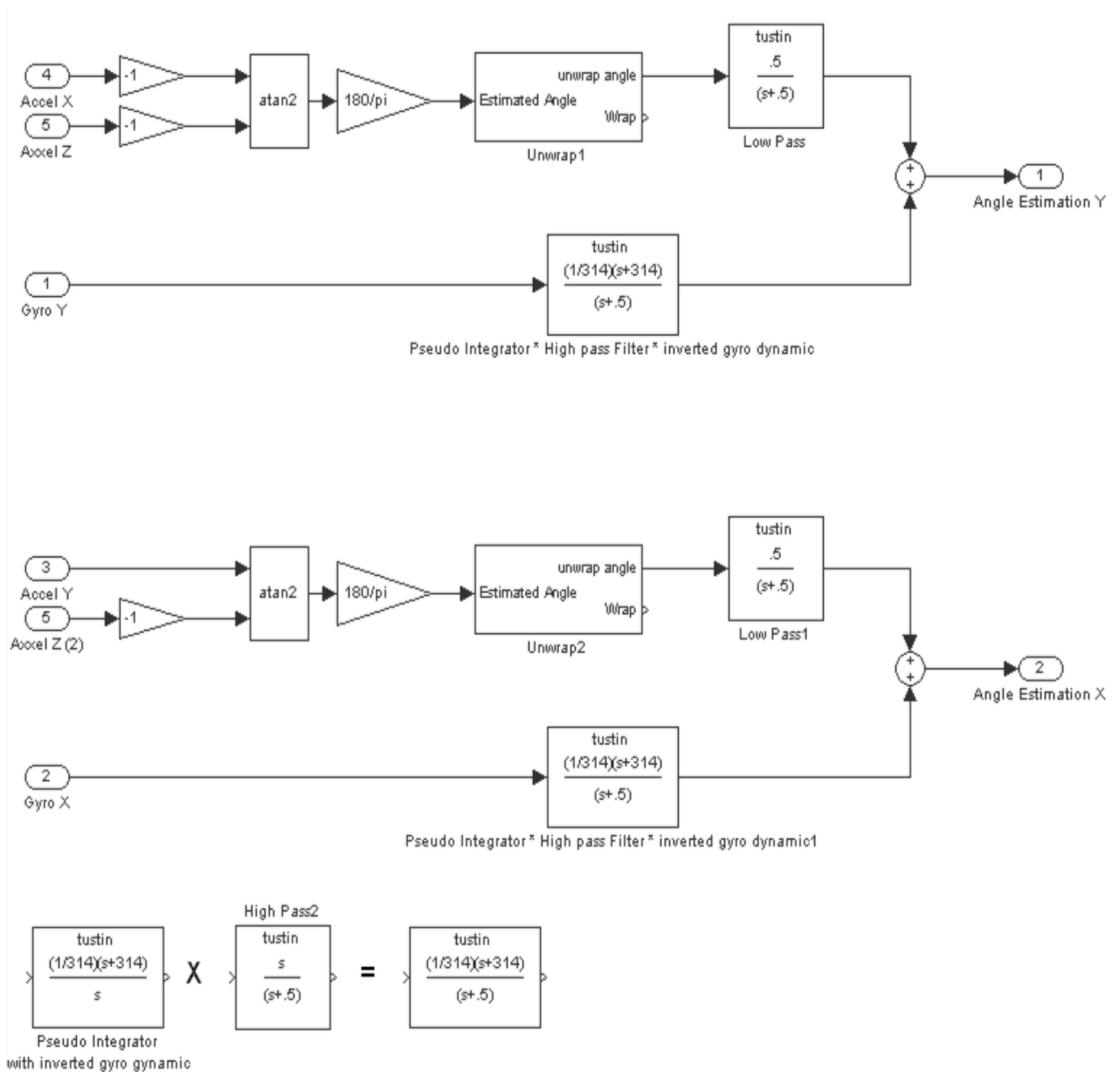


Рисунок 2.9 - Модель блоку обробки даних 3

На рисунку 2.10 представлені результати моделювання.

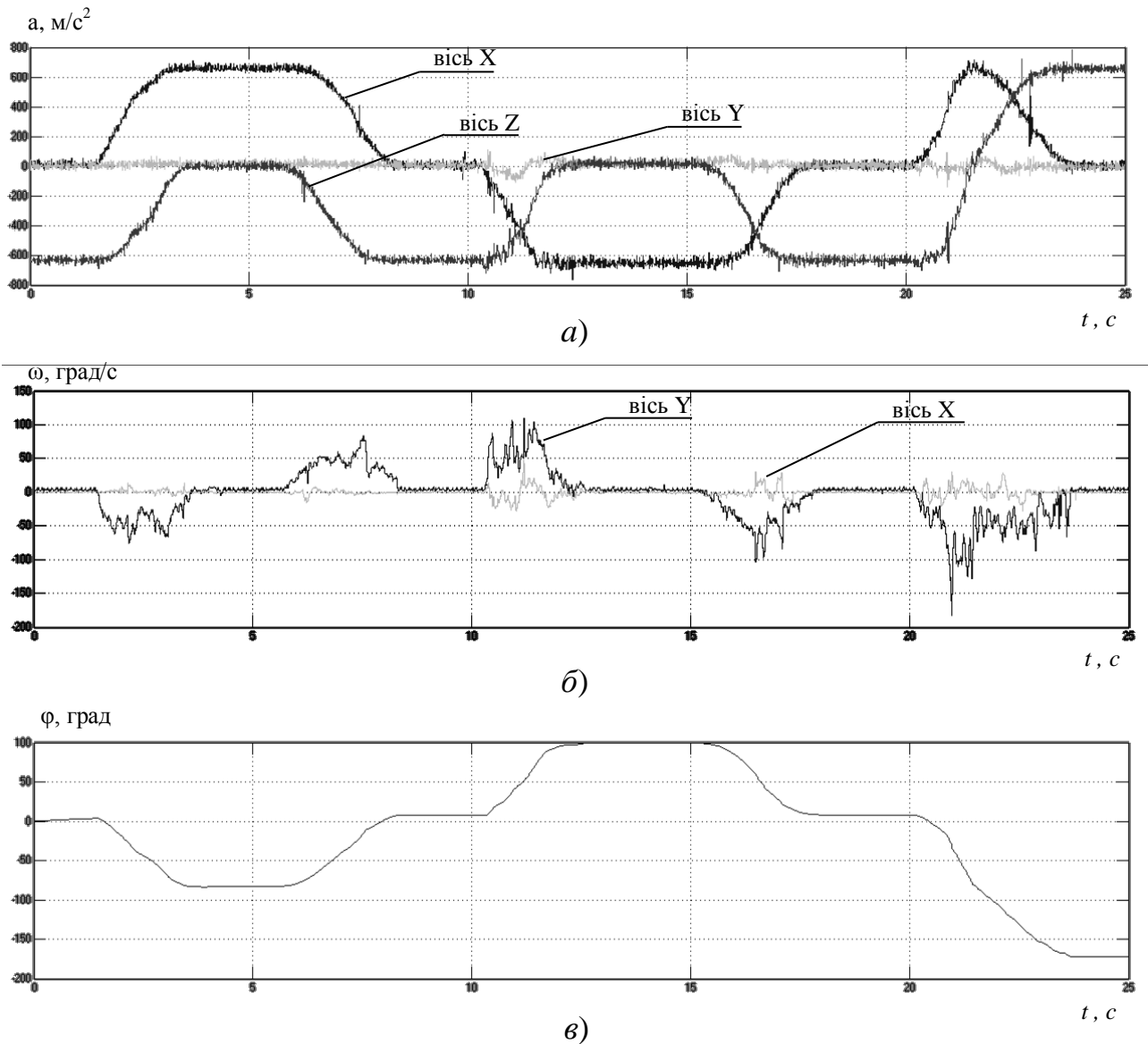


Рисунок 2.10 - Результати моделювання при використанні фільтра першого порядку:

- а) сигнали з трьохвісного акселерометра;
- б) сигнали з двовісного гіроскопа; в) сигнал зміни кута.

2.2.1.2 Фільтри другого порядку

Передавальна функція фільтра низької частоти:

$$W(s) = \frac{0.4s + 0.02}{(s + 0.2)^2}$$

Передавальна функція фільтра високої частоти:

$$W(s) = \frac{s^2}{(s + 0.2)^2}$$

На рисунку 2.11 представлені частотні характеристики даних фільтрів.

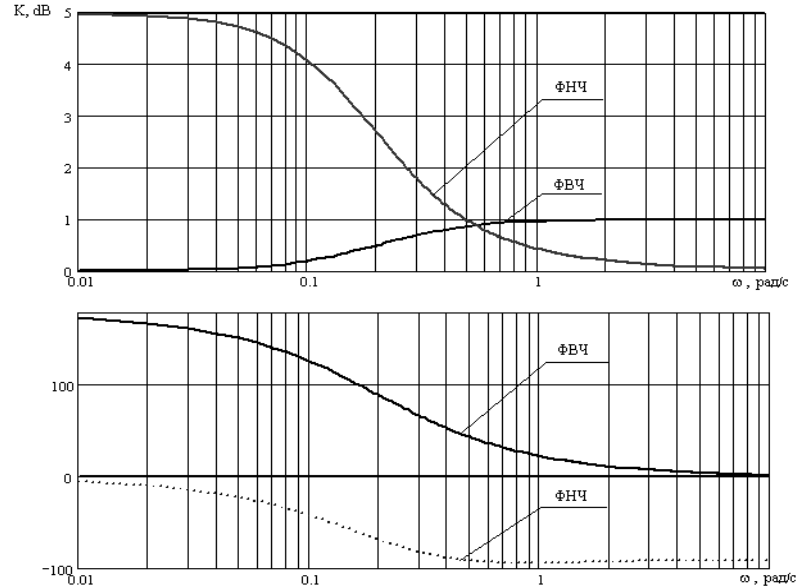


Рисунок 2.11 - АЧХ і ФЧХ фільтрів другого порядку

На рисунку 2.12 представлена модель блоку 4, в якому для фільтрації використовується фільтри 2-го порядку.

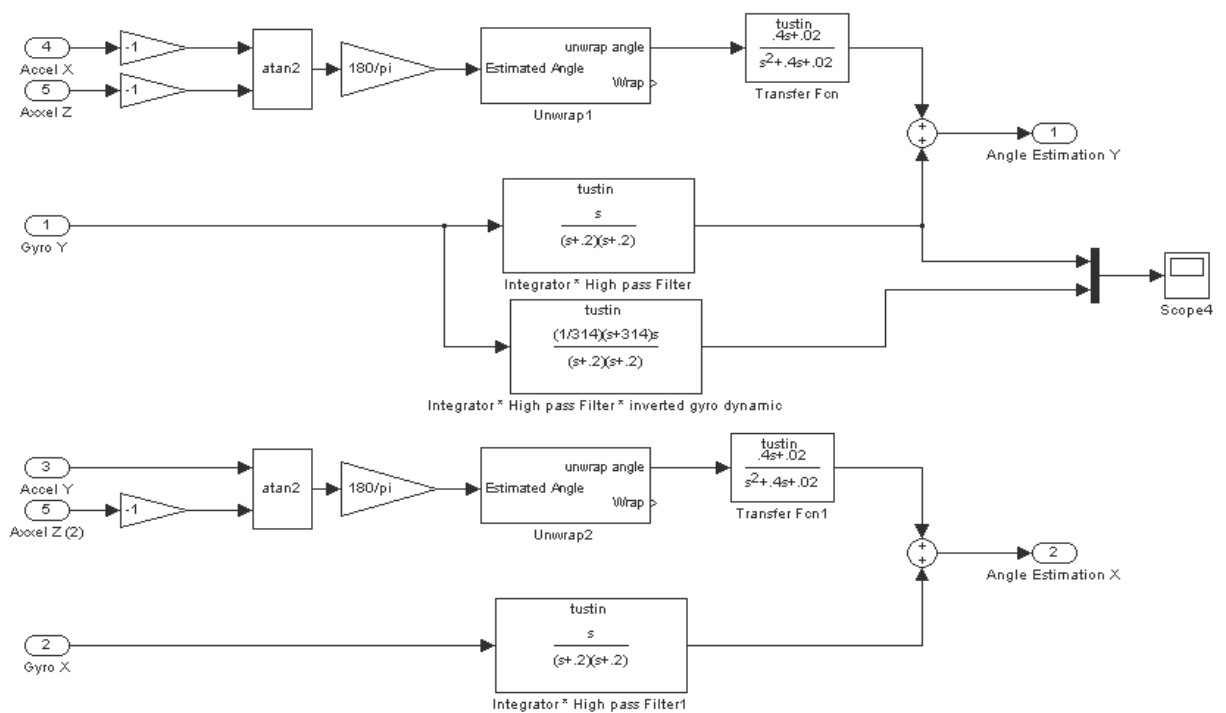


Рисунок 2.12 - Модель блоку обробки даних 4

На рисунку 2.13 представлені результати моделювання.

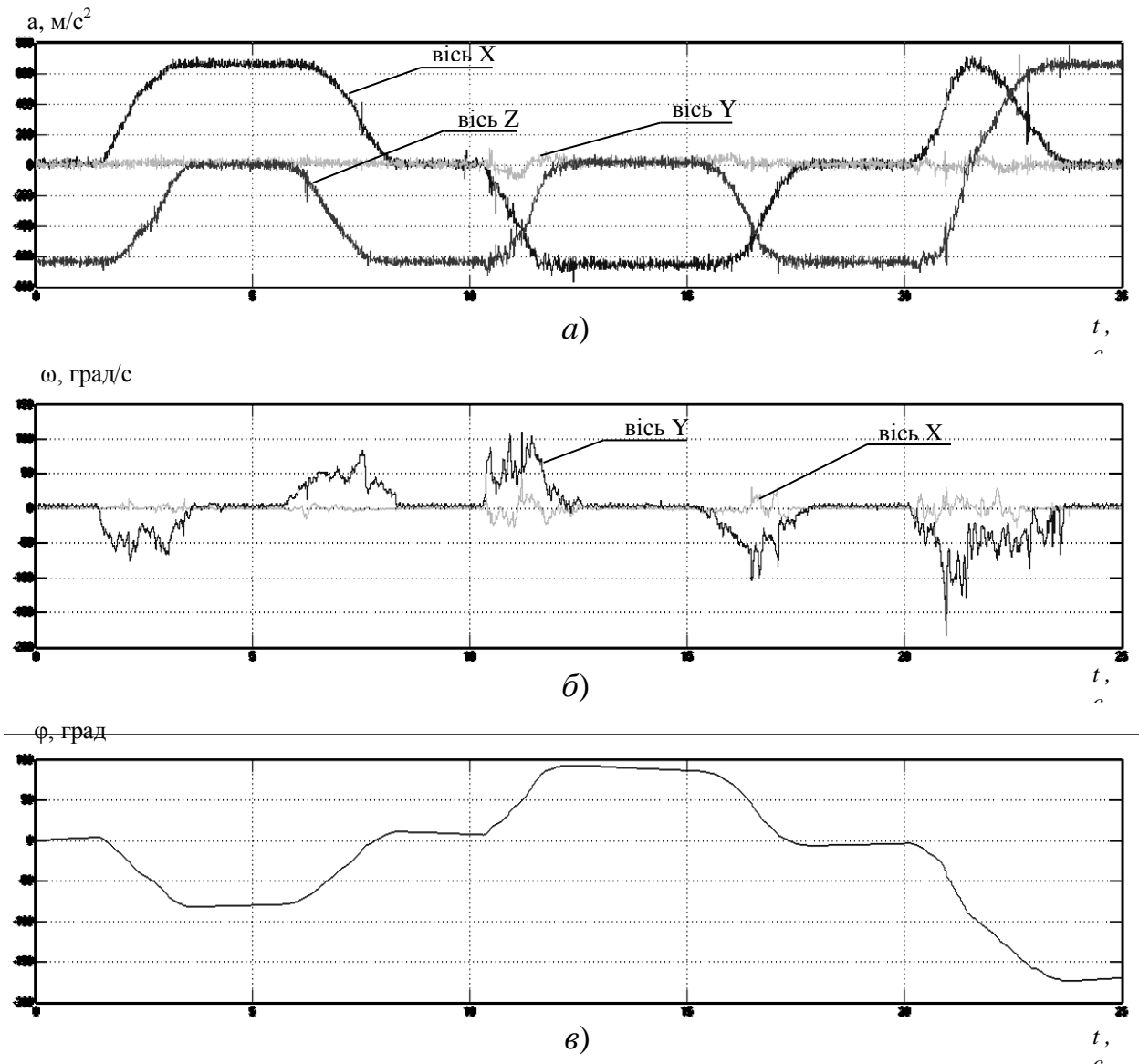


Рисунок 2.13 - Результати моделювання при використанні фільтра другого порядку:

- а) сигнали з тривісного акселерометра;
- б) сигнали з двовісного гіроскопа;
- в) сигнал зміни кута.

Використання даних фільтрів дозволяє усунути помилку у встановленому стані.

2.2.1.3 Фільтр Калмана

Фільтр Калмана (названий на честь Рудольфа Калмана) - рекурсивний фільтр (фільтр з нескінченною імпульсною характеристикою), що оцінює вектор стану динамічної системи, використовуючи ряд неповних та зашумлених вимірів.

Фільтр Калмана призначений для рекурсивного дооцінювання вектора стану апріорно відомої динамічної системи, тобто для розрахунку поточного стану системи необхідно знати поточне вимірювання, а також попередній стан самого фільтра. Таким чином фільтр Калмана, як і безліч інших рекурсивних фільтрів, реалізований в часовому представленні, а не в частотному.

Запис виду $\hat{\mathbf{x}}_n|m$ відповідає оцінці вектора стану в момент часу (ітерації) n , за даними на момент часу m .

Стан фільтра міститься в двох змінних:

$\hat{\mathbf{x}}_{k|k}$ - оцінка вектора стану динамічної системи в момент часу k ;

$\mathbf{P}_{k|k}$ - коваріаційна матриця помилок (мера точності оцінювання вектора стану).

Роботу кожного кроку фільтра Калмана можна розділити на два етапи: прогноз та коректування. Етап прогнозу обчислює вектор стану, за його ж значенням на попередньому кроці роботи фільтра. На етапі коригування в алгоритм надходять дані поточних вимірювань, які використовуються для уточнення прогнозного значення вектора стану, та обчислення власне оцінки вектора стану динамічної системи.

Опис роботи алгоритму.

Уявімо систему, стан якої в будь-який момент часу однозначно характеризується певним набором величин (наприклад, координати, швидкості, рівні напруження і т. д.), як правило, недоступних для безпосереднього визначення. Ці величини є елементами вектора стану системи, які віднесені до заданого моменту часу. Крім того, є ряд змінних, деяким чином пов'язаних зі станом системи, які можна виміряти із заданою точністю; такі величини складають вектор вимірювань, що відносяться до певного моменту часу. Ал-

горитм фільтру Калмана дозволяє в реальному часі побудувати оптимальну оцінку стану системи, базуючись на вимірюваннях, які неминуче містять похибки; при цьому вектор вимірів розглядається в якості багатомірного вихідного сигналу системи, яка обтяжена шумом, а вектор стану - невідомий багатомірний сигнал, що підлягає визначенню. Умовою оптимальності побудованої оцінки стану є мінімум її середньоквадратичної помилки.

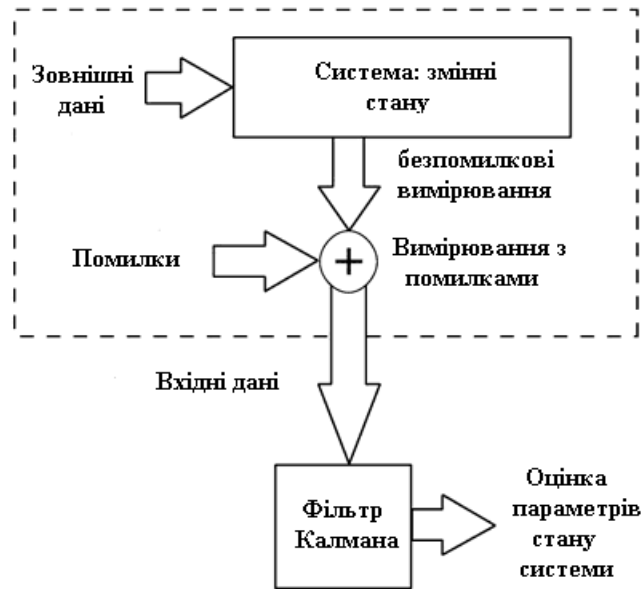


Рисунок 2.14 - Алгоритм роботи системи з фільтром Калмана

Рисунок 2.14 ілюструє роботу алгоритму фільтра Калмана. Початковими умовами на кожному новому циклі алгоритму є оцінка стану системи та величина, що характеризує її похибка. У випадку скалярної змінної такою характеристикою є дисперсія, яка тим більше, чим сильніше розкид індивідуальних значень щодо істинного значення. Поширена оцінка дисперсії - середньоквадратичне відхилення, тобто квадрат стандартного відхилення, - висловлює ступінь розкиду величини щодо середнього. Узагальненням дисперсії для вектора, тобто сукупності скалярних величин, є коваріаційна матриця. Її діагональні елементи є дисперсіями відповідних складових вектора, а недіагональні - коваріаціями, що характеризують взаємозв'язок між двома складовими. Сукупність вимірювань, віднесених до кожного з моментів часу, узагальнює вектор вимірів. Алгоритм послідовно обробляє вектори вимірювань, які знову надходять, враховуючи при цьому значення, які обчислені на попе-

редньому циклі. Ця особливість відрізняє алгоритм фільтра Калмана от рекурентних алгоритмів, яким для роботи потрібно зберігати увесь масив оброблених даних. На наступному кроці за допомогою оброблених на даному циклі вимірювань уточнюються початкові умови. Для цього алгоритм обчислює вагу поправок до них на основі коваріаційних матриць оцінки стану і вимірювань. Чим меншою похибкою характеризуються вимірювання у порівнянні з оцінкою стану системи, тим більшу вагу вони отримують. Відносні ваги невідомих, які визначають вектор стану системи, залежать від ступеня їх впливу на вектор вимірювань: більшу вагу отримують ті змінні, внесок яких у вимірювання більше.

Уточнення початкових умов на основі вимірювань, що надійшли на даному циклі, в загальному випадку, призводить до зменшення невизначеності в оцінці стану системи. виправлені таким чином початкові умови і є вихідними даними фільтра Калмана на кожному циклі. На заключному етапі роботи алгоритму відбувається підготовка до вступу нового вектора вимірів. На основі заданого лінійного перетворення, що зв'язує наступний вектор стану з попереднім, прогнозується оцінка стану системи, віднесена до моменту наступного вимірювання. При побудові коваріаційної матриці прогнозованого вектора стану фільтром Калмана враховується можливість перекручування моделі, що описує поведінку системи, деяким випадковим процесом з відомими статистичними параметрами. Оскільки конкретні значення підбурюючого ефекту не можуть бути відомі, дана обставина сприяє підвищенню невизначеності прогнозу. По мірі послідовної обробки нових вимірів відбувається накопичення фільтром корисної інформації, тому якщо елементи вектора стану впевнено виражаються через обмірювані величини, то сумарна похибка оцінок, як правило, повинна знижуватися. Однак оскільки разом з поліпшенням точності оцінок на етапі їх уточнення має місце її зниження при побудові прогнозу, то ці тенденції, компенсуючи один одного, в результаті приведуть до стабілізації невизначеності, що характеризує оцінку стану системи. У разі відсутності фактора, що вносить збурення в процес переходу системи з одного стану в інше, похибка оцінок в підсумку досягне нуля. Ступінь невизначе-

ності оцінки стану системи, яка змінюється в процесі роботи алгоритму, тягне за собою і зміну ваги, яка обчислюється на другому кроці; дана обставина виділяє фільтр Калмана як алгоритм з перемінними вагами.

Якщо стан розглянутої системи незмінний, то алгоритм фільтра Калмана зводиться до послідовної форми класичного методу найменших квадратів, в якому матриця, зворотна коваріаційній, виступає в якості ваговій. Іншими словами, фільтр Калмана є, по суті, рекурентним способом вирішення завдання зрівнювання за методом найменших квадратів.

На рисунку 2.15 представлена модель фільтра Калмана, яка використовується в блоці обробки даних 5. Наведена нижче структура дозволяє визначити кутову швидкість з урахуванням відхилень та кут, шляхом інтегрування сигналу. Використання даного підходу є еквівалентним використанню фільтра другого порядку. Перевага в тому, що можна визначити відхилення кутової швидкості (дрейф) з гіроскопа та визначити кут без спотворень.

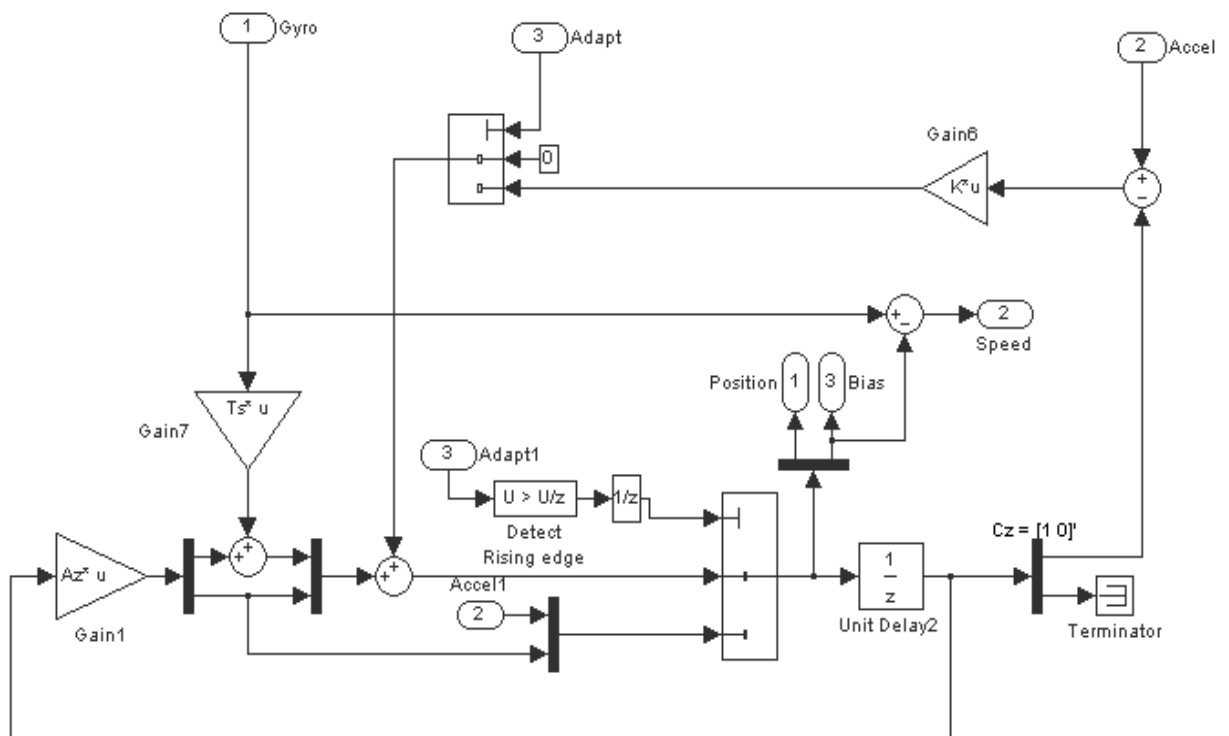


Рисунок 2.15 - Модель блоку обробки даних 5

Результати моделювання з використанням фільтра Калмана представлені на рисунку 2.16.

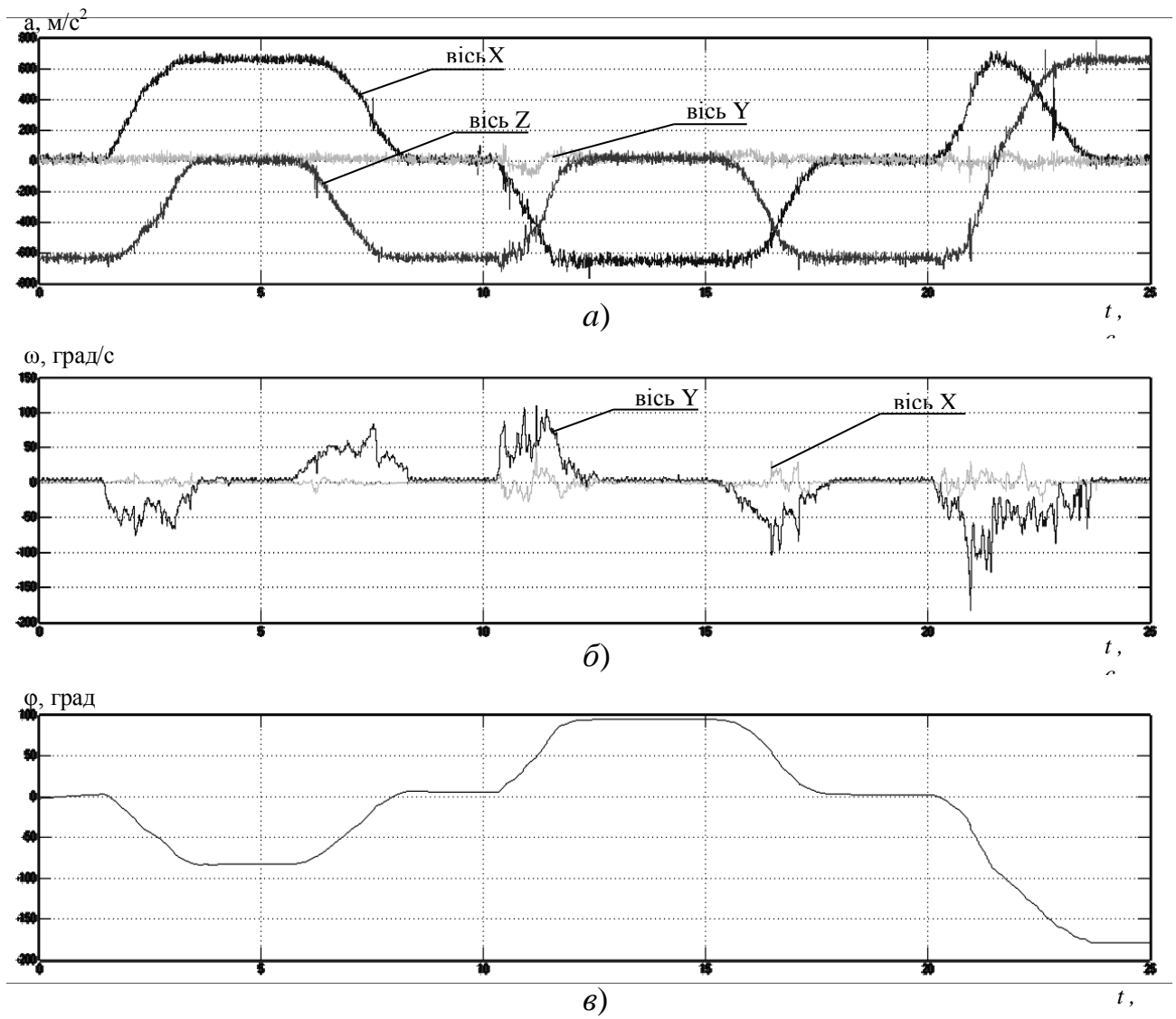


Рисунок 2.16 - Результати моделювання при використанні фільтра Калмана:

- а) сигнали з тривісного акселерометра;
- б) сигнали з двовісного гіроскопа;
- в) сигнал зміни кута.

На рисунку 2.17 і 2.18 представлені загальні результати моделювання (сигналу кутового відхилення з використанням трьох різних фільтрів).

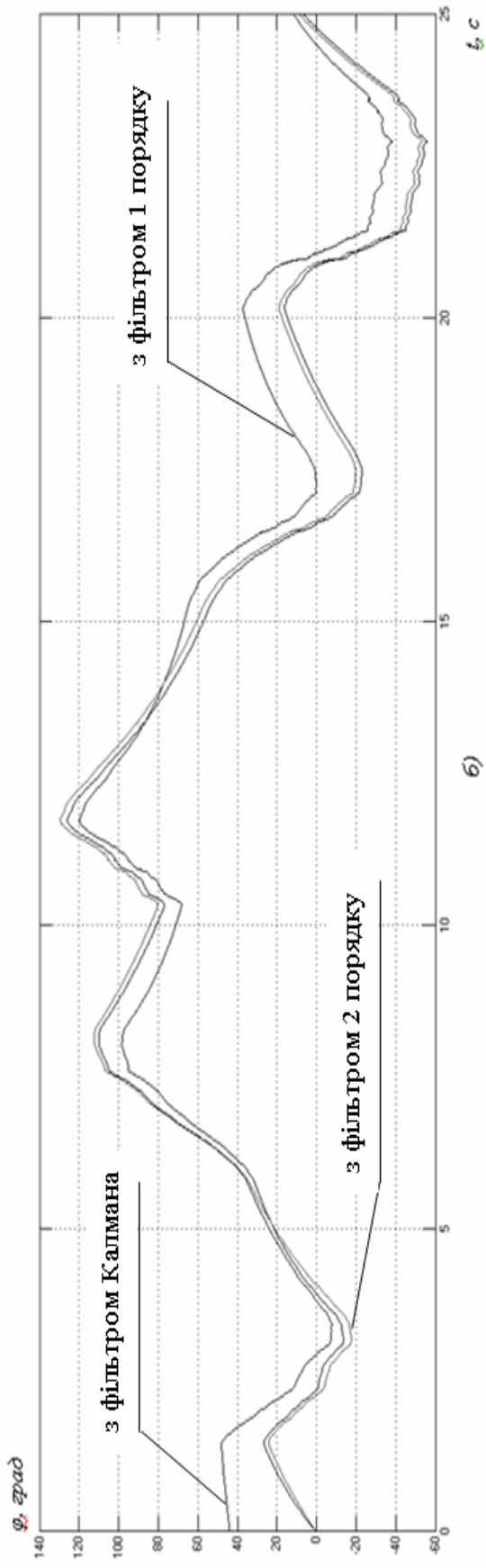
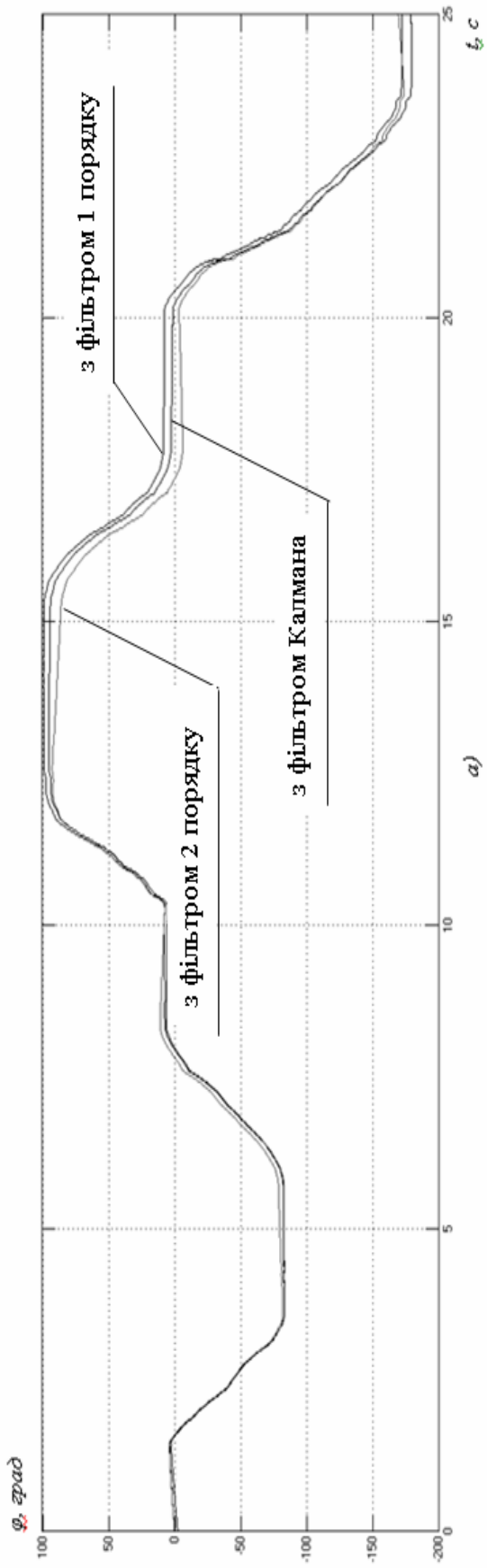


Рисунок 2.17 - Результати роботи системи обробки даних:

- а) - результати роботи системи з використанням гіроскопа та акселерометра;
- б) результати роботи системи без акселерометра.

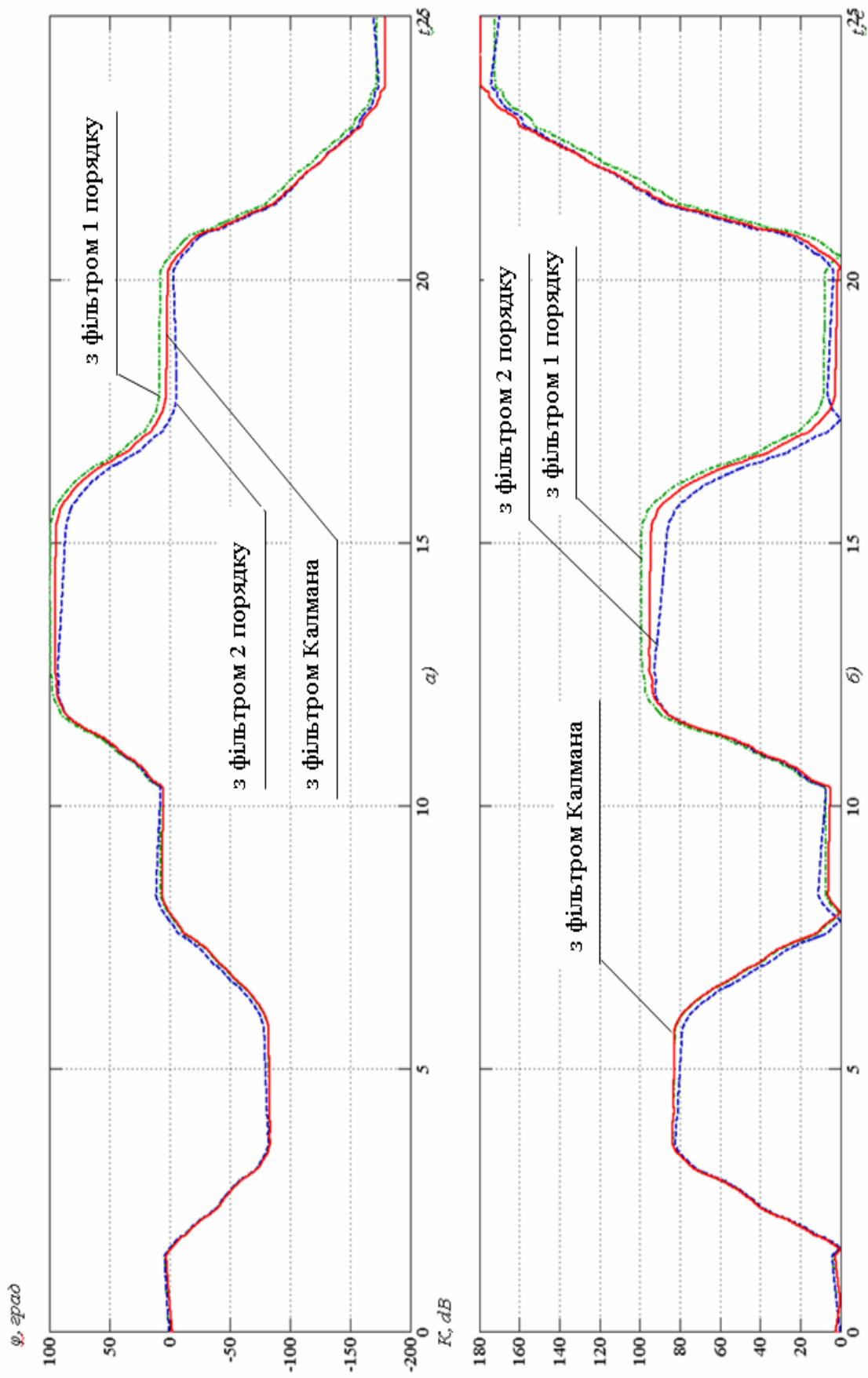


Рисунок 2.18 - Результати роботи системи обробки даних:

а) вихідні сигнали відхилення кута; б) перетворення Фур'є для вихідних сигналів.

2.3 Моделювання системи відстеження параметрів відхилення рухомого об'єкта

2.3.1 Опис системи

У даній системі розглядається транспортний засіб (наприклад, автомобіль), що рухається уздовж деякої невідомої заздалегідь траєкторії. Інформація про траєкторію може бути одержана різними способами. У даному випадку буде розглядатися модель, у якій в кожен момент часу від сенсора (наприклад, гіроскоп та акселерометр) надходить інформація про відхилення центру ваги машини від передбачуваної траєкторії y та кривизна траєкторії φ в точці, найближчої до сенсора. Під кривизною мається на увазі $\varphi = l/R$, де R - радіус кривизни. Таким чином, повна траєкторія заздалегідь невідома, тому точна кривизна розглядається збурення $\varphi(t)$, що вимірюється.

Рух об'єкта описується системою рівнянь:

$$\begin{aligned} \dot{x} &= Ax + Bu + G\varphi(t) \\ x &= |\beta \quad r \quad \Delta\psi \quad y|^T \end{aligned} \quad (2.1)$$

Компоненти фазового вектора x мають наступний фізичний сенс:

- β - кут між віссю об'єкта та вектором швидкості (проти годинникової стрілки);
- r - миттєва кутова швидкість повороту рухомого об'єкта навколо центру ваги (проти годинникової стрілки);
- $\Delta\psi$ - кут між дотичним вектором траєкторії в точці, найближчої до центру ваги, та віссю рухомого об'єкта (проти годинникової стрілки);
- y - відстань від сенсора до центру траєкторії руху (по нормалі, зі знаком - в залежності від того, з якого боку траєкторії знаходиться сенсор: ліворуч - плюс, праворуч-мінус).

Всі згадані вище кути та ті, які зустрічаються далі по тексту, вимірюються в радіанах.

Управління u являє собою кут повороту передніх коліс щодо осі рухомого об'єкта, що те ж саме, що і кут повороту керма. З причин конструктивного характеру управління повинне задовольняти двом обмеженням:

$$u(t) \leq \frac{40\pi}{180}$$

$$\frac{du(t)}{dt} \leq \frac{23\pi}{180}$$

Матриці, що описують об'єкт мають вигляд:

$$A = \begin{vmatrix} a_{11} & a_{12} & 0 & 0 \\ a_{21} & a_{22} & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ v & l & v & 0 \end{vmatrix}, \quad B = |b_1 \ b_2 \ 0 \ 0|^T, \quad G = |0 \ 0 \ -v \ 0|^T$$

При цьому параметри визначаються:

$$a_{11} = -\frac{(c_f + c_r)}{m v}$$

$$a_{12} = -1 + \frac{(c_r l_r - c_f l_f)}{m v^2}$$

$$a_{21} = \frac{(c_r l_r - c_f l_f)}{J}$$

$$a_{22} = -\frac{(c_r l_r^2 - c_f l_f^2)}{J v}$$

$$b_1 = \frac{c_f}{m v}$$

$$b_2 = \frac{c_f l_f}{J}$$

Допоміжні параметри мають наступний фізичний сенс:

- v - швидкість руху об'єктів, м / с;
- m - маса об'єкта, кг;
- l - ширина об'єкта, м;
- l_r - відстань від центру ваги об'єкта до задньої вісі, м;
- l_f - відстань від центру ваги об'єкта до передньої вісі, м;

- l_s - відстань від центра ваги до сенсора, м;
- J - центральний момент інерції, кгм^2 ;
- c_f, c_r - коефіцієнти, обумовлені динамікою об'єкта та коефіцієнтом зчеплення, Н / рад.

Швидкість вважається відомою функцією від часу $v = v(t)$.

Параметри, що визначаються лінійними розмірами об'єкта, мають наступні значення:

$$m = 2000, \quad J = 2650, \quad l_s = 2, \quad l_f = 2, \quad l_r = 2, \quad l = 2.$$

Для невеликого автомобіля, який рухається по сухій дорозі, коефіцієнти c_f та c_r оцінюються величинами:

$$c_f = 200, \quad c_r = 2000.$$

Вектор спостереження C має вигляд:

$$|0 \quad 1 \quad 0 \quad 1|^T.$$

Як згадувалося вище, інформація про величину відхилення від бажаної траєкторії y і кривизна шляху $\varphi(t)$ надходять від спеціального сенсора. Крім цього, гіроскоп дозволяє оцінити величину r [19].

2.3.2 Постановка задачі

Рух об'єкта описується системою рівнянь четвертого порядку (2.1). При побудові моделі необхідно компенсувати три змінних компонента ($\beta, \Delta\psi, r$) фазового вектора x та спрямувати до нуля четверту компоненту y , це необхідно для того, щоб слідкувати за відстанню від сенсора до центру траєкторії руху. Тобто, при моделюванні потрібно сформувати компенсатор та регуля-

тор, що забезпечує виконання умов $y \rightarrow 0, t \rightarrow \infty$. Результат управління повинен задовольняти критерію якості (відхилення від центра траєкторії не повинно перевищувати заданого значення).

$$\max|y(t)| \leq 0.10 - 0.15 \quad .$$

Таким чином, до вирішення завдання стабілізації слід спочатку поставити та вирішити задачу формування компенсатора для перших трьох змінних, а потім отримати їх оцінки за спостереженими значеннями

2.3.3 Зведення задачі стеження до задачі стабілізації

Розглянемо керуючий сигнал у вигляді суми

$$u(t) = S^T [\tilde{x}(t) - x_0(t)] + \alpha \varphi(t), \quad (2.2)$$

де S - вектор зворотного зв'язку, а $\tilde{x}(t)$ - вектор оцінок фазових змінних. Знайдемо таке

$$x_0 = |x_0^1 \quad x_0^2 \quad x_0^3 \quad 0|^T,$$

що

$$A x_0 + B \alpha \varphi(t) + G \varphi(t) = 0$$

Для цього підставимо вираз для u та отримаємо систему рівнянь:

$$\begin{aligned} a_{11} \cdot x_0^1 + a_{12} \cdot x_0^2 + \alpha \cdot \varphi(t) \cdot b_1 &= 0 \\ a_{21} \cdot x_0^1 + a_{22} \cdot x_0^2 + \alpha \cdot \varphi(t) \cdot b_2 &= 0 \\ x_0^2 + \varphi(t) \cdot v &= 0 \\ x_0^1 \cdot v + l \cdot x_0^2 + v \cdot x_0^3 &= 0 \end{aligned}$$

Вирішивши ці рівняння, отримаємо:

$$x_0 = \varphi(t) \cdot \begin{vmatrix} v \cdot \frac{(a_{12} \cdot b_2 - a_{22} \cdot b_1)}{(a_{11} \cdot b_2 - a_{21} \cdot b_1)} \\ -v \\ \frac{(v \cdot a_{22} \cdot b_1 - v \cdot a_{12} \cdot b_2 + l \cdot (a_{11} \cdot b_2 - a_{21} \cdot b_1))}{(a_{11} \cdot b_2 - a_{21} \cdot b_1)} \\ 0 \end{vmatrix}$$

$$\alpha = v \cdot \frac{(a_{11} \cdot a_{22} - a_{12} \cdot a_{21})}{a_{11} \cdot b_2 - a_{21} \cdot b_1}$$

Побудувавши, таким чином, компенсатор, перейдемо до нової системи:

$$\dot{\hat{x}} = A\hat{x} + b S^T \hat{x}, \quad (10)$$

де $\hat{x} = \hat{x} - x_0(t)$.

Припустимо, що ми маємо оцінки параметрів β і $\Delta\psi$, які не вимірюються, та почнемо побудову регулятора. Оскільки розглянута система нестационарна, для побудови регулятора використовуємо перетворення, яке переводить матрицю замкнутої системи незалежно від вектора зворотного зв'язку до форми Фробеніуса [20]:

$$\hat{A} = \begin{vmatrix} 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \\ \hat{a}_1(t) & \hat{a}_2(t) & \hat{a}_3(t) & \hat{a}_4(t) \end{vmatrix}, \quad \hat{B} = \begin{vmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ \hat{b}_1(t) \end{vmatrix}$$

2.3.4 Формування канонічного перетворення подібності для системи

Розглянемо перетворення $Z(t)=T(t)x(t)$. Матриця T визначається з умов: матриця об'єкта перетвореної системи має форму Фробеніуса з останнім функціональним рядком, вектор розподілу перетвореної системи є останній одиничний орт e_n . Звідси, згідно з [20] отримуємо:

$$T = \begin{pmatrix} m(t) \\ \frac{dm(t)}{dt} + m(t) \cdot L_1(t) \\ \frac{d^2 m(t)}{dt^2} + 2 \cdot \frac{dm(t)}{dt} \cdot L_1(t) + m(t) \cdot L_2(t) \\ \frac{d^3 m(t)}{dt^3} + 3 \cdot \frac{d^2 m(t)}{dt^2} \cdot L_1(t) + 3 \cdot \frac{dm(t)}{dt} \cdot L_2(t) + m(t) \cdot L_3(t) \end{pmatrix}.$$

Приведемо вигляд цих матриць:

$$\begin{aligned} L_1 &= A(t) \\ L_2 &= \frac{d}{dt} A(t) + A(t)^2, \\ L_3 &= \frac{d^2}{dt^2} A(t) + 3 A(t) \cdot \frac{d}{dt} A(t) + A(t)^3 \end{aligned}$$

де $L_i(t)$ - матриці відповідних похідних в силу системи, а $m(t)$ - вектор, який потрібно знайти з умови $TB = e_n$. Для системи четвертого порядку вектор $m(t)$ знаходиться з виразу:

$$m^T(t) \begin{vmatrix} B(t) & \frac{d}{dt} B(t) & \frac{d^2}{dt^2} B(t) & \frac{d^3}{dt^3} B(t) \end{vmatrix} = |0 \quad 0 \quad 0 \quad 1|,$$

де $\frac{d}{dt}$ - оператор диференціювання в силу однорідної системи. У розгорнутому вигляді ці умови будуть мати вигляд:

$$\begin{aligned}
m^T B &= 0 \\
m^T (L_1 B - \dot{B}) &= 0 \\
m^T (L_2 B - 2\dot{L}_1 B - 2L_1 \dot{B} + \ddot{B}) &= 0 \\
m^T (L_3 B - 4\ddot{B} + 3\ddot{L}_1 B + 6\dot{L}_1 \dot{B} + 3L_1 \ddot{B} - 3\dot{L}_2 B - 3L_2 \dot{B}) &= 1
\end{aligned}$$

Цих чотирьох рівнянь достатньо для знаходження $m(t)$ тільки у разі стаціонарного вектора управління. В іншому випадку, для знаходження рішення буде потрібно продиференціювати ці рівняння та додати до вихідної системи з чотирьох рівнянь. Так, перше рівняння доведеться продиференціювати три рази, друге - два, та третє - один.

Застосуємо побудоване перетворення до системи:

$$\begin{aligned}
\hat{B}(t) &= T(t) B(t) \\
\hat{A}(t) &= T(t) A(t) T^{-1}(t) + \frac{d}{dt} T(t) T^{-1}(t)
\end{aligned}$$

Отримані таким чином матриці мають бажаний вид.

2.3.5 Стабілізація системи

Розглянемо матрицю

$$H = \begin{vmatrix} h_1 & h_{12} & 0 & 0 \\ h_{12} & h_2 & h_{23} & 0 \\ 0 & h_{23} & h_3 & h_{34} \\ 0 & 0 & h_{34} & h_4 \end{vmatrix},$$

де $h_i > 0$, и $-1 < \rho_k < 1$.

Переконаємося в тому, що вона відповідає позитивно визначеній квадратичній формі $V(t, \hat{x}) = \hat{x}^T H \hat{x}$. Розглянемо похідну цієї форми в силу системи:

$$\begin{aligned}\dot{V} &= \hat{x}^T P \hat{x}, \\ P &= (\hat{A}(t) + \hat{B}(t) \hat{S}^T) H + H (\hat{A}(t) + \hat{B}(t) \hat{S}^T)^T\end{aligned}$$

та потребуємо її негативної визначеності. Використовуючи критерій Сильвестра, будемо домагатися того, щоб головні діагональні мінори матриці P склали знакозмінну послідовність. Виберемо вектор зворотного зв'язку перетвореної системи S у вигляді:

$$\hat{S} = |0 \quad 0 \quad 0 \quad s_1|$$

Тоді знакозмінності перших трьох мінорів можна буде досягти шляхом підбору елементів матриці H , а позитивності визначника матриці P можна буде досягти шляхом підбору параметра s_1 . Допустимий діапазон, в якому може змінюватися параметр s_1 знаходиться з квадратного рівняння, коефіцієнти якого є функціями від швидкості $v(t)$ та її похідних. Беручи до уваги природу об'єкта можна спростити завдання, вважаючи старші похідні швидкості рівними нулю. Таким чином, для кожної пари значень (v, a) , де a - це прискорення, можна обчислити верхній $S_{max}(a, t)$ та нижній $S_{min}(a, t)$ кордони для значень s_1 . Зрозуміло, що для кращої стабілізації слід брати значення, що лежать посередині цього інтервалу. Для того, щоб вирішити поставлену задачу, потрібно повернутися у вихідний базис:

$$S = T^T(t) \hat{S}$$

При русі з постійною швидкістю вектор зворотного зв'язку буде мати вигляд:

$$S = S_c = |s_c^1 \quad s_c^2 \quad 0 \quad 0|,$$

а під час руху з прискоренням будуть задіяні усі чотири елемента вектора:

$$S = S_a = |s_a^1 \quad s_a^2 \quad s_a^2 \quad s_a^2|,$$

2.3.6 Оцінка фазових змінних

Таким чином, залишилося вирішити задачу оцінки не вимірюваних компонент вектора $X(t)$.

2.3.6.1 Оцінка стану параметра β

Як було показано, навіть для найпростішого випадку - руху з постійною швидкістю, - потрібно знати, як мінімум перші дві фазові змінні. Друга фазова змінна вимірюється безпосередньо, а для оцінки перших потрібно побудувати спостерігач. Слід звернути увагу на те, що права верхня чверть матриці об'єкта складається з нулів. Завдяки цьому, для оцінки першої фазової змінної досить побудувати спостерігач другого порядку. Скористаємося класичною методикою Люенбергера. Візьмемо матрицю A^I другого порядку та вектор спостереження C^1 та стабілізуємо цю систему по узгодженню:

$$A_o^1 = \begin{vmatrix} a_{11} & a_{12} \\ a_{21} & a_{22} \end{vmatrix}, \quad C_o^1 = \begin{vmatrix} 0 & 1 \end{vmatrix}$$

Ця система сама по собі є стійкою, що легко показати, тому можна вважати, що для спостереження першої фазової змінної досить просто промодельовати об'єкт, що відповідає верхній лівій чверті матриці A .

2.3.6.2 Оцінка стану параметра $\Delta\phi$

Розглянемо рух з прискоренням. Для побудови вектора зворотного зв'язку в цьому випадку потрібно також оцінка стану $\Delta\psi$. Побудуємо для цього другий спостерігач. Візьмемо матрицю спостерігача, як рівною матриці вихідного об'єкта $A_0^2 = A$ та вектор спостереження рівним вектору управління $C_0^2 = B$. Завдання стабілізації цієї системи вже була вирішена.

2.3.6.3 Формування регулятора для вихідної системи

Таким чином, регулятор для перетвореної системи має вигляд, де вектор оцінок фазових змінних $X(t)$ є вектором фазових змінних спостерігача, а регулятор вихідної системи має вигляд:

$$u = S^T(t) T(t) \tilde{X}(t) + \alpha \Phi(t).$$

2.3.7 Опис моделі в середовищі Simulink

Моделювання наведених вище результатів проводилося в пакеті Simulink. Загальна схема моделювання показано на рисунку 2.19.

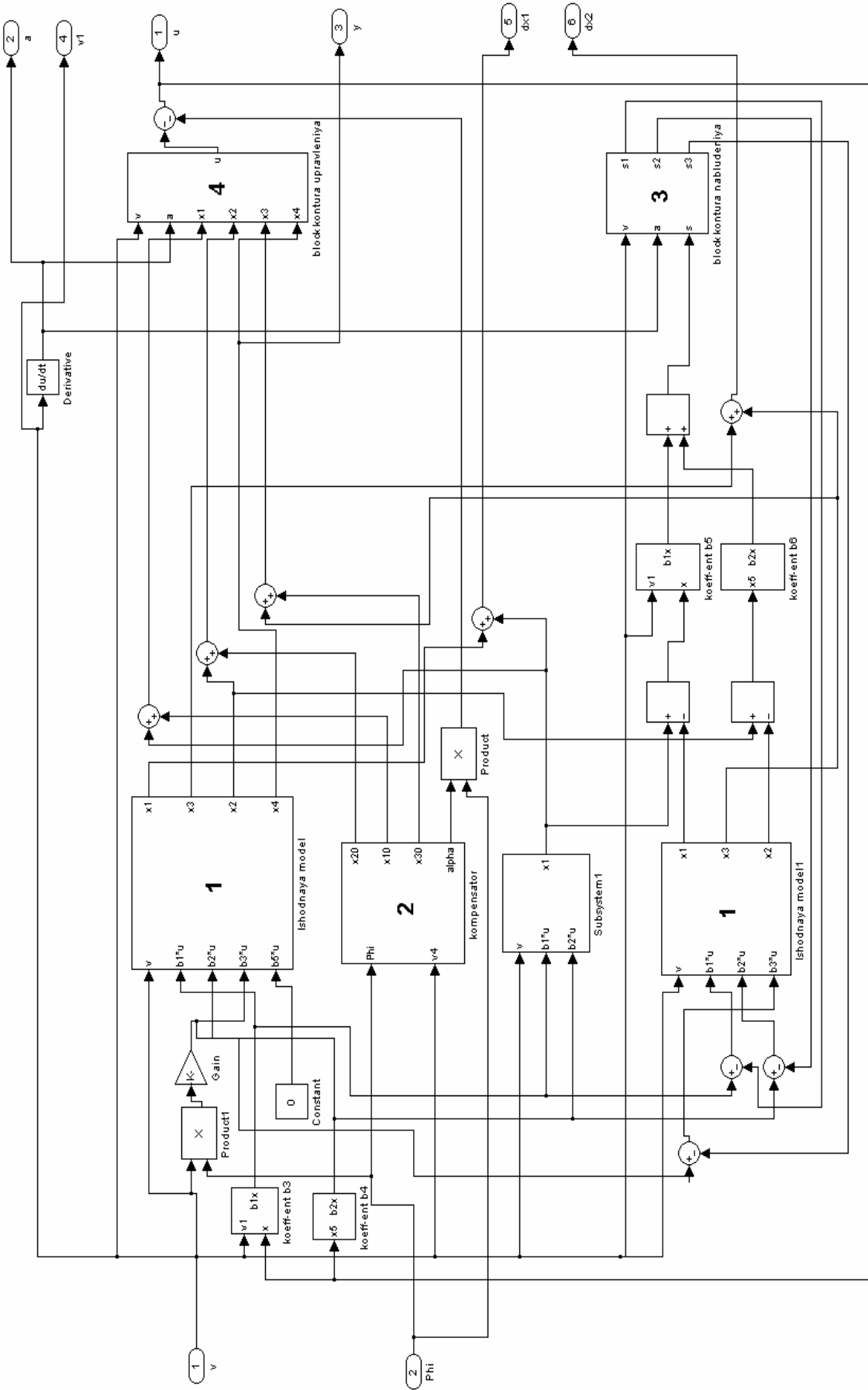


Рисунок 2.19 - Модель системи відстеження параметрів відхилення рухомого об'єкта в середовищі Simulink

В цій моделі можна виділити п'ять основних блоків: модель самого об'єкта (блок відзначено цифрою 1), яка присутня у схемі двічі, - в якості власне об'єкта управління та в якості моделі об'єкта управління в спостереженні; блоки, які формують сигнал зворотного зв'язку як в контурі спостереження, так і в контурі управління (блоки позначені цифрами 3 та 4 відповідно); блок компенсатора (цифра 2), який присутній у схемі з-за того, що згідно з умовою завдання потрібно стабілізувати не все, а лише одну фазових змінну.

Модель має два входи - швидкість v і кривизну шляху Φ , та два виходи - відхилення центра мас транспортного засобу від середини дороги y та управління, тобто кут повороту керма u .

Диференціальні рівняння моделювалися за допомогою інтеграторів, при цьому функція множення на нестационарні коефіцієнти реалізувалася кожен раз у вигляді окремої підсистеми. В якості окремих входів відповідних підсистем використовувалися швидкість v та прискорення a . При цьому прискорення обчислювалося всередині моделі як диференціал від швидкості. Моделі нестационарних коефіцієнтів a_{11} , a_{12} , a_{21} , a_{22} , b_1 , b_2 , підсистеми другого порядку, вихідної системи четвертого порядку, компенсатора, а також усіх використовуваних блоків наведені на рисунках нижче.

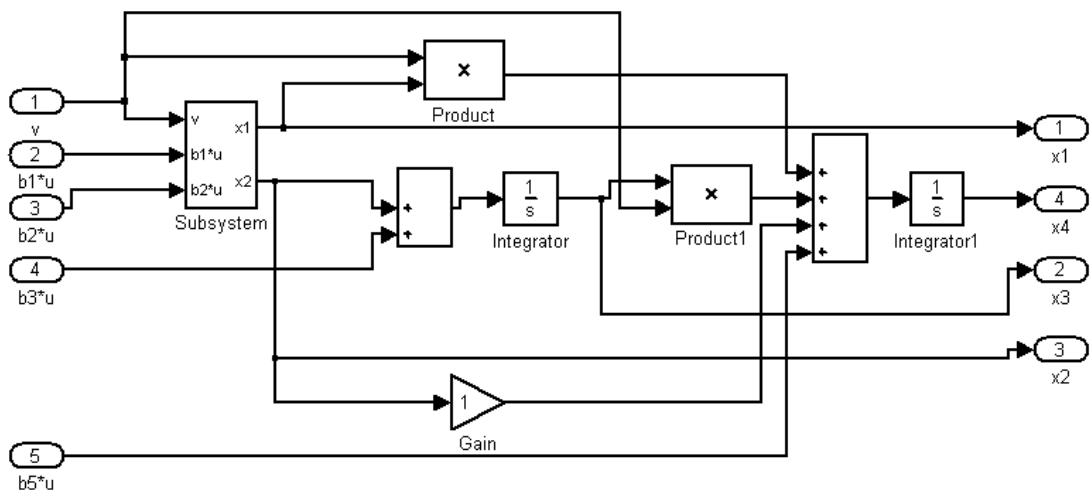


Рисунок 2.20 - Модель вихідної системи 4-го порядку

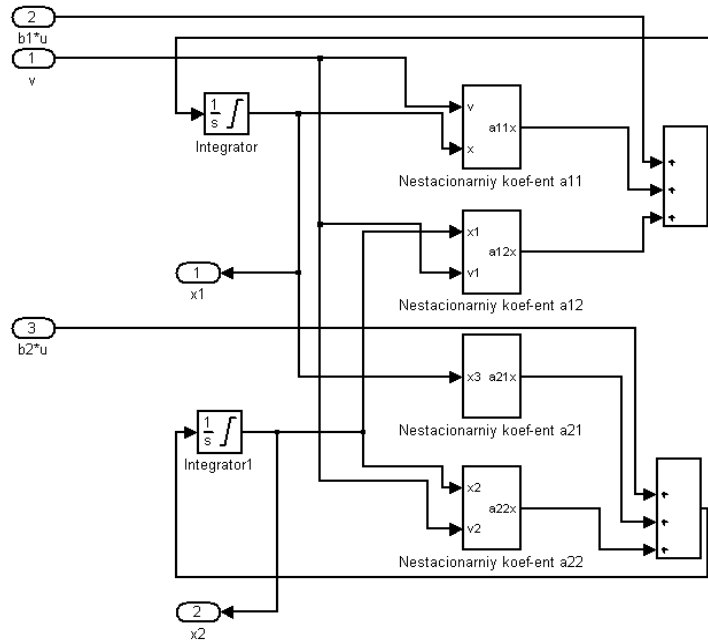


Рисунок 2.21 - Модель підсистеми 2-го порядку

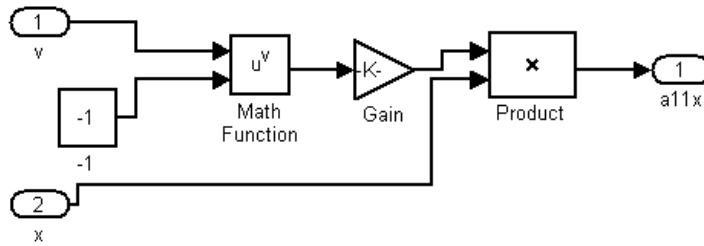


Рисунок 2.22 - Модель нестационарного коефіцієнта a_{11}

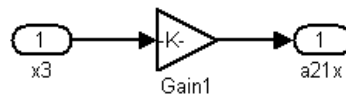


Рисунок 2.23 - Модель нестационарного коефіцієнта a_{21}

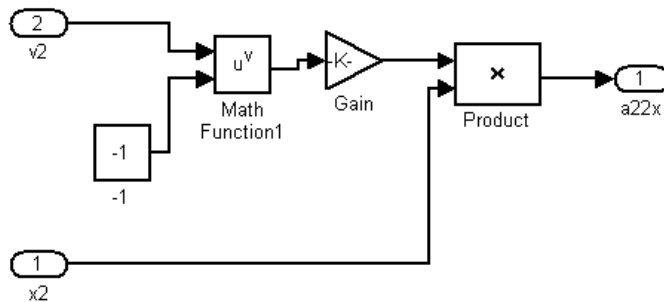


Рисунок 2.24 - Модель нестационарного коефіцієнта a_{22}

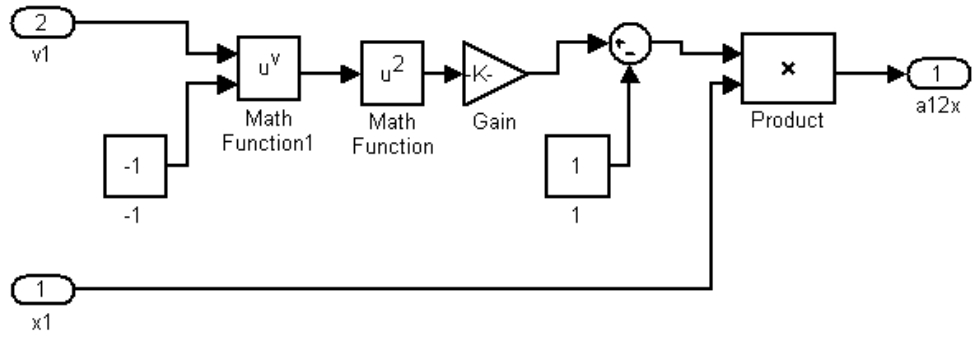


Рисунок 2.25 - Модель нестационарного коефіцієнта a_{12}

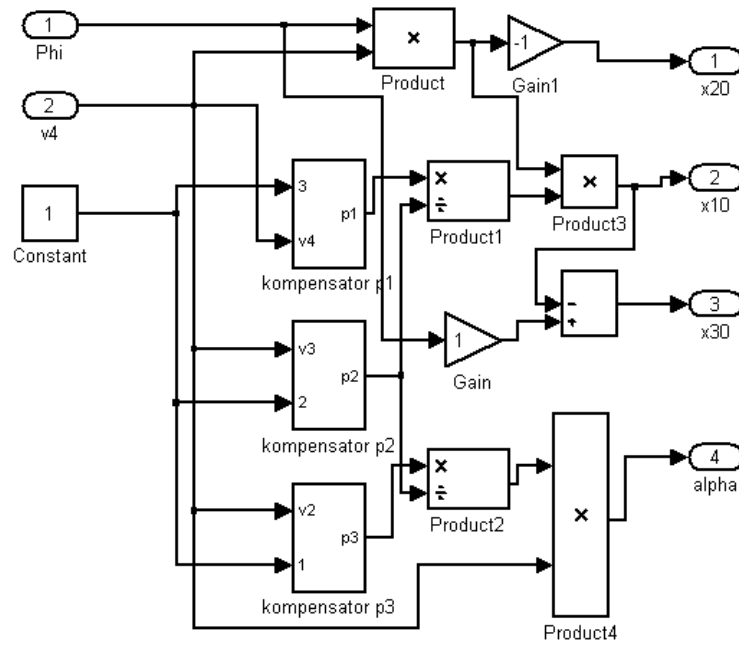


Рисунок 2.26 - Модель компенсатора

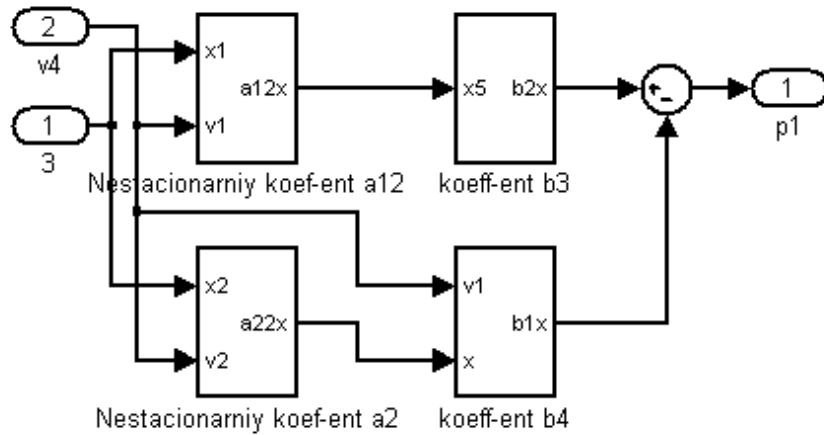
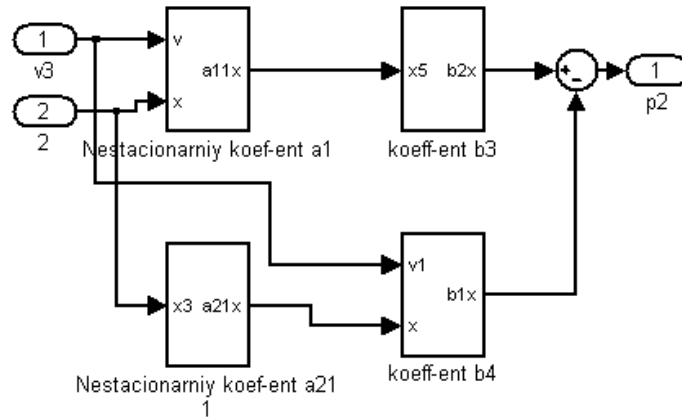
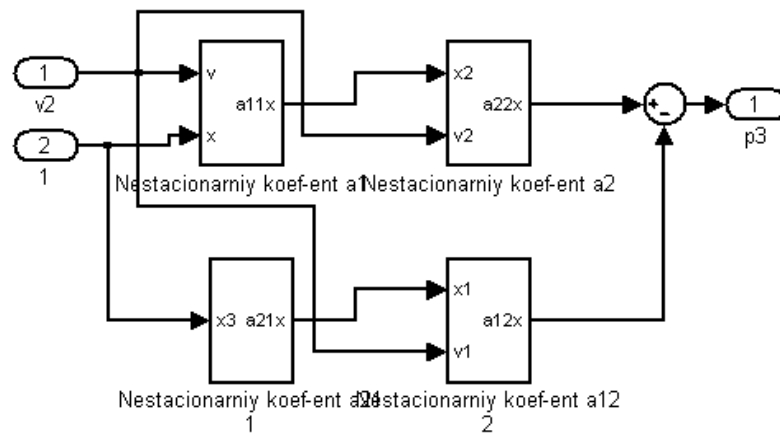
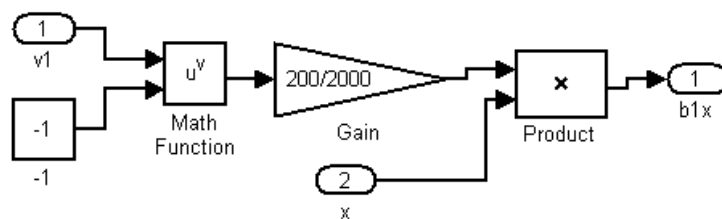
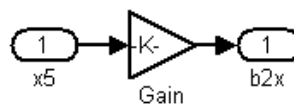


Рисунок 2.27 - Модель підсистеми p_1 компенсатора

Рисунок 2.28 - Модель підсистеми p_2 компенсатораРисунок 2.29 - Модель підсистеми p_3 компенсатораРисунок 2.30 - Модель нестационарного коефіцієнта b_1 Рисунок 2.31 - Модель нестационарного коефіцієнта b_2

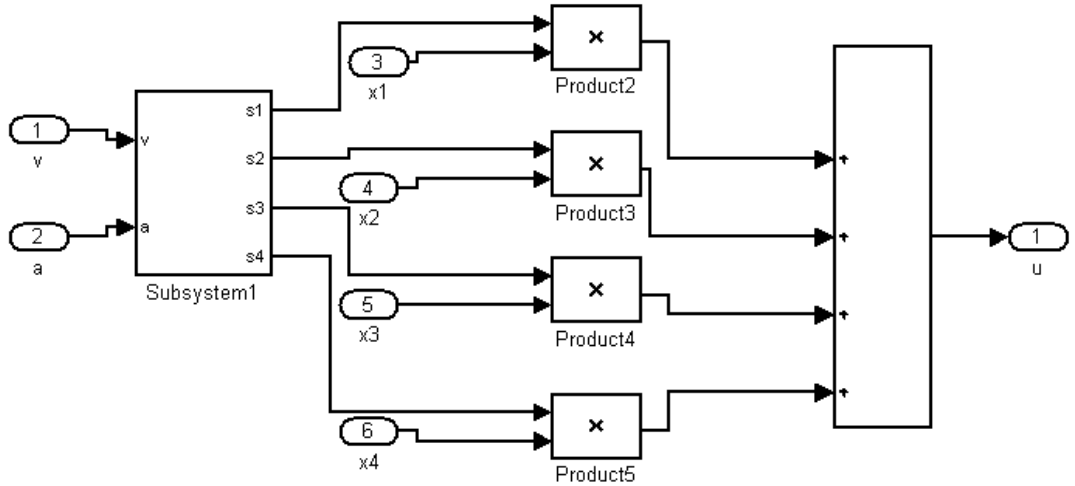


Рисунок 2.32 - Модель блоку формування сигналу зворотного зв'язку в контурі управління (елемент 4 на рисунку 2.19)

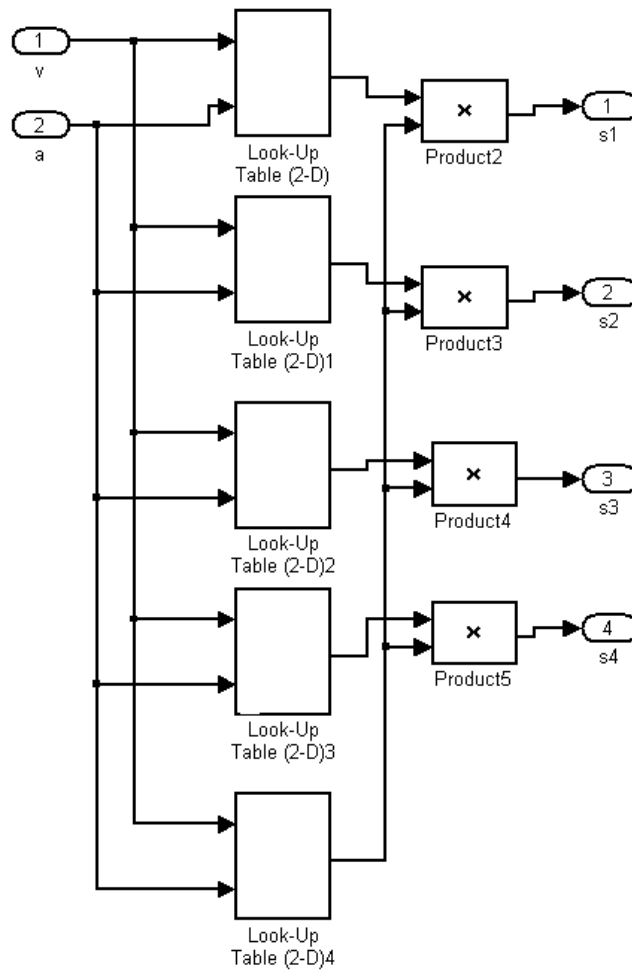


Рисунок 2.33 - Модель блоку коефіцієнтів зворотного зв'язку

2.3.8 Результати моделювання

Етап моделювання побудованої схеми складався з двох послідовних фаз - моделювання в стаціонарному режимі та моделювання в нестаціонарному режимі. У стаціонарному режимі було досліджено два маневру: рух по дузі кола (рисунок 2.34а) з нульовим початковим відхиленням та рух по прямій з ненульовим початковим відхиленням (рисунок 2.34б). В обох випадках швидкість передбачалася постійною: $v(t) = v_0 = 30 \text{ м / с}$. У другому випадку вектор початкових умов дорівнював

$$X_0 = |0001|^T.$$

Для того, щоб відобразити найбільш характерні риси траєкторії був розглянутий інтервал часу $T = 200$.

На другому етапі розглядалася нестаціонарна модель об'єкта. Параметри маневру, досліджуваного в цьому режимі, показані на рисунку 2.35. Транспортний засіб рухається прямо, потім здійснює поворот вздовж дуги окружності з радіусом кривизни $R = 30 \text{ м}$ і знову продовжує рухатися по прямій. Перед тим як під'їхати до повороту, об'єкт поступово скидає швидкість з 60 до 22,5 м / с, здійснює поворот з постійною швидкістю 22,5 м / с і знову розганяється до 60 м / с. Графік залежності вимірюваної кривизни бажаної траєкторії від часу показано на рисунку 2.35а. Графік залежності швидкості від часу зображено на рисунку 2.35б. Графіки вихідних сигналів моделі показано на рисунку 2.36. Рисунок 2.36а відповідає куту повороту керма δ (передніх коліс), а рисунок 2.36б - відхилення від бажаної траєкторії y .

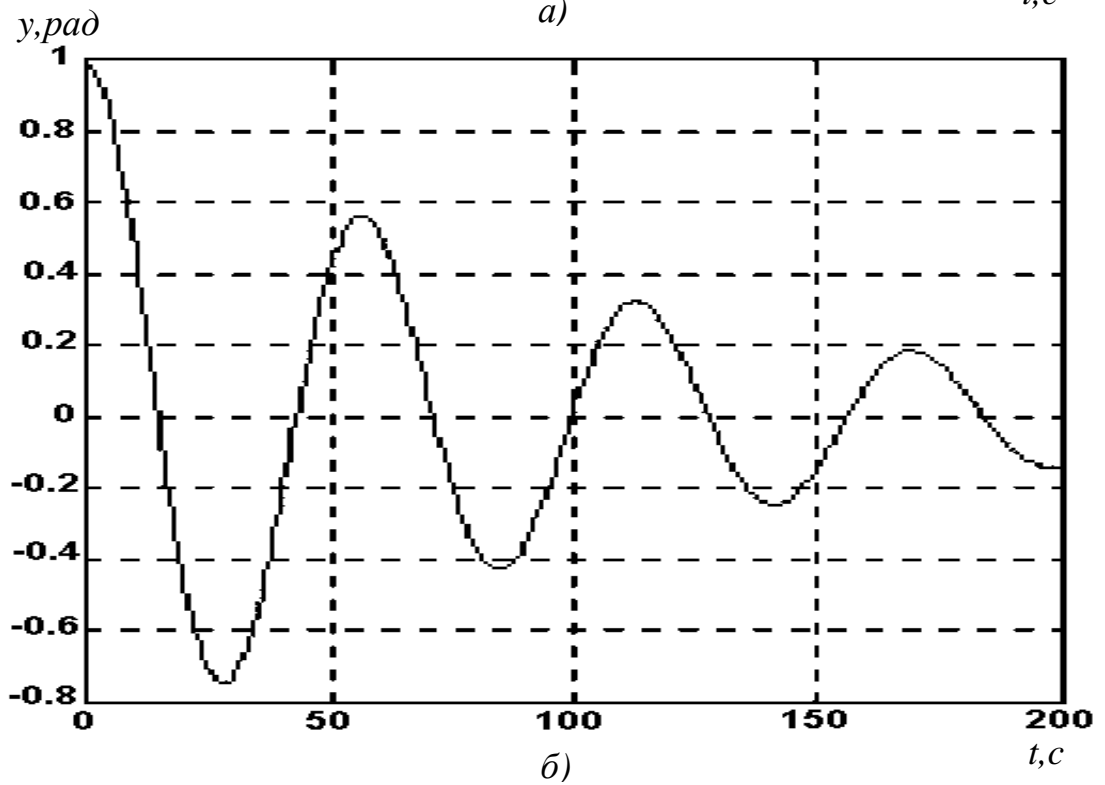
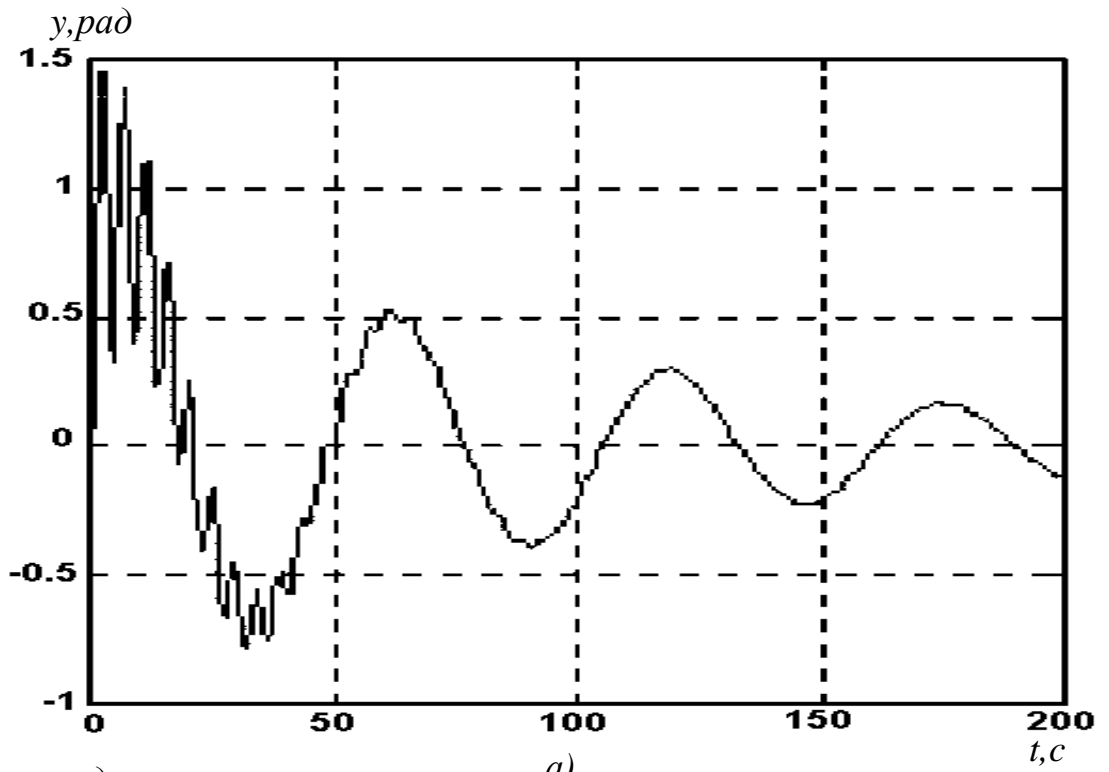
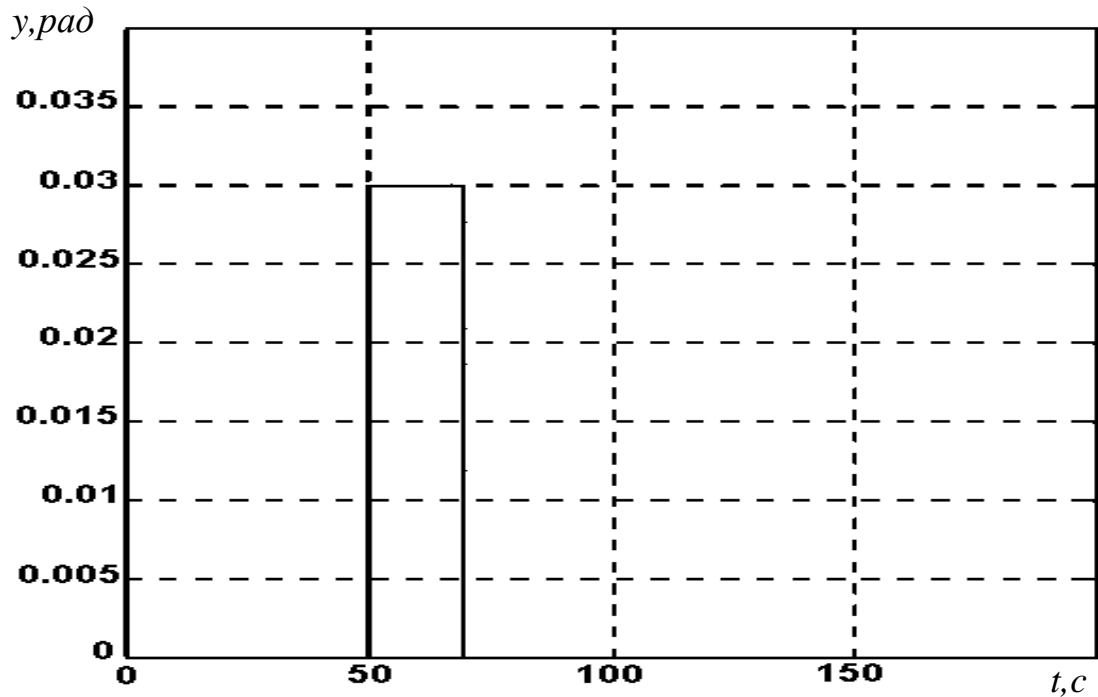


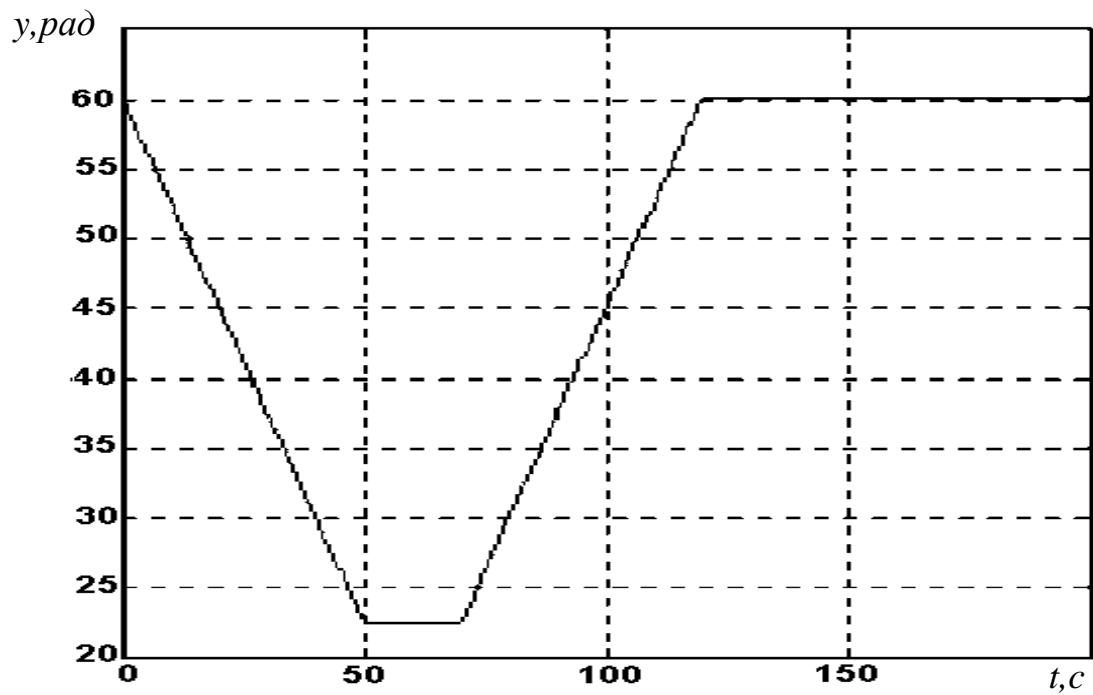
Рисунок 2.34 - Відхилення від центру дороги y :

a) рух по колу $R = 30\text{м}$;

б) рух по прямій з ненульовими початковими умовами.



a)

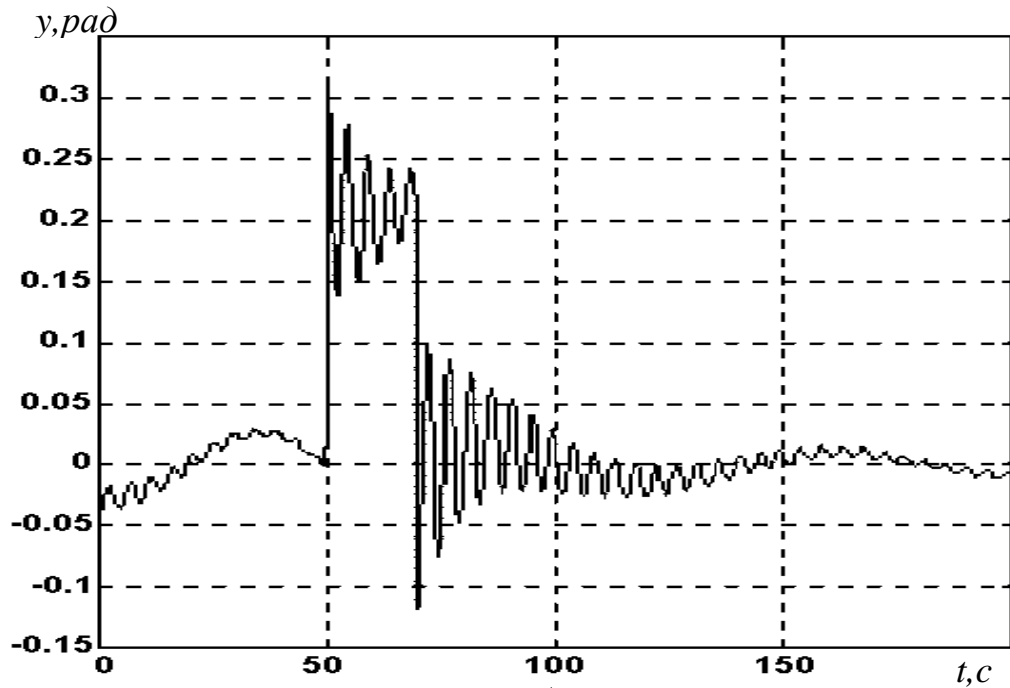


б)

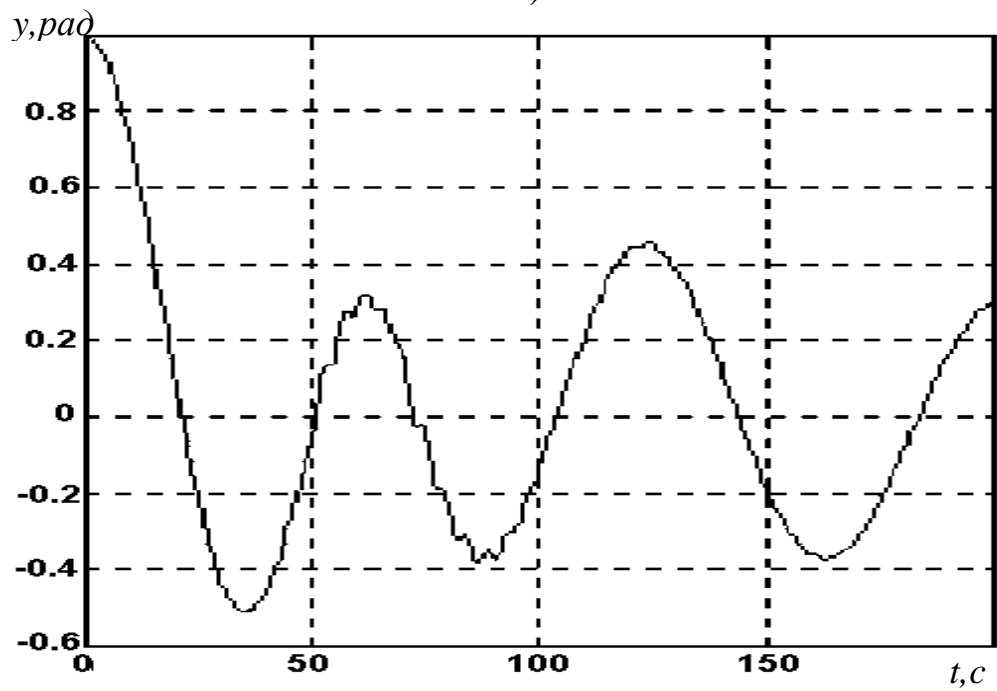
Рисунок 2.35 - Опис маневру об'єкта:

а) залежність кривизни від часу;

б) залежність швидкості від часу.



a)



б)

Рисунок 2.36 - Результати моделювання для маневру 3:

a) кут повороту керма u ;

б) відхилення від центру дороги y (від бажаної траєкторії).

2.3.9 Висновки за розділом

При проектуванні систем визначення місцеположення можуть виникнути проблеми і питання, пов'язані з особливостями тих об'єктів, де буде використовуватися така система, з типом використовуваних елементів, а також з бажаними характеристиками вихідного сигналу. Тому виникає необхідність індивідуального дослідження кожної проекрованої системи. Моделювання систем визначення місцеположення об'єкта дозволяє відобразити роботу реальних пристроїв та елементів, при необхідності відкоригувати необхідні параметри та досягти бажаного результату.

У ході моделювання були побудовані та проаналізовані дві моделі:

- модель системи обробки даних;
- модель системи визначення місцеположення об'єкта.

Перша модель дозволяє обробляти сигнали, отримані з мікроелектромеханічного гіроскопа та акселерометра (кутова швидкість і прискорення відповідно). Спільне використання мікроелектромеханічного гіроскопа та акселерометра дозволяє досягти найкращих результатів при визначенні кутового відхилення. Обробка сигналів включає: калібрування (для компенсації величини кутового дрейфу, похибок від вібрацій та шуму, а також для вирівнювання зміщення вісей); фільтрацію (необхідна через наявність шумів у сигналах, які можуть посилюватися при встановленні мікроелектромеханічних елементів на віброуючі об'єкти); отримання величини кутового відхилення від мікроелектромеханічного гіроскопа та акселерометра (інтегрування сигналу кутової швидкості від гіроскопа та обчислення арктангенсу відношення прискорень, значення яких отримані від акселерометра); комбінування отриманих сигналів кутового відхилення для покращення вихідного сигналу кутового відхилення.

Для фільтрації (необхідна з-за можливої наявності шумів у сигналах) отриманих сигналів в моделі системи обробки даних використовувалися фільтри високих і низьких частот (ФВЧ - для гіроскопа, ФНЧ - для акселерометра). Застосовувалися фільтри першого порядку, другого та фільтр Калмана.

Фільтр першого порядку є найбільш простим у реалізації структури, але у вихідному сигналі присутня помилка в установленому стані.

Використання фільтра Калмана дає найкращі результати (можна визначити відхилення (дрейф) кутовий швидкості з гіроскопа та визначити величину кута без спотворень), але реалізація такого фільтра є найбільш складною.

Застосування фільтрів другого порядку дає позитивні результати: помилка в установленому стані практично відсутня та цей фільтр нескладно реалізувати.

Загальний аналіз моделі системи обробки даних показує, що спільне використання мікроелектромеханічного гіроскопа та акселерометра в системі визначення кута дає результати ліпші (усувається помилка в установленому стані, компенсується дрейф кутової швидкості), у порівнянні з результатом, отриманим при використанні тільки мікроелектромеханічного гіроскопа.

Моделювання системи відстеження параметрів відхилення рухомого об'єкта (друга модель) дозволяє спостерігати та проаналізувати поведінку рухомого об'єкта при зміні швидкості (прискорення) руху даного об'єкту і траєкторії. Зміна положення об'єкта у просторі може фіксуватися мікроелектромеханічним гіроскопом та акселерометром. Дана модель не є універсальною, а підлаштовується під параметри конкретного об'єкта. Шлях переміщення об'єкта розглядається з урахуванням кута відхилення від центру бажаної траєкторії. Алгоритм роботи цієї моделі може бути закладений в мікроконтролер та використовуватися у автономних системах визначення місцеположення об'єкта.

Кут відхилення від центру траєкторії може бути отриманий від спільної роботи мікроелектромеханічного гіроскопа та акселерометра, тобто дві аналізовані моделі можуть використовуватися як цілісна система визначення координат місцезнаходження будь-якого реального об'єкта на базі мікроелектромеханічного гіроскопа та акселерометра.

ТРЕТІЙ РОЗДІЛ

ПЕРЕВІРКА РЕЗУЛЬТАТІВ МОДЕЛЮВАННЯ

Перевірка результатів моделювання здійснювалася експериментальним шляхом. Для проведення експерименту використовувалася система визначення кута на базі мікроелектромеханічного гіроскопа фірми Melexis, а також плата вводу - виводу PCI - 1711/1731 (фірма advantech), за допомогою якої дані, які зняті з пристрою визначення кута, передавалися в персональний комп'ютер. В ході експерименту фіксувались значення кутової швидкості та відповідні їм відхилення кута. Збереження і обробка даних здійснювалася в середовищі Simulink пакета Matlab. На рисунку 3.1 представлена структурна схема експериментальної системи.

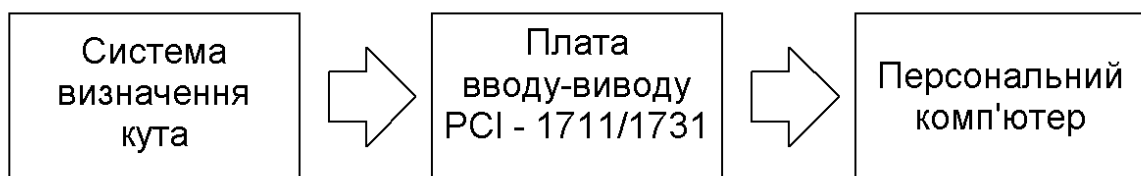


Рисунок 3.1 - Структурна схема експериментальної системи

3.1 Опис системи визначення кута на базі мікроелектромеханічного гіроскопа

Для експерименту була виготовлена система визначення кутового відхилення структурна схема якої представлена на рисунку 3.2.

Розглянемо короткий опис системи визначення кута відхилення. Мікроелектромеханічний гіроскоп визначає кутову швидкість обертання всієї системи. Через цифровий інтерфейс сигнал кутової швидкості, для наступної обробки, надходить на мікроконтроллер, що програмується, який інтегрує

даний сигнал, щоб перевести вимірювання швидкості обертання в вимірювання зміни кута відхилення в просторі. Після чого оброблений сигнал через цифровий інтерфейс надходить на приймач даного сигналу (наприклад, цифрова індикація, запис під Flash-пам'ять і т.д.). З цифрового інтерфейсу сигнал надходить на цифрово-аналоговий перетворювач, для перетворення цифрового сигналу в аналоговий, а вже через лінію передачі сигнал надходить до приймача, який також може бути індикатором для аналогових сигналів. Елемент управління (кнопка) служить для запуску або скидання роботи пристрою.

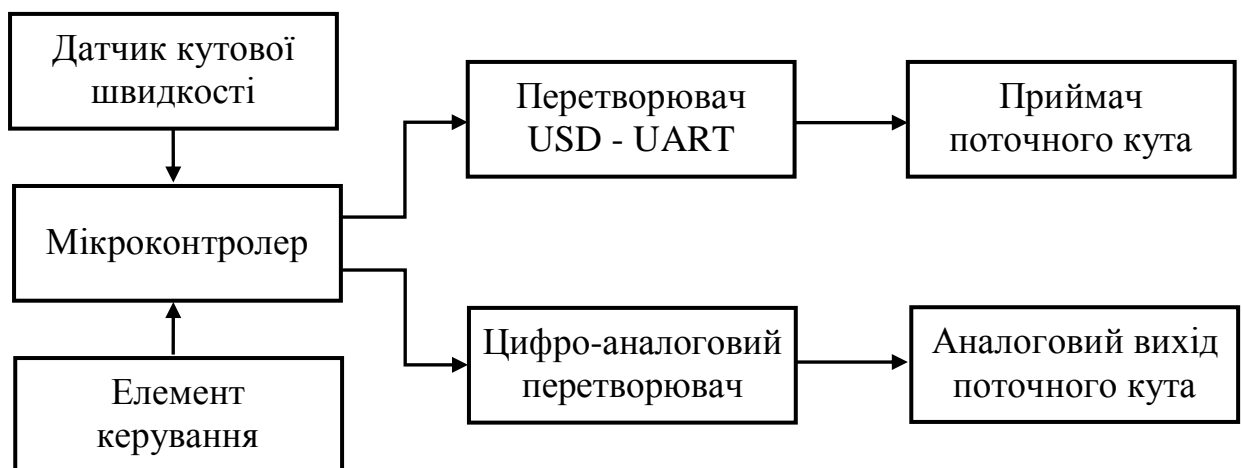


Рисунок 3.2 - Структурна схема пристрою для визначення кута відхилення об'єкта

На основі структурної схеми будується функціональна схема пристрою (рисунок 3.3).

Функціональна схема відображає, яким чином здійснюється взаємозв'язок між окремими вузлами. Реалізація зв'язків здійснюється, в основному, по цифрових інтерфейсах. Зв'язок датчика кутової швидкості з мікроконтролером здійснюється SPI-інтерфейсом. Перетворений сигнал з мікроконтролера надходить через I2C-інтерфейс на ЦАП та через UART-інтерфейс на USB-UART перетворювач. З USB-UART перетворювача інформація про стан об'єкта може вступати на будь-який пристрій з USB-інтерфейсом (ПК, ноутбук, КПК і т.д.).

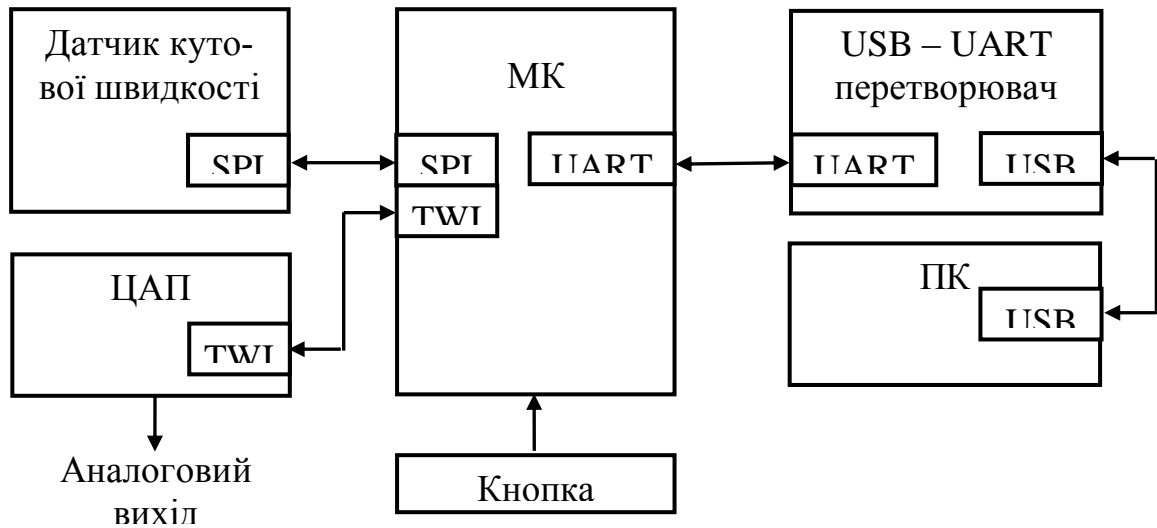


Рисунок 3.3 - Функціональна схема пристрою для визначення кутової координати об'єкта

3.2 Опис плати вводу-виводу РСІ - 1711/1731

Особливості плати вводу-виводу:

- АЦП 12 біт, 100 кГц ;
- 16 потенційних аналогових входів;
- поканально програмоване посилення (КП: 1, 2, 4, 8, 16);
- автоматичне сканування каналів;
- буфер FIFO на 1К значень;
- 2 каналу ЦАП 12 біт;
- 16 цифрових входів та 16 цифрових виходів;
- програмувальна схема запуску.

На рисунку 3.4 показано зовнішній вигляд плати вводу-виводу РСІ - 1711/1731

РСІ-1711/1731 є потужною недорогою багатофункціональною платою збору даних. У РСІ-1711/1731 є 16 аналогових входів, 16 цифрових входів та 16 цифрових вихідних каналів, а також програмований лічильник. У РСІ-1711 передбачається 2 вихідних аналогових каналу.

PCI-1711/1731 є Plug-i-Play (з'єднай та працюй) пристроєм, що повністю відповідає специфікації PCI Rev2.1. У процесі встановлення плати немає необхідності встановлювати які-небудь перемички або DIP перемикачі.

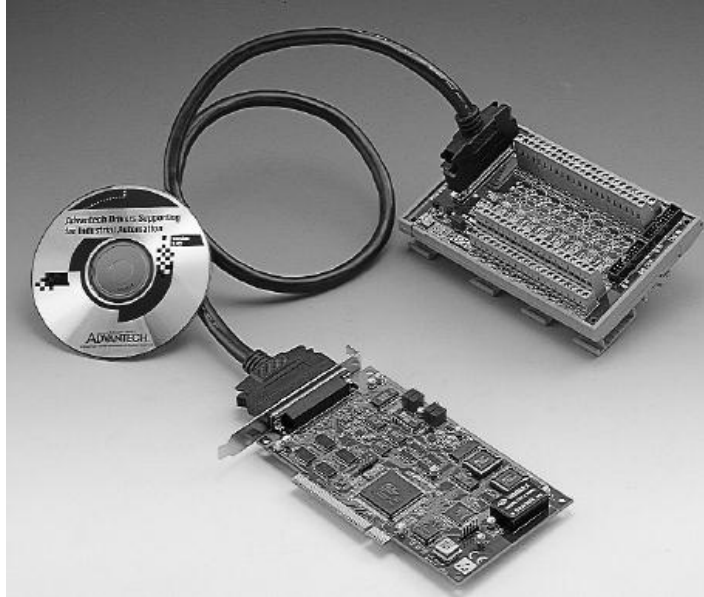


Рисунок 3.4 - Плата вводу-виводу PCI - 1711/1731

У PCI-1711/1731 є функція автоматичного сканування каналу. Користувачі можуть встановити різні значення вхідної напруги для кожного каналу у відповідності з їх потребами, тобто є гнучка система налаштувань вхідного діапазону. Ця система дозволяє здійснювати багатоканальний, високошвидкісний, високопродуктивний збір даних.

У PCI-1711/1731 забезпечується буферна пам'ять FIFO («перший увійшов - перший вийшов»), яка зберігає до 1К А / D зразків. Користувач може включити або відключити функцію запиту переривання з FIFO буфера. Ця гнучка функція дозволяє здійснювати безперервну високошвидкісну передачу даних з більш передбачуваною продуктивністю системи Windows.

Плата PCI-1711/1731 оздоблена програмувальним лічильником, який може використовуватися як тригер, що задає, для аналого-цифрового перетворення.

Плата вводу-виводу застосовується в процесах спостереження та контролю, для перетворення та вимірювання, як багатоканальний цифровий вольтметр і т.п. [22].

На рисунку 3.5 представлена структурна схема плати вводу-виводу PCI-1711/1731.

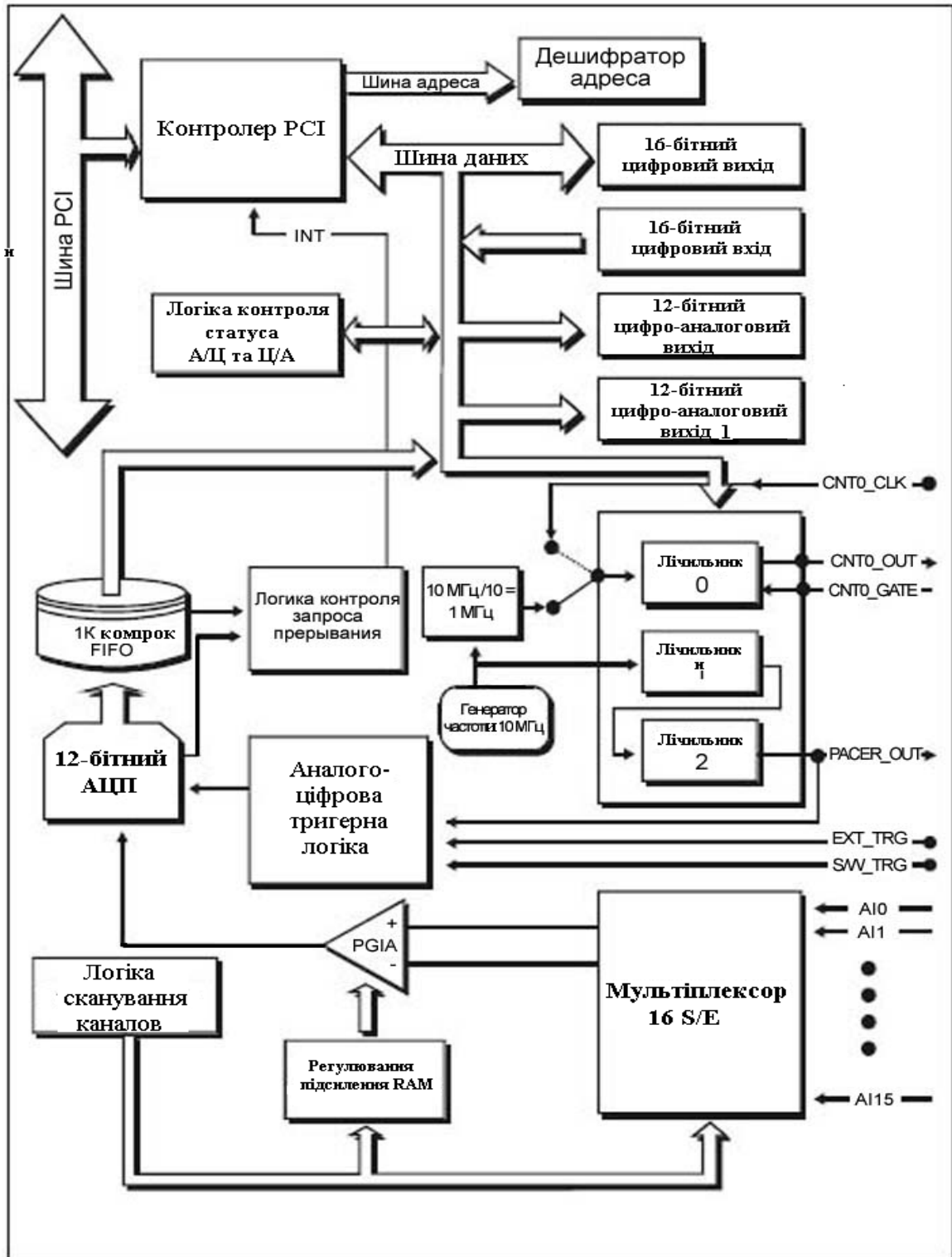


Рисунок 3.5 - Структурна схема плати вводу-виводу PCI - 1711/1731

На рисунках, що наведені нижче представлений порівняльний аналіз експериментальних результатів та результатів, що отримані за допомогою моделювання.

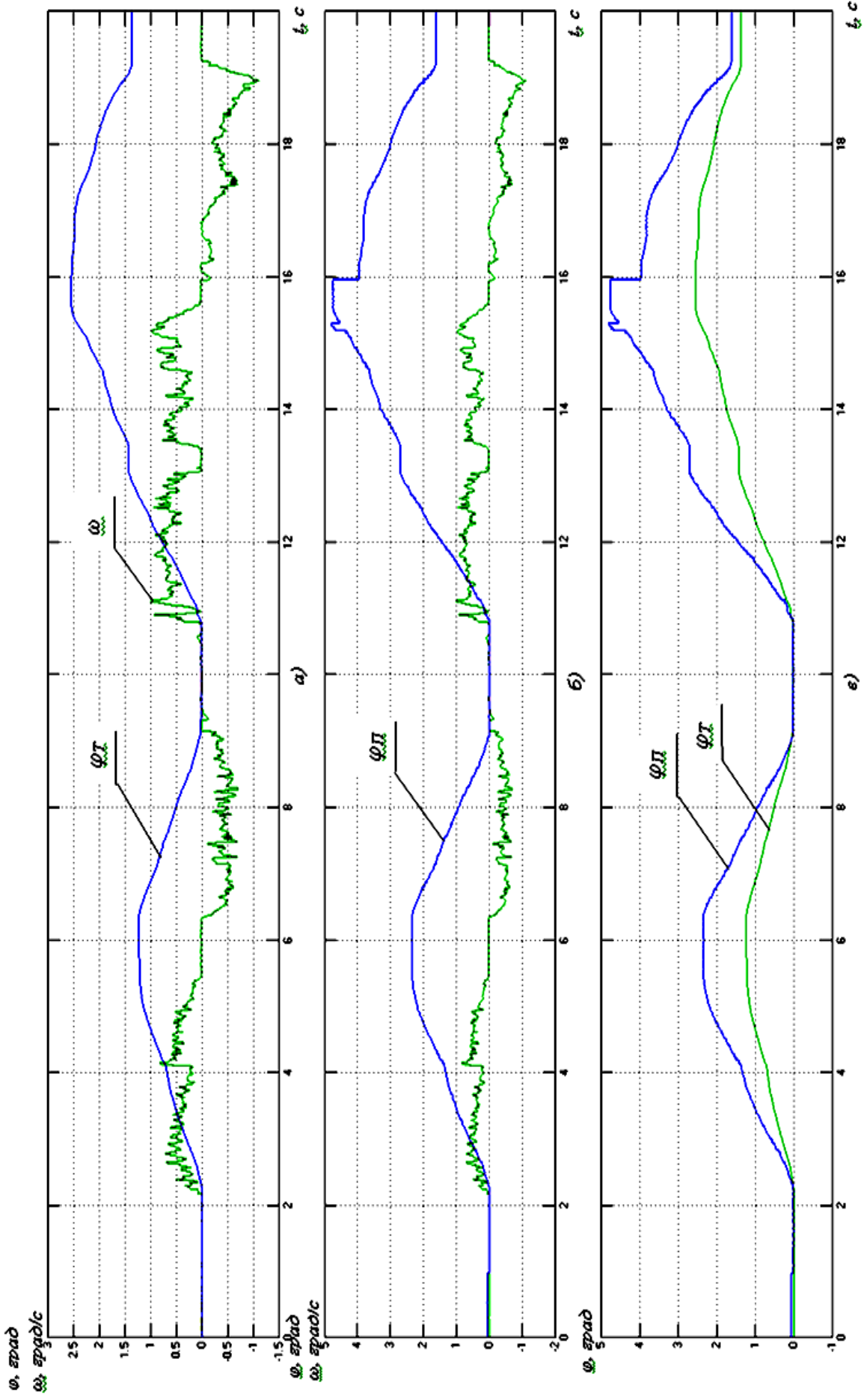


Рисунок 3.6 - Порівняльний аналіз експериментальних результатів та результатів, що отримані за допомогою моделювання (перший експеримент).

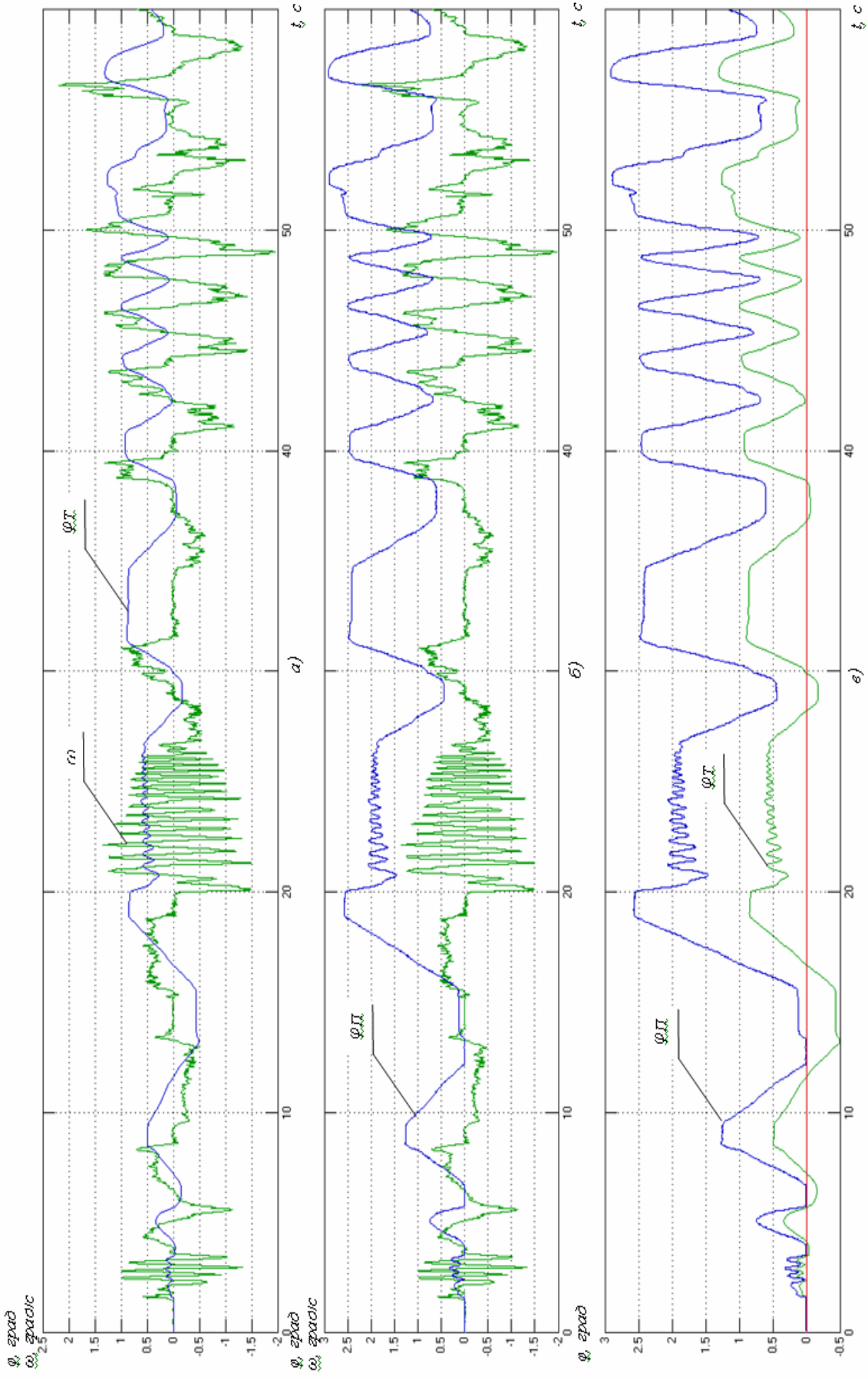


Рисунок 3.7 - Порівняльний аналіз експериментальних результатів та результатів, що отримані за допомогою моделювання (другий експеримент).

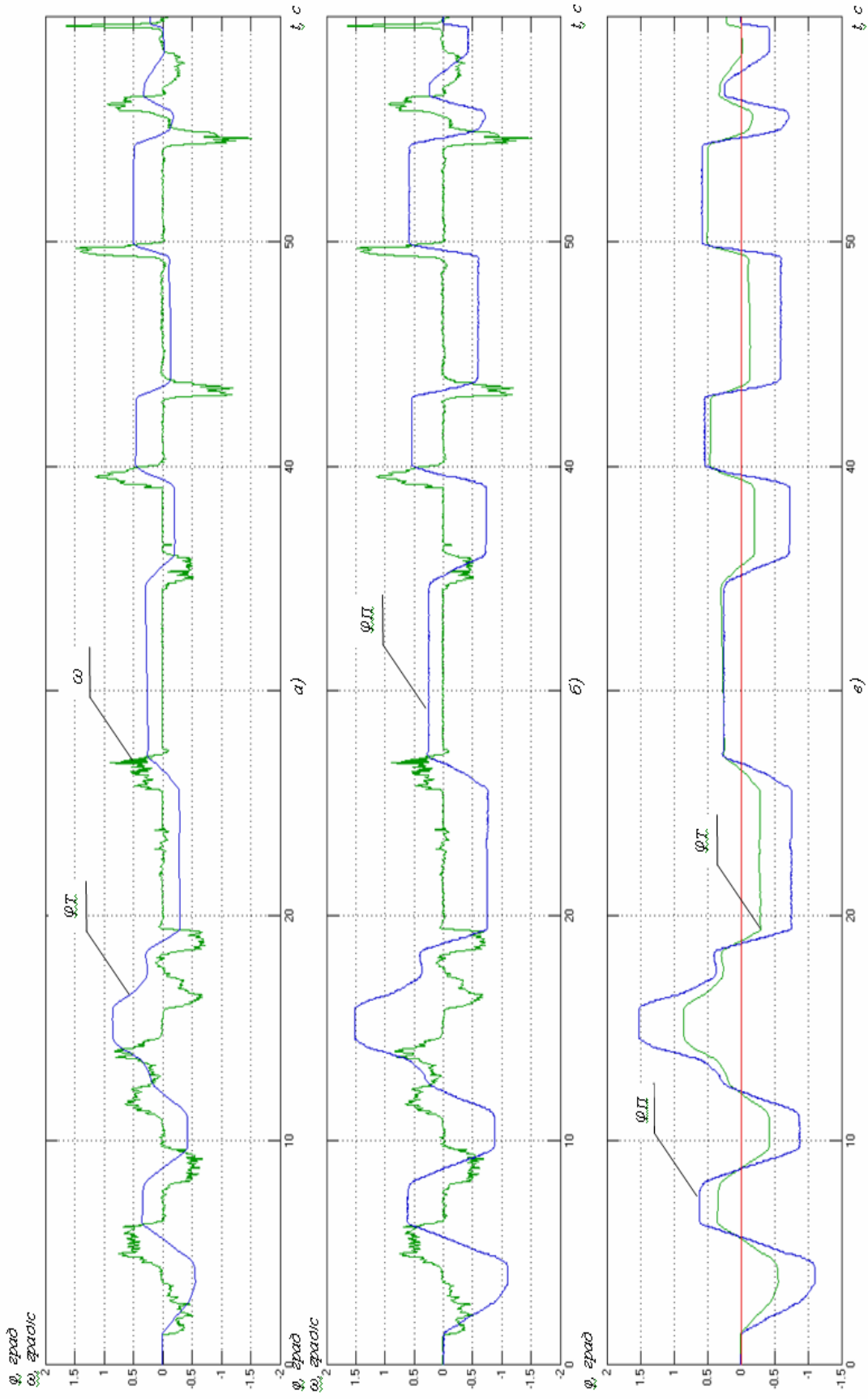


Рисунок 3.8 - Порівняльний аналіз експериментальних результатів та результатів, що отримані за допомогою моделювання (третій експеримент).

3.3 Висновки за розділом

З метою порівняння отриманих теоретичних даних був проведений фізичний експеримент. Досліджувалась система визначення кута на базі мікроелектромеханічного гіроскопа фірми Melexis. Отримані дані через плату вводу-виводу передавалися на персональний комп'ютер в середу Simulink 7.2 пакета Matlab 7.7.

Порівняльний аналіз теоретичних та експериментальних даних показав, що отримані сигнали кутового відхилення практично ідентичні, але дрейф кутовий швидкості присутній (це недолік всіх мікроелектромеханічних гіроскопів), а, відповідно, у результаті інтегрування кутовий швидкості з'являється кутовий дрейф, який складає (приблизно) 1 градус в хвилину. Також в ході експерименту система не зазнавала дії вібрації, тому отриманий сигнал практично не містить шуму.

Таким чином, система визначення місцеположення об'єкта є повністю працездатною, але для отримання більш якісного сигналу кутового відхилення та для використання таких систем в більш складних умовах доцільно застосовувати системи визначення кутового відхилення, які побудовані з використанням як мікроелектромеханічного гіроскопа, так і з використанням мікроелектромеханічного акселерометра.

ВИСНОВКИ

В ході роботи було виконано наступне:

- зроблений загальний огляд з досліджуваної теми; в результаті огляду можна сказати, що мікроелектромеханічні елементи (гіроскоп, акселерометр та ін.) - перспективні прилади сучасної мікросистемної техніки, які інтенсивно і динамічно розвивається в науково-технічному спрямуванні;

- розглянуті історичні та технологічні передумови виникнення мікроелектромеханічних систем; можна сказати, що розвиток мікроелектромеханічних систем почався ще у другій половині 40-х років минулого століття, коли була відкрита основа ключових технологічних процесів для створення MEMS-пристроїв та сучасних напівпровідникових приладів - анізотропне травлення кремнію, а з початку 90-х - триває, можна сказати, мікромеханічна епоха;

- вивчені конструкція та принципи роботи мікроелектромеханічних гіроскопів та акселерометрів, що дало можливість врахувати усі деталі при моделюванні;

- проведений аналіз існуючих схемних рішень, який показав, що на сьогоднішній день ще існують проблеми (або необхідність поліпшення існуючих результатів) в навігаційній області;

- вивчені проблеми (відхилення вихідного сигналу з-за дрейфів та шумів, є помилка в установленому стані) при побудові систем визначення координат місцеположення об'єкта та шляхи усунення виникаючих похибок (спільне використання мікроелектромеханічного гіроскопа та акселерометра, застосування різних фільтрів);

- розглянуті способи одержання величини кутового відхилення від мікроелектромеханічного гіроскопа та акселерометра (інтегрування сигналу кутовий швидкості від гіроскопа та обчислення арктангенсу відношення прискорень, значення яких отримані від акселерометра) з сигналу вихідної швид-

кості та прискорення відповідно, а також результат їх спільного використання в системі визначення місцеположення об'єкта;

- складена структурна схема системи визначення місцеположення об'єкта, що включає блок калібрування, блоки обробки даних, блок визначення місцеположення об'єкта та можлива принципова схема з'єднання елементів такої системи;

- виконано моделювання системи обробки даних та системи відстеження параметрів відхилення рухомого об'єкта за допомогою системи автоматизованого проектування; на основі проведеного моделювання можна сказати, що спільне використання гіроскопа та акселерометра в системі визначення кута дає результати ліпші (усувається помилка в установленому стані, компенсується дрейф кутової швидкості), у порівнянні з результатом, отриманим при використанні тільки мікроелектромеханічного гіроскопа;

- проведений фізичний експеримент з метою порівняння результатів, триманих за допомогою моделювання з одержаними експериментальними даними показав, що отримані сигнали кутового відхилення практично ідентичні, але дрейф кутової швидкості присутній (це недолік всіх мікроелектромеханічних гіроскопів), а, відповідно, у результаті інтегрування кутовий швидкості з'являється кутовий дрейф, що може становити (приблизно) кілька градусів на хвилину. Таким чином, система визначення місцеположення об'єкта, яка використовувалась у експерименті, є повністю працездатною, але для отримання більш якісного сигналу кутового відхилення та при використанні таких систем в більш складних умовах доцільно застосовувати системи визначення кутового відхилення з використанням як мікроелектромеханічного гіроскопа, так і з використанням мікроелектромеханічного акселерометра.

Далі можна дослідити та вирішувати такі питання:

- удосконалення моделі системи визначення місцеположення об'єкта (наприклад, зробити універсальною);

- побудова єдиної цілісної моделі системи визначення місцеположення об'єкту для зручності дослідження;
- реалізація пристрою визначення місцеположення об'єкта на базі мікроелектромеханічного гіроскопа та акселерометра.

В цілому, пропонується впровадження мікроелектромеханічних елементів (зокрема гіроскопа і акселерометра) в різні системи навігації.

ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ

1. Микро-Электро-Механика/ А.Н. Зубинский// Компьютерное обозрение. –2015. - №24.
2. Ригли У., Холлистер У., Денхард У. Теория, проектирование и испытания гироскопов.- М.: Мир, 1972.- 416 с.
3. Лестев М.А. Нелинейные задачи динамики вибрационных микромеханических гироскопов: автореф.дис. на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук: спец. 01.02.01 «Теоретическая механика»/Лестев М.А. – Санкт-Петербург, 2007.- 16с.
4. Ковалёв А.С.Управление первичными и вторичными колебаниями микромеханического гироскопа: автореф. дис. на соискание ученой степени кандидата технических наук: спец. 05.11.03 «Приборы навигации»/Ковалёв А.С. – Санкт-Петербург, 2008.- 21с.
5. Шахнович И.Н. МЭМС-гироскопы – единство выбора/ Шахнович И.Н.// Электроника: наука, технология, бизнес. – 2007. - №1. – С.76-85.
6. MEMS Inertial Sensors Selection Tables. Сайт представительства компании Analog Devices - Режим доступа: <http://analog.com.ru/> - 02.03.2018.
7. Н.В.Чистяков. Что даёт ДУС. – Режим доступа: [http://dpla.ru/acclmmer.img/chtodaetdus.htm./](http://dpla.ru/acclmmer.img/chtodaetdus.htm/) - 10.03.2018.
8. Н.В.Чистяков. Обуздание интеграла. – Режим доступа: <http://dpla.ru/acclmmer.img/obuzdanieintegrala.htm/>. –10.03.2018.
9. An Overview of MEMS Inertial Sensing Technology. Bernstein J., Corning-IntelliSense Corp. Sensors Magazine, Feb 2003. – Режим доступа: <http://www.sensorsmag.com/articles/0203/14/main.shtml>. - 3.03.2018
10. US Patent 5 982 054. Magnetostrictive device. Оpubл. 9.11.1999. (TDK Corporation).
11. Robust Feedback Control Design of an Ultra-Sensitive, High Bandwidth Tunneling Accelerometer. Khammash M., Oropeza-Ramos L., Turner Kimberly L. Department of Mechanical and Environmental Engineering, University of Califor-

nia at Santa Barbara. – Режим доступа: [http://www.engineering.ucsb.edu/~tmems/Robust Feedback Control Design of an Ultra-Sensitive, High Bandwidth.pdf](http://www.engineering.ucsb.edu/~tmems/Robust%20Feedback%20Control%20Design%20of%20an%20Ultra-Sensitive,%20High%20Bandwidth.pdf). – 7.03.2018.

12. High-resolution micromachined interferometric accelerometer. Cooper E. B., Post E. R., Griffith S. и др., Massachusetts Institute of Technology. – Режим доступа: [http://www.media.mit.edu/nanoscale/courses/readings/APL ID accel.pdf](http://www.media.mit.edu/nanoscale/courses/readings/APL_ID_accel.pdf). – 7.03.2018

13. Experimental evaluation and comparative analysis of commercial variable-capacitance MEMS accelerometers. Acar C., Shkel A M., University of California, 2003. <http://www.repositories.cdlib.org/cgi/viewcontent.cgi?article=1674&.../viewcontent.pdf>

14. Sill R. D. A 70g full scale accelerometer designed to survive 100,000g overrange. Endevco Technical Paper TP300.

15. Сысоева С. В. Автомобильные акселерометры. Часть 4. Развитие технологий и элементной базы емкостных акселерометр/ С. В. Сысоева // Компоненты и технологии. - 2012. - №3.

16. Miniature Inertial Measurement Unit – IMU. – Режим доступа: <http://www.kerhuel.eu>, 12.03.18, 16:07.

17. Гончаренко Г.Г. Компьютерные технологии визуального моделирования в прикладной гироскопии и навигации / Гончаренко Г.Г. – Учебное пособие – Москва: МАИ, 2005. – 148с.

18. Черных И.В. SIMULINK: среда создания инженерных приложений /Под общ. Ред. к.т.н. В.Г. Потемкина. - М.: ДИАЛОГ-МИФИ, 2003. - 496 с.

19. J. Ackermann, J.Gudner, W.Sienel, R.Stainhauser, V.I.Utkin Linear and Nonlinear Controller Design for Robust Automatic Steering. IEEE Transactions on Control Systems Technology, vol. 3, № 1, march 1995, pp. 132– 142.

20. I.E. Zuber Stabilization of Nonlinear Systems by Similarity Transformations. Journ. of Applied Mathematics and Stochastic Analysis 11:4, 1998, pp. 519–526.

21. J. Ackermann, A. Bartlett, D. Kaesbauer, W. Sienel, R. Steinhauser Robust Control Systems with Uncertain Physical Parameters Springer-Verlag London Berlin Heidelberg

22. Advantech Co.- Режим доступа: <http://www.advantech.com> - 12.05.09, 16:05