

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

**Приладобудівний факультет  
Кафедра приладів і систем орієнтації і навігації**

«На правах рукопису»  
УДК \_\_\_\_\_

До захисту допущено:  
Завідувач кафедри  
\_\_\_\_\_ Надія БУРАУ  
«\_\_» \_\_\_\_\_ 20\_\_ р

**Магістерська дисертація**

**на здобуття ступеня магістра**

**за освітньо-професійною програмою «Комп'ютерно - інтегровані технології  
та системи навігації і керування»**

**зі спеціальності 151 «Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології»**

**на тему: «Фільтрація сигналів чутливих елементів систем орієнтації і  
навігації»**

Виконала:

студентка VI курсу, групи ПГ-91мп  
Клименко Анастасія Максимівна \_\_\_\_\_

Науковий керівник:

Завідувач каф. ПСОН, д.т.н., професор,  
Бурау Надія Іванівна \_\_\_\_\_

Консультант з розробки стартапу:

Доцент каф. менеджменту, д.е.н., доц.,  
Бояринова Катерина Олександрівна \_\_\_\_\_

Рецензент:

\_\_\_\_\_

Засвідчую, що у цій магістерській  
дисертації немає запозичень з праць інших  
авторів без відповідних посилань.  
Студентка \_\_\_\_\_

Київ – 2020 року

## РЕФЕРАТ

Магістерська дисертація складається з 80 сторінок, в ній міститься 50 рисунків, 34 таблиць та використано 25 джерел.

**Актуальність.** Останні роки все більш широкого поширення набуває питання фільтрації сигналів мікромеханічних навігаційних приладів. Оскільки неможливо уявити технології без сигналів, а сигнали без фільтрації. В наш час найбільш розповсюджено застосування фільтрів наступних типів: фільтр Калмана, фільтр «Ковзке Середнє» та комплементарний фільтр. Вони є найкомфортнішими у роботі та видають відносно хороший результат. Отже основною ціллю даної магістерської дисертації є проведення порівняльного аналізу фільтрації сигналів мікромеханічного акселерометра та гіроскопа за використанням трьох фільтрів.

Магістерська дисертація виконана відповідно до основних напрямків наукових досліджень кафедри.

**Мета магістерської дисертації:** розробка методичного та алгоритмічного забезпечення фільтрації сигналів навігаційних мікромеханічних датчиків, а саме: акселерометра та гіроскопа.

### **Завдання:**

1. Огляд стану проблеми за методами фільтрації сигналів.
2. Аналіз принципів та умов функціонування мікромеханічних приладів і їх похибок. Обґрунтування підходів до фільтрації їх сигналів.
3. Розробка Simulink – моделей фільтра Калмана та «Ковзкого середнього», моделювання сигналу мікромеханічного акселерометра для подальшої обробки.
4. Розробка програмної моделі комплементарного фільтра у програмному середовищі MATLAB, моделювання та обробка сигналів мікромеханічного акселерометра та гіроскопа.
5. Порівняльний аналіз отриманих результатів фільтрації сигналів

мікромеханічних датчиків.

6. Розробка стартап - проекту: «Порівняльний аналіз ефективності фільтрації для різних частотних діапазонів вихідних сигналів».

**Об'єкт дослідження:** процеси визначення навігаційних параметрів в системах навігації і керування.

**Предмет:** Методи фільтрації сигналів мікромеханічних датчиків систем навігації та керування.

**Методи дослідження:** для розв'язання поставленої задачі в роботі використано методи теорії фільтрації, оптимальних та цифрових систем керування, програмне середовище MATLAB Simulink, в якому побудовані моделі сигналів та досліджуваних фільтрів.

**Наукова новизна:**

1. Розроблено програмні моделі фільтра Калмана, фільтра «Ковзке середнє» та комплементарного фільтру.

2. На основі виконаного моделювання встановлено залежності ефективності фільтрації (за значенням похибки) від параметрів корисних сигналів для запропонованих фільтрів.

**Практичне значення:** Розроблено програмні моделі фільтра Калмана, фільтра «Ковзке середнє» та комплементарного фільтру. Промодельовано сигнали мікромеханічного акселерометра та гіроскопу та проведено порівняльний аналіз отриманих даних.

**Апробація результатів дисертації (виступи на науково технічних кон- ференціях):**

1. XVI Науково-практична конференція студентів, аспірантів та молодих вчених: «Ефективність та автоматизація інженерних рішень у приладобудуванні», Київ, 2020.

**Бібліографічні посилання:**

Клименко А. М. Порівняльний аналіз фільтра Калмана та Фільтра «ковзке середнє» / А. Клименко // XVI Науково-практична конференція студентів, аспірантів та молодих вчених: «Ефективність та автоматизація інженерних рішень у приладобудуванні», Київ, 2020.-с.67

**Ключові слова:** мікромеханічні прилади, фільтр Калмана, фільтр «Ковзке середнє», комплементарний фільтр, гіроскоп, акселерометр.

## ABSTRACT

The master's dissertation consists of 80 pages, it contains 50 figures, 34 tables and uses 25 sources.

**Topicality.** In recent years, the issue of filtering signals of micromechanical navigation devices has become more widespread. Because it is impossible to imagine technology without signals, and signals without filtering. Nowadays, the most common applications are the following types of filters: Kalman filter, "Sliding Medium" filter and complementary filter. They are the most comfortable to work with and give a relatively good result. Therefore, the main purpose of this master's dissertation is to conduct a comparative analysis of the filtering of the signals of the micromechanical accelerometer and gyroscope using three filters.

The master's dissertation is executed according to the basic directions of scientific researches of department.

**The purpose of the master's dissertation:** development of methodical and algorithmic support for filtering the signals of navigation micromechanical sensors, namely: accelerometer and gyroscope.

### **Tasks:**

1. Review the status of the problem by signal filtering methods.
2. Analysis of the principles and conditions of operation of micromechanical devices and their errors. Substantiation of approaches to filtering their signals.
3. Development of Simulink - Kalman filter models and "Sliding mean", simulation of micromechanical accelerometer signal for further processing.
4. Development of a software model of a complementary filter in the MATLAB software environment, modeling and signal processing of a micromechanical accelerometer and gyroscope.

5. Comparative analysis of the obtained results of filtering the signals of micromechanical sensors.

6. Development of a startup project: "Comparative analysis of filtering efficiency for different frequency bands of output signals".

**Object of study:** processes of determining navigation parameters in navigation and control systems.

**Subject:** Methods of filtering signals of micromechanical sensors of navigation and control systems.

**Research methods:** To solve this problem, the methods of filtering theory, optimal and digital control systems, MATLAB Simulink software environment are used, in which models of signals and investigated filters are built.

**Scientific novelty:**

1. Software models of Kalman filter, "Sliding average" filter and complementary filter have been developed.

2. Based on the performed simulation, the dependences of the filtering efficiency (by the error value) on the parameters of the useful signals for the proposed filters are established.

**Practical meaning:** Software models of Kalman filter, "Sliding average" filter and complementary filter have been developed. The signals of the micromechanical accelerometer and gyroscope are modeled and the comparative analysis of the obtained data is carried out.

**Approbation of dissertation results (speeches at scientific and technical conferences):**

1. XVI Scientific-practical conference of students, graduate students and young scientists: "Efficiency and automation of engineering solutions in instrument making", Kyiv, 2020.

**Bibliographic references:**

Klymenko AM Comparative analysis of Kalman filter and "moving average" filter / A. Klymenko // XVI Scientific-practical conference of students, graduate students and young scientists: "Efficiency and automation of engineering solutions in instrument making", Kyiv, 2020.-p. .67

**Keywords:** micromechanical devices, Kalman filter, "Sliding average" filter, complementary filter, gyroscope, accelerometer.

## ЗМІСТ

ВСТУП.....	8
РОЗДІЛ 1. ОГЛЯД ТА АНЛІЗ ІСНУЮЧИХ ВИДІВ ФІЛЬТРАЦІЇ ДАНИХ.....	11
1.1 Фільтрація у мікромеханічних системах орієнтації і навігації.....	11
1.2 Класифікація фільтрів сигналів .....	17
1.2.1 Фільтр Калмана.....	17
1.2.2 Фільтр "альфа-бета".....	25
1.2.3 Фільтр "рухоме середнє".....	26
1.3 Огляд раніше виконаних робіт за темою дослідження.....	28
1.4. Мета і завдання дисертаційного дослідження.....	29
1.5. Висновки до розділу 1.....	30
РОЗДІЛ 2. ДОСЛІДЖЕННЯ ФІЛЬТРАЦІЇ МІКРОМЕХАНІЧНИХ ПРИЛАДІВ.....	31
2.1. Моделювання та дослідження фільтра Калмана.....	31
2.3. Моделювання та дослідження фільтра «Ковзке Середнє».....	41
2.4. Моделювання та дослідження комплементарного фільтра .....	49
2.5 Висновки до розділу 2.....	62
РОЗДІЛ 3 РОЗРОБКА СТАРТАП ПРОЕКТУ: «ПОРІВНЯЛЬНИЙ АНАЛІЗ ЕФЕКТИВНОСТІ ФІЛЬТРАЦІЇ ДЛЯ РІЗНИХ ЧАСТОТНИХ ДІАПАЗОНІВ ВХІДНИХ СИГНАЛІВ».....	64
3.1. Опис ідеї проекту.....	64
3.2. Аналіз ринкових можливостей запуску стартап-проекту.....	68
3.3. Розроблення ринкової стратегії та маркетингової програми стартап – проекту.....	76
3.4. Висновки до розділу 3.....	86
ВИСНОВКИ.....	88
СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ.....	89



## **ВСТУП**

### **Актуальність теми**

Сучасний період розвитку науки і техніки характеризується поширенням технологій на кожен сферу діяльності. Неможливо уявити собі будь-яку технологію без сигналу та його обробки в її структурі. В наш час існує безліч видів фільтрації і з кожним роком з'являється все більше нових алгоритмів обробки даних будь-яких форматів: зображень, звуків, відео та інших. Одною з найважливіших обробкою даних є їх фільтрація, що означає відділення частини даних за певними критеріями та приглушення або відкидання іншої. Базовим поняттям фільтрації даних в цифровому форматі є цифровий фільтр.

Цифровий фільтр – пристрій, що обробляє цифрові сигнали з метою виділення та/або затримання певних частотних компонент цього сигналу. Цифрові фільтри можна застосовувати у будь-яких пристроях, де застосовуються цифрові сигнали. Це означає, що він є невід'ємною складовою передових інформаційних технологій, оскільки сигнали є всюди, негативні впливи на сигнали, які необхідно відфільтровувати також є всюди. Як приклад можна привести застосування цифрового фільтру – приглушення шуму за допомогою відсічення від спектру сигналу певного діапазону частот, які не несуть корисної інформації. Іншим прикладом може бути виділення в сигналі періодичних компонентів для дослідження їх властивостей [1].

У сучасних системах орієнтації, стабілізації і навігації, системах керування рухом у просторі використовуються велика кількість різноманітних мікромеханічних датчиків таких, як: акселерометри, гіроскопи, магнітометри, барометри, тощо [1]. Їх вихідні сигнали в процесі функціонування систем на реальних об'єктах піддаються впливу шуму, що призводить до розсіювання даних датчиків за нормальним законом розподілу ймовірностей навколо істинного значення даних. Завдання керуючого комп'ютера (контролера) системи орієнтації чи стабілізації полягає в фільтрації отриманих даних, тобто визначення в кожен момент часу рівня достовірності отриманих даних. Для

цього можуть бути використані різні підходи, обрано методи та розроблено алгоритмічне і програмне забезпечення. Але виникає важливе актуальне завдання вибору дійсно ефективного методу фільтрації для кожного конкретного застосування. Тому порівняльний аналіз ефективності методів фільтрації сигналів мікромеханічних датчиків систем орієнтації, навігації та керування, та вибір відповідного методу залишається важливим актуальним завданням розробників таких систем.

**Метою магістерської дисертації є розробка методичного та алгоритмічного забезпечення фільтрації сигналів навігаційних мікромеханічних датчиків, а саме: акселерометра та гіроскопа.**

**Для досягнення поставленої мети в роботі необхідно було вирішити такі завдання:**

7. Огляд стану проблеми за методами фільтрації сигналів.
8. Аналіз принципів та умов функціонування мікромеханічних приладів і їх похибок. Обґрунтування підходів до фільтрації їх сигналів.
9. Розробка Simulink – моделей фільтра Калмана та «Ковзкого середнього», та моделювання сигналу мікромеханічного акселерометра для подальшої обробки.
10. Розробка програмної моделі комплементарного фільтра у програмному середовищі MATLAB, моделювання та обробка сигналів мікромеханічного акселерометра та гіроскопа
11. Порівняльний аналіз отриманих результатів фільтрації сигналів мікромеханічних датчиків.
12. Розробка стартап - проекту: «Порівняльний аналіз ефективності фільтрації для різних частотних діапазонів вихідних сигналів».

**Об’єкт дослідження:** процеси визначення навігаційних параметрів в системах навігації і керування.

**Предмет:** Методи фільтрації сигналів мікромеханічних датчиків систем навігації

та керування.

**Методи дослідження:** для розв'язання поставленої задачі в роботі використано методи теорії фільтрації, оптимальних та цифрових систем керування, програмне середовище MATLAB Simulink, в якому побудовані моделі сигналів та досліджуваних фільтрів.

**Наукова новизна:**

1. Розроблено програмні моделі фільтра Калмана, фільтра «Ковзке середнє» та комплементарного фільтру.

2. На основі виконаного моделювання встановлено залежності ефективності фільтрації (за значенням похибки) від параметрів корисних сигналів для запропонованих фільтрів.

**Практичне значення:** Розроблено програмні моделі фільтра Калмана, фільтра «Ковзке середнє» та комплементарного фільтру. Проаналізовано сигнали мікромеханічного акселерометра та гіроскопу та проведено порівняльний аналіз отриманих даних.

## РОЗДІЛ 1. ОГЛЯД ТА АНАЛІЗ ІСНУЮЧИХ ВИДІВ ФІЛЬТРАЦІЇ ДАНИХ

### 1.1 Загальна характеристика мікромеханічних датчиків систем орієнтації і навігації

У сучасних системах орієнтації, стабілізації і навігації використовуються велика кількість різноманітних мікромеханічних датчиків таких, як: акселерометри, гіроскопи, магнітометр, барометри і термометри [1]. Усі вони подають на вхід системи сигнал, який піддається впливу шуму, що власне призводить до розсіяності по нормальному закону навколо істинного значення даних. Завдання керуючого комп'ютера (контролера) системи орієнтації чи стабілізації полягає в фільтрації отриманих даних, тобто визначення в кожен момент часу рівня достовірності отриманих даних.

Термін MEMS визначає технологію, яка дозволила зменшити габарити механічних структур та інтегрувати їх в електронні. Завдяки цьому утворилися пристрої, які називають «системами», оскільки вони складаються з електричних та механічних компонентів, які працюють одночасно і вирішують спільні задачі. Таким чином MEMS - це мікромеханічна та мікроелектрична система [1].

Взагалі механічні компоненти і системи вважаються менш технологічними, якщо порівнювати їх з електричними. Але це зовсім не значить, що механічна база завжди низькотехнологічна. Механічне реле, наприклад, досить часто використовується не зважаючи на те, що вже існують транзисторні прилади, які виконують ідентичну роботу [1].

Тим не менш, більшість механічних пристроїв мають великі габарити, якщо порівнювати їх з електричними. Але часто бувають випадки коли механічний компонент замінюють електронним навіть тоді, коли його використати доцільніше, але для економії простору друкованої плати і мінімізації розмірів.

MEMS технологія являє собою концептуально нове вирішення дилеми: якщо модернізувати механічні компоненти таким чином, що вони стануть не тільки мініатюрними, але й будуть повністю зіставними з виробничим процесом мікросхем, то в результаті буде отриманий компонент, який об'єднує у собі переваги обох технологій.

Мініатюрна структура MEMS виробляється методом фізичної модифікації кремнію (або іншого матеріалу). Далі такі структури об'єднуються з мікросхемою і вся електромеханічна система корпусується, представляючи собою єдиний пристрій [1].

MEMS пристрої можуть складатися з мікромашинних структур, мікродатчиків, мікроелектронних схем і мікроактуаторів. Всі вони інтегровані на одному кристалі. Датчики дозволяють пристроям визначити термічні, механічні, магнітні, електромагнітні або хімічні зміни, які можуть бути перетворені електричною схемою в визначений сигнал, а актуатори забезпечують фізичні зміни, а не просто вимірюють їх.

На сьогоднішній день датчики, побудовані на основі MEMS – технологій широко використовуються в сучасних системах керування, орієнтації та навігації.

- **Акселерометри**

Найпоширенішим у використанні серед мікромеханічних пристроїв є акселерометр. Як зазначалося вище, сфера його застосування у технологіях надзвичайно широка. Вона охоплює мобільні телефони, ноутбуки, ігрові приставки, а також більш серйозні пристрої, такі як автомобілі та інші. Основним призначенням акселерометра є вимірювання уявного прискорення, а саме його проекції. У випадку з мобільними телефонами він використовується для багатьох цілей. Наприклад, для зміни орієнтації екрану. Або ж виконання будь-яких функцій при «струшуванні» пристрою і т.п;

Особливе значення має акселерометр, який застосовується в ноутбуках, а точніше, в їх жорстких дисках. Всім відомо, що вінчестери - пристрої досить

крихкі, і в разі з ноутбуками ймовірність їх пошкодження зростає в рази. Так, при падінні ноутбука акселерометр фіксує різку зміну прискорення і віддає команду до розміщення головки жорсткого диска, запобігаючи пошкодження пристрою, і втрату даних.

Конструкція акселерометра наведена на рис. 1.1. [3].

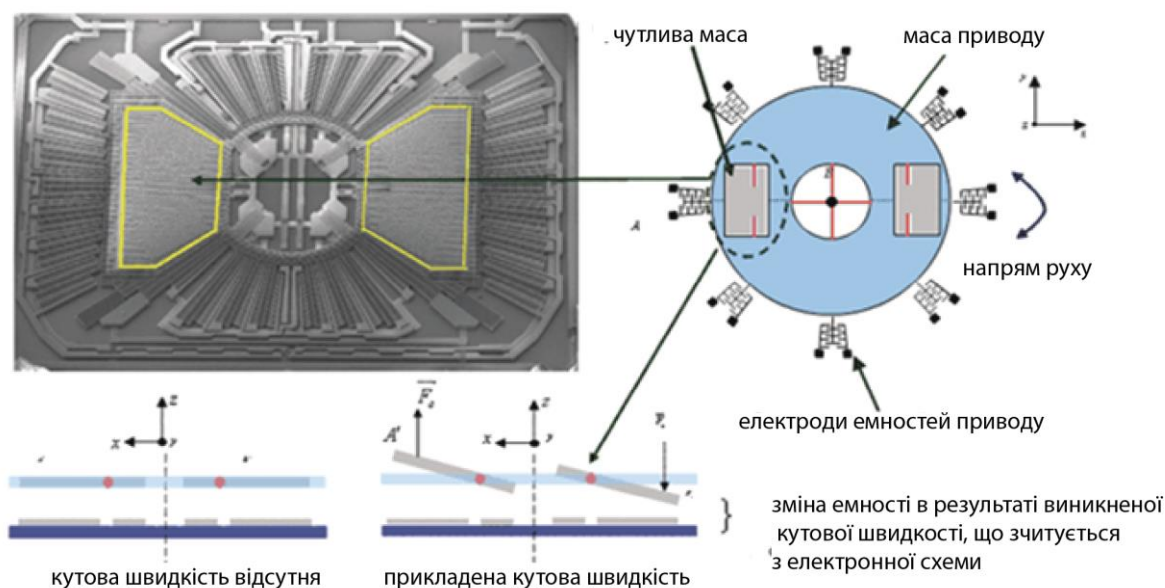


Рис 1.1. Структура акселерометра [3]

Необхідно розглянути конструкцію акселерометра. Акселерометри складаються з інерційної маси (ІМ), яка за допомогою пружних елементів підвісу закріплена в корпусі. Завдяки перетворювачам переміщень, деформацій і сил електроніки реалізується вихідний сигнал і принцип вимірювання. Конструктивний вузол, який включає в себе ІМ і підвіс з елементами кріплення, можна назвати чутливим елементом (ЧЕ) акселерометра. За видом руху інерційної маси акселерометри поділяють на осьові і маятникові. В осьових акселерометрах конструкція пружного підвісу забезпечує прямолінійний рух ІМ, а в маятникових кутовий. Маятникові акселерометри називають кутовими, а іноді - балковими. Оскільки ЧЕ акселерометра знаходиться в полі сил тяжіння, він може вимірювати кути нахилу об'єкта, на якому закріплений [4].

Існує кілька видів пристроїв в залежності від їх архітектури. Робота акселерометра може ґрунтуватися на конденсаторному принципі. Рухомою частиною такої системи є звичайний грузик який зміщується в залежності від нахилу пристрою. По мірі його зміщення змінюється ємність конденсатора, а саме змінюється напруга. Виходячи з цих даних, можна отримати зміщення грузика, а разом з тим і шукане прискорення [3].

- **Гіроскопи**

Ще одним популярним датчиком, який часто використовуються разом із акселерометром, є гіроскоп. Його основне призначення полягає у вимірюванні кутових швидкостей відносно однієї або декількох осей. Якщо скомбінувати акселерометр і гіроскоп, це дозволить відстежити і зафіксувати рух в тривимірному просторі [4].

Архітектура гіроскопів дуже схожа з будовою акселерометрів (рис. 1.2.) [4].

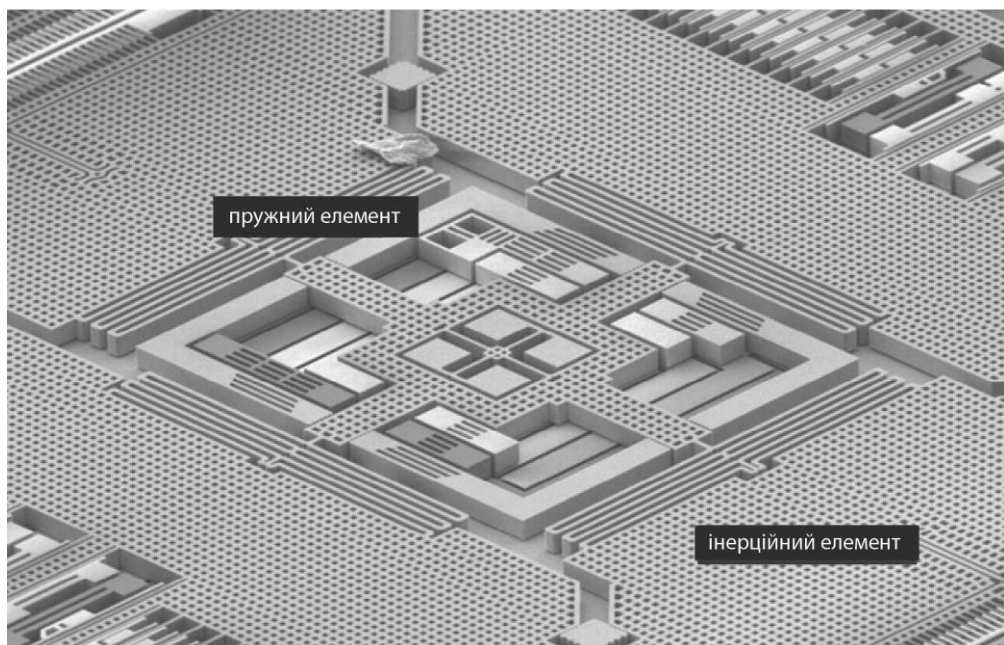


Рис. 1.2. Пристрій мікромеханічного гіроскопа [4]

Мікромеханічні гіроскопи, є електромеханчними системами, в яких енергія вимушених (первинних) коливань інерційної маси на пружному підвісі

при появі переносної кутової швидкості перетворюється в енергію вторинних коливань, що містять інформацію про вимірювану кутову швидкість. Це перетворення здійснюється внаслідок впливу сил (або моментів) інерції Коріоліса на резонатор при його обертанні з переносною кутовою швидкістю, вектор якої перпендикулярний до вектора кількості руху або моменту кількості руху (кінетичного моменту), відповідно для поступальних або обертальних первинних коливань інерційної маси. [4].

- **Похибки мікромеханічних приладів**

Основними причинами виникнення похибок вимірювань мікромеханічних приладів, являються температура, вібрація і перехресне прискорення. Зміна температура навколишнього середовища призводить до зміни значення діелектричної проникливості, зазору і лінійних розмірів маятника й приводу катушек магнітоелектричного датчика моменту [4].

Великий вплив на вимірювання кутової швидкості мікромеханічним гіроскопом дає вібрація. Для запобігання якої прибігають до зменшення коефіцієнта нерівножесткості підвісу в площині перпендикулярній до осі вторинних коливань ротора або до збільшення частоти власних коливань ротора. Останній варіант: контроль частоти вібраційних збурень, яка має бути меншою в половину від частоти власних коливань [4].

При дії перехресного прискорення виникає додаткова деформація пружних елементів підвісу і викликає відповідні їм переміщення. Переміщення маятника уздовж осі відносно нерухомих електродів датчика переміщень змінюють ефективну площу перекриття електродів, отже без прийняття необхідних заходів, може виникати випадкова помилка [4].

Для запобігання даної помилки необхідно збільшити площу електродів на кришках [4].

Ще однією причиною виникнення помилки у вимірюваннях, є шум. Шумом можна назвати будь-яку складову у вихідному сигналі, яку можна представити, як результат впливу вимірюваної фізичної величини, яка в



дійсності є наслідком зовнішніх та внутрішніх перешкод. Зменшення шуму можна забезпечити завдяки збільшенню амплітуди власної частоти інерційної маси, а також її маси і добротності по осі вторинних коливань[4].

На рис. 1.3, відображені вихідні сигнали мікромеханічного акселерометра та гіроскопа. [5].

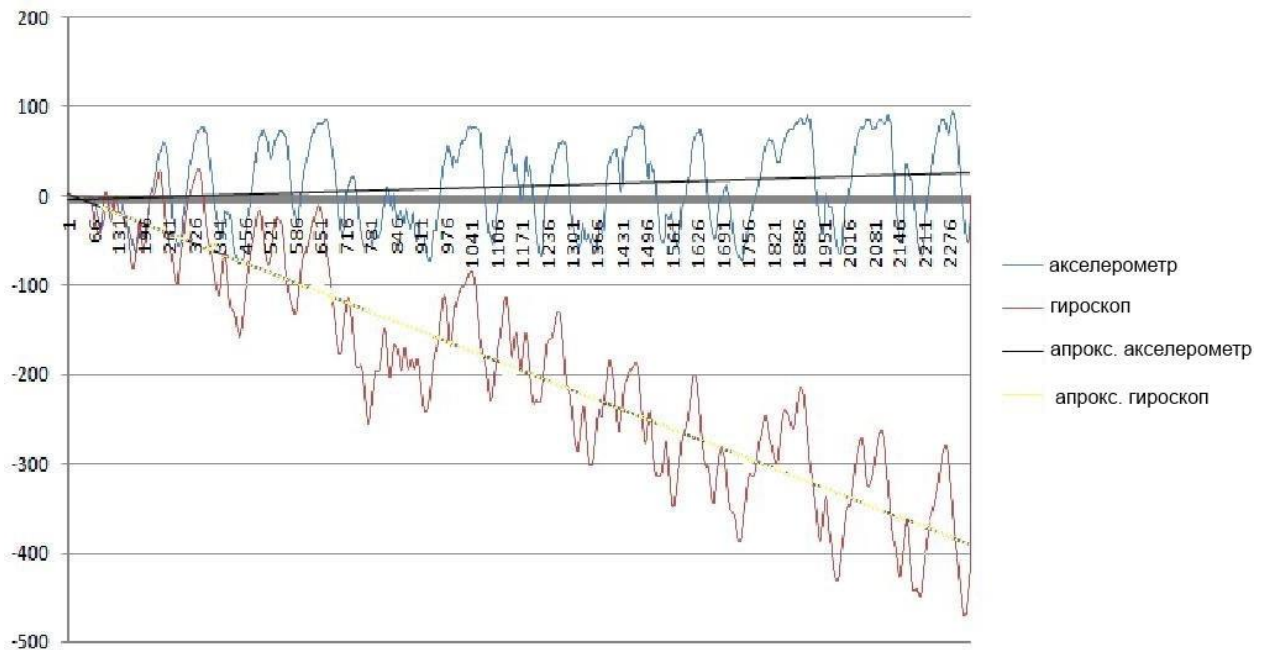


Рис. 1.3. Аналіз зашумленості даних MEMS-датчиків [5].

З рисунка видно, що вихідні сигнали дуже спотворені та потребують апроксимації, апроксимовані сигнали також наведені на рисунку. Чітко відображається, що дані без апроксимації не прийнятні для подальшого безпосереднього використання. Крім того, при інтегруванні кутової швидкості, одержуваної від мікромеханічного гіроскопа неодмінно відбувається накопичення помилки. Дана проблема пов'язана з квантуванням за часом і за рівнем одержуваного сигналу [5].

Як правило, проблема зашумленості MEMC-даних вирішується введенням фільтрації в програму збору даних. Найчастіше використовуються такі фільтри [6]:

- Фільтр Калмана.
- Фільтр "альфа-бета"

- Фільтр "ковзне середнє"

Тому актуальним завданням є розробка нових та вдосконалених існуючих методів фільтрації для досягнення максимального ефекту очищення даних від шумів і завад.

## 1.2 Загальна характеристика фільтрів сигналів

Існує велике різноманіття фільтрів сигналів, але більша їх частина не дає прийнятних результатів для конкретного застосування. Тому для огляду було обрано фільтри, які найкраще підходять для поставлених цілей у даній роботі. Проведемо їх огляд, розглянемо принцип роботи та дослідимо на практиці, який з них дає найкращий результат фільтрації.

### 1.2.1 Фільтр Калмана

Для початку необхідно визначити величину, яка буде фільтруватися, це може бути координата, швидкість, прискорення, вологість, температура, тиск, і т.д. [8]

Для кращого розуміння принципу роботи фільтра Калмана, в [8] наведено приклад. Існує деякий об'єкт, який може пересуватися тільки вперед та тільки назад за рахунок керування. Знаючи вагу об'єкта, форму, покриття поверхні та ін, можна розрахувати, як контролюючий джойстик впливає на швидкість руху  $v_k$ .

Отже, координата об'єкта буде змінюватися за законом:

$$x_{k+1} = x_k + v_k dt$$

На практиці не завжди можна врахувати в розрахунках невеликі похибки, що діють на об'єкт (вітер, вібрації, перешкоди на дорозі), тому справжня швидкість об'єкта буде відрізнятися від розрахованої. До правої частини написаного рівняння додається випадкова величина  $\xi_k$ :

$$x_{k+1} = x_k + v_k dt + \xi_k$$

У об'єкта є встановлений GPS, який визначає справжнє місцезнаходження об'єкта, але він не може виміряти точні координати  $x_k$ , оскільки при вимірюванні виникає помилка  $\eta_k$ , яка також є випадковою величиною. З датчика ми отримуємо дані з помилкою:

$$z_k = x_k + \eta_k$$

Задача полягає в тому, щоб при помилкових показаннях сенсора  $z_k$ , знайти хороше наближення для істинної координати об'єкта  $x_k$ . Таке наближення буде позначатися, як  $x_k^{opt}$ .

У загальному формулюванні задачі, як вказувалося вище, за координату  $x_k$  може бути прийнято будь-яку характеристику (температура, вологість, т.п.), а член, який відповідає за контроль системи ззовні ми позначимо за  $u_k$ , отже рівняння для координати і показання навігатора будуть мати вигляд:

$$\begin{aligned} x_{k+1} &= x_k + u_k + \xi_k \\ z_k &= x_k + \eta_k \end{aligned} \tag{1.1}$$

Відомі на даному етапі параметри:

- $u_k$  - це відома величина, яка контролює еволюцію системи;
- помилка моделі  $\xi_k$  і помилка навігатора  $\eta_k$  - випадкові величини. Їх закони розподілу не залежать від часу (від номера ітерації  $k$ );
- середні значення помилок дорівнюють нулю:  $E\xi_k = E\eta_k = 0$ ;
- закон розподілу випадкових величин може бути не відомий, але відомі його дисперсії  $\sigma_\xi^2$  і  $\sigma_\eta^2$  (дисперсії не залежать від  $k$ , тому що закони розподілу не залежать від нього);
- передбачається, що всі випадкові помилки незалежні один від одного: яка помилка буде в момент часу  $t_1$  абсолютно не залежить від помилки в інший момент часу  $t_2$ .

Завдання фільтрації - це не є завданням згладжування. Тут не прагнеться

згладжувати дані з сенсора, головним завданням фільтрації є - отримати найбільш близьке значення до реальної координаті  $x_k$ .

- **Алгоритм Калмана**

Нехай на  $k$ -му кроці вже знайдено відфільтроване значення з навігаційного датчика  $x_k^{opt}$ , яке добре наближає справжню координату системи  $x_k$ , крім того, вже відомо рівняння, яке контролює зміну нам невідомої координати [8]:

$$x_{k+1} = x_k + u_k + \xi_k$$

тоді, можна зробити припущення, що на кроці  $k+1$  система еволюціонує відповідно до цього закону і датчик покаже щось близьке до  $x_k^{opt} + u_k$ . Але на даному етапі, не можна сказати нічого більш точного. З іншого боку, на кроці  $k+1$  будуть отримані не достовірні показання датчика  $z_{k+1}$ .

Ідея Калмана полягає в тому [8], що щоб отримати найкраще наближення до істинної координати  $x_{k+1}$ , для цього необхідно знайти золоту середину між показанням  $z_{k+1}$  неточного датчика і  $x_k^{opt} + u_k$  - прогнозом того, що очікується від нього побачити. Показанням сенсора надано вагу  $K$ , а на передбачене значення залишиться вага  $(1 - K)$ , тоді:

$$x_{k+1}^{opt} = K \cdot z_{k+1} + (1 - K) \cdot (x_k^{opt} + u_k)$$

Коефіцієнт  $K$  називається коефіцієнтом Калмана [8]. Він залежить від кроку ітерації, тому логічніше було б писати  $K_{k+1}$ , Але для того, щоб не ускладнювати формули, при розрахунках, індекс буде упускатися. Коефіцієнт Калмана  $K$  необхідно підібрати таким чином, щоб оптимальне значення координати  $x_{k+1}^{opt}$  було б найближче до істинної координаті  $x_{k+1}$ . Наприклад, якщо відомо, що навігаційний датчик дуже точний, то однозначно його показанням можна довіряти більше і значенню  $z_{k+1}$  буде надано більше ваги (близько одиниці). Якщо ж датчик, навпаки, зовсім не точний, тоді необхідно

буде орієнтуватися на теоретично передбачене значення  $x_k^{opt} + u_k$ .

У загальному випадку, щоб знайти точне значення коефіцієнта Калмана, потрібно просто мінімізувати помилку:

$$e_{k+1} = x_{k+1} - x_{k+1}^{opt}$$

З попередньо зазначених рівнянь (1.1), можна переписати вираз для помилки:

$$e_{k+1} = (1 - K)(e_k + \xi_k) - K\eta_{k+1}$$

Далі необхідно провести мінімізування середнього значення від квадрата помилки:

$$E(e_{k+1}^2) \rightarrow \min$$

Відповідно до (1.2) запишемо:

$$E(e_{k+1}^2) = (1 - K)^2(Ee_k^2 + \sigma_\xi^2) + K^2\sigma_\eta^2$$

Вираз приймає мінімальне значення, коли похідна прирівнюється до нуля, звідки отримаємо:

$$K_{k+1} = \frac{Ee_k^2 + \sigma_\xi^2}{Ee_k^2 + \sigma_\xi^2 + \sigma_\eta^2} \quad (1.3)$$

В останньому виразі для коефіцієнта Калмана записано з індексом кроку, потрібно підставити у вираз для середньоквадратичної помилки  $E(e_{k+1}^2)$ , мінімізуюче значення похибки коефіцієнта Калмана  $K_{k+1}$ , після перетворення отримано:

$$E(e_{k+1}^2) = \frac{\sigma_\eta^2(Ee_k^2 + \sigma_\xi^2)}{Ee_k^2 + \sigma_\xi^2 + \sigma_\eta^2}.$$

Таким чином, отримано ітераційну формулу для обчислення коефіцієнта Калмана (1.3).

Отже, узагальнимо отримані формули [9]:

На рис. 1.4. відображено результат фільтрації MEMS сигналу з

$u_k$  - відома управляюча функція

$\xi_k$  - помилка моделі, а  $\sigma_\xi^2$  її дисперсія

$\eta_k$  - помилка сенсора, а  $\sigma_\eta^2$  її дисперсія

$x_{k+1} = x_k + u_k + \xi_k$  - рівняння зміни координати

$z_k = x_k + \eta_k$  - отримане значення з сенсора

$E(e_{k+1}^2) = \frac{\sigma_\eta^2(Ee_k^2 + \sigma_\xi^2)}{Ee_k^2 + \sigma_\xi^2 + \sigma_\eta^2}$  - середнє значення квадрату помилки

$E(e_0^2) = E(\eta_0^2) = \sigma_\eta^2$  - база ітерації

$K_{k+1} = \frac{Ee_k^2 + \sigma_\xi^2}{Ee_k^2 + \sigma_\xi^2 + \sigma_\eta^2} = \frac{E(e_{k+1}^2)}{\sigma_\eta^2}$  - посилення Калмана

$x_{k+1}^{opt} = K_{k+1} \cdot z_{k+1} + (1 - K_{k+1}) \cdot (x_k^{opt} + u_k)$  - оптимальне відфільтроване значення

$x_0^{opt} = z_0$  - база ітерації

використанням алгоритму Калмана.



Рис.1.4. Фільтрація сигналу з використанням алгоритму Калмана [9].

Фільтрація з використанням алгоритму Калмана (на рисунку позначений

синьою лінією) дає хороші результати: відбувається помітне згладжування сигналу (на рисунку позначений зеленою лінією), середнє значення проходить через середньостатистичне значення на ділянці вимірювання.

Якщо спостерігати, як з кроком ітерації  $k$  змінюється коефіцієнт Калмана  $K_k$ , то можна побачити, що він завжди стабілізується до певного значення  $K_{stab}$ . Наприклад, коли середньоквадратичні помилки навігаційного сенсора і моделі відносяться один до одного, як десять до одного, то графік коефіцієнта Калмана в залежності від кроку ітерації виглядає так (рис.1.5)[9]:

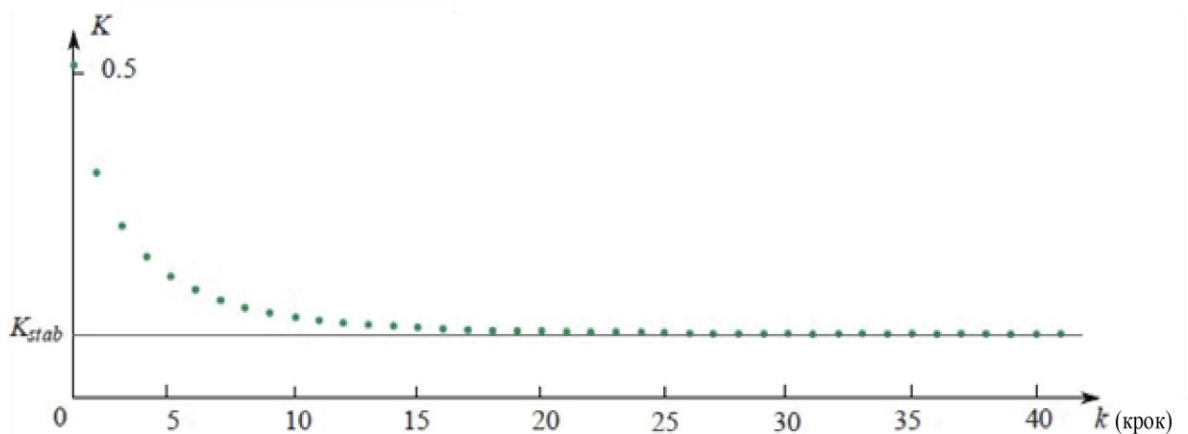


Рис. 1.5. зміна коефіцієнта Калмана в залежності від кроку ітерації [9].

На практиці дуже часто буває, що взагалі нічого не відомо про фізичну модель того сигналу, який потрібно фільтрувати. Наприклад, поставлена задача відфільтрувати показання акселерометра. Заздалегідь невідомо, за яким законом утворюється вихідний сигнал акселерометра. Максимум інформації, яку можна в такому випадку оцінити - це дисперсія помилки сенсора  $\sigma_\eta^2$ . У такій складній ситуації всі невідомі складові моделі руху можна додати до випадкової величини  $\xi_k$ :

$$x_{k+1} = x_k + \xi_k$$

Така система вже буде зовсім іншою, такою, що абсолютно не буде задовольняти тим умовам, які були прийняті до випадкової величини  $\xi_k$ . Оскільки тепер там знаходиться вся невідома досліднику фізика руху, і тому

не можна говорити, що в різні моменти часу помилки моделі незалежні один від одного і що їх середні значення рівні нулю. У цьому випадку, теорія фільтра Калмана може бути застосована за деяких умов. Наприклад, якщо застосувати всі формули, підбравши  $\sigma_\xi^2$  і  $\sigma_\eta^2$  емпіричним шляхом, так щоб відфільтровані дані відповідали умові..

Але можна піти іншим, набагато простішим шляхом. Як видно з попередньо викладеної інформації, коефіцієнт Калмана  $K_k$  зі збільшенням номера кроку  $k$  завжди стабілізується до значення  $K_{stab}$ . Тому замість того, щоб підбирати коефіцієнти дисперсії  $\sigma_\xi^2$  і  $\sigma_\eta^2$  і знаходити за досить складними формулами коефіцієнт Калмана  $K_k$ , можна прийняти цей коефіцієнт завжди незмінним, константою і далі підбирати тільки його значення. Це припущення не буде мати впливу на результат. Коефіцієнт Калмана швидко стабілізується до константи. Тому немає необхідності використовувати громіздкі формули з теорії Калмана, просто потрібно підібрати прийнятне значення  $K_{stab}$  і підставити його в ітераційну формулу:

$$x_{k+1}^{opt} = K_{stab} \cdot z_{k+1} + (1 - K_{stab}) \cdot x_k^{opt}$$

На рис. 1.6. [10] відображені відфільтровані двома різними способами дані з вигаданого сенсора (за умови того, що досліднику нічого не відомо про фізику явища). Перший спосіб – з використанням усіх формул з теорії Калмана. А другий – спрощений.

Як видно з наведеного результату, методи майже нічим не відрізняються. Єдина невелика відмінність спостерігається тільки на початку, коли коефіцієнт Калмана ще не прийняв стабілізованого значення.



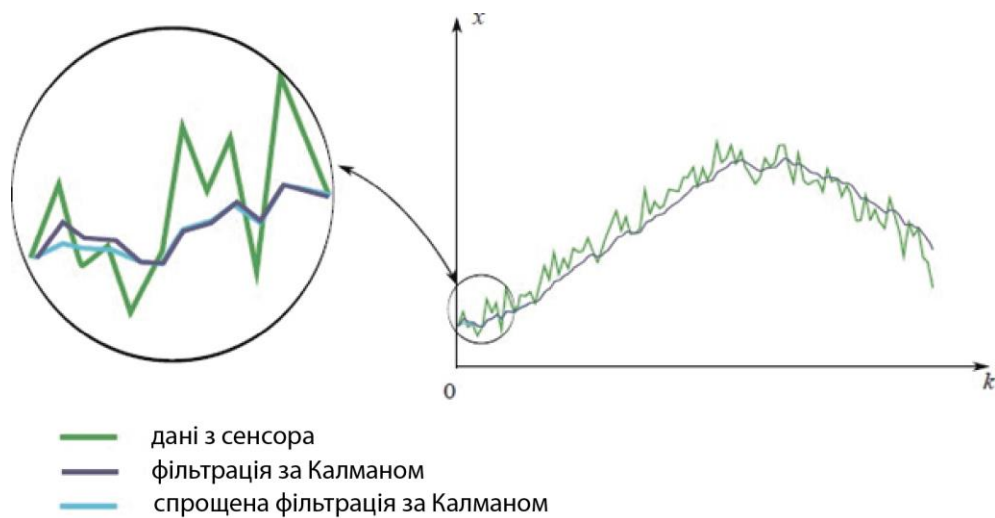


Рис. 1.6. Порівняння жорсткої і спрощеної фільтрації Калмана [10].

Отже, основна ідея фільтра Калмана полягає в тому, що треба знайти коефіцієнт  $K$  такий, щоб відфільтроване значення [10]:

$$x_{k+1}^{opt} = K z_{k+1} + (1 - K)(x_k^{opt} + u_k)$$

в середньому найменше відрізнялося б від реального значення координати.  $x_{k+1}$ . Видно, що відфільтроване значення  $x_{k+1}^{opt}$  є лінійною функцією від показання датчика і попереднього відфільтрованого значення  $x_k^{opt}$ . А попереднє відфільтроване значення  $x_k^{opt}$  є, в свою чергу, лінійною функцією від показання датчика і перед-попереднього відфільтрованого значення  $x_{k-1}^{opt}$ . І так далі, поки ланцюг повністю не розвернеться. Тобто відфільтроване значення залежить від усіх попередніх показань сенсора лінійно:

$$x_{k+1}^{opt} = \lambda + \lambda_0 z_0 + \dots + \lambda_{k+1} z_{k+1}$$

Тому фільтр Калмана називають лінійним фільтром. Можна довести, що з усіх лінійних фільтрів, фільтр Калмана найкращий, в тому сенсі, що середній квадрат помилки фільтра мінімальний [11].

### 1.2.2 Комплементарний фільтр «альфа-бета».

Комплементарний фільтр призначений для ліквідації помилки інтегрування при визначенні кутової координати з використанням мікромеханічних гіроскопів. Оскільки саме мікромеханічні датчики мають невелику точність серед гіроскопічних датчиків [12], їм в першу чергу необхідна фільтрація вихідного сигналу.

Прилад, що вимірює кут нахилу різних об'єктів відносно гравітаційного поля Землі можна побудувати на основі акселерометру або гіроскопу. У першому випадку кут нахилу пристрою легко обчислюється за допомогою дискретного інтегрування швидкості його обертання, що визначається саме гіроскопом.

Однак, у MEMS гіроскопа є один значний недолік – дрейф нуля. Суть цього недоліку полягає в тому, що при зупинці обертання гіроскопа, він все ще буде показувати значення відмінне від нуля. Іншим недоліком такого рішення, є застосування процедури дискретного інтегрування, яке дає неточний результат. Третя проблема виражається в поступовому накопиченні помилки обчислення кута через обмежену точність змінних мікроконтролера.

Якщо використовувати акселерометр, то для визначення кута нахилу досить застосувати прості геометричні перетворення до його показань. Акселерометр дозволяє визначати точні кути нахилу приладу тільки в стані спокою. Поки на нього не діють зовнішні сили, на виході приладу будуть отримані значення. Будь-який вплив зовнішньої сили буде провокувати помилку в обчисленнях. Частково очистити сигнал від помилки можна за допомогою ФНЧ, але побічним ефектом подібної обробки буде значне зменшення швидкодії приладу.

Виникає цілком логічна думка об'єднати показання цих двох пристроїв для усунення їх недоліків. Зробити таке об'єднання дозволяє комплементарний фільтр, робота якого визначається досить простим виразом [12]:

$$a = (1-K) * gyr + K * acc ,$$

тут:

- $a$  - відфільтрований, результуючий кут нахилу;
- $gyr$  і  $acc$  - значення кута нахилу, отримані за допомогою гіроскопа і акселерометра;
- $K_{kf}$  - коефіцієнт комплементарного фільтра.

Як видно, величина кута нахилу, що отримана у підсумку є сумою інтегрованого значення гіроскопа і миттєвого значення акселерометра. По суті, головне завдання комплементарного фільтра полягає тут в тому, щоб нівелювати дрейф нуля гіроскопа і помилки дискретного інтегрування. Наведений вираз (1.4) саме це і робить, на кожному кроці інтегрування коригується інтеграл кута нахилу за допомогою показань акселерометра. Сила ж цієї корекції визначається коефіцієнтом фільтра  $K_{kf}$ .

Вибір коефіцієнта  $K_{kf}$  підбирається в залежності від величини дрейфу нуля гіроскопа, від швидкості накопичення помилок обчислення і від умов використання об'єкту. Так, занадто велике значення  $K_{kf}$  призведе до того, що на результат роботи фільтру буде сильно впливати вібрація корпусу. А коли навпаки, занадто ж мале значення  $K_{kf}$ , може виявитися недостатнім, щоб ліквідувати дрейф нуля гіроскопа. Як правило, коефіцієнт комплементарного фільтра підбирається вручну для кожної системи виходячи з вищевказаних умов [12].

Фільтр Калмана і комплементарний фільтр на практиці дають дуже схожі результати.

### 1.2.3. Фільтр «Ковзке середнє»

Ковзке середнє (moving average), - загальна назва для сімейства функцій, значення яких в кожній точці визначення дорівнюють середньому значенню вихідної функції за попередній період. Фільтри такого типу зазвичай використовуються з даними часових рядів для згладжування короткострокових коливань і виділення основних тенденцій або циклів [15].

Математично ковзне середнє є одним з видів згортки, і тому його можна розглядати, як фільтр низьких частот, що використовуються в обробці сигналів.

Просте ковзне середнє, або арифметичне рухоме середнє чисельно дорівнює середньому арифметичному значень вихідної функції за встановлений період і обчислюється за формулою [16]:

$$SMA_t = \frac{1}{n} \sum_{i=0}^{n-1} p_{t-i} = \frac{p_t + p_{t-1} + \dots + p_{t-i} + \dots + p_{t-n+2} + p_{t-n+1}}{n},$$

де  $SMA_t$  - значення простого ковзного середнього в точці  $t$ ;  $n$  - кількість значень вихідної функції для розрахунку змінного середнього (згладжує інтервал), чим ширше згладжує інтервал, тим більш плавним виходить графік функції;  $p_{t-i}$  - значення вихідної функції в точці  $t - i$ . Отримане значення простого рухомого середнього відноситься до середини обраного інтервалу, однак, традиційно його відносять до останньої точки інтервалу.

З попереднього свого значення просте ковзке середнє може бути отримано за такою рекурентною формулою:

$$SMA_t = SMA_{t-1} - \frac{p_{t-n}}{n} + \frac{p_t}{n}, \quad (1.5)$$

Результат роботи фільтра представлено на рисунку 1.7.

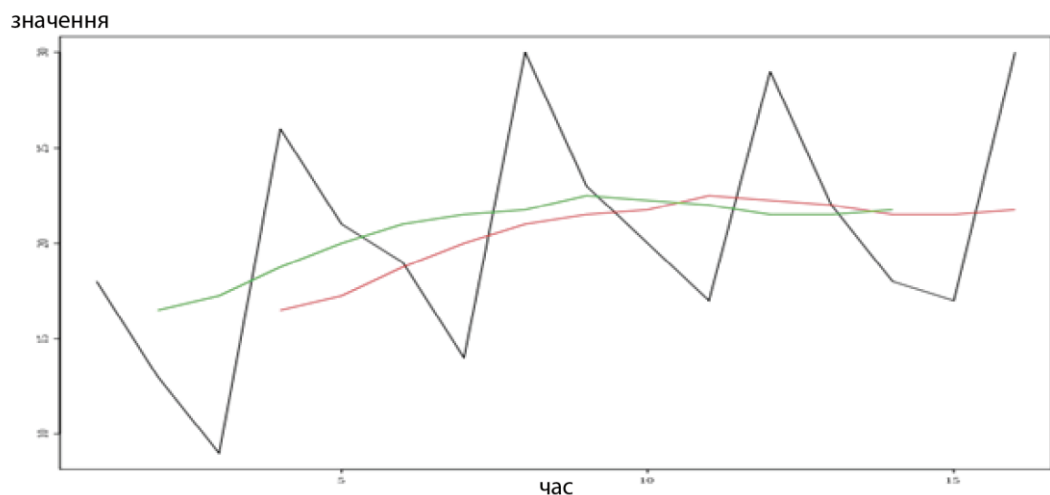


Рис. 1.7. Результат роботи фільтра "ковзке середнє" [16]

Таким чином для фільтрації показань мікромеханічних акселерометрів та мікромеханічних гіроскопів, які виконують функції чутливих елементів

системи орієнтації і навігації, будемо використовувати

### **1.3. Огляд раніше виконаних робіт за темою дослідження**

Фільтрації присвячено безліч наукових статей, проведено різноманітні дослідження та захищено декілька дисертацій. В роботі [17] проаналізовані існуючі методи обробки даних з MEMS сенсорів, їх недоліки та переваги, також в роботі було розроблено систему отримання даних з сенсору та дослідження засобів обробки та фільтрації отриманих даних. Продемонстровано алгоритм очищення сигналу від шуму.

В роботі [18] розглядаються питання аналізу та синтезу комплементарного фільтра. Найбільшу увагу приділено питанню впливу дрейфів гіроскопів на точність роботи фільтра. Продемонстровано особливість функціонування фільтра в довільній системі координат. Також досліджена ефективність введення магнітометра в склад комплементарного фільтра.

У статті [19] наведені використовувані стохастичні моделі шумових складових сигналу (шум квантування, випадкове блукання нуля, мерехтіння шум, шум догляду, білий шум). Описується алгоритм фільтрації за Калманом для калібрування інерційних датчиків. Також у статті приведено метод калібрування з використання розширеного фільтра Калмана, що підвищує швидкості збіжності калібрувальних коефіцієнтів, при абсолютній похибці на рівні шумів АЦП.

В роботі [20], наведено аналітичне та експериментальне дослідження комплементарних фільтрів на MEMS-вимірі. Аналізується ефективність їх застосування для визначення просторової орієнтації рухомих об'єктів.

У статті [21] продемонстровано, як при збільшенні збурюючого моменту лінійно збільшується похибка вимірювання кутової швидкості МС. Доведена доцільність доповнення фільтра Калмана спостерігачем Луенбергера, на основі якого здійснюється вимірювання збурюючих моментів наведена структурна схема системи стабілізації мікросупутника із

використанням фільтра Калмана та спостерігача Луенбергера. Це дозволило досягнути покращення точності оцінювання кутової швидкості МС за недостатнього рівня апіорних відомостей про збурюючі моменти.

В роботі [22] розглянуто роботу комплементарно фільтра та отримано чисельну реалізацію комплементарного фільтра інерціального вимірювального модуля. Розглянуто варіанти реалізації мікросистем орієнтації тільки на акселерометрах та акселерометрах і гіроскопах. Визначено умови мінімізації випадкової похибки на виході комплексної інерціальної системи орієнтації.

Таким чином, дослідження і розробки, присвячені фільтрації сигналів актуальні і спрямовані на вирішення різноманітних завдань. Кожна стаття присвячена окремим питанням реалізації конкретного фільтра. Але недостатньо досліджена ефективність таких фільтрів на одних і тих самих прикладах сигналів.

#### **1.4. Мета і завдання дисертаційного дослідження**

**Метою** магістерської дисертації є розробка методичного та алгоритмічного забезпечення фільтрації сигналів навігаційних мікромеханічних датчиків, а саме: акселерометра та гіроскопа.

Для досягнення поставленої мети в роботі необхідно вирішити такі завдання:

13. Огляд стану проблеми за методами фільтрації сигналів.
14. Аналіз принципів та умов функціонування мікромеханічних приладів і їх похибок. Обґрунтування підходів до фільтрації їх сигналів.
15. Розробка Simulink – моделей фільтра Калмана та «Ковзкого середнього», та моделювання сигналу мікромеханічного акселерометра для подальшої обробки.
16. Розробка програмної моделі комплементарного фільтра у програмному середовищі MATLAB, моделювання та обробка сигналів мікромеханічного акселерометра та гіроскопа
17. Порівняльний аналіз отриманих результатів фільтрації сигналів

мікромеханічних датчиків.

18. Розробка стартап - проекту: «Порівняльний аналіз ефективності фільтрації для різних частотних діапазонів вихідних сигналів»

## **1.5. Висновки до розділу 1**

У першому розділі магістерської дисертації було розглянута та приведена актуальність теми фільтрації для мікромеханічних навігаційних приладів.

Тема фільтрації сигналів гостро стоїть для кожної галузі, яка хоч трохи пов'язана з використанням та аналізом сигналів. А в наш час неможливо уявити собі галузь, яка не використовує сигнали чи не провокує їх. Оскільки автоматизація захопила всі сфери нашого життя, то отримання достовірного сигналу прямо впливає на якість людського існування на цій планеті.

Тому було вирішено проаналізувати роботу фільтрів та порівняти отримані результати.

Для розгляду було обрано три найзастосовуваніших у наш час фільтри: фільтр Калмана, фільтр «Ковзке середнє» та комплементарний фільтр. Приведені алгоритми їх функціонування, їх переваги та недоліки та можливі сфери застосування.

Також у розділі було розглянуті мікромеханічні прилади, а саме: гіроскоп та акселерометр. Розглядалася їх будова, принцип роботи. Приведені їх структурні схеми. Окремим пунктом описано можливість виникнення похибок мікромеханічного акселерометра та гіроскопа, їх види та способи їх усунення.

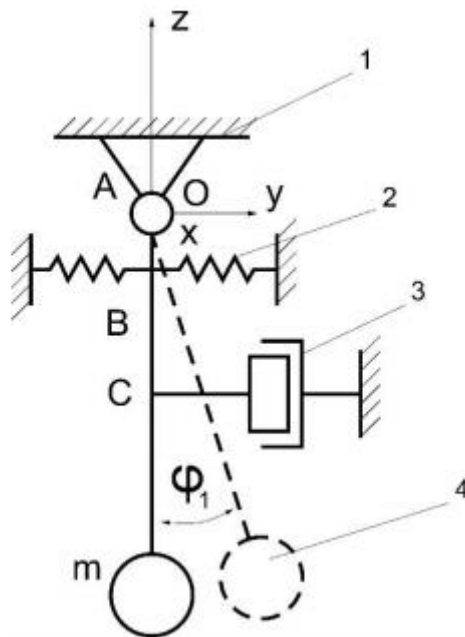
У розділі проводився огляд раніше виконаних робіт, наукових досліджень та публікацій, що відповідають темі магістерської дисертації.

## РОЗДІЛ 2. ДОСЛІДЖЕННЯ ФІЛЬТРАЦІЇ МІКРОМЕХАНІЧНИХ ПРИБЛІДІВ

### 2.1. Моделювання та дослідження фільтра Калмана

Для реалізації програмної моделі фільтра Калмана для мікромеханічного акселерометра, було прийнято використовувати мікромеханічний маятниковий акселерометр. Схема такого акселерометра представлена на рис.2.1. На зображенні прийняті такі позначення [23]:

- 1 – корпус приладу;
- 2 – пружний підвіс;
- 3 – демпфер;
- 4 – інерційна маса або чутливий елемент акселерометра;



Математична модель маятникового акселерометра представлена диференціальними рівняннями [23]:



$$\begin{aligned}
I_{1x}\ddot{\phi}_1 + f_1\dot{\phi}_1 + c_1\phi_1 &= M_{1x}^{nd} + M_{1x}^n - I_{1x}\dot{\omega}_x + m_1(y_1a_{z1} - z_1a_{y1}); \\
I_{2y}\ddot{\phi}_2 + f_2\dot{\phi}_2 + c_2\phi_2 &= M_{2y}^{nd} + M_{2y}^n - I_{2y}\dot{\omega}_y + m_2(z_2a_{x2} - x_2a_{z2}); \\
I_{3z}\ddot{\phi}_3 + f_3\dot{\phi}_3 + c_3\phi_3 &= M_{3z}^{nd} + M_{3z}^n - I_{3z}\dot{\omega}_z + m_3(x_3a_{y3} - y_3a_{x3}).
\end{aligned}$$

Для того, щоб побудувати програмну модель мікромеханічного маятникового акселерометра необхідно визначити рівняння руху [23]:

$$I\ddot{\phi} + f\dot{\phi} + c\phi = I\dot{\omega}$$

Для побудови програмної моделі буде використовуватись програмне середовище MATLAB. Для початку необхідно задати параметри: масу (m), довжину (l), коефіцієнт демпфування (f), момент інерції (J). Коефіцієнт демпфування розраховується з попереднього встановлення коефіцієнту затухання ( $\xi$ ), приймемо, що  $\xi = 2 \cdot 10^{-3}$  і розрахуємо f [23]:

$$f = 2 \cdot \xi \cdot I \cdot \sqrt{\frac{c}{I}}$$

Параметри, що задані у завданні для даної моделі:

Маса =  $1.0318 \cdot 10^{-10}$  кг.

Жорсткість =  $1 \cdot 10^{-10}$

Довжина =  $120 \cdot 10^{-6}$  м.

Момент інерції  $I = (m \cdot l^2) / 12$  кг/м.

Амплітуда =  $5 \cdot \text{rtd}$

Частота =  $5 \cdot 2 \cdot \pi$  рад/с

У моделі буде реалізовуватися фільтр Калмана дискретного типу [24]. У дискретному фільтрі Калмана в задачі лінійного оцінювання, безперервної динамічній системі:  $\dot{\bar{x}} = A\bar{x} + B\bar{u} + G\bar{w}$ , та вимірювань  $\bar{y} = H\bar{x} + \bar{v}$ , відповідають записані в різнітній формі дискретна система і дискретні вимірювання

$$\bar{x}_{k+1} = F_k \bar{x}_k + \Psi_k \bar{u}_k + \Gamma_k \bar{w}_k; \quad (7)$$

$$\bar{y}_k = H_k \bar{x}_k + \bar{v}_k, \quad (8)$$

де підрядкові індекси «k» і «k + 1» вказують номер дискретного моменту часу  $t_k$  і  $t_{k+1}$ ; крок дискретизації  $\Delta t = t_{k+1} - t_k$

$F_k = \exp(A \cdot \Delta t)$  - перехідна матриця системи в момент часу  $t_k$ , яка може бути представлена приблизно у вигляді розкладання в ряд

$$F_k = I + F_k \Delta t + \frac{1}{2} (F_k \Delta t)^2 + \dots ;$$

$\Gamma_k \cong F_k G_k \Delta t$  - матриця, яка визначає вплив вектора вхідних шумів  $w_{k-1}$  в момент часу  $t_k$ , в першому наближенні  $\Gamma_k \approx G_k \Delta t$ ;

$\Psi_k \cong F_k B_k \Delta t$  - матриця, яка визначає вплив вектора управління  $u_{k-1}$  в момент часу  $t_k$ , в першому наближенні  $\Gamma_k \approx G_k \Delta t$ ;

$I$  - одинична матриця;

Матриці інтенсивностей векторних дискретних гаусовських шумів  $w_k$  системи і  $v_k$  вимірювань пов'язані з відповідними матрицями безперервної динамічної системи співвідношеннями:

$$Q_k = \frac{Q(t_k)}{\Delta t}, \quad R_k = \frac{R(t_k)}{\Delta t}.$$

Для оцінки вектора стану можна використовувати алгоритм лінійного дискретного фільтра Калмана:

- задано початкове значення  $\bar{x}_{k0}$  оцінки вектора змінної стану, початкового значення передбаченої (апріорної) кореляційної матриці  $\bar{P}_{k0}$ , помилок, матриці інтенсивностей шумів  $Q_k$  і  $R_k$ ;

- отримано передбачене (апріорне) значення вектора змінних стану

$$\bar{x}_{k+1} = F_k \bar{x}_k + B u_k ,$$

- розраховано значення коефіцієнтів фільтра

$$K_k = \bar{P}_k H_k^T [H_k \bar{P}_k H_k^T + R_k]^{-1} ,$$

- обчислено скориговані (апостеріорне) значення оцінки вектора стану

$$\bar{x}_k = \bar{x}_k + K_k [y_k - H_k \bar{x}_k] ,$$

- обчислено скориговану (апостеріорну) кореляційну матрицю помилок фільтра

$$\bar{P}_k = [I - K_k H_k] \bar{P}_k ,$$

- розраховано значення передбаченої (апріорної) кореляційної матриці помилок для нового кроку обчислень

$$\bar{P}_{k+1} = F_k \bar{P}_k F_k^T + Q_k ,$$

Для полегшення обчислень можна взяти наближене значення перехідної матриці  $F = I + A \Delta t$ ;  $\bar{x}_k$  - скориговане (апостеріорне) значення оцінки вектора  $\bar{x}_k$  стану, - передбачене (апріорне) значення оцінки вектора стану,  $K$  - матриця коефіцієнтів посилення Калмана,  $\bar{P}_k$  скоректованна (апостериорная) кореляційна матриця помилок фільтра,  $\bar{P}_k$  - передсказанная (апріорна) кореляційна матриця помилок фільтра,  $R$ - матриця інтенсивностей шумів спостереження (вимірювання)  $v$ ,  $Q$  - матриця інтенсивностей вхідних збурень  $w$ . Початкова матриця  $P_k$  зазвичай містить діагональні елементи, відповідні початковим дисперсіям помилок відповідних змінних стану

Отримана модель фільтра представлена на рисунку 2.2.

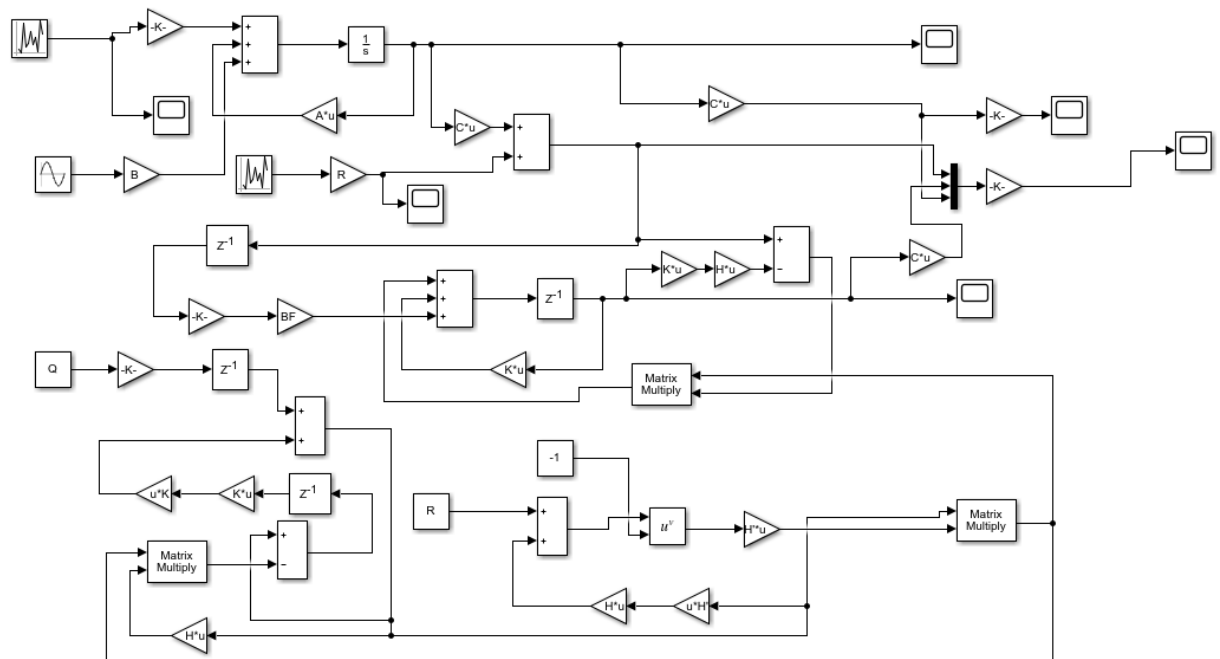


Рис. 2.2 Simulink – модель фільтра Калмана для мікромеханічного акселерометру

Після пропускання сигналу через фільтр Калмана отримано графік, що відображений на рисунку 2.3. На графіку зображено три сигнали, що порівнюються: оранжевим кольором – чистий сигнал з акселерометру, жовтим – сигнал з шумом, синім – сигнал після фільтрації Калмана. Даний результат отримано при  $R=1 \cdot 10^{-3}$  - дисперсія зовнішніх збурень та  $Q=1 \cdot 10^{-3}$  - дисперсія вимірювального шуму.

Для кращого розуміння, як поводить себе сигнал, необхідно його розглянути при різних частотах: 0 рад /с, 5 рад /с, 10 рад /с, 25 рад/с та 40 рад /с.

На рисунку 2.3 зображений сигнал акселерометру з частотою 0 рад/с без адитивного шуму, який подається на вхід фільтру разом з шумом, і є однаковим для обох досліджуваних фільтрів. А на рисунку 2.4 відображений також сигнал, що подається на входи фільтру, але з частотою 10 рад/с.

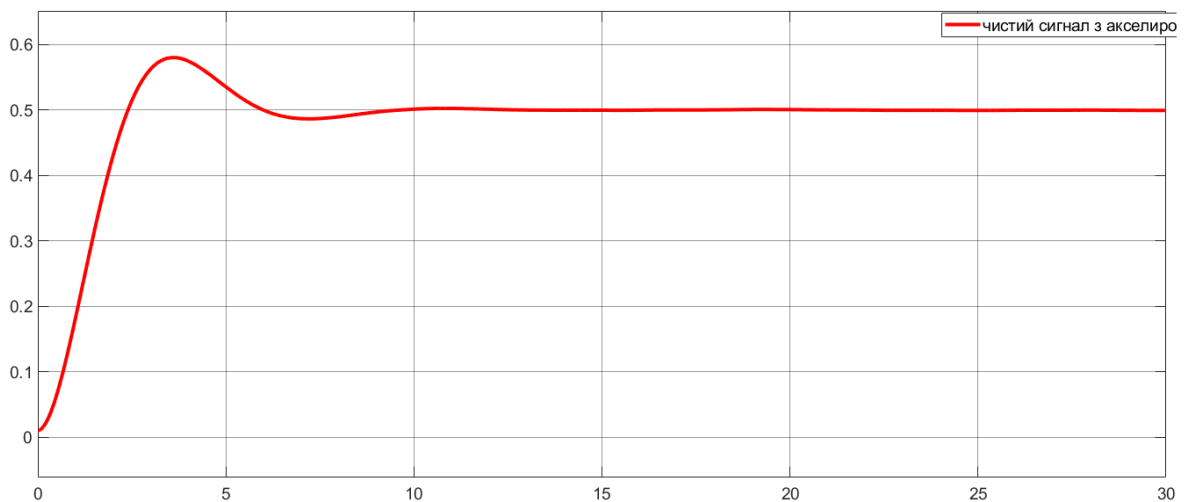


Рис. 2.3. Сигнал акселерометру, що подається на входи фільтрів. З частотою 0 рад/с

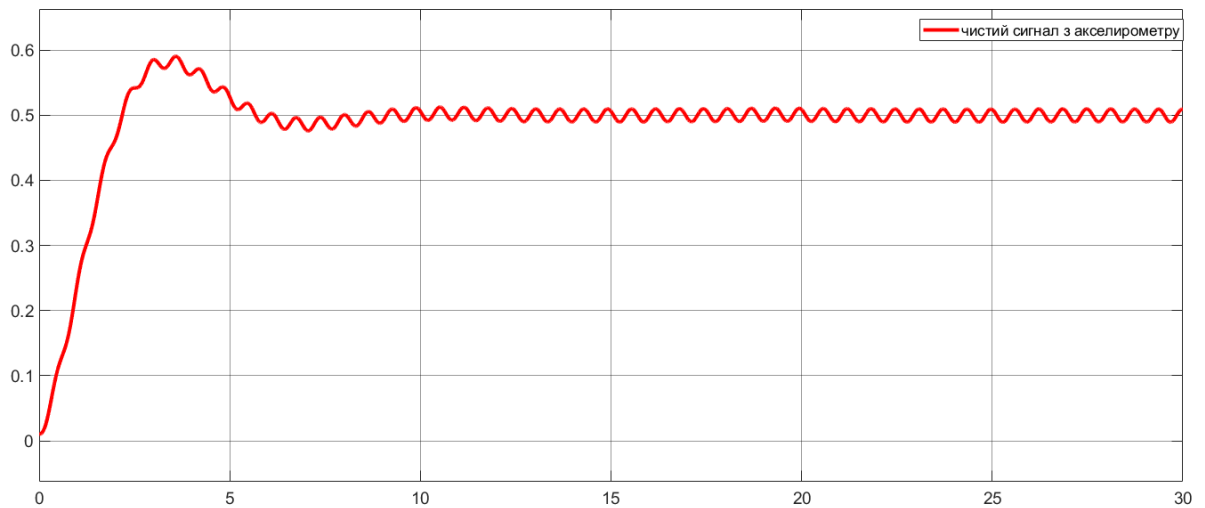


Рис. 2.4. Сигнал акселерометру, що подається на входи фільтрів з частотою 10 рад/с

На рисунку 2.5. наведено графік, який отримано після пропущення сигналу через фільтр Калмана. На графіку зображено три сигнали, що порівнюються: оранжевим кольором – чистий сигнал з акселерометру, жовтим – сигнал з шумом, синім – сигнал після фільтрації Калмана. Даний результат отримано при частоті 0 рад/с. А на рисунку 2.6 відображено цей же сигнал збільшено.

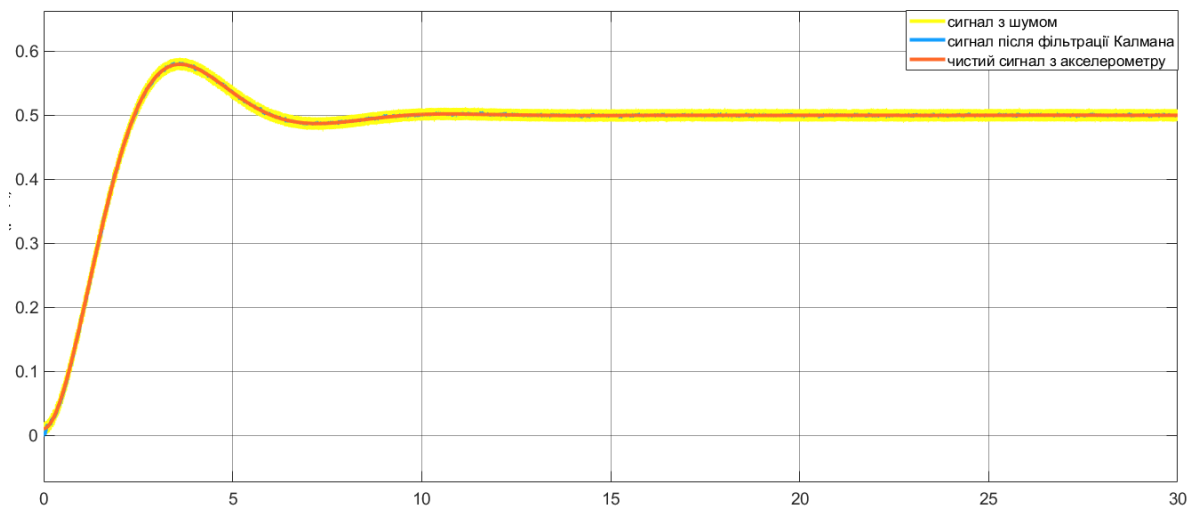


Рис. 2.5. Вихідний сигнал акселерометру з частотою 0 рад/с

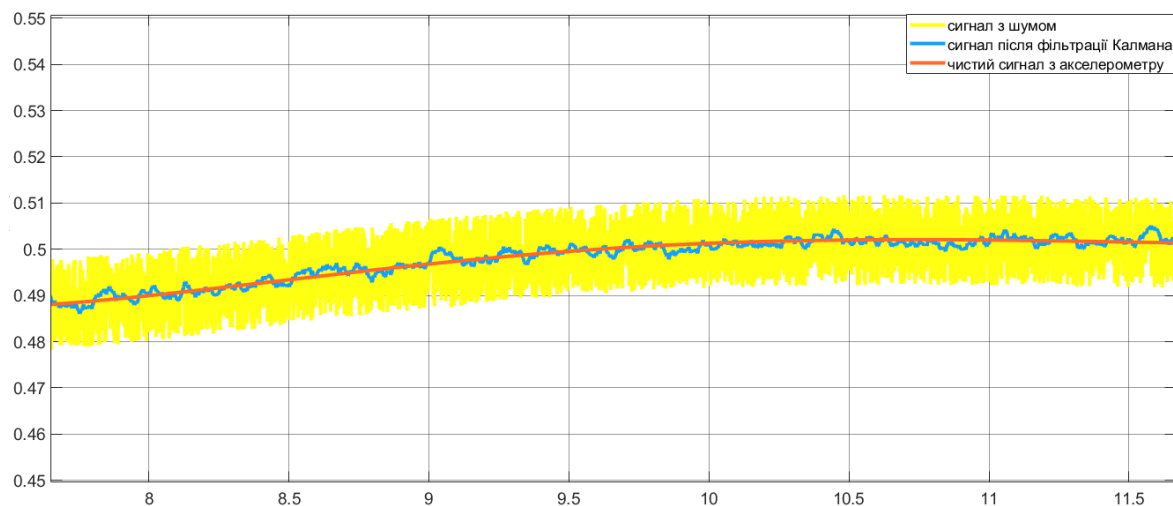


Рис. 2.6. Вихідний сигнал акселерометру з частотою 0 рад/с (збільшено).

На рисунку 2.7. наведено графік, який отримано після пропусчення сигналу через фільтр Калмана. На графіку зображено три сигнали, що порівнюються: оранжевим кольором – чистий сигнал з акселерометру, жовтим – сигнал з шумом, синім – сигнал після фільтрації Калмана. Даний результат отримано при частоті 5 рад/с. А на рисунку 2.8. відображено цей же сигнал збільшено.

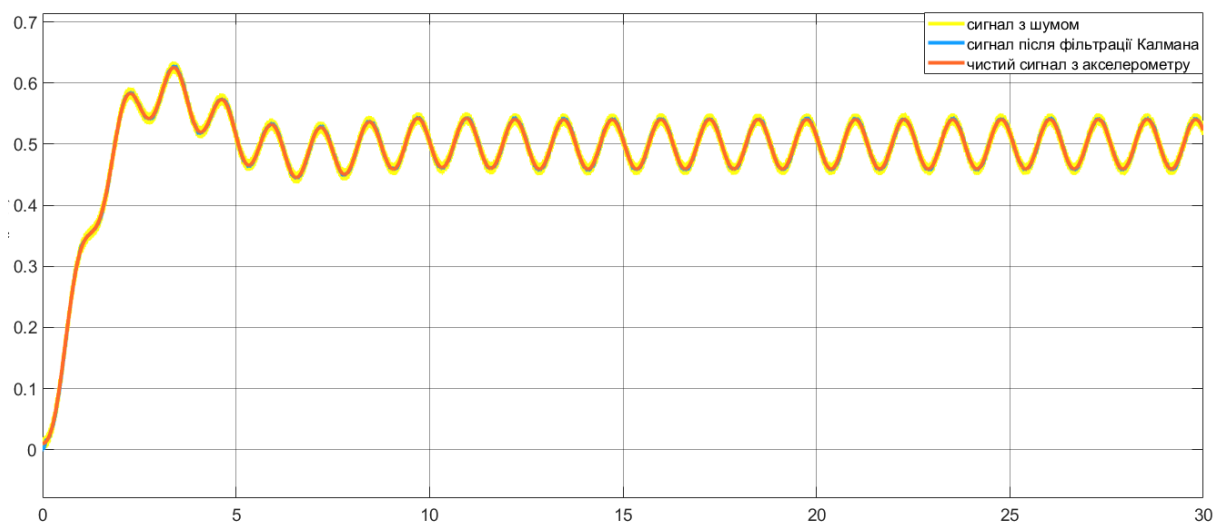


Рис. 2.7. Вихідний сигнал акселерометру з частотою 5 рад/с

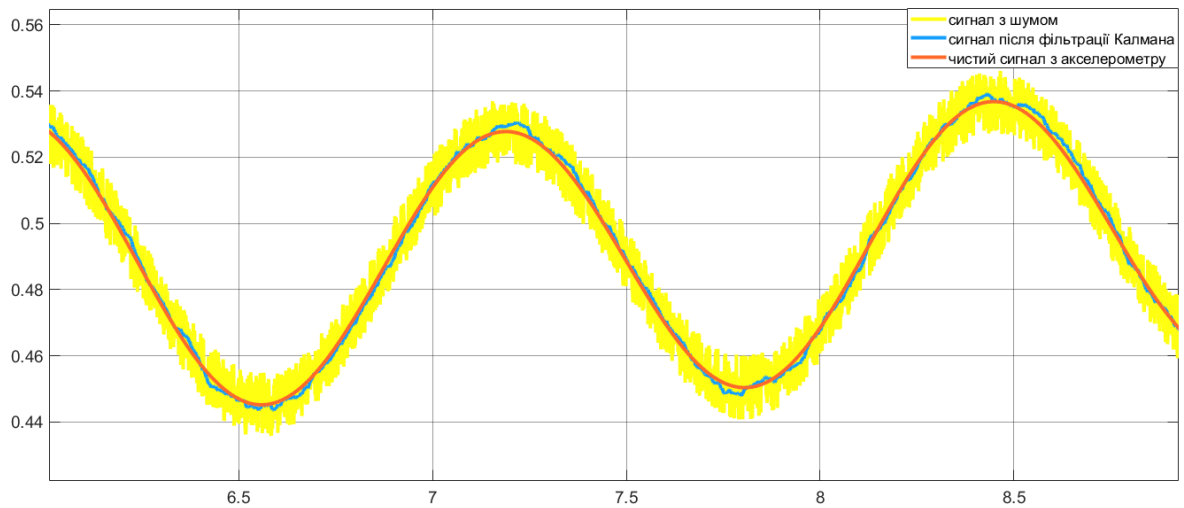


Рис. 2.8. Вихідний сигнал акселерометру з частотою 10 рад/с (збільшено)

На рисунку 2.9. наведено графік, який отримано після пропускання сигналу через фільтр Калмана. На графіку зображено три сигнали, що порівнюються: оранжевим кольором – чистий сигнал з акселерометру, жовтим – сигнал з шумом, синім – сигнал після фільтрації Калмана. Даний результат отримано при частоті 10 рад/с. А на рисунку 2.10. відображено цей же сигнал збільшено.

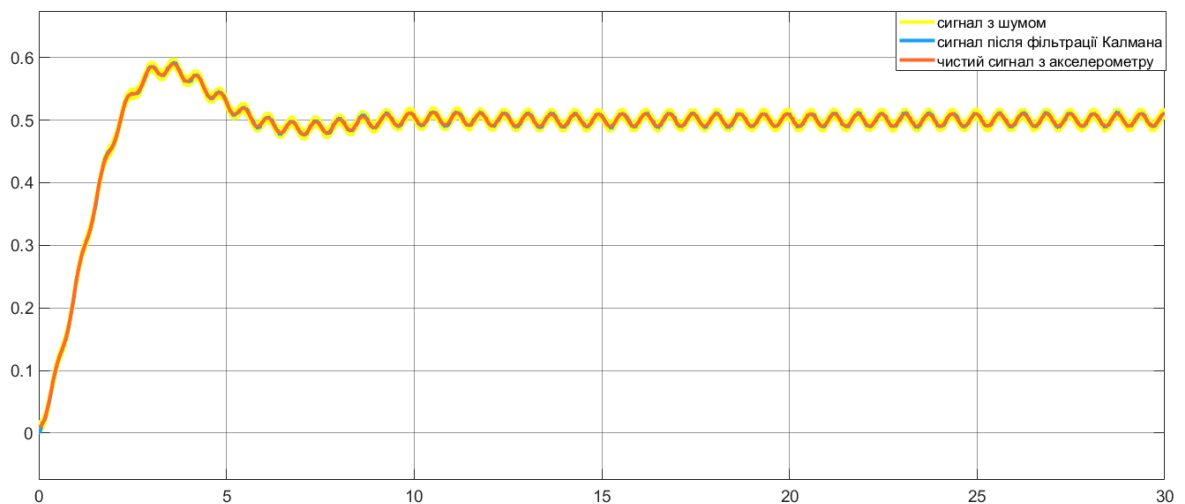


Рис. 2.9. Вихідний сигнал акселерометру з частотою 10 рад/с

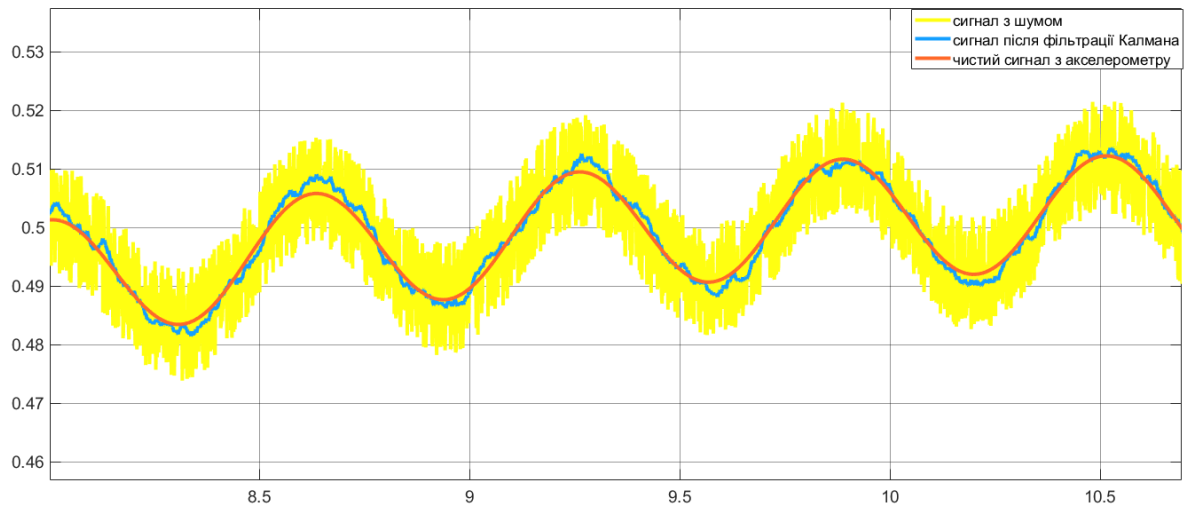


Рис. 2.10. Вихідний сигнал акселерометру з частотою 10 рад/с (збільшено)

На рисунку 2.11. наведено графік, який отримано після пропускання сигналу через фільтр Калмана. На графіку зображено три сигнали, що порівнюються: оранжевим кольором – чистий сигнал з акселерометру, жовтим – сигнал з шумом, синім – сигнал після фільтрації Калмана. Даний результат отримано при частоті 20 рад/с. А на рисунку 2.12 відображено цей же сигнал збільшено.

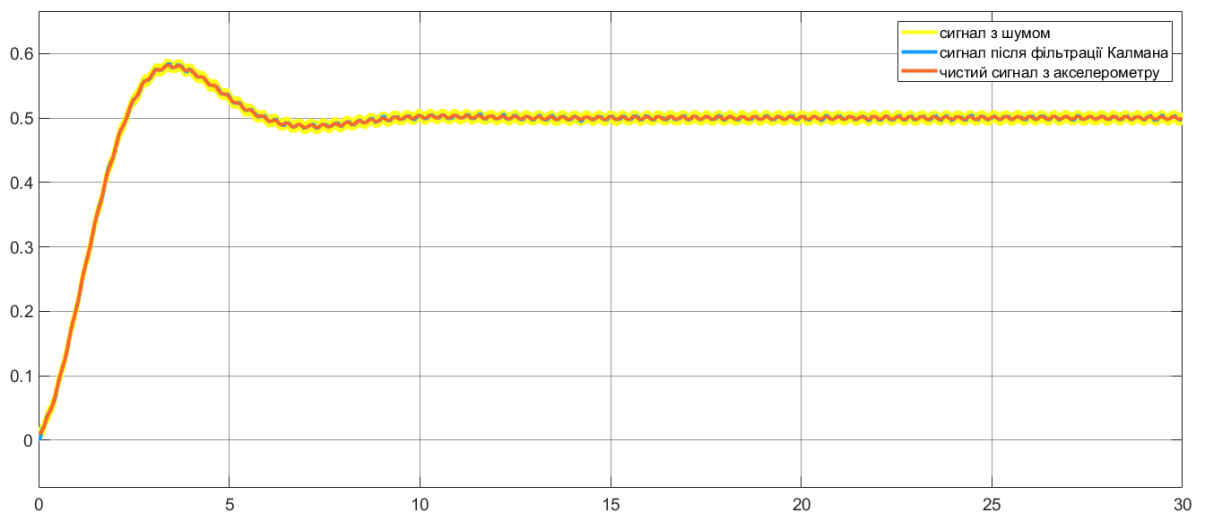


Рис. 2.11. Вихідний сигнал акселерометру з частотою 20 рад/с



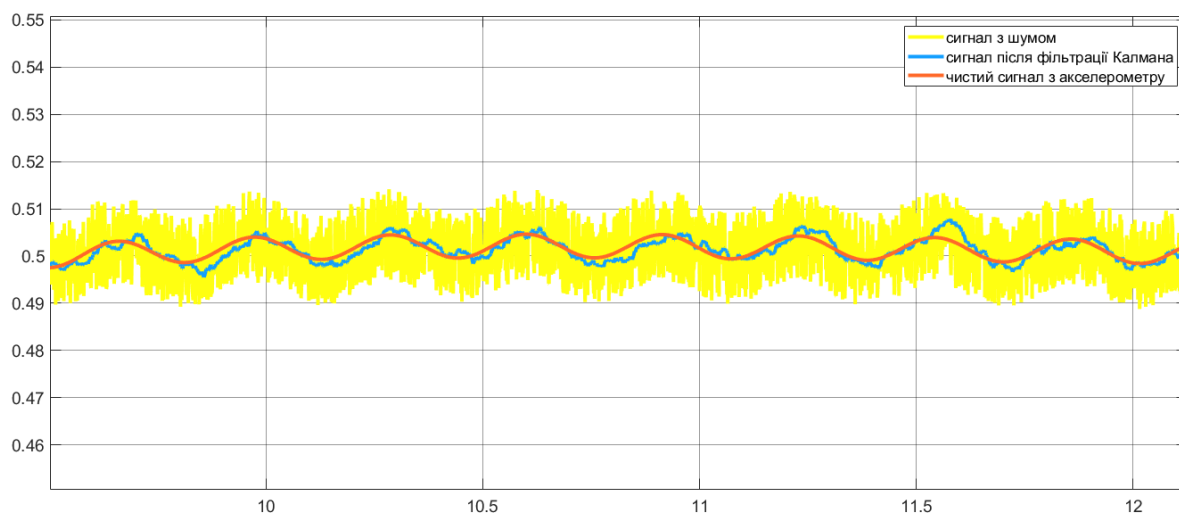


Рис. 2.12. Вихідний сигнал акселерометру з частотою 20 рад/с (збільшено).

На рисунку 2.13. наведено графік, який отримано після пропускання сигналу через фільтр Калмана. На графіку зображено три сигнали, що порівнюються: оранжевим кольором – чистий сигнал з акселерометру, жовтим – сигнал з шумом, синім – сигнал після фільтрації Калмана. Даний результат отримано при частоті 40 рад/с. А на рисунку 2.14 відображено цей же сигнал збільшено.

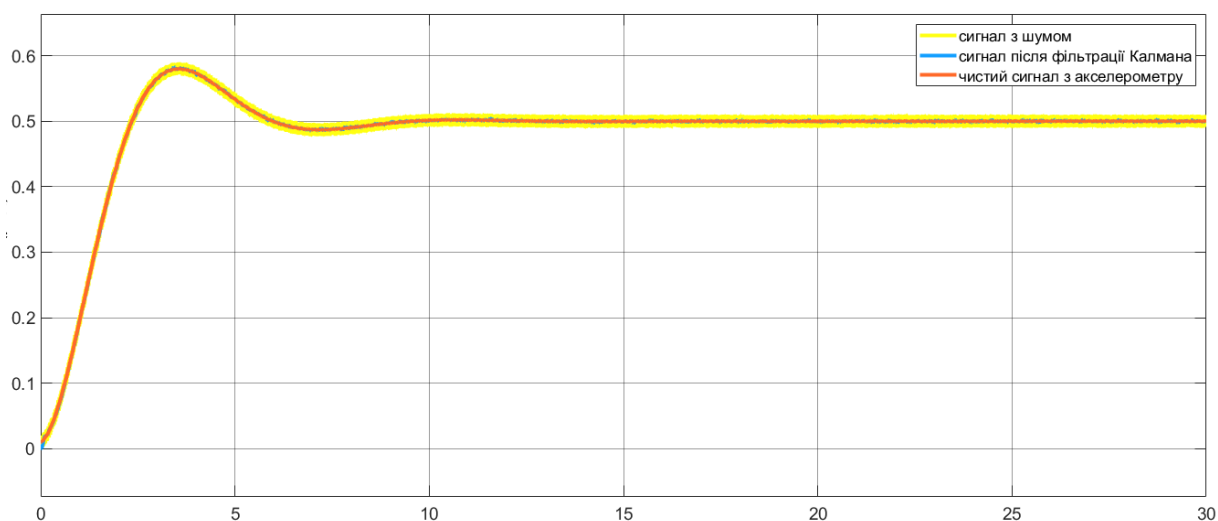


Рис. 2.13. Вихідний сигнал акселерометру з частотою 40 рад/с

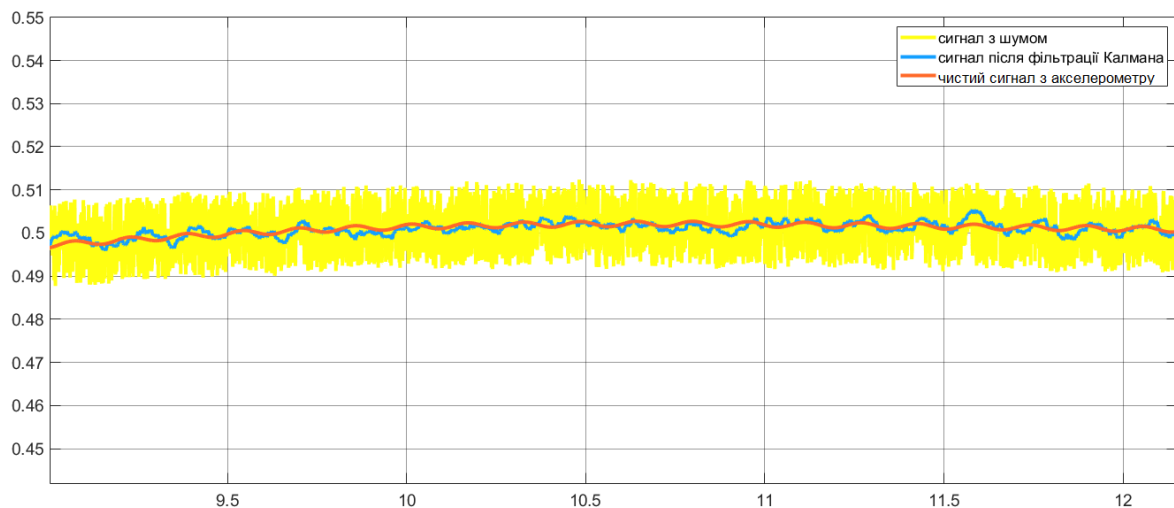


Рис. 2.14. Вихідний сигнал акселерометру з частотою 40 рад/с (збільшено).

З наведених вище графіків можна заключити, що при збільшенні частоти графік стає більш плавним. Коли частота сигналу переступає значення 20 рад/с, сигнал вже набуває сприятливого вигляду та стає сприятливим для подальшої роботи з ним.

## 2.2 Моделювання та дослідження фільтра «Ковзне середнє»

Фільтр «ковзне середнє» реалізований на основі осереднення 20 попередніх точок. Рівняння роботи (1.5) та принцип фільтру наведено у першому розділі.

На вхід моделі подається сигнал маятникового мікромеханічного акселерометра, як у попередньому підрозділі 2.1, з тими ж параметрами.

На рисунку 2.15 наведена реалізована Simulink – модель фільтра «Ковзне середнє».

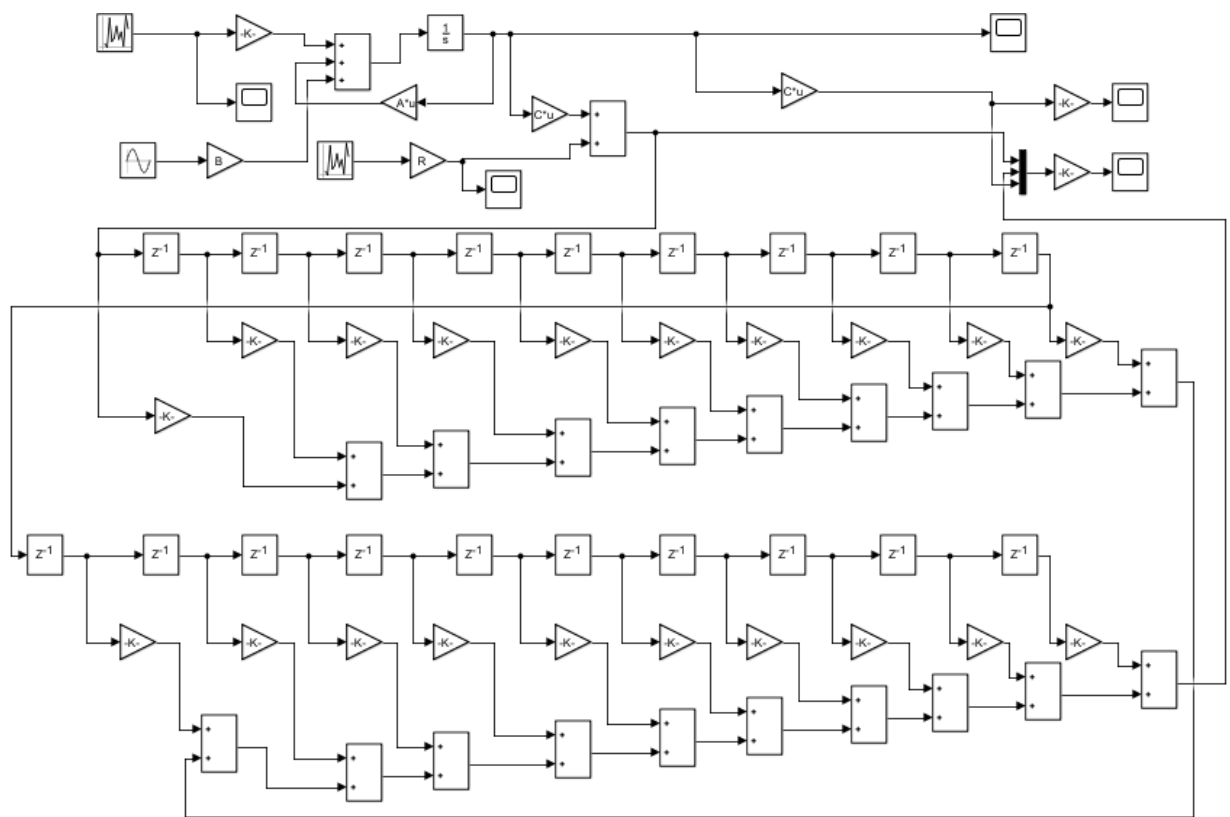


Рис.2.15. Simulink – модель фільтра «Ковзне середнє»

Отже, після того, як сигнал проходить через фільтр, на виході отримано порівняння трьох сигналів, що порівнюються: оранжевим кольором – чистий сигнал з акселерометру, жовтим – сигнал з шумом, синім – сигнал після фільтрації ковзного середнього. Даний результат отримано при  $R=1 \cdot 10^{-3}$  - дисперсія зовнішніх збурень та  $Q=1 \cdot 10^{-3}$  - дисперсія вимірювального шуму.

В даному випадку, як і з фільтром Калмана необхідно подивитись, як поводить себе сигнал при зміні його частоти. Діапазон частот буде наступним: 0 рад /с, 5 рад /с, 10 рад /с, 20 рад/с та 40 рад /с.

На рисунку 2.16. наведено графік, який отримано після пропускання сигналу через фільтр «Ковзке середнє». На графіку зображено три сигнали, що порівнюються: оранжевим кольором – чистий сигнал з акселерометру, жовтим – сигнал з шумом, синім – сигнал після фільтрації «Ковзке середнє». Даний результат отримано при частоті 0 рад/с. А на рисунку 2.17 відображено цей же сигнал збільшено.

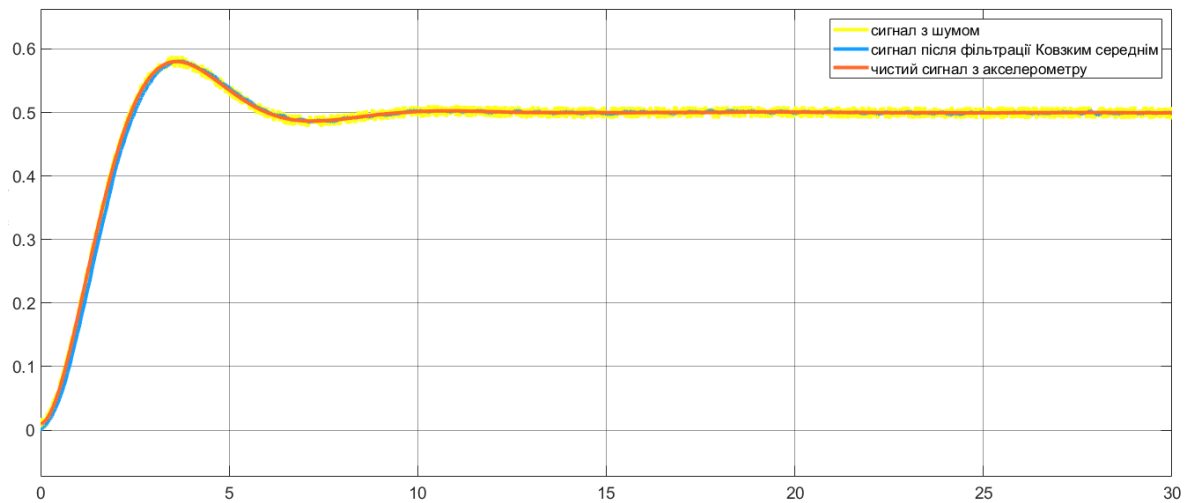


Рис.2.16. Вихідний сигнал акселерометру з частотою 0 рад/с

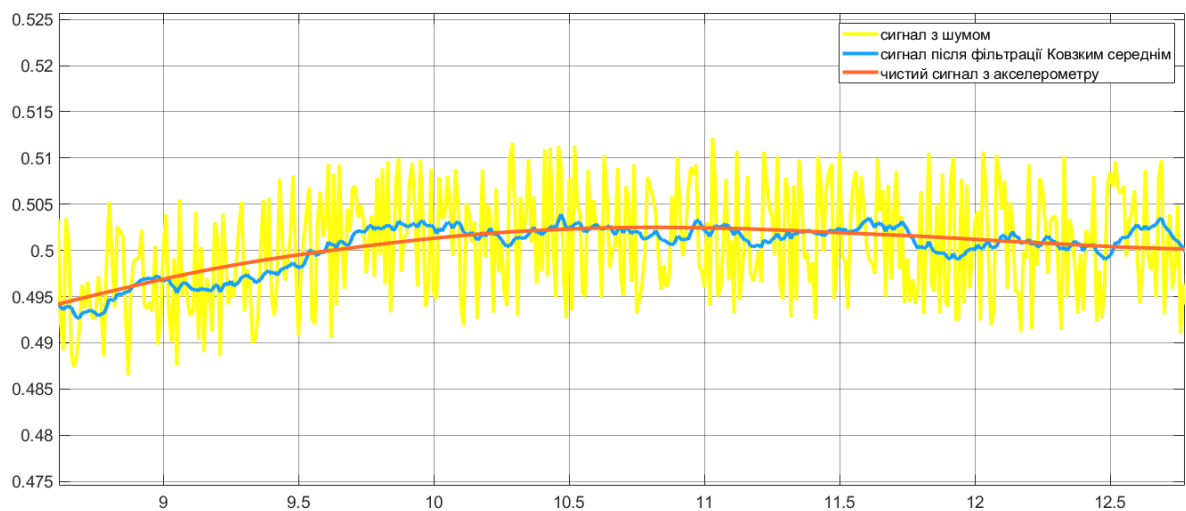


Рис. 2.17. Вихідний сигнал акселерометру з частотою 0 рад/с (збільшено)

На рисунку 2.18. наведено графік, який отримано після пропущення сигналу через фільтр «Ковзке середнє». На графіку зображено три сигнали, що порівнюються: оранжевим кольором – чистий сигнал з акселерометру, жовтим – сигнал з шумом, синім – сигнал після фільтрації «Ковзке середнє». Даний результат отримано при частоті 5 рад/с. А на рисунку 2.19 відображено цей же сигнал збільшено.

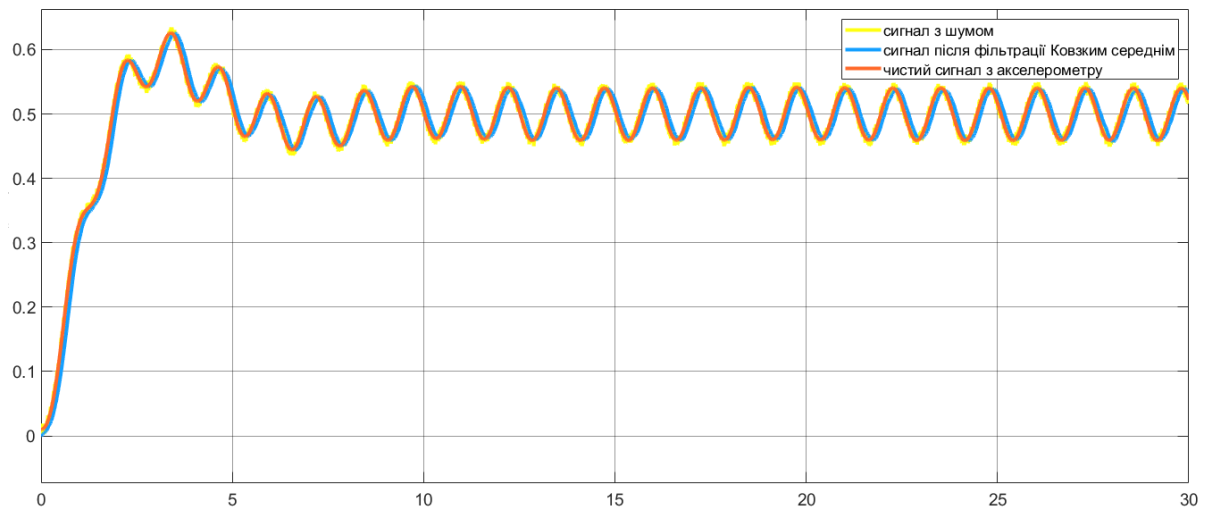


Рис.2.18. Вихідний сигнал акселерометру з частотою 5 рад/с

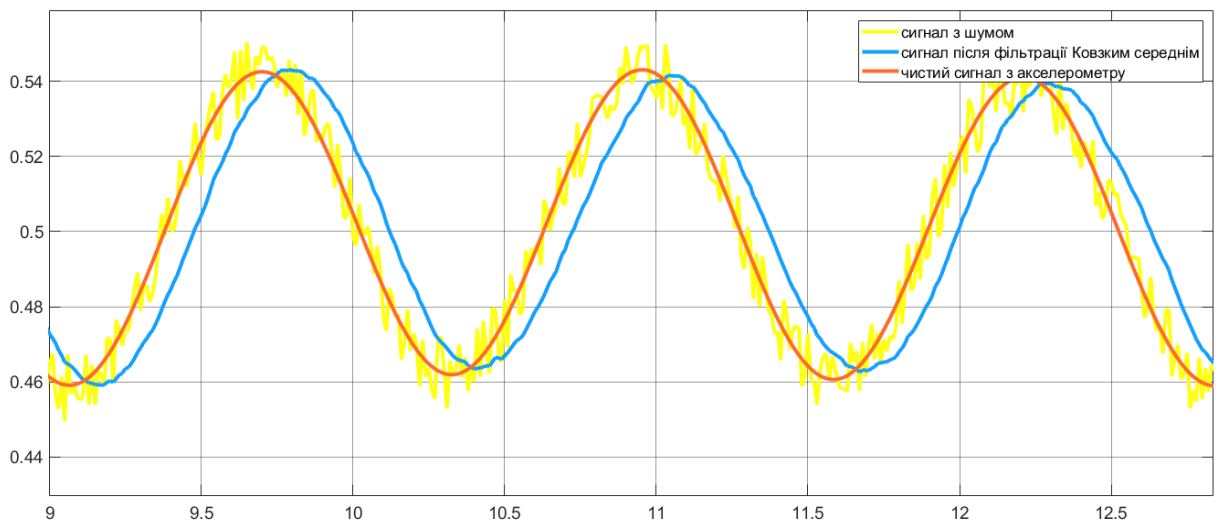


Рис. 2.19. Вихідний сигнал акселерометру з частотою 5 рад/с (збільшено)

На рисунку 2.20. наведено графік, який отримано після пропущення сигналу через фільтр «Ковзке середнє». На графіку зображено три сигнали, що порівнюються: оранжевим кольором – чистий сигнал з акселерометру, жовтим – сигнал з шумом, синім – сигнал після фільтрації «Ковзке середнє». Даний результат отримано при частоті 10 рад/с. А на рисунку 2.21 відображено цей же сигнал збільшено.

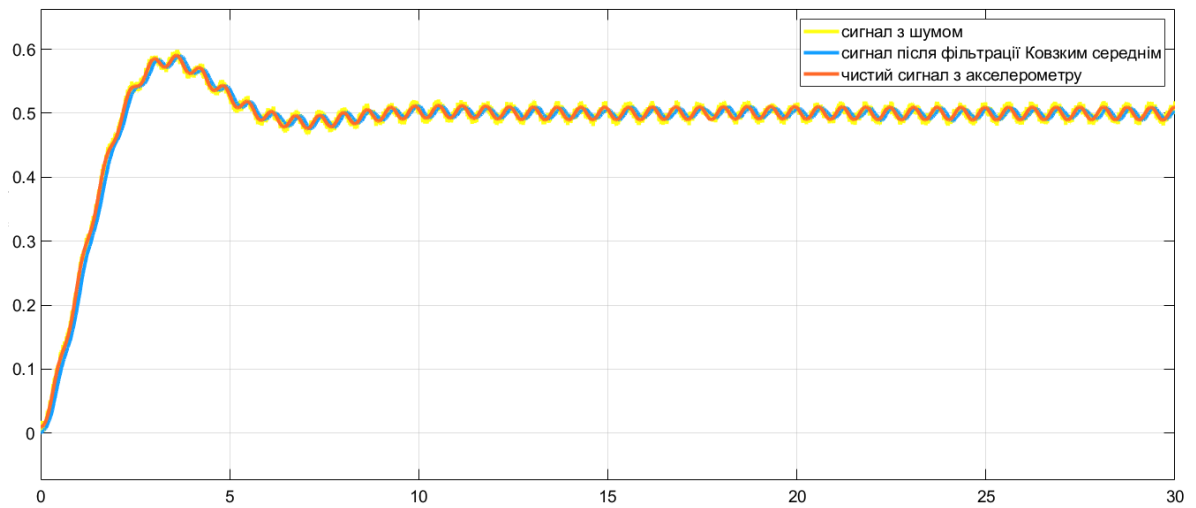


Рис.2.20. Вихідний сигнал акселерометру з частотою 10 рад/с

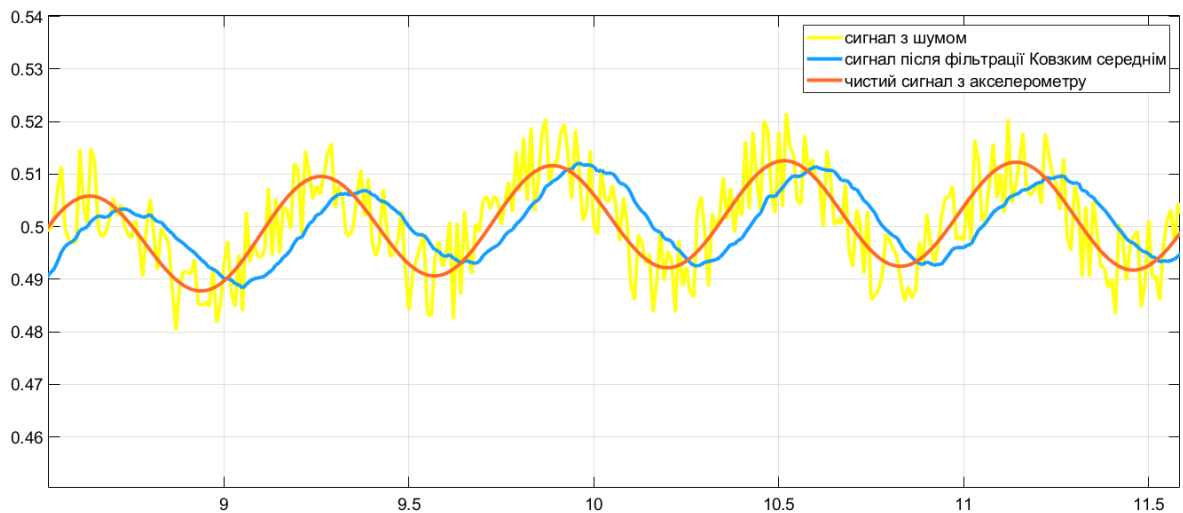


Рис. 2.21. Вихідний сигнал акселерометру з частотою 10 рад/с (збільшено)

На рисунку 2.22. наведено графік, який отримано після пропускання сигналу через фільтр «Ковзке середнє». На графіку зображено три сигнали, що порівнюються: оранжевим кольором – чистий сигнал з акселерометру, жовтим – сигнал з шумом, синім – сигнал після фільтрації «Ковзке середнє». Даний результат отримано при частоті 20 рад/с. А на рисунку 2.23 відображено цей же сигнал збільшено.

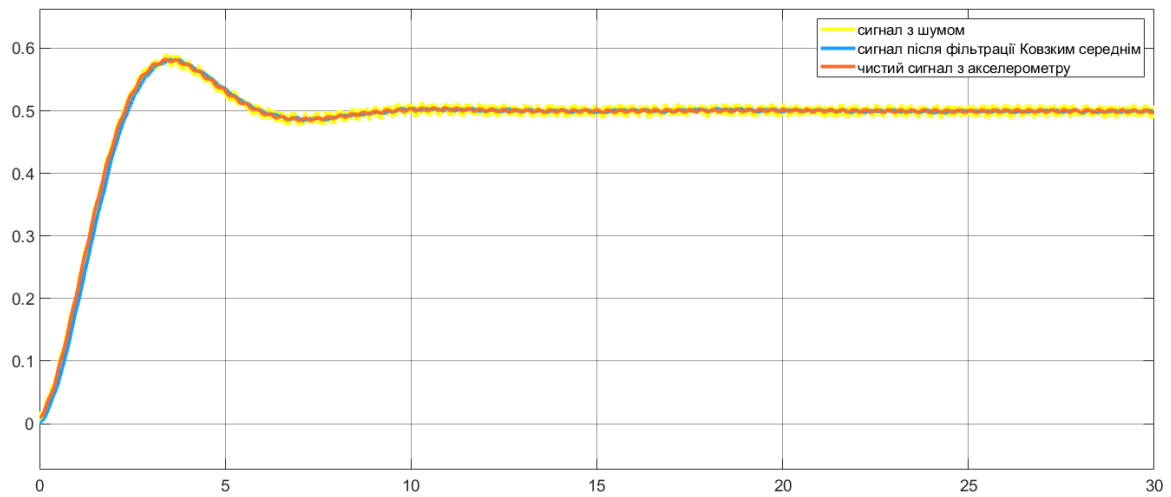


Рис.2.22. Вихідний сигнал акселерометру з частотою 20 рад/с

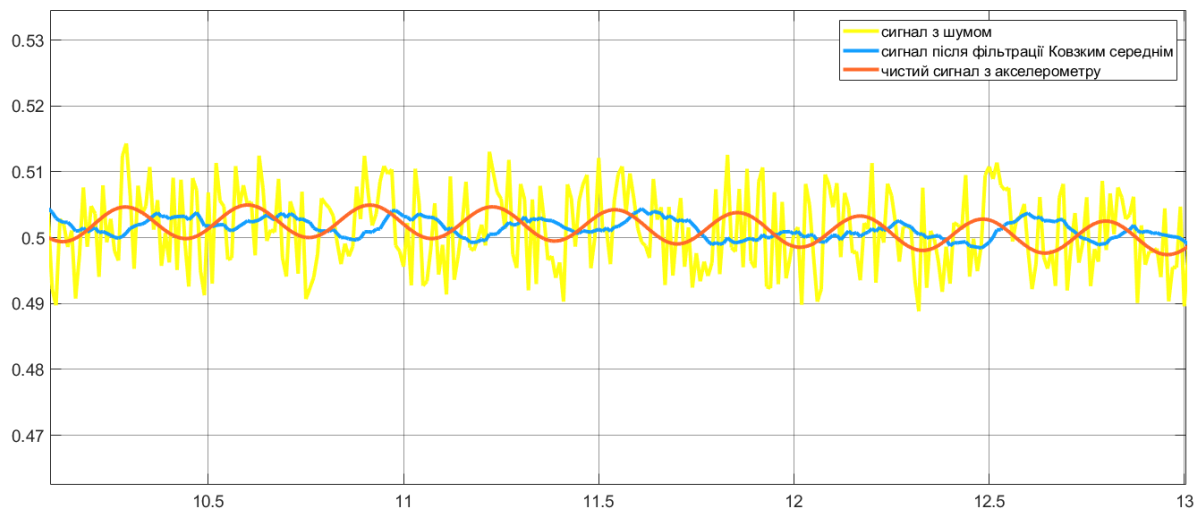


Рис. 2.23. Вихідний сигнал акселерометру з частотою 20 рад/с (збільшено)

На рисунку 2.24. наведено графік, який отримано після пропускання сигналу через фільтр «Ковзке середнє». На графіку зображено три сигнали, що порівнюються: оранжевим кольором – чистий сигнал з акселерометру, жовтим – сигнал з шумом, синім – сигнал після фільтрації «Ковзке середнє». Даний результат отримано при частоті 40 рад/с. А на рисунку 2.25. відображено цей же сигнал збільшено.

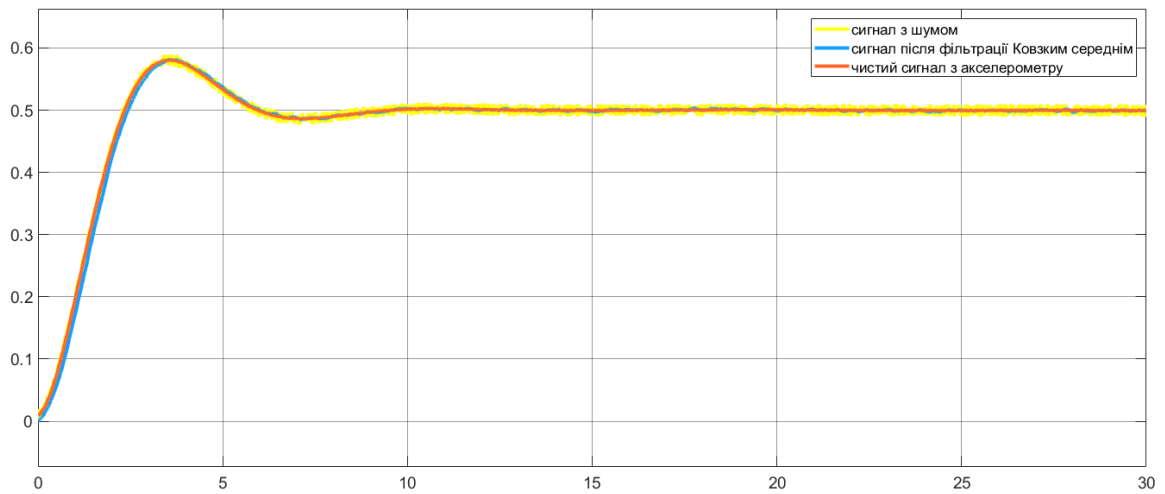


Рис.2.22. Вихідний сигнал акселерометру з частотою 40 рад/с

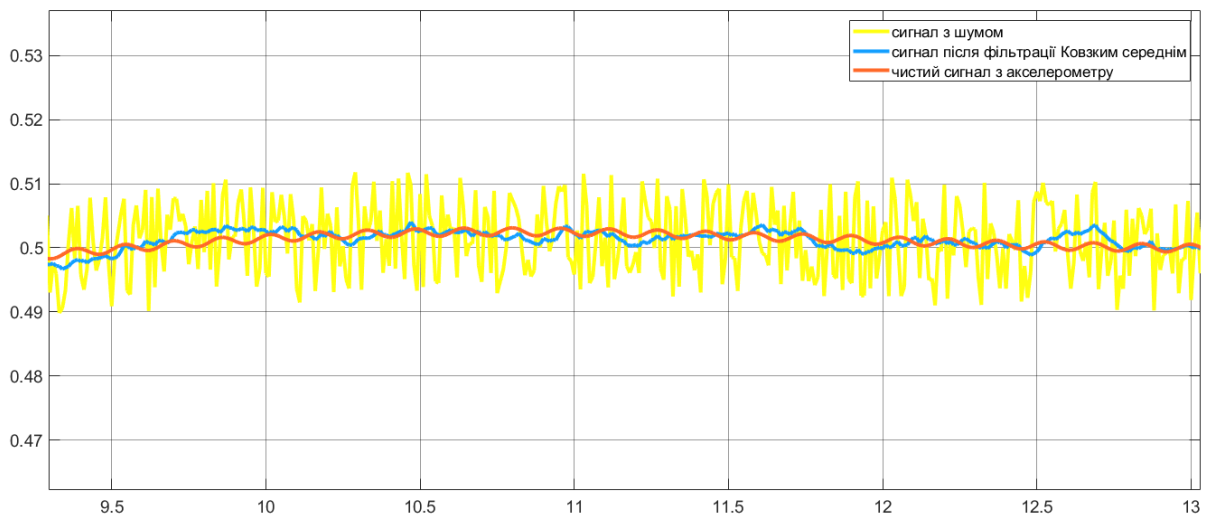


Рис. 2.25. Вихідний сигнал акселерометру з частотою 40 рад/с (збільшено)

З наведених вище графіків видно, що незважаючи на те, з якою частотою подавати сигнал, на виході отримано приблизно один результат. Отже, можна зробити висновок, що фільтр може опрацьовувати сигнали будь-якої частоти.

Для аналізу даних необхідно порахувати середньоквадратичне відхилення (СКВ) отриманих сигналів: чистого сигналу та сигналу після фільтрації кожним фільтром та порівняти їх.

Середньоквадратичне відхилення розраховано за наступною

формулою: 
$$S = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}{n}}$$

Для аналізу даних було визначено середньоквадратичне відхилення



(СКВ) отриманих після фільтрації сигналів, порівняно до сигналу без шуму. Результати розрахунків середньоквадратичного відхилення при фільтрації за Калманом та Ковзким середнім на кожному значенні частоти занесені до таблиці 2.1.

Таблиця 2.1. Результати розрахунків СКВ

Частота (рад/с)	СКВ при фільтрації Калмана	СКВ при фільтрації Ковзким середнім
0	0.186173499	0.016289367
5	0.187101179	0.035042824
10	0.185592907	0.014674432
20	0.185660413	0.013542897
40	0.18581695	0.01463748

Для наочності на рисунках 2.26 та 2.27 побудовані графіки залежності СКВ від частоти при двох фільтраціях.

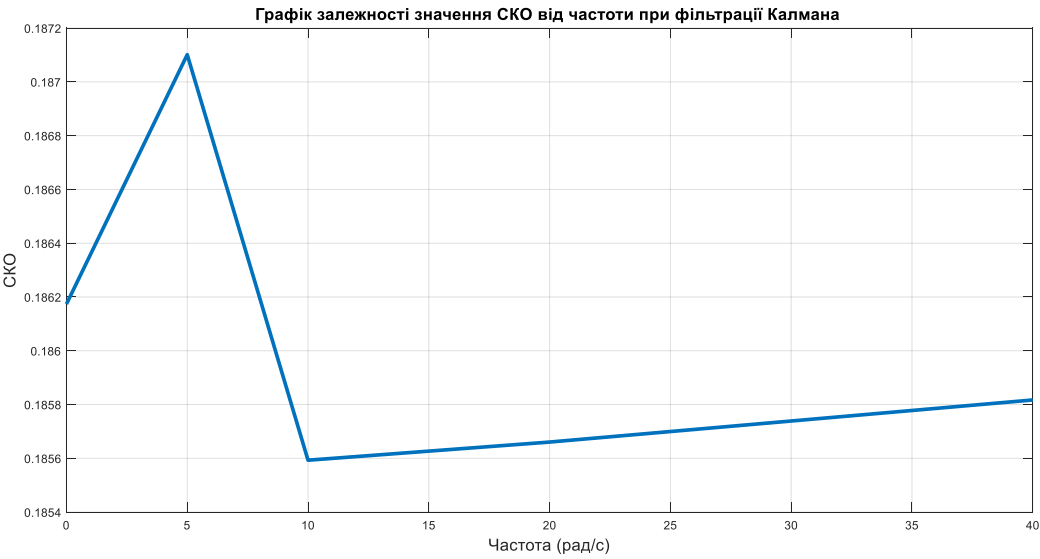


Рис 2.26. Графік залежності значення СКВ від частоти при фільтрації Калмана

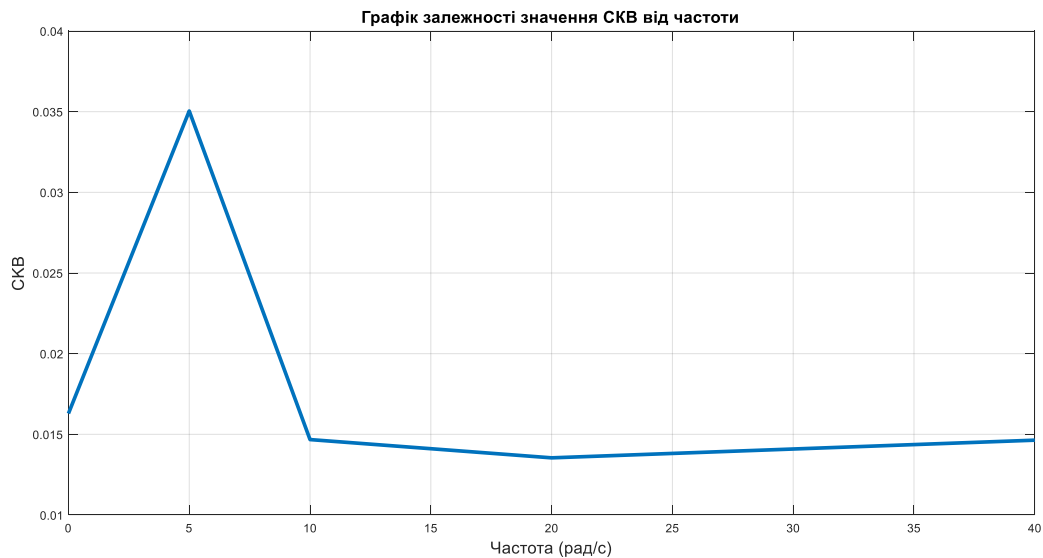


Рис 2.27. Графік залежності значення СКВ від частоти при фільтрації Ковзким середнім

Виходячи з приведених вище графіків визначити, що за використання фільтра «Ковзке Середнє» отримується кращий результат, оскільки графік має більш плавну форму на відміну від графіка залежності СКВ від частоти при використанні фільтра Калмана.

Результати визначення СКВ показали, що в розглянутому діапазоні частот середньоквадратичне відхилення при використанні фільтра Калмана становить 0.1861 а, при використанні Ковзкого середнього становить 0.0188.

### 2.3 Моделювання та дослідження Комплементарного фільтра

Комплементарний фільтр представляє собою спрощену модель фільтра Калмана для одновимірного випадку, в якому ланка інтерполяції представляє перший доданок [24]. Тому, що оцінка кута при використанні одного датчика акселерометра або гіроскопа виходить недостатню точною, отже головна ідея комплементарного фільтра постає в поєднанні виходів гіроскопа і акселерометра [24]. Отримані дані з суми їх вимірювань становлять оцінку кута. Комплементарний фільтр є одним із найросповсюджених методів поєднання показань акселерометра і гіроскопа у наш час. Суть такого методу

полягає у компенсуванні дрейфа нуля гіроскопа за допомогою показань акселерометра. В такому випадку комплементарний фільтр є фільтром високих частот для гіроскопа, а власне для акселерометра - фільтром низьких частот. Рішення задачі досягається таким чином, на низьких частотах переважають показання акселерометра (значить, що дрейф нуля відсутній), на високих частотах переважають значення гіроскопа.

Для визначення кута відхилення за допомогою комплементарного фільтра, використовується вираз [25]:

$$\hat{\phi}(n) = K(\hat{\phi}(n-1) + \omega_g \Delta t) + (1-K)\phi_a$$

Параметри уравнения комплементарного фильтра отображены в табл. 2.

Параметри комплементарного фільтра наведені у таблиці 2.2:

Таблиця 2.2. Параметри комплементарного фільтра [25].

Позначення	Параметр
$\hat{\phi}(n)$	Оцінка кута в даний момент часу
$\hat{\phi}(n-1)$	Оцінка кута в попередній момент часу
$\omega_g$	Кутова швидкість, отримана по показанням гіроскопа
$\phi_a$	Значення кута нахилу, отримане по показанням акселерометра
$\Delta t$	Шаг інтегрування
$K$	Коефіцієнт фільтра

Для того, щоб отримати необхідні характеристики комплементарного фільтра, потрібно правильно підібрати значення коефіцієнта фільтра –  $K$ , яке визначає вклад показань датчиків. На рисунку 2.28 відображена структурна схема, яка відповідає даному визначенню.

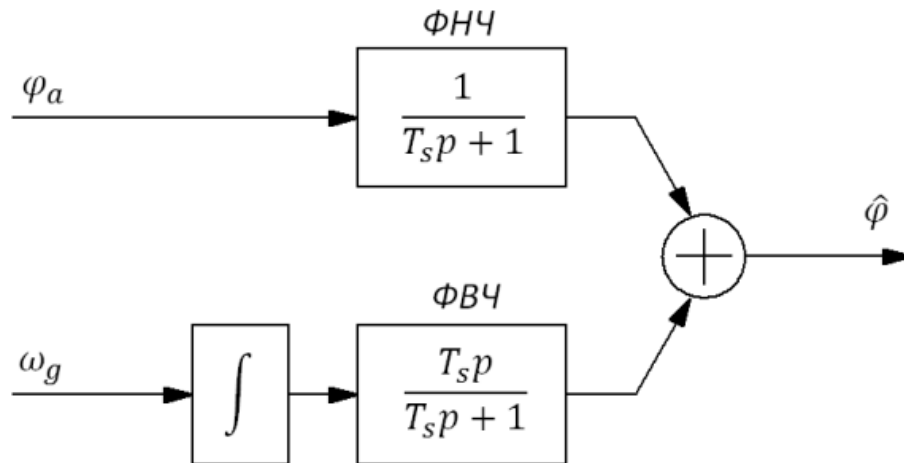


Рис. 2.28. Структурная схема комплементарного фильтра,

Значення параметру  $K$  пов'язане зі значенням частоти зрізу наступним співвідношенням [25]:

$$K = \frac{1}{1 + \omega_s \Delta t}$$

Загалом, щодо підбору значення параметра, в літературі часто рекомендують використовувати значення в діапазоні 0.95 ... 0.99 [26]. Такі рекомендації обумовлюються тим, на вхід фільтра потрапляють високочастотні перешкоди акселерометра, коли значення коефіцієнта  $K$ , коли ж значення наближається до одиниці, то збільшується статична помилка оцінки і час перехідного процесу.

Але такий спосіб оцінки має суттєві недоліки, що істотно обмежує спектр його застосування. Комплементарний фільтр є дужн вразливим до вимірювань акселерометра в області середніх частот, а саме до можливих збурень на цьому проміжку. Для кращого розуміння алгоритму функціонування фільтру, необхідно детальніше розглянути його принцип роботи.

Отже, з рисунку 2.28, на якому наведена структурна схема фільтру видно, що частоти зрізу фільтрів акселерометра ( $\Phi_{НЧ}$ ) і гіроскопа ( $\Phi_{ВЧ}$ ) пов'язані один з одним і параметром фільтру -  $K$ . Це значить, що чим нижче

частота, на якій збурення акселерометра стають істотними, тим нижче повинна бути частота зрізу ФНЧ, а отже, і частота ФВЧ [24]. Таким чином збільшується статична помилка разом з часом перехідного процесу, оскільки саме такі наслідки впливають після зниження частоти зрізу ФВЧ. Цю особливість ілюструє наступний чисельний експеримент. Для моделювання використовувалася структурна схема, представлена на рис. 29 [25].

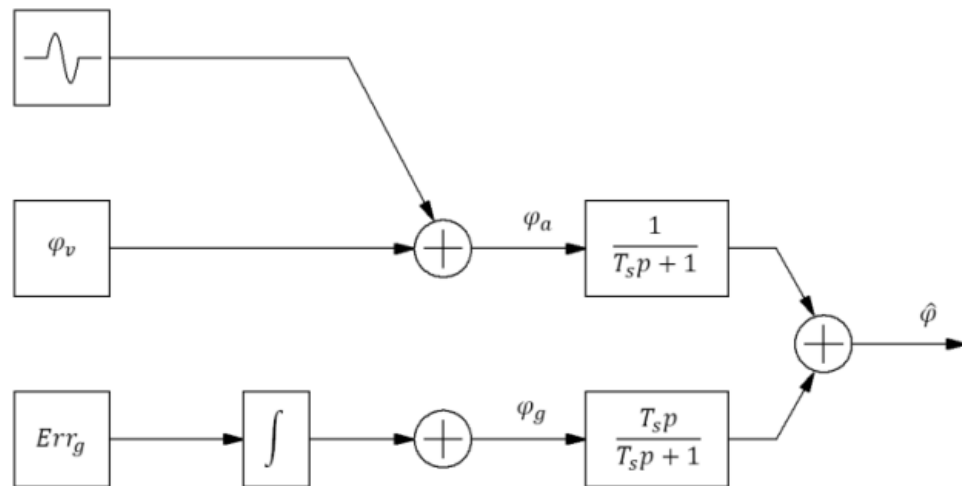


Рис. 2.29 Схема моделювання процесів комплементарного фільтру [25]

Для моделювання комплементарного фільтру була прийнята наступна кінематика поворотів, яка наведена на рисунку 2.30.

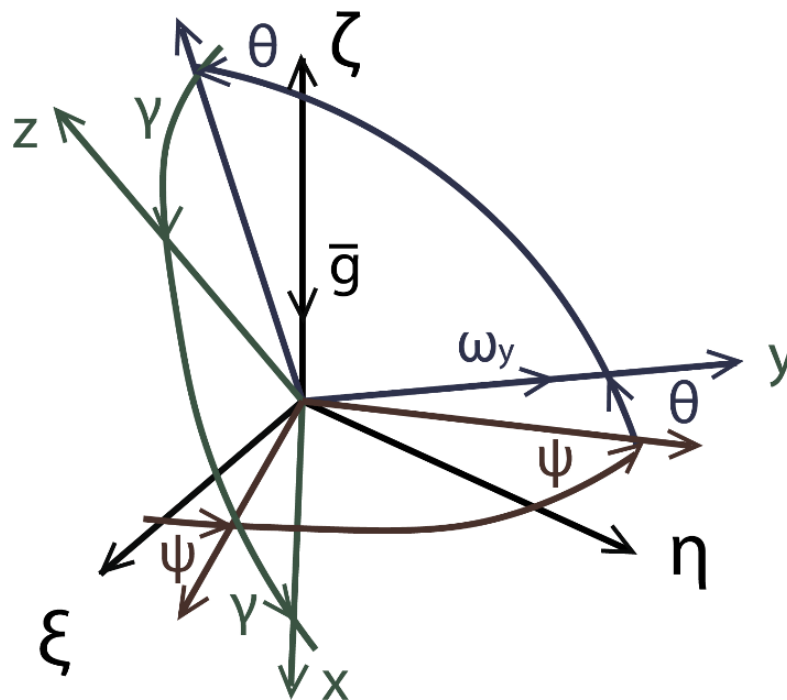


Рис. 2.30 Кінематика поворотів об'єкту

Отже, виходячи з кінематики приведеної на рисунку 2.30, можна отримати наступні рівняння роботи для акселерометру та гіроскопу:

$$\begin{cases} a_x = g \cos \theta \sin \gamma \\ a_y = g \cos \theta \\ a_z = g \cos \theta \cos \gamma \end{cases}$$

Необхідно визначити кути з акселерометру та гіроскопу. Для акселерометру це кут  $\gamma$ , який можна знайти з виразу:

$$\gamma = -\arctg \frac{a_x}{a_z}$$

$$\theta = \arcsin \frac{a_y}{g}$$

Далі необхідно розрахувати кут, що отриманий шляхом інтегрування показів гіроскопа:

$$\gamma = \gamma_0 + \int \omega_y dt$$

Де  $\gamma_0$  розраховується для певного початкового проміжку часу на якому об'єкт практично не рухається і не коливається.

$$\gamma_0 = -\arctg \frac{a_x}{a_z}$$

Для моделювання комплементарно фільтра було використано сигнали мікромеханічного акселерометру та гіроскопу, що були проаналізовані та отримані при виконанні науково - дослідної роботи з реальних приладів. Моделювання проводилося у програмному середовищі MATLAB, суть експерименту полягає в тому, щоб проаналізувати роботу комплементарного фільтра при різних значеннях кута сигналу акселерометра, визначати значення параметрів фільтра, які отримуються в наслідок зміни кута акселерометра, результати наведені у таблиці 2.3.

Таблиця 2.3. Значення параметрів комплементарного фільтра

Значення параметра	Частота дискретизації (рад/с)	Нормалізована частота (рад/с)	Крок дискретизації	Частота зрізу (рад/с)
K				
0.4431	0.04	0.2000	25	5

Нижче приведені графіки сигналу акселерометра при різних значеннях кута акселерометра, сигнал датчика кутової швидкості та отримані значення кута після фільтрації. Графіки необхідно побудувати для того, щоб побачити, як впливає зміна кута акселерометру на роботу комплементарного фільтра, а саме на визначення відхилення кута та при яких значеннях буде отримано найкращий результат.

На рисунку 2.31. зображений сигнал з датчика кутової швидкості (гіроскопа), який знаходиться на рівні  $0^\circ$ . Синім кольором позначено сигнал з гіроскопу по осі x, червоним – значення по осі y, а оранжевим – значення по осі z. А на рисунку 2.32. приведено цей же сигнал, тільки збільшено.

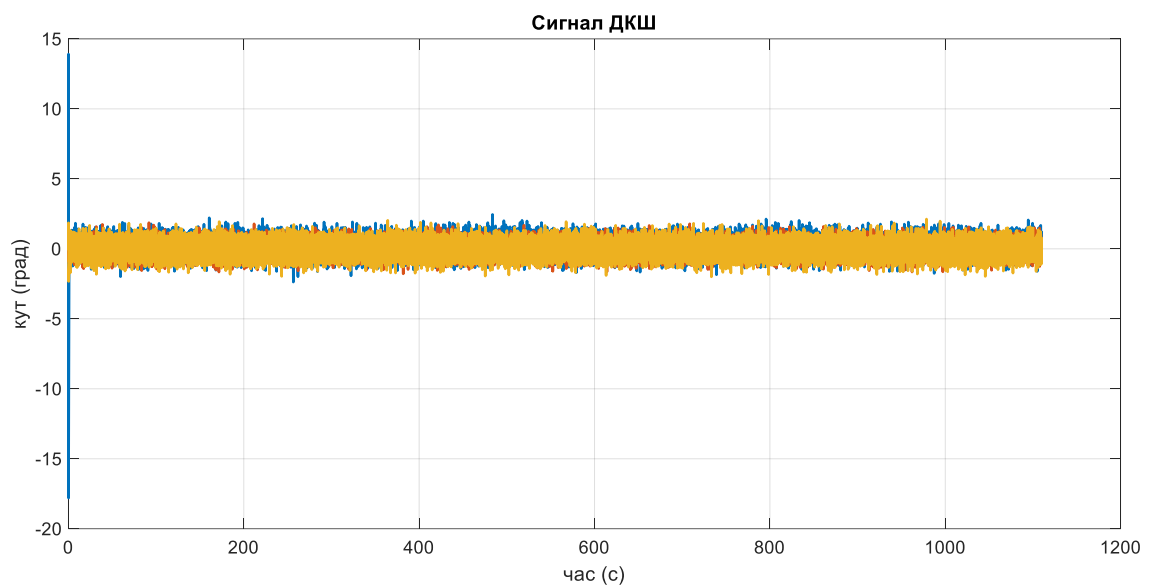


Рис. 2.31. Графік сигналу з датчика кутової швидкості

Синім кольором позначено сигнал з гіроскопу по осі x, червоним – значення по осі y, а оранжевим – значення по осі z

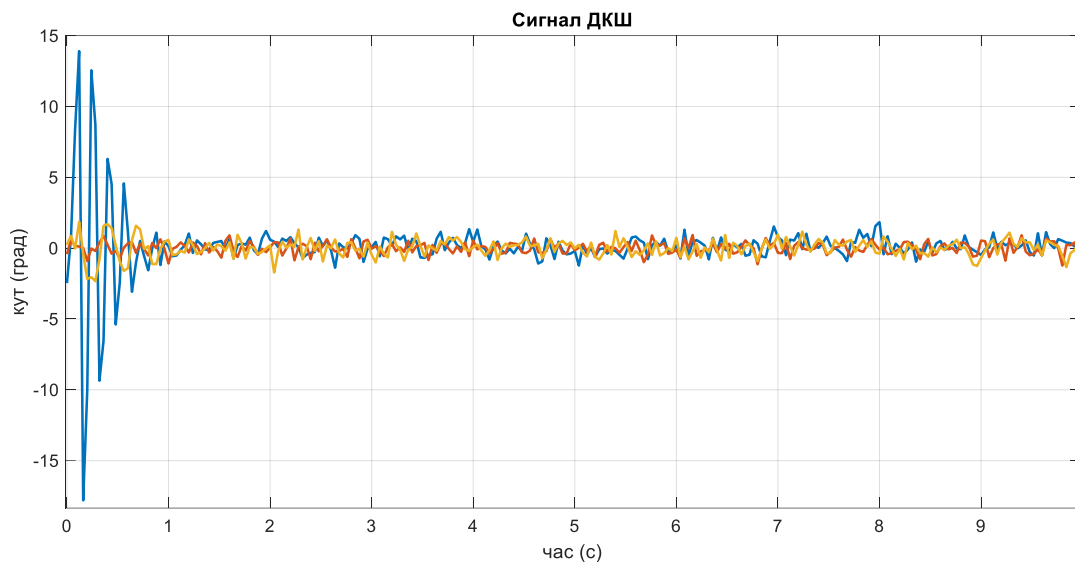


Рис. 2.32. Графік сигналу з датчика кутової швидкості (збільшено).

Синім кольором позначено сигнал з гіроскопу по осі x, червоним – значення по осі y, а оранжевим – значення по осі z

Із збільшеного фрагмента можна побачити час перехідного процесу, що він завершується на значенні одиниці.

Сигнал акселерометра відображений на рисунку 2.33.

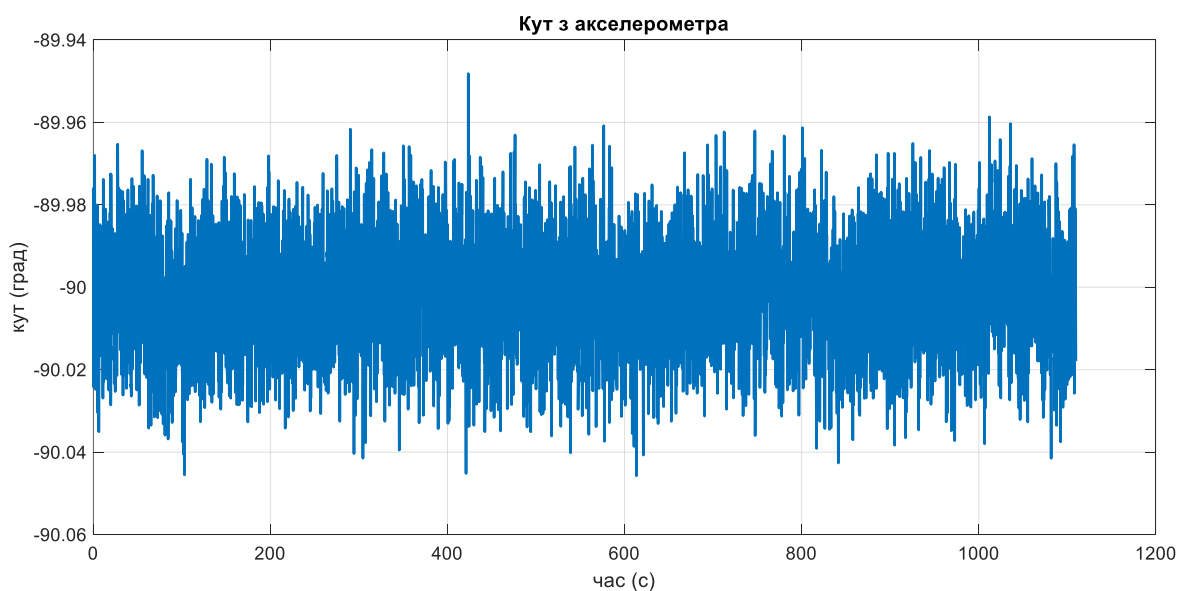


Рис. 2.33. Кут з акселерометру

З вище наведеного рисунку видно, що сигнал коливається на рівні  $-90^\circ$ , в діапазоні  $-90.06^\circ$  -  $-89.94^\circ$ .



На рисунку 2.34. приведений графік роботи комплементарного фільтра. На ньому відображається значення кута відхилення в залежності від часу.

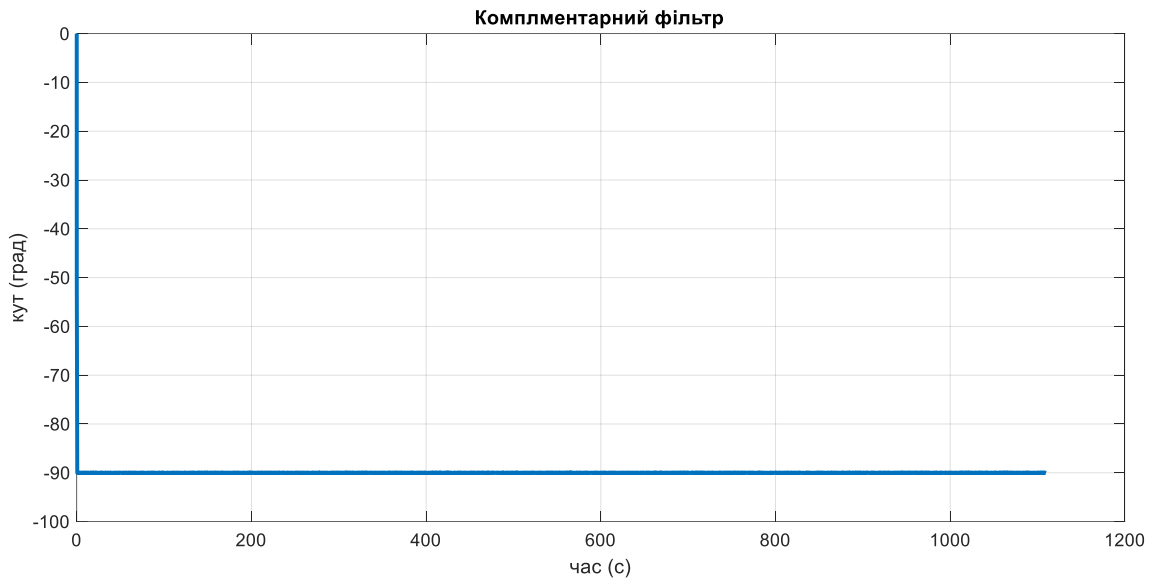


Рис. 2.34. Значення кута відхилення отриманого після фільтрації в залежності від часу

Оцінка кута відхилення, яку отримано на графіку 2.34 відповідає сигналу акселерометру на рисунку 2.33 та сигналу ДКШ на рисунку 2.31.

Наступним кроком буде зміна кута акселерометра з  $-90^\circ$  на  $-180^\circ$ . Сигнал з ДКШ залишиться незмінним (приведено на рис. 2.35, на рисунку 2.36. приведений фрагмент цього графіка), він залишиться на значенні кута  $0^\circ$ .

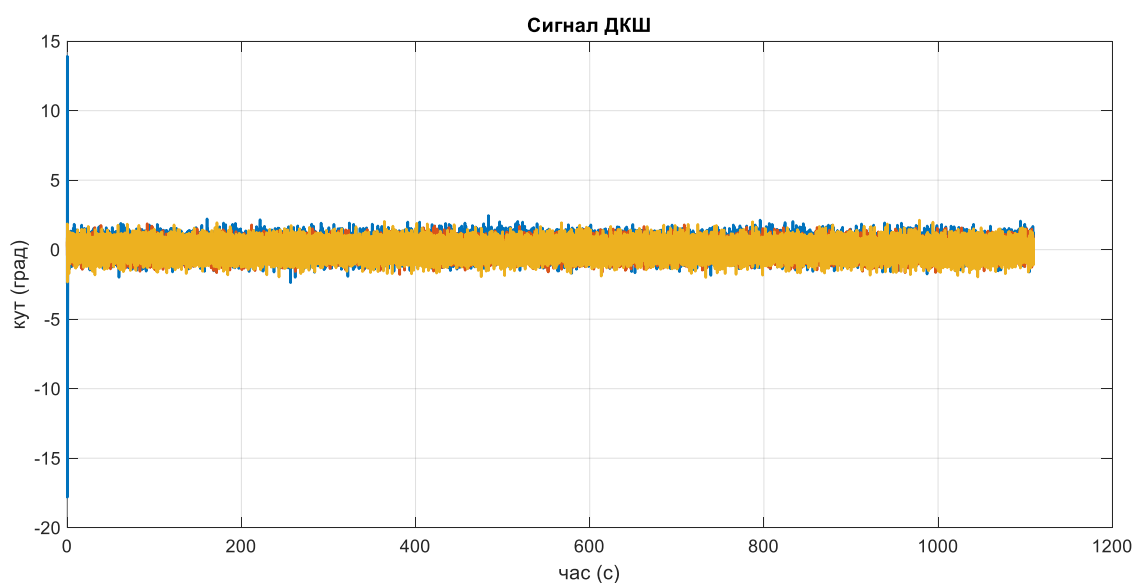


Рис. 2.35. Графік сигналу з датчика кутової швидкості

На графіку синім кольором позначено сигнал з гіроскопу по осі x, червоним – значення по осі y, а оранжевим – значення по осі z

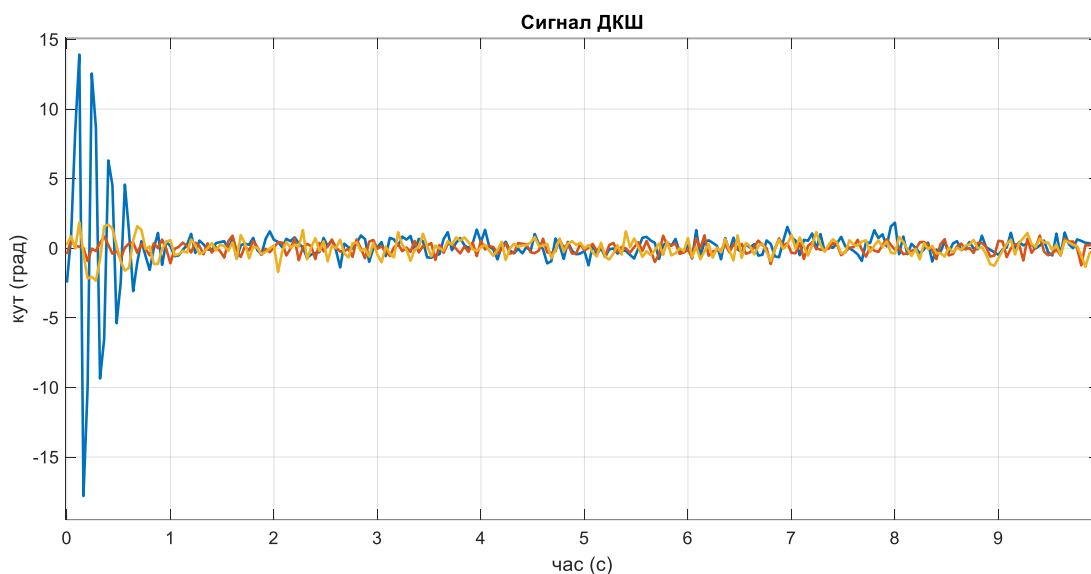


Рис. 2.36. Графік сигналу з датчика кутової швидкості (збільшено).

Синім кольором позначено сигнал з гіроскопу по осі x, червоним – значення по осі y, а оранжевим – значення по осі z

Сигнал акселерометра відображений на рисунку 2.37.

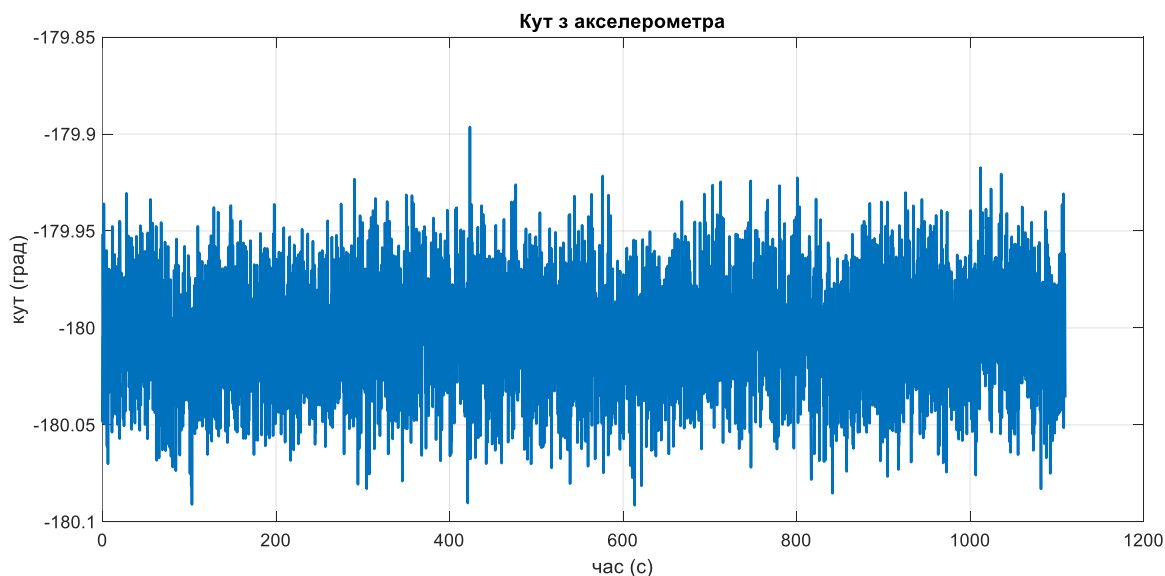


Рис. 2.37. Кут з акселерометру

З вище наведеного рисунку видно, що сигнал коливається на рівні - 180 °, в діапазоні – 179.90° - -180.1°.

На рисунку 2.38. приведений графік роботи комплементарного фільтра. На ньому відображається значення кута відхилення в залежності від часу.

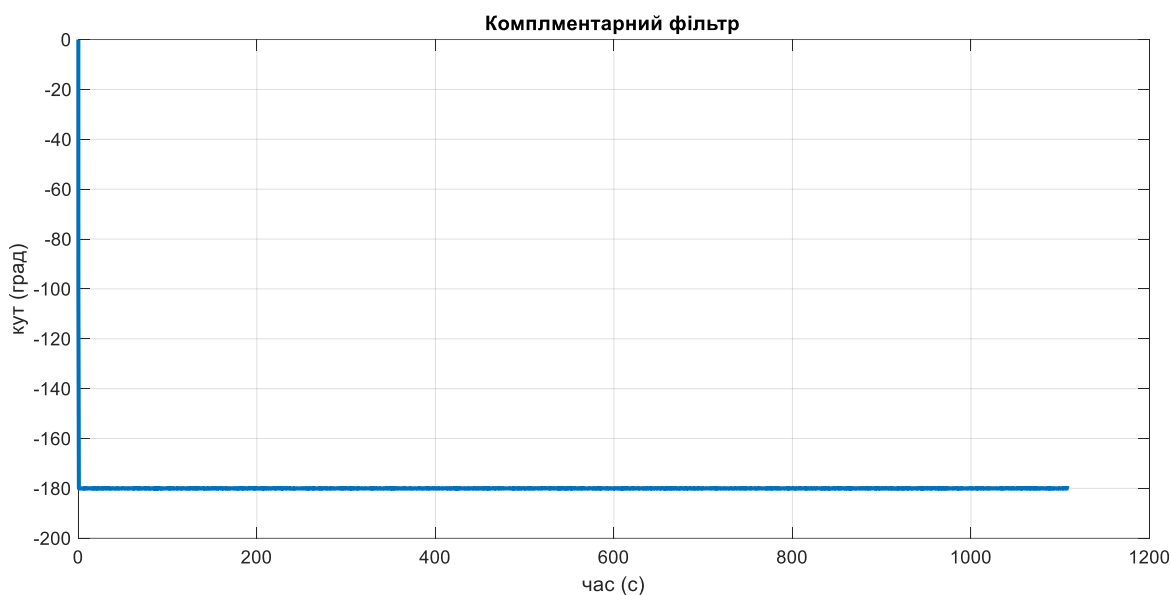


Рис. 2.38. Значення кута відхилення отриманого після фільтрації в залежності від часу

Оцінка кута відхилення, яку отримано на графіку 2.38 відповідає сигналу акселерометру на рисунку 2.37 та сигналу ДКШ на рисунку 2.34.

Далі необхідно змінити значення кута акселерометра з  $-180^{\circ}$  на  $-270^{\circ}$ . Сигнал з ДКШ залишається незмінним (на рис. 2.39, на рисунку 2.40. приведено фрагмент цього графіка), він залишиться під значенням кута  $0^{\circ}$ .

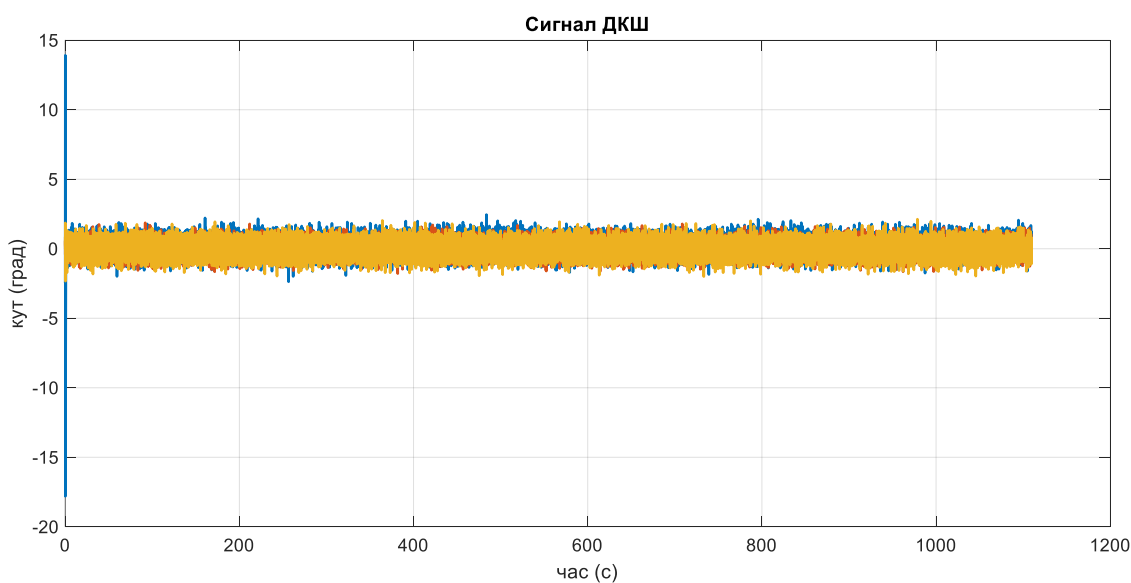


Рис. 2.39. Графік сигналу з датчика кутової швидкості

На графіку синім кольором позначено сигнал з гіроскопу по осі x, червоним – значення по осі y, а оранжевим – значення по осі z

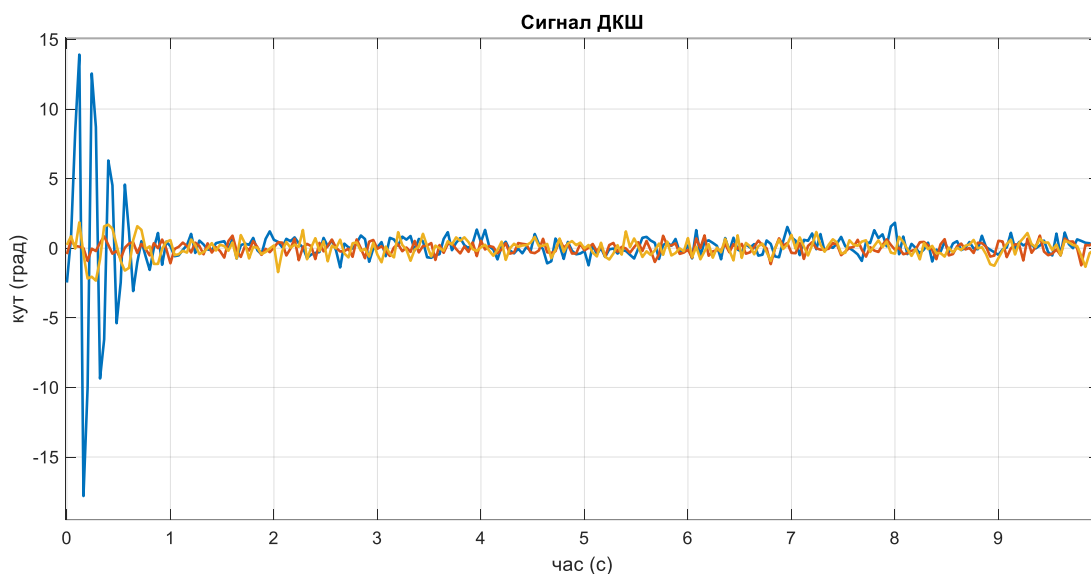


Рис. 2.40. Графік сигналу з датчика кутової швидкості (збільшено).

Синім кольором позначено сигнал з гіроскопу по осі x, червоним – значення по осі y, а оранжевим – значення по осі z

Сигнал акселерометра відображений на рисунку 2.41.

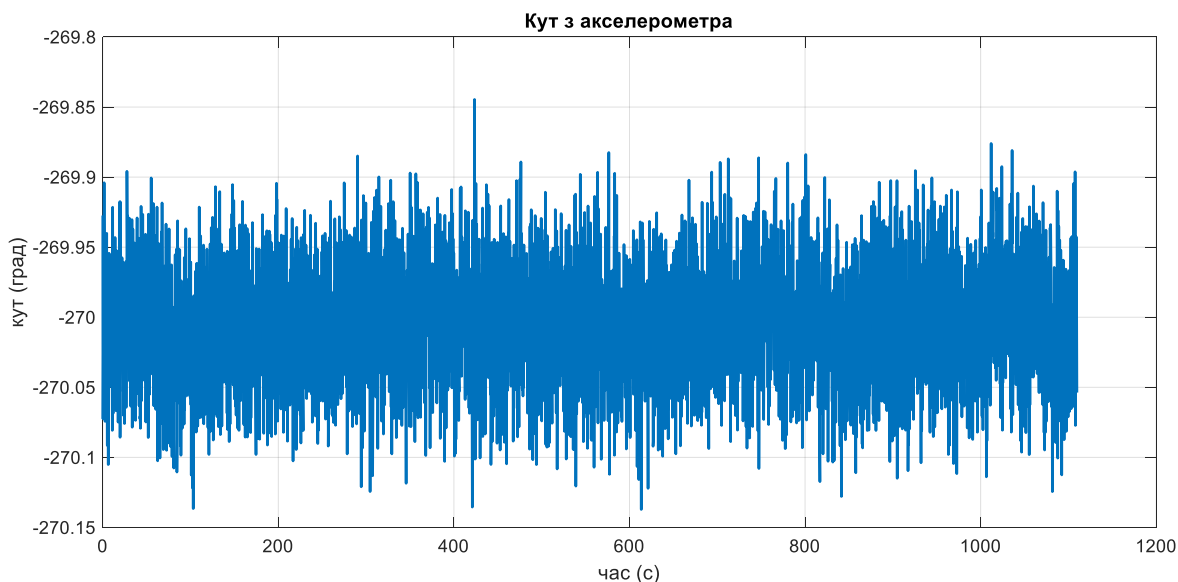


Рис. 2.41. Кут з акселерометру

З вище наведеного рисунку видно, що сигнал коливається на рівні - 270°, в діапазоні – 270.15° - -269.8°.

На рисунку 2.42. приведений графік роботи комплементарного фільтра. На ньому відображається значення кута відхилення в залежності від часу.

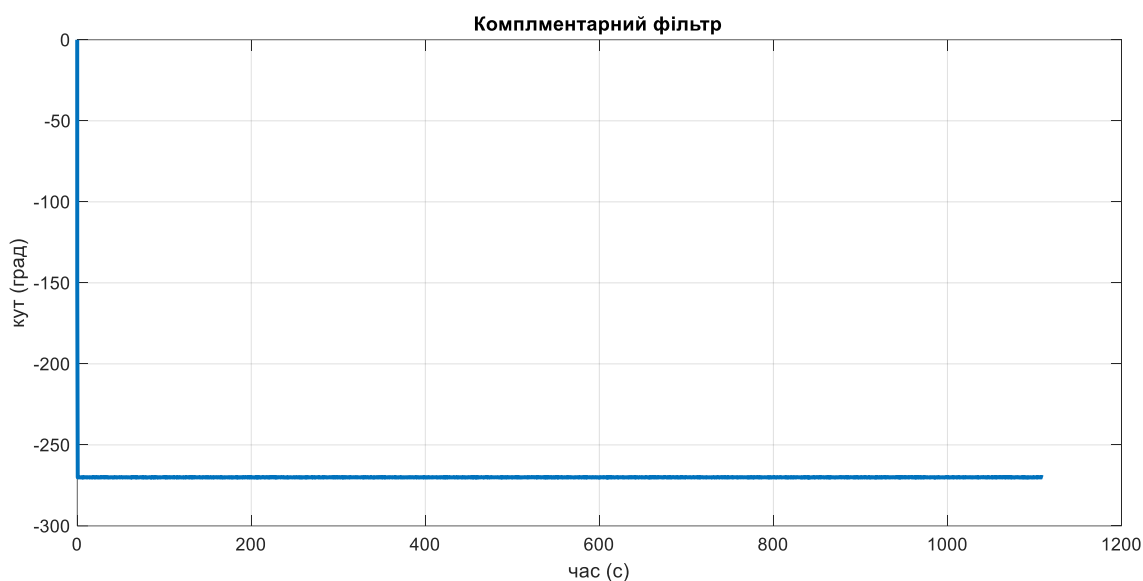


Рис. 2.42. Значення кута відхилення отриманого після фільтрації в залежності від часу

Оцінка кута відхилення, яку отримано на графіку 2.42 відповідає сигналу акселерометру на рисунку 2.41 та сигналу ДКШ на рисунку 2.39.

Останнім кроком буде зміна кута акселерометра з  $270^{\circ}$  на  $360^{\circ}$ . Сигнал з ДКШ залишається незмінним (приведений на рис. 2.43, на рисунку 2.44. приведений фрагмент цього графіка), він залишиться під значенням кута  $0^{\circ}$ .

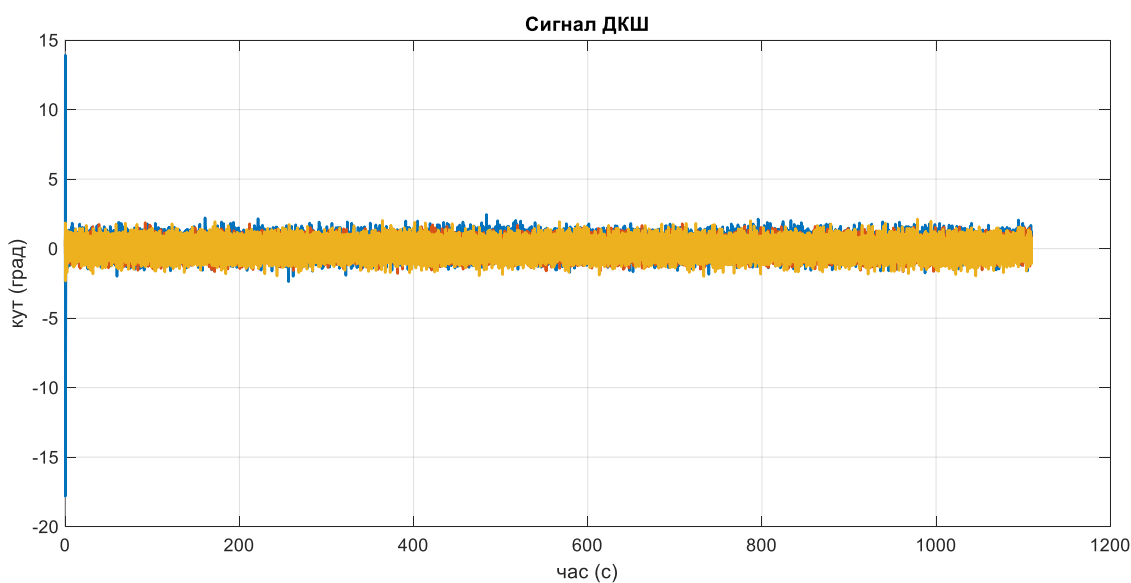


Рис. 2.43. Графік сигналу з датчика кутової швидкості

На графіку синім кольором позначено сигнал з гіроскопу по осі x, червоним – значення по осі y, а оранжевим – значення по осі z

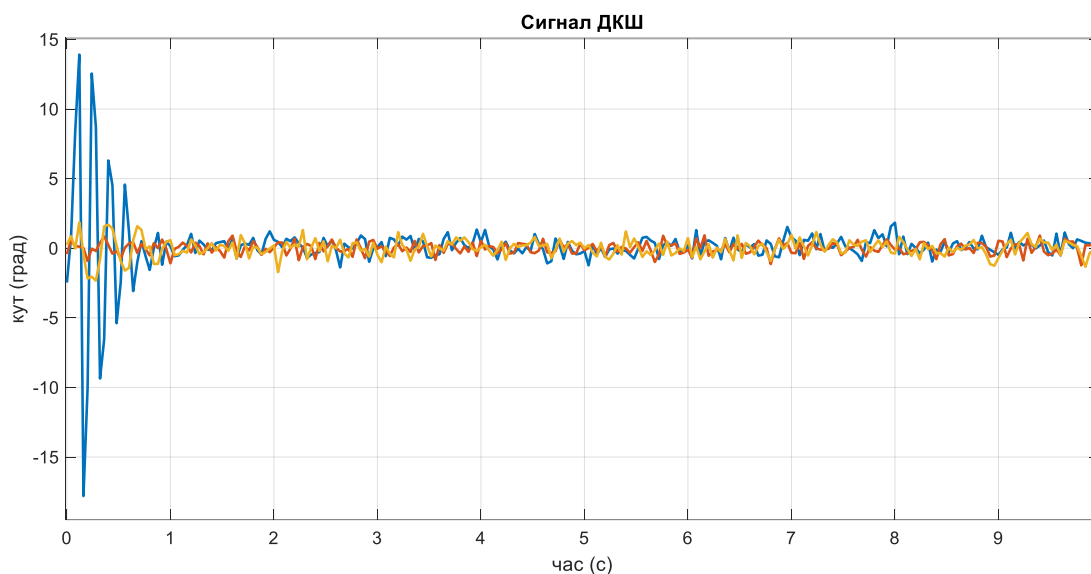


Рис. 2.44. Графік сигналу з датчика кутової швидкості (збільшено).

Синім кольором позначено сигнал з гіроскопу по осі x, червоним – значення по осі y, а оранжевим – значення по осі z

Сигнал акселерометра відображений на рисунку 2.45.

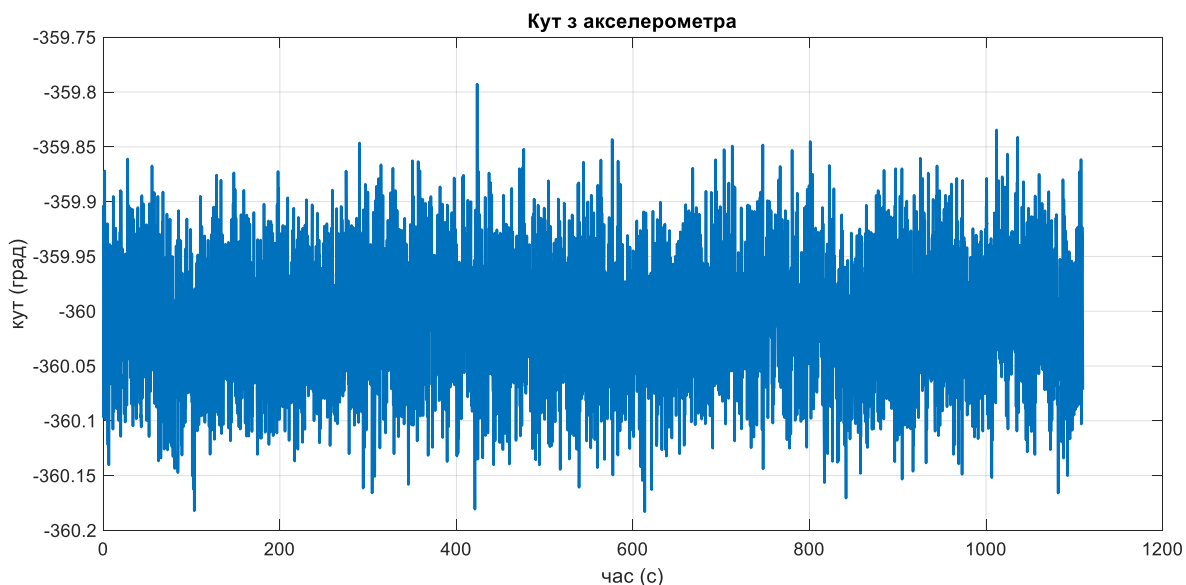


Рис. 2.45. Кут з акселерометру

З вище наведеного рисунку видно, що сигнал коливається на рівні - 360°, в діапазоні – 359.75° - -360.2°.

На рисунку 2.46. приведений графік роботи комплементарного фільтра. На ньому відображається значення кута відхилення в залежності від часу

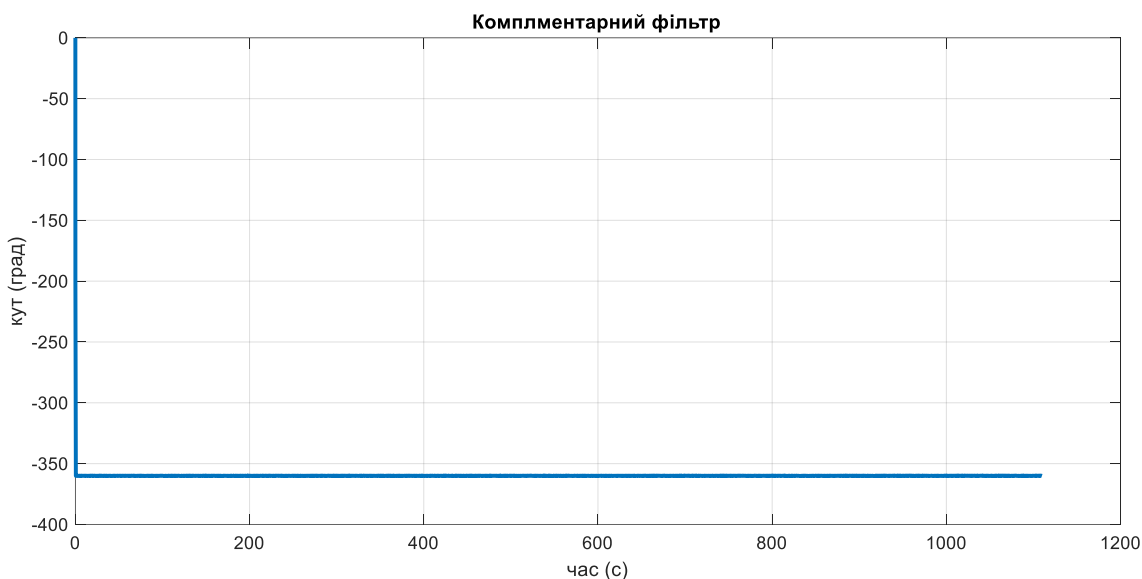


Рис. 2.46. Значення кута відхилення отриманого після фільтрації в залежності від часу

Оцінка кута відхилення, яку отримано на графіку 2.46 відповідає сигналу акселерометру на рисунку 2.45 та сигналу ДКШ на рисунку 2.43.

З проведеного дослідження можна зробити висновок, що змодельований комплементарний фільтр працює коректно. Оскільки при кожному значенні кута акселерометра: -90, -180, -270 та -360 було отримано відповідне відхилення кута на виході комплементарного фільтра. На підсумкових графіках (рис. 2.34, 2.38, 2.42 та 2.46) видно, що спочатку сигнал на значенні 0 опускається вниз до розрахованого значення кута відхилення, у кожному випадку це значення відповідає куту відхилення гіроскопа.

## 2.4 Висновки до розділу 2

У другому розділі були приведені математичні моделі для кожного з досліджуваних фільтрів: фільтра Калмана, фільтра «Ковзке середнє» та комплементарного фільтра. Також проведено їх моделювання у програмному середовищі MATLAB Simulink.

Дослідження проводилися з використанням сигналів мікромеханічного акселерометра та гіроскопа. Для аналізу роботи фільтра Калмана та «Ковзкого середнього» було використано сигнал акселерометру, що подавався на вхід фільтру, до нього додавався шум, та потім відфільтровувався. Даний експеримент проводився при різних частотах вхідного сигналу акселерометра: 0 рад/с, 5 рад/с, 10 рад/с, 20 рад/с, 40 рад/с.

Далі, для кожного з фільтрів було розраховане середньоквадратичне відхилення. Для фільтра Калмана СКВ становить: 0.1861, для «Ковзкого середнього» становить: 0.0188.

Для моделювання комплементарного фільтра було використано сигнали мікромеханічного акселерометра та гіроскопа разом, що були отримані внаслідок науково-дослідної роботи над реальним приладом. Був написаний програмний код, що відтворював роботу реального фільтра. Були розраховані параметри:  $K$  - коефіцієнт фільтру, частота зрізу, частота дискретизації, крок дискретизації та нормалізована частота. Дослідження роботи фільтра проводилося змінюючи кут акселерометру ( $-90^\circ$ ,  $-180^\circ$ ,  $-270^\circ$ ,  $-360^\circ$ ).

На виході комплементарного фільтру отримано значення кута відхилення. Для перевірки достовірності роботи фільтру необхідно було порівняти отримані результуючі графіки при кожному значенні кута з кутом самого акселерометра, що і було зроблено. Результати показали, що фільтр працює коректно.



## **РОЗДІЛ 3. РОЗРОБКА СТАРТАП ПРОЕКТУ**

### **«ПОРІВНЯЛЬНИЙ АНАЛІЗ ЕФЕКТИВНОСТІ ФІЛЬТРАЦІЇ ДЛЯ РІЗНИХ ЧАСТОТНИХ ДІАПАЗОНІВ ВХІДНИХ СИГНАЛІВ»**

#### **3.1.Опис ідеї проекту**

Невпинний та неминучий технічний прогрес впливає на всі сфери «технічного світу». Кожного дня модернізуються та з'являються нові прилади та системи, вдосконалюється їх структура, змінюється вид, розмір, призначення та багато іншого. Вже неможливо уявити собі життя без мікромеханіки, коли кожен ще досі звичний нам, масивний прилад, може бути реалізований в такому крихітному вигляді. Мікроменханічні акселерометри та гіроскопи присутні в майже всіх пристроях, з якими зіштовхується людина кожного дня.

На фоні такого зросту в застосуванні мікромеханічних приладів постає важлива задача - отримання максимально чистого вихідного сигналу. Але давно відомо, що мікромеханічні прилади мають такий недолік, як спотворювання сигналу за рахунок похибок. Основними причинами виникнення похибок вимірювань мікромеханічних приладів, являються температура, вібрація і перехресне прискорення. Зміна температура навколишнього середовища призводить до зміни значення діелектричної проникливості, зазору і лінійних розмірів маятника й приводу катушек магнітоелектричного датчика моменту

Для вирішення такої проблеми використовують фільтрацію. Існує безліч фільтрів, які дають більш - менш хороший результат, але цього замало, коли йде річ про серйозні наукові дослідження. Фільтрація сигналу декількома фільтрами та подальшим порівнянням отриманих даних - дасть набагато точніший результат, який можна буде опрацьовувати в індивідуально заданих цілях.

У таблиці 3.1 зображено зміст ідеї та можливі базові потенційні ринки,

в межах яких потрібно шукати групи потенційних клієнтів.

Таблиця 3.1. Опис ідеї стартап проекту

Зміст ідеї	Напрямки застосування	Вигоди для користувача
Підвищення якості фільтрації сигналів з мікромеханічних приладів	1. Приладобудування	Отримання очищеного від шуму вихідного сигналу
	2. Робототехніка	Підвищення точності роботи роботів за рахунок очищення сигналів
	3. Електроніка	Вдосконалений методи фільтрації сигналів
	4. Медицина	Отримання більш точного вихідного сигналу

Висновок: в таблиці приведені основні напрямки застосувань запропонованого методу фільтрації сигналів. Цими споживачами є приладобудівна сфера, робототехніка, електричні пристрої та медичні установи.

Далі проводимо аналіз потенційних техніко-економічних переваг ідеї порівняно із пропозиціями конкурентів (табл. 3.2)

Таблиця 3.2. Визначення сильних, слабких та нейтральних характеристик ідеї проекту

№ п/п	Техніко-економічні характеристики ідеї	(потенційні) товари/концепції конкурентів				W (слабка сторона)	N (нейтральна сторона)	S (сильна сторона)
		Мій проект	Конкурент1	Конкурент2	Конкурент3			
1	Низькі витрати	30	50	35	40			+
2	Габаритність	-	-	-	-		+	
3	Технологічність	84%	65%	80%	74%			+
4	Точність	висока	висока	середня	середня			
5	Швидкість проведення результату	висока	низька	висока	середня			
6	Простота	70%	60%	64%	53%			

Висновки: З таблиці видно, що головною перевагою проекту для користувачів являється збільшення точності вимірювання та зменшення часу на проведення аналізу. Також дуже важливим, є такі техніко-економічні характеристики, як ціна та простота алгоритму. Досить слабку позицію займає простота проекту, оскільки для виконання фільтрації одразу декількома методами потребує більш складного алгоритму.

Задля повного розуміння структури стартапу, необхідно побудувати його бізнес-модель, яку приведено на таблиці.3.3.

Таблиця 3.3. Бізнес-модель стартапу.

<p>8. Ключові партнери :</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- , займаються обробкою сигналів;</li> <li>- брендингові компанії;</li> <li>- компанії, що займаються дослідженням сигналів;</li> </ul>	<p>7. Ключові види діяльності:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- розробка продукту та його впровадження;</li> <li>- проведення рекламної кампанії.</li> </ul>	<p>2. Ціннісна пропозиція:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- достовірні результати;</li> <li>- швидкий та точний метод фільтрації;</li> <li>- простота у використанні</li> </ul> <p>;</p>	<p>4. Взаємовідносини з клієнтами:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- наявність цілодобової технічної підтримки;</li> <li>- не дороге обслуговування продукції.</li> </ul>	<p>1. Споживчі сегменти:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>-компанії, що займаються аналізом сигналів;</li> <li>- звичайні користувачі;</li> <li>- науково-дослідницькі центри;</li> <li>приладобудівні підприємства;</li> </ul>
	<p>6. Ключові ресурси:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- якісне ПО;</li> <li>- капітал;</li> <li>- освічені спеціалісти;</li> <li>- відповідне обладнання;</li> </ul>		<p>3. Канали збуту:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- звичайні користувачі;</li> <li>- медичні заклади;</li> <li>- спорт-комплекси;</li> <li>- фітнес-центри;</li> <li>- військові установи.</li> </ul>	

Продовження таблиці 3.3.

<p>9. Структура виплат:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- значну частину витрат займе розробка програмної моделі;</li> <li>- заробітна плата працівникам;</li> <li>-оплата послуг брендингових компаній;</li> <li>-патентування;</li> </ul>	<p>5. Потоки доходів:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- продаж продукту.</li> </ul>
--	--

В вище наведеній таблиці було визначено основні структурні елементи бізнес-моделі, а саме: споживчі сегменти, ціннісна пропозиція, канали збуту, взаємовідносини з клієнтами, потоки доходів, ключові ресурси, ключові види діяльності, ключові партнери та структура виплат.

У наведеній нижче таблиці 3.4 відображено проведення аудиту технології, за допомогою якої можна реалізувати ідею проекту.

Таблиця 3.4. Технологічна здійсненність ідеї проекту

№ п/п	Ідея проекту	Технології реалізації	Наявність технологій	Доступність технологій
1.	Розробка математичної моделі	Розробка нових математичних моделей фільтрів	Наявна	Доступна
2.	Підвищення точності методу	Побудова нових математичних моделей фільтрів	Наявна	Доступна
3.	Зменшення складових шуму сигналу	Фільтрація сигналу трьома фільтрами	Наявна	Доступна

Продовження таблиці 3.4.

4.	Інтеграція алгоритму в існуючі прилади	Використання передових технологій виробництва приладів	Необхідно розробити	Не доступна
5.	Доступність методики	Методика розробленої програмної моделі доступна	Наявно	Доступно
6.	Простота у використанні	Детально продуманий інтерфейс	Наявно	Доступно
7.	Обробка результатів	Якісно працююча модель	Наявно	Доступно
8.	Представлення результатів	Код програмної моделі	Наявно	Доступно
Обрана технологія реалізації ідеї проекту: Побудова нових математичних моделей фільтрів у програмному середовищі MatLab та Simulink. MatLab – це пакет прикладних програм для вирішення задач технічних розрахунків.				

Висновки: Проаналізувавши вищенаведену таблицю, можна зробити висновки, що даний проект можна реалізувати впровадивши новий алгоритмів фільтрації, моделювання алгоритму, що підійде для різних напрямків застосування) компенсування похибок та використання нових технологій виробництва приладів.

### 3.2. Аналіз ринкових можливостей запуску стартап-проекту

Визначення можливостей та ринкових загроз, які можна використати під час ринкового впровадження проекту, які можуть бути корисними або навпаки перешкоджати реалізації проекту. Така характеристика дозволяє спланувати напрями розвитку проекту відштовхуючись від сьогоденного та майбутнього стану ринкового середовища, потреб потенційних клієнтів та пропозицій конкурентів.

У таблиці 3.5. проведено аналіз попиту: наявність, обсяг та динаміка розвитку ринку.

Таблиця 3.5. Попередня характеристика потенційного ринку стартап-проекту

№ п/п	Показники стану ринку (найменування)	Характеристика
1	Кількість головних гравців, од	4
2	Загальний обсяг продаж, грн/ум.од	45000
3	Динаміка ринку (якісна оцінка)	Зростає
4	Наявність обмежень для входу (вказати характер обмежень)	Сертифікація
5	Специфічні вимоги до стандартизації та сертифікації	Відсутні
6	Середня норма рентабельності в галузі (або по ринку), %	72%

Висновки: Отже головними перевагами показників стану ринку є те, що: попит даного продукту стрімко зростає, в майбутньому це спровокує підвищення продажів. Не обійшлося й без загрожуючих факторів для виходу на ринок: високе ціноутворення, рівень освіченості у спеціалістів, що відповідають за правильне введення даних, розробку та реалізацію даного алгоритму. Щодо рентабельності, то проект являється рентабельним для виходу на ринок, оскільки середня норма рентабельності в галузі є досить високою— 72%.

В таблиці 3.6. наведено визначені потенційні групи клієнтів та їх характеристики. Також сформовано вимоги до товару кожної групи.

Таблиця 3.6. Характеристика потенційних клієнтів стартап-проекту

№ п/п	Потреба, що формує ринок	Цільова аудиторія (цільові сегменти ринку)	Відмінності у поведінці різних потенційних цільових груп клієнтів	Вимоги споживачів до товару
1	Розробка нових програмних моделей фільтрів	Інженерні компанії пов'язані з обробкою сигналів	Перевага надається новим програмним моделям високої технологічності	Низька ціна, висока якість та висока точність результатів
2	Адаптування програмної моделі під різні прилади	Клієнти, що виробляють або використовують різні прилади	Перевага надається універсальності програмної моделі	Низька ціна, висока якість та висока точність результатів

Висновок: з огляду таблиці видно, що найбільш важливими потребами, які формують ринок, стали: розробка нових алгоритмів програми, а також адаптування програми до різних програмних забезпечень. При цьому потенційні клієнти потребують нижчої ціни та високої точності, а також достатньої точності при дії збурень.

Для отримання переваг на ринку, необхідно створити або використовувати сприятливі обставини ринку, що носять назву - «ринкові можливості». До таких можливостей відносять наступні: погіршення становища конкурентів на ринку, різке зростання попиту, зростання рівня доходів населення, поява нових технологій виробництва продукції та ін.

У таблиці 3.7. проведено аналіз факторів ринкового середовища, які сприяють впровадженню проекту на ринок, а фактори, що перешкоджають впровадженню наведені у таблиці табл. 3.8. Результати занесені до таблиці в порядку зменшення значущості.

Таблиця 3.7. Фактори можливостей

№ п/п	Фактор	Зміст можливості	Можлива реакція компанії
1.	Збільшення попиту на продукт	Різке збільшення зацікавленості до продукту	Підвищення продажів
2	Отримання капіталовкладень	Завдяки додатковим коштам можливо залучити нових працівників, що можуть прискорити розробку	Розробка життєздатного продукту, що задовольнить потребам користувача
3.	Необхідність до інтеграції	Можливість розширення програмної моделі	Компанія може створити додаткові можливості програмної моделі
4.	Освоєння нових сфер	Програмний продукт використовується у сферах, що не розглядалися раніше	Створення спеціальної робочої команди для адаптації моделі під запрошені умови
5.	Співпраця з конкурентами	Компанія - конкурент запропонував співпрацю	Оцінка можливих ризиків

Висновки: Дані програмні продукти застосовуються в сучасних прогресивних сферах, тому попит на них стабільно зростає, що призводить до збільшення ринку клієнтів. А збільшення попиту на товар спровокує різке збільшення об'єму виробництва та продажів, що відкриє можливості до вдосконалення продукту. Дані цілі можна досягти впровадивши рекламу та освоєнням нових сфер застосування.

Таблиця 3.8. Фактори загроз

№ п/п	Фактор	Зміст загрози	Можлива реакція компанії
1.	Конкуренція	Менша ціна у конкурента при однаковій якості продукту	Відтік клієнтів



Продовження таблиці 3.8.

2.	Економічний	Економічний стан країни-виробника	Відмова від продукту
3.	Якість	Не належна якість зібраного приладу	Відмова від продукту
4.	Некомпетентність Робітників	Неточність інженерних Розрахунків	Відмова від продукту
5.	Функціонування	Невідповідність очікуванням користувача	Розширення функціоналу
6.	Наявність конфлікту	Проблема конкуренції із подібними фірмами	Пошук нових шляхів розповсюдження товару

Висновки: Головним фактором загроз є конкуренція. На ринку вже існують товари із репутацією, яка формувалася не один рік. Також вони мають визначені об'єми виробництва. Конкуренти можуть демпінгувати ціни, щоб отримати нових клієнтів свого продукту.

У таблиці 3.9 наведено аналіз пропозиції за визначенням загальних рис ринкової конкуренції.

Таблиця 3.9. Ступеневий аналіз конкуренції на ринку

близькості конкурентного середовища	В чому проявляється дана характеристика	Вплив на діяльність підприємства (можливі дії компанії, щоб бути конкурентоспроможною)
тип конкуренції - чиста конкуренція	Мала кількість постачальників даного продукту	Відповідність ринку прогнозування випереджати існуючі технології
2. За рівнем конкурентної боротьби – міжнародний	ність замовників із інших держав	Міжнародний ринок
3. За галузевою ознакою – міжгалузева	стання у різних галузях	Робота менеджменту і реклами по залученню клієнтів

Продовження таблиці 3.9.

4. Конкуренція за видами товарів:- товарно-видова	що пропонується є одного виду	Клієнтко-орієнтована стратегія розвитку Адаптивність до умов ринку
5. За характером конкурентних переваг - Цінова	Вартість залежить від комплектації та функціоналу	Пошук вигідного постачальника компонентів
6. За інтенсивністю - марочна	Вибір постачальника по бренду	Розкрутка бренду, його рекламування

Висновки: на ринку присутня велика конкуренція, оскільки окремі гравці не можуть впливати на ціноутворення продукту. Рівень конкурентної боротьби – міжнародний із міжгалузевою ознакою. Конкуренція за видами товарів – видова.

Необхідно провести більш детальний аналіз умов конкуренції, який наведений у таблиці. 3.10 та перерахувати фактори конкурентоспроможності у таблиці .3.11.

Таблиця 3.10. Аналіз конкуренції в галузі за М. Портером

Складові аналізу	Прямі конкуренти в галузі	Потенційні конкуренти	Постачальники	Клієнти	Товари-замінники
	Zetlab BaseGroup Labs NDT	DewesoftPfinс Captocorp	Amphenol RS Components STMicroelectronics	Будівельні компанії Промислові компанії	Інші програмні моделі фільтрації
Висновки:	Конкуренція є відносно не великою	Вихід на ринок відносно простий. Наявні потенційні конкуренти.	Постачальники мають не диктувати ціни на ринку	Клієнти не диктують умови через велику зацікавленість до товару	Обмежень практично немає

Висновки: з таблиці видно, що ринок не є насиченим, але конкуренція досить висока тому, що компанії - конкуренти мають вже міцну репутацію. Перешкодою являється необхідний високий рівень капіталовкладень

Таблиця 3.11. Обґрунтування факторів конкурентоспроможності

№ п/п	Фактор конкурентоспроможності	Обґрунтування (наведення чинників, що роблять фактор для порівняння конкурент-них проектів значущим)
1	Надійність	Використання алгоритму з підвищеним захистом даних та високою точністю
2	Обслуговування	Наявність технічної підтримки протягом всього часу користування продуктом
3	Адаптивність	Гнучкість моделі, можливість налаштування під конкретні задачі
4	Готова програмна модель	Зменшення часу очікування для замовника

Висновки: Підвищення надійності системи досягається використанням алгоритму з високою захищеністю та точністю. Збільшення попиту на модель призведе до більшої зацікавленості у ній відповідно. Адаптивність та її завершеність відкривають широкий спектр використання приладу у поєднанні із іншими системами та зменшують час очікування продукту для замовника.

За факторами конкурентоспроможності наведеними у таблиці 3.10 визначено фактори проведено аналіз сильних та слабких сторін стартап-проекту, що приведені у таблиці 3.12.

Таблиця 3.12. Порівняльний аналіз сильних та слабких сторін

№п/ п	Фактор конкурентоспроможності	Бали 1-20	Рейтинг товарів-конкурентів						
			-3	-2	-1	0	+1	+2	+3
1	Надійність	20							+3
2	Обслуговування	18			-1			+2	
3	Адаптивність	19				0			
4.	Готова програмна модель	16		-2					

Висновки: запропонована програмна модель має кращий рейтинг відносно прямих конкурентів. З даної таблиці видно, за рахунок яких особливостей розроблена програмна модель відрізняються від продуктів конкурентів. Детальний аналіз відображає сильні сторони моделі, а саме: надійність та можливість до адаптації роботи з іншими системами.

Завершальним пунктом ринкового аналізу можливостей впровадження

проекту є складання SWOT- аналізу (матриці аналізу сильних (Strength) та слабких (Weak) сторін, загроз (Troubles) та можливостей (Opportunities), що приведені у таблиці 3.13. відштовхуючись від приведених ринкових загроз та можливостей, та сильних і слабких сторін у таблиці 3.11.

Таблиця 3.13. SWOT- аналіз стартап-проекту

Сильні сторони: 1. простота використання; 2. адаптивність; 3. стабільна робота; 4. універсальність; 5. технічна підтримка; 6. можливість до комплексування	Слабкі сторони: -репутація підприємства; капіталовкладення; ть за послуги
Можливості: 1. вихід на міжнародний ринок; 2. збільшення попиту; 3. інтеграція; 4. освоєння нових сфер; 5. підлаштування під замовника; 6. співпраця з конкурентами	Загрози: 1. нові подібні розробки; 2. освіченість спеціалістів; 3. нестабільність ринку та повільність розрахунків складних процесів..

На основі SWOT-аналізу необхідно визначити альтернативну ринкову поведінку (перелік заходів) для інтеграції стартап-проекту у ринок та орієнтовний оптимальний час їх ринкової реалізації опираючись на дані потенційних проектів - конкурентів, що можуть бути виведені на ринок. Визначені альтернативи формуються відповідно до строків та ймовірності отримання ресурсів, дані наведені у таблиці 3.14.

Таблиця 3.14. Альтернативи ринкового впровадження стартап-проекту

№ п/п	Альтернатива (орієнтовний комплекс заходів) ринкової поведінки	Ймовірність отримання ресурсів	Строки реалізації
1	Індивідуалізм (максимізація власного виграшу)	Середня	7міс

Продовження таблиці 3.14.

2	Кооперація (максимізація спільного виграшу)	Висока	10міс
3	Суперництво	Нижче середнього	12міс.
4	Спроба впровадження в інші галузі	Ймовірне	8 місяці
5	Залучення інвесторів	Ймовірне	14 місяці

Висновки: в результаті аналізу даних таблиці було обрано кооперацію, як альтернативну ринкову поведінку через те, що за відносно короткий час можна отримати ресурсів.

### 3.3. Розроблення ринкової стратегії та маркетингової програми стартап - проекту

Розроблення ринкової стратегії першим кроком передбачає визначення стратегії охоплення ринку: опис цільових груп потенційних споживачів, що наведені в таблиці 3.15..

Таблиця 3.15. Вибір цільових груп потенційних споживачів

№ п/п	Опис профілю цільової групи потенційних клієнтів	Готовність споживачів сприйняти продукт	Орієнтовни й попит в межах цільової групи (сегмент)	Інтенсивність конкуренції в сегменті	Простота входу у сегмент
1.	Промислові компанії	Готові, за умов наявності відповідних документів	Високий 85-90%	Низька	+
2.	Дослідницькі центри	Готові, за умов наявності відповідних документів	Високий 85-90%	Низька	-

Продовження таблиці 3.15.

3.	Приладобудування	Готові, за умов наявності відповідних документів	Високий 85-90%	Середня	+
4.	Робототехніка	Готові, за умов наявності відповідних документів	Високий 85-90%	Низька	+
5.	Військові установи	Готові, за умов наявності відповідних документів	Низький Середній 20-40%		
6.	Інші установи	Готові, за умов наявності відповідних документів	Високий 85-90%		
7.	Звичайні користувачі	Готові	Середній 75-85%		
Які цільові групи обрано: під час вибору цільової групи до уваги бралось в першу чергу готовність споживача сприйняти продукт. Приладобудівні компанії потребують більш популярних роз'яснень щодо можливостей використання таких систем. У випадку успішної реклами є можливість зайняти нішу.					

Висновки: за результатами аналізу потенційних груп споживачів було обрано ті групи, у яких найбільший дефіцит методів вирішення проблеми, на розв'язання якої спрямований цей проект та ті групи які можуть мати найбільший вплив на характеристики цієї проблеми – зміст, структуру, масштабність, характер, соціальну значимість та ін.

Необхідно сформулювати базову стратегію розвитку для роботи в обраних сегментах ринку, результат представлений у таблиці 3.16.

Таблиця 3.16. Визначення базової стратегії розвитку

№ п/п	Обрана альтернатива розвитку проекту	Стратегія охоплення ринку	Ключові конкурентноспроможні позиції відповідно до обраної альтернативи	Базова стратегія розвитку*
	Індивідуалізм	Стратегія недиференційованого маркетингу	Адаптація до вимог ринку; Використання новацій; Генерування ноу-хау; Участь у технічних та наукових виставках; Адаптивність; Зручність; Простота у використанні; Достовірність результатів.	Стратегія спеціалізації

Висновки: залежно від ситуації, компанія може обирати для себе різні «стратегічні набори», які сприяють ефективному реагуванню на зміни у навколишньому середовищі. Обрана стратегія розвитку для проекту, це стратегія спеціалізації, викликана існуванням на ринку сильніших гравців. На першій порі існування проекту краще обрати стратегію спеціалізації та зайняти стабільну нішу на ринку.

Далі потрібно обрати стратегію конкурентної поведінки, що наведена у таблиці 3.17.

Таблиця 3.17. Визначення базової стратегії конкурентної поведінки

№ п/п	Чи є проект «першопрохідцем» на ринку?	Чи буде компанія шукати нових споживачів, або забирати існуючих у конкурентів?	Чи буде компанія копіювати основні характеристики товару конкурента, і які?	Стратегія конкурентної поведінки*
1	Не є першопрохідцем	Буде шукати нових споживачів та з часом приваблювати клієнтів конкурентів	Компанія буде вдосконалювати існуючі зразки	Стратегія виклику лідера

Висновок: проект не є першопрохідцем, але має вагомі переваги над своїм прямим конкурентом, в такому випадку доцільно обрати стратегію виклику лідеру. Це є доцільним рішенням на фоні використання інноваційних методів для підвищення точності алгоритмічного забезпечення і вдосконалення продукту за рахунок нових технологій з метою ускладнити задачі конкурентів.

Відштовхуючись від вимог споживачів з сегментів, що були обрані до постачальника та до продукту, а також в залежності від обраної базової стратегії розвитку та стратегії конкурентної поведінки було розроблено стратегію позиціонування (та занесено до таблиці 3.18), яка складається з формування ринкової позиції.

Таблиця 3.18. Визначення стратегії позиціонування

№ п/п	Вимоги до товару цільової аудиторії	Базова стратегія розвитку	Ключові конкурентоспроможні позиції власного стартап-проекту	Вибір асоціацій, які мають сформувати комплексну позицію власного проекту (три ключових)
1	Захищеність та точність роботи	Стратегія спеціалізації	Дослідження та розвиток	Захищена та надійна
2	Висока стабільність результатів	Стратегія спеціалізації	Якість	Стабільна робота
3	Можливість роботи з іншими системами	Стратегія спеціалізації	Обслуговування	Здатність до роботи з іншими системами

Висновки: проект має асоціюватись у клієнта з такими позиціями, як здатність до роботи з іншими системами, стабільність роботи без збоїв, захищеність та надійність результатів.



### 3.4. Розроблення маркетингової програми стартап-проекту

Для розробки маркетингової концепції товару, необхідно підсумувати результати попереднього аналізу конкурентоспроможності товару та навести їх у таблиці 3.19.

Таблиця 3.19. Визначення ключових переваг концепції потенційного товару

№ п/п	Потреба	Вигода, яку пропонує товар	Ключові переваги перед конкурентами (існуючі або такі, що потрібно створити)
1	Необхідність якісної фільтрації сигналу мікрофона приладів	Надійна та не дорога система, що здатна відфільтровувати шум	Ціна, точність, захищеність, надійність, простота, технічна підтримка.

Висновки: ключовими вигідними сторонами товару є прийнятна ціна, точність отриманих даних, захищеність від можливих збурень, надійність, простота використання, технічна підтримка протягом всього часу користування програмною моделлю, що дає перевагу даній програмі над конкурентами. В майбутньому, використання нових алгоритмів програмної моделі дозволить вивести її на високий рівень.

Далі розробляється трирівнева маркетингова модель продукту уточнюється його ідея, його фізичні складові та особливості процесу його функціонування (таблиця 3.20).

Таблиця 3.20. Опис трьох рівнів моделі товару

Рівні товару	Сутність та складові
I. Товар за задумом	Програмна модель дає можливість фільтрувати сигнал з високою точністю за рахунок того, що використовуються одночасно три передових фільтри. Після фільтрації дані порівнюються та отримується якісний результат.

Продовження таблиці 3.20.

II. Товар у реальному використанні	Властивості/характеристики	М/Нм	Вр/Тх /Тл/Е/Ор
	Висока точність	70Гц	Ор-організаційна Е
	Надійність	0,1°СКВ	—економічна
	Невисока вартість	IP67	Тл –технологічна
	Технічна підтримка		властивість
	Простота у використанні	50	Вр - виробнича
	Якість: відповідає нормам ДСТУ2499:2017		
	Пакування: програмна модель записані на компакт диск.		
III. Товар із Підкріпленням	До продажу: комплектація максимальна		
	Після продажу: гарантія, сервісне обслуговування		
и захисту програмного та апаратного забезпечення.			

Висновки: Для того, щоб захистити продукт від недоброзичливих користувачів, його необхідно запатентувати. Характеристики продукту, що наведені в другому та третьому рівнях роблять його унікальним так конкурентно спроможним серед інших.

Таблиця 3.21. Визначення меж встановлення ціни

№ п/п	Рівень цін на товари-замінники	Рівень цін на товари-аналоги	Рівень доходів цільової групи Споживачів	Верхня та нижня межі встановлення ціни на товар/послугу
1	80-140 у.о.	70-100 у.о.	1200-2000 у.о	60-90 у.о.

Висновки: Для продукту було обрано середню цінову категорію, оскільки занадто висока ціна не вигідна для потенційного покупця, а також така ціна дасть перевагу над товарам конкурентів

Визначення оптимальної системи збуту, в межах якого приймається рішення наведено у таблиці 3.22.

Таблиця 3.22. Формування системи збуту

№ п/п	Специфіка закупівельної поведінки цільових клієнтів	Функції збуту, які має виконувати постачальник товару	Глибина каналу збуту	Оптимальна система збуту
-------	---	---	----------------------	--------------------------

Продовження таблиці 3.22.

	Продаж	Повний супровід товару до замовника	Нульового рівня	Безпосередній (прямий)
--	--------	-------------------------------------	-----------------	------------------------

Висновки: основним каналом збуту продукту є продаж. Через невеликі об'єми виробництва немає потреби залучати підрядників для реалізації продукту. Тому обрано нульовий рівень глибини каналу збут та пряма системи збуту.

Таблиця 3.23. Концепція маркетингових комунікацій

№ п/п	Специфіка поведінки цільових клієнтів	Канали комунікацій, якими користуються цільові клієнти	Ключові позиції, обрані для позиціонування	Завдання рекламного повідомлення	Концепція рекламного звернення
	Зовнішні обставини провокують клієнтів до пошуку рішення	Реклама; SMM; Сайт виробника; Профільні видання;	Високошвидкісна робота; Легкість; Надійність;	Донесення можливостей отримання прибутку за допомогою продукту	Показ можливостей даного продукту та можливість застосування

Висновки: Маркетингова комунікація проходить через рекламу програмної моделі в соціальних мережах, у профільних виданнях, а також безпосереднє ведення переговорів з компаніями-замовниками. Метою реклами є донесення можливостей даного продукту та переваг його використання.

Представимо команду стартап-проекту та її розвиток на таблиці 3.24.

Таблиця 3.24. Команда стартап-проекту.

Розвиток Команди	Учасники	Завдання Учасників	Освіта	Досвід роботи	Спеціалізовані знання	Витрати, тис. грн.
Мінімальна команда	Клименко	Керівник, розробник програмної моделі, маркетолог,	Бакалавр	Розробник програмного забезпечення, менеджер.	Розробка програмного забезпечення	20000

## Продовження таблиці 3.24.

		менеджер фінансист			Розробка математи чних моделей фільтраці ї; Менеджм ент;	
Разом:	17000					

У вище наведеній таблиці була представлена команда, яка може повністю представити інтереси проекту.

Наступним кроком є розроблення календарного графіка реалізації стартап-проекту.

Таблиця 3.25. Календарний графік реалізації стартап-проекту.

№	Зміст етапу	Період реалізації, номер місяця з початку виконання робіт													Вартість етапу, грн.
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	
1.	Розробка мат.моделі														1000
2.	Розробка програмної моделі														10000
3.	Розробка інтерфейсу														10000
4.	Аналіз моделв														10000
5.	Проектування моделі														10000
6.	Створення прототипу														10000
7.	Тестування														10000
8.	Аналіз недоліків														10000
9.	Усунення недоліків														10000
10.	Розробка нового прототипу														10000

Продовження таблиці 3.25.

11.	Впровадження реклами														10000
12.	Старт продажу														10000
Всього грн.															111000

В таблиці наведений календарний графік реалізації стартап-проекту, що прогнозує всі можливі витрати на проект з першого етапу його розробки до останнього - моменту запуску реклами.

Далі необхідно пояснити виробничий процес, а саме визначити матеріали та комплектуючі продукту та потребу в промислово виробничому персоналі.

Таблиця 3.26. Сировина, матеріали та комплектуючі виробу

№	Найменування видів сировини, матеріалів та комплектуючих виробів	Постачальники	Ціна за одиницю	Примітки (місцезнаходження постачальників, умови поставок тощо)
1.	Програмне середовище	Постачальниками є фірми – розробники програмного середовища	12000	Постачальники знаходяться за кордоном; поставки виконуються раз на два тижня
2.	Інструкція		10	
3.	Компактний диск		25	
Разом:			12035	

У таблиці наводяться матеріали та комплектуючі, які необхідні для розробки програмної моделі фільтру.

Таблиця 3.27. Потреба в промислово-виробничому персоналі.

№	Посада/виконувані завдання	Чисельність	Витрати на персонал, тис. грн.
1.	Керівник	1	45000
2.	Розробник ПО	6	30000
3.	Інженер	3	25000

Продовження таблиці 3.27.

4.	Маркетолог	1	18000
5.	Менеджер	1	18000
6.	Фінансист	1	18000
Разом:		13	154000

З таблиці видно, що для функціонування компанії необхідно 13 чоловік, витрати на заробітну плату яких, становить 154000 тис. грн. Отже, необхідно активно розвивати продукт, щоб покривати дані витрати.

В таблиці 3.28 визначаються початкові витрати необхідні для стартапу.

Таблиця 3.28. План витрат на запуск виробництва продукції.

№	Найменування	Характеристика	Вартість тис. грн.
1.	Витрати на придбання обладнання та устаткування	Витрати на придбання обладнання	180000
2.	Сировина, основні матеріали	Вартість сировини та матеріалів для забезпечення технологічного процесу	30000
3.	Комплектуючі	Витрати на комплектуючі продукту	12035
4.	Паливо та електроенергія на технологічні цілі	Витрати на електроенергію, а також на паливо, необхідні для запуску проектної потужності виробництва	38000
5.	Оплата праці промислово-виробничого Персоналу	Витрати на заробітну плату та соціальні відрахування	111000
6.	Освоєння та запуск Виробництва	Витрати на пусконаладжувальні роботи, запуск виробництва	55000
Разом:			426035

Отже, з таблиці видно, що на запуск проекту знадобиться 426035 тис. грн.

Далі, в таблиці 3.29 наведені загальні обсяги інвестицій.

Таблиця 3.29. Обсяги інвестицій.

№	Вид інвестицій	Сума, грн
1.	Першо-початкові інвестиції	220000
2.	Інвестиції на стадії виробництва	355000
3.	Інвестиції на просування стартапу	150000
Разом:		725000

У таблиці приведено суми інвестицій та визначено суму загального обсягу виробництва на всіх етапах розробки програмної моделі, а саме початкові інвестиції, інвестиції на стадії виробництва та на просування стартапу.

### 3.4 Висновки

Даний розділ присвячений розробці першого етапу стартап-проекту. Дуже важливим у проведенні будь-якої наукової роботи є можливість отримання прибутку у майбутньому, тобто комерціалізація. Це можливість впровадження розробленої моделі в промисловості. Не можна виключати значення впливу ідей на економічну складову підприємств та взагалі, цілих держав, ніхто точно не знає яка саме ідея здійснить економічний переворот. Тому розроблений стартап – проект може бути використаний, як бізнес - модель та бути проданим зацікавленим особам.

Наступним кроком був технологічний аудит проекту. Під час технологічного аудиту автор має можливість краще зрозуміти технології виконання. Виявлено що більшість технологій вже знайшли застосування в світі, однак їх використання не може дати можливість обійти конкурентів. Саме покладання на новітні методи підвищення точності очищення фільтрації можуть

зробити пристрій унікальним та незамінним. Отже, впровадження проекту можливе і потрібне, однак необхідно створити сильну та якісну рекламну компанію, щоб привабити покупців.

Звертаючи увагу на стрімкий та невпинний розвиток технологій, для швидкого отримання прибутків, як форму ринкового впровадження проекту, слід обрати кооперацію. Що означає, що для того щоб йти в ногу з ринком, потрібно, запропонувати лідерам ринку використання реалізованого продукту, а не розроблювати систему з нуля, оскільки це займе багато часу, чого краще уникнути. Таке рішення є альтернативним, оскільки в такому випадку ні одна зі сторін не може отримати повного прибутку.

Після аналізу кожного з аспектів ринку, подальша імплементація проекту можлива. Але за однієї важливої умови. необхідно створити сильну та якісну рекламну компанію та донести до покупців переваги та необхідність використання програмної моделі, чому важливо обрати наш продукт.



## ВИСНОВКИ

У магістерській дисертації було проведено дослідження методів фільтрації трьома методами.

Перший метод - фільтрація сигналу за Калманом. Для аналізу даного методу було промодельовано сигнал аксилерометру та побудовано Simulink - модель, у програмному середовищі MATLAB. Суть дослідження полягала в аналізі фільтрації сигналу з різною частотою вхідного сигналу аксилерометра (0 рад/с, 5 рад/с, 10 рад/с, 20 рад/с, 40 рад/с). До чистого вхідного сигналу додавався шум та згодом відфільтровувався фільтром Калмана. На вихід виводилося три сигнали: перший - чистий сигнал з аксилерометра, другий - сигнал з адитивним шумом, а третій - сигнал після фільтрації. Останнім пунктом був розрахунок середньоквадратичного відхилення сигналу після фільтрації, значення якого складає: 0.1861

Другий метод - використання фільтра «Ковзке середнє». Для проведення дослідження використовувався сигнал аксилерометра, як і при фільтрації за Калманом, так само проведена побудова Simulink - моделі фільтра. Проведений експеримент аналогічний до експерименту наведеному вище для фільтра Каламана. Середньоквадратичне відхилення для фільтра «Ковзке середнє» становить: 0.0188. З чого можна зробити висновок, що даний фільтр справляється з поставленою задачею краще.

Третій досліджуваний метод - фільтрація комплементарним фільтром. Для побудови фільтру використано програмне середовище MATLAB, та використані реальні сигнали аксилерометру та гіроскопу, які були отримані в результаті науково - дослідної роботи.

Суть експерименту полягала в тому, щоб дослідити роботу фільтра та отримати на виході кут відхилення. Дослідження проводилося при різних кутах акселирометра, отримані результати кута відхилення порівнювалися з кутом на вході. Оскільки результати відповідають один одному, то можна зробити висновок, що фільтр працює коректно та справляється з поставленою задачею.

## СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. «Спеціальні розділи математики. Чисельні методи. Метод. вказівки до виконання лабораторних робіт для студ. бак. 6.091401 «Комп'ютеризовані системи, автоматика і управління» / Уклад.: Я.Ю. Дорогий, Є.В.Глушко. – К. : ІВЦ «Політехніка», 2017. – 201 с.
2. «Математические модели теплового дрейфа гироскопических датчиков инерциальных систем»/ Джашитов В.Э., Панкратов В.М./Под общей редакцией академика РАН В.Г. Пешехонова. СПб.: ГНЦ РФ–ЦНИИ «Электроприбор», 2015. – 150 с.
3. Белокуров В.А., Горкин В.Н., Костиков В.Г., Кошелев В.И., Павлов О.В., Холопов И.С. «Использование трехосных темс гироскопов и акселерометров для задач определения пространственной ориентации подвижных объектов», ISSN 1995-4565. Вестник РГРТУ № 3 (выпуск 41), Рязань, 2016.
4. Распопов В. Я. «Микромеханические приборы: учебное пособие»/ Распопов В.Я.–М.: Машиностроение, 2007. – 400 с. :ил.
5. Матвеев В.В., «Основы построения бесплатформенных инерциальных систем», СПб.: ГНЦ РФ ОАО «Концерн «ЦНИИ Электроприбир», 2019.
6. MPU-6050 datasheet [Електронний ресурс]. – Режим доступу до ресурсу: <https://arduino.ua/docs/RM-MPU-6000A.pdf>
7. ESP8266 [Електронний ресурс]. – Режим доступу до ресурсу: <https://esp8266.ru/>
8. Протокол I2C [Електронний ресурс]. – Режим доступу до ресурсу: <https://ru.wikipedia.org/>
9. Фільтр Калмана [Електронний ресурс]. – Режим доступу до ресурсу: <https://ru.wikipedia.org/>
10. Комплементарний фільтр [Електронний ресурс]. – Режим доступу до ресурсу: <http://robotclass.ru/articles/complementary-filter/>
11. Комплементарний фільтр [Електронний ресурс]. – Режим доступу до ресурсу: <http://www.poprobot.ru/home/komplementarnyjfiltr>

12. Мережева модель OSI [Електронний ресурс]. – Режим доступу до ресурсу: <https://ru.wikipedia.org/wiki/>
13. Digital Filters Applet. – Режим доступу: <http://www.falstad.com/dfilter/>
14. Digital Filter Design. – Режим доступу: <http://www.arc.id.au/FilterDesign.html>
15. Антонью А. Цифровые фильтры: анализ и проектирование: Пер. с англ. / Антонью А. — М.: Радио и связь, 2017. — 320 с, ил.
16. Пелед А., Лиу Б. Цифровая обработка сигналов. / Пелед А., Лиу Б. — Киев: Техника, 2016. — 263 с.
17. Надточій. С., Гуда А. Розробка системи отримання даних з mems сенсорів та дослідження методів їх обробки /С. Надточій А. Гуда // Геометричне моделювання та інформаційні технології – м. Дніпро.,– 2018. - №2.
18. Рижков Л. М., Волков О. С. Вплив дрейфів гіроскопа на точність комплементарного фільтра/ Л. М. Рижков та О. С. Волков// Механіка гіроскопічних систем - м. Київ.– 2018. - №5. - С. 34 – 37.
19. Костюк А. Ю., Лакоза С. Л. Применение расширенного фильтра калмана для калибровки инерциальных датчиков // Вісник НТУУ «КПІ». Серія приладобудування. – 2012. – Вип. 43. – С. 10 – 17.
20. Рижков Л. М., Примушко А. М. Дослідження комплементарного фільтра на мемс-вимірювачах // Інформаційні системи, механіка та керування. м. Київ – 2017. – №3 – С. 23 – 26.
21. Буревич А. О., Рижков Л. М., Мелашенко О. М. Вимірювання кутової швидкості мікросупутник фільтром калмана та спостерігачем луенбергера // Інформаційні системи, механіка та керування. м. Київ – 2018. – №4 – С. 3 – 7.
22. Рудик А.В. Акселерометричні інерціальні мікросистеми орієнтації / А.В. Рудик //Вісник «НАУ». Вимірювальна та обчислювальна техніка в технологічних процесах – 2017. – Вип. 50. – С. 5 – 8.

23. Вавилов, В.Д. Оптимизация параметров микромеханического акселерометра / В.Д. Вавилов, В.Л. Волков, А.В. Улюшкин // Труды НГТУ им Р.Е. Алексеева. - Н. Новгород. 2010. № 3.С. 308-314.

24. Ивойлов А.Ю. О применении мэмс-датчиков при разработке системы автоматической стабилизации двухколесного робота/А.Ю. Ивойлов// Сборник научных трудов НГТУ. – 2017. – № 3 (89). – 32–51

25. Зо Мьо Наин, А.В. Щагин, Ле Винь Тханг, Хтин Линн У. Комплементарный фильтр для оценки угла с использованием микроэлектромеханической системы гироскопа и акселерометра. Национальный исследовательский университет «Московский Институт. Электронный научный журнал «Инженерный вестник Дона». Москва, 2020.- №3.