

Міністерство освіти і науки України
Харківський національний університет радіоелектроніки

Факультет Автоматики і комп'ютеризованих технологій
(повна назва)
Кафедра Комп'ютерно-інтегрованих технологій, автоматизації та
робототехніки
(повна назва)

КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА

Пояснювальна записка

другий (магістерський)

(рівень вищої освіти)

Вдосконалення методу слідкування траєкторії руху
мобільної платформи на основі даних від акселерометру та гіроскопу
(тема)

Виконав:

здобувач 2 року навчання,

групи КІТПВМ-23-2

Гонтаренко Ігор Олександрович

(прізвище, ініціали)

Спеціальність 174 Автоматизація, комп'ютерно-інтегровані технології та робототехніка

освітньої програми Комп'ютерно-інтегровані технологічні процеси і виробництва

(код і повна назва напрямку)

Тип програми освітньо-професійна

(повна назва освітньої програми)

Керівник проф. Новоселов С. П.

(посада, прізвище, ініціали)

Допускається до захисту
зав. кафедри

(підпис)

Невлюдов І.Ш.

(прізвище, ініціали)

2025 р.

Харківський національний університет радіоелектроніки

Факультет	Автоматики і комп'ютеризованих технологій
Кафедра	Комп'ютерно-інтегрованих технологій, автоматизації та робототехніки
Рівень вищої освіти	другий (магістерський)
Спеціальність	174 Автоматизація, комп'ютерно-інтегровані технології та робототехніка
Тип програми	освітньо-професійна
Освітня програма	Комп'ютерно-інтегровані технологічні процеси і виробництва (код і повна назва)

ЗАТВЕРДЖУЮ:

Зав. кафедри _____

(підпис)

« _____ » _____ 2024 р.

ЗАВДАННЯ НА КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ

здобувачеві _____ Гонтаренко Ігорю Олександровичу

(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема роботи Вдосконалення методу слідкування траєкторії руху мобільної платформи на основі даних від акселерометру та гіроскопу

затверджена наказом по університету від _____ 22.11. 2024 р. № 1231 Ст

2. Термін подання студентом роботи до екзаменаційної комісії _____ 13.01.2025 р.

3. Вихідні дані до роботи _____

3.1 Апаратна платформа – MEMS датчик MPU6050

3.2 Середовище розробки – Arduino IDE v.2.0

3.3 Технологія визначення кута повороту – комбінація даних з гіроскопу та акселерометру

4. Перелік питань, що потрібно опрацювати в роботі

4.1 Аналіз предметної області

4.2 Методи фільтрації даних від MEMS-датчиків

4.3 Підвищення ефективності визначення кута повороту змішуванням даних від різних датчиків

4.4 Експериментальні дослідження

4.6 Висновки

5. Перелік графічного матеріалу із зазначенням креслеників, схем, плакатів, комп'ютерних ілюстрацій (слайдів)

Демонстраційний матеріал представлений у форматі презентації PowerPoint.

6. Консультанти розділів роботи (п.6 включається до завдання за наявності консультантів згідно з наказом, зазначеним у п.1)

Найменування розділу	Керівник (посада, прізвище, ім'я, по батькові)	Позначка консультанта про виконання розділу	
		підпис	дата

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№	Назва етапів роботи	Терміни виконання етапів роботи	Примітка
1	Аналіз літератури за темою роботи	10.10.24 – 17.10.24	Виконав
2	Аналіз предметної області	18.10.24 – 30.10.24	Виконав
3	Аналіз методів фільтрації даних від МЕМС-датчиків	01.11.24 – 16.11.24	Виконав
4	Підвищення ефективності визначення кута повороту змішуванням даних від різних датчиків	17.11.24 – 10.12.24	Виконав
5	Експериментальні дослідження	11.12.24 – 20.12.24	Виконав
6	Оформлення пояснювальної записки	21.12.24 – 25.12.24	Виконав
7	Подання роботи на рецензію		
8	Подання роботи на підпис зав. кафедри		

Дата видачі завдання 02.09.2024 р.

Здобувач

(підпис)

Керівник роботи

(підпис)

Гонтаренко І. О.

(прізвище, ініціали)

проф. Новоселов С.П.

(посада, прізвище, ініціали)

РЕФЕРАТ

Пояснювальна записка: 71 с., 36 рис., 2 дод., 16 джерел.

МОБІЛЬНИЙ РОБОТ, МЕМС ДАТЧИКИ, АКСЕЛЕРОМЕТР, ГІРОСКОП, ФІЛЬТР КАЛМАНА, АВТОМАТИЗОВАНА СИСТЕМА

Об'єктом дослідження в даній роботі є процес навігації наземних роботизованих безпілотних засобів.

Предмет дослідження – методи визначення поточного положення роботизованого транспортного засобу з використанням інерційної навігаційної системи.

Метою цієї роботи є вдосконалення методу навігації транспортних роботизованих безпілотних засобів за рахунок розробки модуля для визначення поточної орієнтації робота.

Проведено аналіз систем орієнтації безпілотних мобільних роботів в просторі з використанням МЕМС датчиків. Проведено аналіз методів та принципів використання інерційних систем навігації у випадку застосування засобів радіоелектронної боротьби. Проаналізовані переваги та недоліки одночасного використання акселерометра та гіроскопа для вирішення задачі підвищення точності позиціонування.

Проведено аналіз методу визначення куту повороту мобільного роботу з використанням МЕМС датчиків. Виконано огляд методів фільтрації даних від МЕМС-датчиків. Виконані експериментальні дослідження для підтвердження працездатності запропонованого методу визначення кута повороту.

Також, отримані результати роботи можна віднести до Цілі сталого розвитку 9 «Промисловість, інновації та інфраструктура», а саме п.9.2 «Забезпечити розширення використання електротранспорту та відповідної мережі інфраструктури».

ABSTRACT

Explanatory note: 71 p., 36 fig., 2 appendices, 16 sources.

MOBILE ROBOT, MEMS SENSORS, ACCELEROMETER,
GYROSCOPE, KALMAN FILTER, AUTOMATED SYSTEM

The object of research in this work is the navigation process of ground robotic unmanned vehicles.

The subject of research is methods for determining the current position of a robotic vehicle using an inertial navigation system.

The purpose of this work is to improve the navigation method of transport robotic unmanned vehicles by simultaneously using signals from an inertial navigation system based on an accelerometer and a gyroscope.

An analysis of the orientation systems of unmanned mobile robots in space using MEMS sensors has been carried out. An analysis of the methods and principles of using inertial navigation systems in the case of using electronic warfare means has been carried out. The advantages and disadvantages of the simultaneous use of an accelerometer and a gyroscope to solve the problem of increasing positioning accuracy are analyzed.

The method for determining the angle of rotation of a mobile robot using MEMS sensors is analyzed. A review of methods for filtering data from MEMS sensors is performed. Experimental studies are performed to confirm the operability of the proposed method for determining the angle of rotation.

Also, the results of the work can be attributed to Sustainable Development Goal 9 "Industry, Innovation and Infrastructure", namely p.9.2 "Ensure the expansion of the use of electric transport and the corresponding infrastructure network".

ЗМІСТ

Перелік скорочень	8
Вступ.....	9
1 Аналіз предметної області.....	11
1.1 Аналіз методів та принципів використання інерційних систем навігації у випадку застосування засобів радіоелектронної боротьби.....	11
1.2 Переваги та недоліки одночасного використання акселерометра та гіроскопа для вирішення задачі підвищення точності позиціонування.....	15
1.3 Аналіз методу визначення куту повороту мобільного роботу з використанням MEMS датчиків.....	19
1.4 Висновки по першому розділу.....	23
2 Методи фільтрації даних від MEMS-датчиків.....	24
2.1 Фільтр Калмана	24
2.2 Алгоритм найменшого середнього квадрата (LMS).	28
2.3 Адаптивний контролер режиму ковзання	29
2.4 Адаптивний смуговий фільтр	30
2.5 Алгоритми фільтрації на основі змішування даних від різних датчиків	31
2.6 Висновки по другому розділу.....	32
3 Підвищення ефективності визначення куту повороту змішуванням даних від різних датчиків	33
3.1 Метод комбінація сигналів від декількох датчиків.....	33
3.2 Моделювання роботи автоматизованої системи стабілізації заданого куту оберту.....	40
3.3 Висновки по третьому розділу	44

4 Експериментальні дослідження.....	46
4.1 Опис експериментальної установки.....	46
4.2 Опис програмного забезпечення для контролера Arduino	52
4.3 Опис програмного забезпечення для персонального комп'ютера.....	56
4.4 Аналіз результатів експерименту	60
4.5 Висновки по четвертому розділу.....	66
Висновки	67
Перелік джерел посилань	69
Додаток А Апробація результатів наукових досліджень.....	72
Додаток Б Вихідний код програми.....	76

ПЕРЕЛІК СКОРОЧЕНЬ

АП – автоматизований пристрій;

ІНС – інерційні систем навігації;

MEMS – мікроелектромеханічні системи;

ОУ – об'єкт управління;

ПЗ – програмне забезпечення;

ПД – пропорційне диференційне регулювання;

РЕБ – радіоелектронна боротьба;

ABPF – adaptive bandpass filter;

IMU – inertial measurement unit;

LMS – least mean squares filter.

ВСТУП

Наземні безпілотні мобільні роботи є важливим компонентом сучасних робототехнічних систем, які широко використовуються в промисловості, військовій сфері, транспорті та наукових дослідженнях. Однією з ключових задач при розробці таких роботів є забезпечення високої точності їхньої навігації в просторі. Для цього застосовуються різні типи датчиків, зокрема акселерометри та гіроскопи, які дозволяють визначати параметри руху та орієнтації робота.

З розвитком засобів радіоелектронної боротьби, які здатні значно впливати на роботу супутникових навігаційних систем, інерційні системи навігації мобільних роботів, що виконуються завдання гуманітарного та воєнного характеру стають одним із ключових інструментів для забезпечення автономної та надійної навігації в умовах електромагнітних перешкод.

У сучасних конфліктах засоби РЕБ можуть значно погіршити роботу супутникових навігаційних систем, що призводить до неможливості коректного позиціонування військових чи цивільних об'єктів.

Інерційні навігаційні системи, завдяки своїй автономності, стійкості до радіоперешкод та здатності інтеграції з іншими навігаційними системами, є незамінними в багатьох військових і цивільних застосуваннях. Таким чином, тема даної роботи є актуальною.

Метою цієї роботи є вдосконалення методу навігації транспортних роботизованих безпілотних засобів за рахунок розробки модуля для визначення поточної орієнтації робота.

Об'єктом дослідження в даній роботі є процес навігації наземних роботизованих безпілотних засобів.

Предмет дослідження – методи визначення поточного положення роботизованого транспортного засобу з використанням інерційної навігаційної системи.

Для досягнення мети необхідно вирішити наступні завдання:

- провести аналіз методів та принципів використання інерційних систем навігації у випадку застосування засобів радіоелектронної боротьби;
- виконати аналіз принципу визначення позиції мобільного робота на основі акселерометру та гіроскопу.
- розробити архітектуру автоматизованої системи з використанням акселерометру та гіроскопу;
- виконати побудову алгоритму.

Роботу слід виконати відповідно нормативної документації, методичних вказівок та посібників [1 - 4].

1 АНАЛІЗ ПРЕДМЕТНОЇ ОБЛАСТІ

1.1 Аналіз методів та принципів використання інерційних систем навігації у випадку застосування засобів радіоелектронної боротьби

Застосування інерційних систем навігації (ІНС) набуває особливої важливості в сучасних умовах ведення бойових дій та використання радіоелектронних засобів впливу. З розвитком технологій радіоелектронної боротьби (РЕБ), які здатні суттєво вплинути на навігаційні системи, що базуються на супутникових сигналах, таких як GPS чи ГЛОНАСС, питання забезпечення безперервного і надійного позиціонування рухомих об'єктів стає критично важливим. У цьому контексті інерційні системи навігації стають важливим резервним і автономним інструментом, який здатен забезпечувати навігацію навіть у складних умовах електромагнітних завад або повного блокування супутникових сигналів.

Інерційна система навігації – це автономна система, яка визначає положення, швидкість і орієнтацію об'єкта у просторі без використання зовнішніх джерел інформації [5, 6]. Основними елементами ІНС є:

- гіроскопи – використовуються для вимірювання кутової швидкості та визначення орієнтації (рис. 1.1);
- акселерометри – використовуються для вимірювання лінійних прискорень (рис. 1.2).

ІНС базується на принципах механіки Ньютона: за допомогою вимірювання прискорень і кутових швидкостей система обчислює зміни в положенні та орієнтації об'єкта в просторі [7, 8].



Рисунок 1.1 – Приклад реалізації гіроскопа для мобільного робота

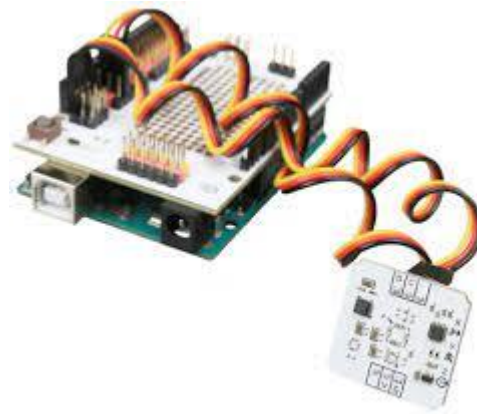


Рисунок 1.2 – Приклад реалізації акселерометра для мобільного робота

Основною перевагою інерційних систем є їхня автономність: вони не потребують зовнішніх сигналів для роботи, що робить їх надзвичайно надійними у випадку, коли інші засоби навігації стають недоступними через вплив РЕБ.

РЕБ – це сукупність технічних і тактичних засобів, призначених для створення перешкод, ураження або повного пригнічення роботи електронних систем супротивника. Засоби РЕБ включають у себе:

- створення потужних радіоперешкод, які заважають прийомам супутникових сигналів GPS/ГЛОНАСС;

- підміна сигналів навігаційних супутників фальшивими даними, що призводить до отримання неправильних координат;
- створення електромагнітного впливу, що порушує роботу електронних систем.

У сучасних конфліктах засоби РЕБ можуть значно погіршити роботу супутникових навігаційних систем, що призводить до неможливості коректного позиціонування військових чи цивільних об'єктів.

ІНС не потребують супутникових або радіосигналів для своєї роботи, що робить їх незамінними в умовах, коли системи GPS/ГЛОНАСС піддаються радіоелектронному впливу. Це означає, що навіть у випадку повного глушіння сигналів супутникових навігаційних систем об'єкт, обладнаний ІНС, зможе продовжувати рух, орієнтуючись у просторі.

Оскільки ІНС використовують внутрішні дані про прискорення та кутові швидкості, вони не піддаються впливу перешкод чи спуфінгу, як це може бути з системами на основі GPS. Це дає змогу уникнути спотворення навігаційних даних під час активного впливу РЕБ.

У багатьох сучасних системах ІНС використовуються як резервний механізм на випадок втрати сигналу від супутників. Наприклад, у військових безпілотних літальних апаратах чи наземних транспортних засобах ІНС дозволяє тимчасово компенсувати втрату зовнішніх навігаційних даних, поки не буде відновлено доступ до GPS/ГЛОНАСС.

ІНС можуть забезпечувати високу точність навігації протягом коротких проміжків часу навіть без зовнішньої корекції. Це особливо важливо в умовах активних бойових дій, коли точність і швидкість переміщення є ключовими факторами для успіху операції.

ІНС часто інтегруються з іншими навігаційними системами (наприклад, GPS або оптичними системами), що дозволяє підвищити загальну стійкість і надійність навігації. При цьому, навіть якщо системи РЕБ тимчасово пригнічують роботу супутникової навігації, ІНС забезпечують плавний

перехід до автономної навігації, зменшуючи ризики втрати керування об'єктом.

Безпілотні системи часто працюють в умовах підвищеного ризику глушіння GPS-сигналів. Використання ІНС дозволяє забезпечувати точну навігацію на обмеженому просторі, навіть якщо супутникова навігація тимчасово недоступна.

В умовах активного застосування РЕБ наземні транспортні засоби можуть втрачати здатність точно визначати своє місцезнаходження через блокування GPS. ІНС допомагають компенсувати це, дозволяючи продовжувати рух і виконувати бойові завдання.

Для морських об'єктів, які діють на великих відстанях від узбережжя, застосування ІНС є критичним, оскільки сигнали супутникових систем навігації можуть бути вразливими до глушіння. ІНС дозволяє морським суднам зберігати курс і орієнтацію навіть у разі відсутності сигналу GPS.

Хоча інерційні системи навігації мають низку переваг, вони також мають певні обмеження:

- з часом ІНС можуть накопичувати помилки через інтегрування прискорень і кутових швидкостей, що призводить до зростання похибки у визначенні координат;

- для тривалої точної роботи ІНС потребують періодичної корекції за допомогою зовнішніх систем (наприклад, GPS або системи оптичного відслідковування).

Однак навіть ці обмеження не перекривають важливості ІНС, особливо в умовах впливу засобів РЕБ.

Незважаючи на певні технічні обмеження, інерційні системи навігації залишаються критично важливими для забезпечення надійного позиціонування об'єктів у випадку застосування засобів РЕБ.

Реалізація систем навігації з використанням акселерометра і гіроскопа є критично важливою для багатьох робототехнічних платформ.

Наземні мобільні роботи, які використовуються для логістики або обслуговування в приміщеннях, повинні мати високу точність навігації, щоб уникати перешкод і забезпечувати безпечне переміщення по складних траєкторіях.

Навіть при наявності високоточних зовнішніх систем, таких як GPS, в умовах втрати сигналу (наприклад, у тунелях або будівлях), роботи використовують інерційні системи, засновані на комбінації акселерометрів і гіроскопів, для безперервної навігації.

В зонах, де сигнали зовнішніх систем навігації (GPS) недоступні або заборонені до використання, роботи з інерційними навігаційними системами на базі акселерометрів та гіроскопів здатні працювати автономно, забезпечуючи точне пересування навіть в екстремальних умовах.

Для військових завдань або рятувальних операцій, де навігація повинна залишатися точною в умовах перешкод або відсутності зовнішньої інформації, інерційні системи навігації забезпечують можливість точно визначати положення і орієнтацію роботи в просторі.

1.2 Переваги та недоліки одночасного використання акселерометра та гіроскопа для вирішення задачі підвищення точності позиціонування

Наземні безпілотні мобільні роботи є важливим компонентом сучасних робототехнічних систем, які широко використовуються в промисловості, військовій сфері, транспорті та наукових дослідженнях. Однією з ключових задач при розробці таких роботів є забезпечення високої точності їхньої навігації в просторі. Для цього застосовуються різні типи датчиків, зокрема акселерометри та гіроскопи, які дозволяють визначати параметри руху та орієнтації роботи.

Акселерометри вимірюють лінійне прискорення, а гіроскопи – кутову швидкість. Однак, для досягнення максимальної точності необхідно не лише

використання окремих датчиків, а й комплексна обробка їх сигналів. Цей підхід дозволяє підвищити надійність та точність системи навігації мобільного робота навіть у складних умовах експлуатації.

Для розуміння принципів функціонування навігаційної системи на основі акселерометра та гіроскопа необхідно розглянути ключові особливості кожного з цих сенсорів.

Акселерометр – це датчик, який вимірює лінійне прискорення вздовж однієї або кількох осей. Це дозволяє визначати зміни в швидкості та переміщенні робота. Однак акселерометри схильні до накопичення похибок через наявність шумів і дрейфу.

Гіроскоп – це датчик, який вимірює кутову швидкість обертання об'єкта навколо осей. Гіроскопи використовуються для визначення орієнтації та контролю поворотів робота. Як і акселерометри, гіроскопи мають свої похибки, зокрема через дрейф і чутливість до вібрацій.

Незважаючи на певні обмеження кожного з цих датчиків, їх комбіноване використання дає змогу компенсувати недоліки та підвищити точність навігації.

Основною проблемою при використанні лише акселерометрів або гіроскопів для навігації наземного робота є накопичення похибок (дрейф). Це може призвести до значних помилок у визначенні позиції або орієнтації робота через певний час його роботи:

При застосуванні акселерометра похибки виникають внаслідок інтегрування сигналу прискорення для обчислення швидкості та подальшого визначення положення. Навіть невеликий шум або неточність призводять до швидкого накопичення помилок.

При використанні гіроскопу накопичення похибки відбувається через інтеграцію кутової швидкості для обчислення орієнтації. Це явище називають дрейфом гіроскопа, і воно може значно впливати на точність визначення кута повороту.

Комбіноване використання сигналів від акселерометра та гіроскопа дозволяє значно підвищити точність навігації за рахунок компенсації слабких сторін кожного сенсора. На рис. 1.3 показано графік вихідних сигналів з гіроскопу (червона лінія) та акселерометру (синя лінія) [9].

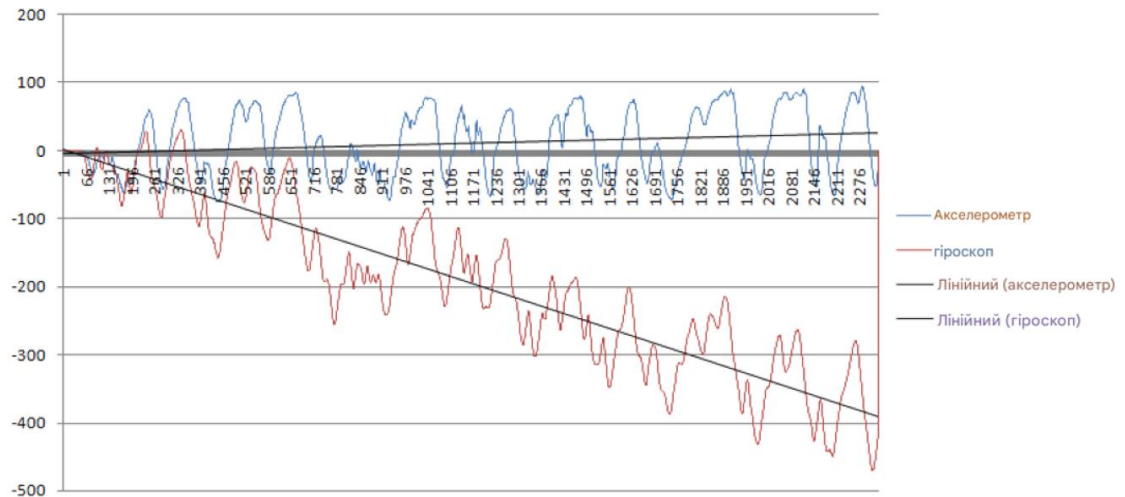


Рисунок 1.3 – Графік вихідних сигналів з гіроскопу (червона лінія) та акселерометру (синя лінія).

На рис. 2.3 можна бачити проблему, що виникає в багатьох гіроскопах, а саме дрейф вихідного сигналу. Використання одночасно двох МЕМС датчиків може принести значні переваги

Акселерометри можуть компенсувати дрейф гіроскопів, оскільки вони здатні надати абсолютну оцінку лінійних прискорень і гравітаційного поля.

Гіроскопи можуть згладити помилки акселерометрів, надаючи точні дані про орієнтацію і кутові швидкості, особливо під час короткочасних маневрів.

Для об'єднання сигналів використовують спеціальні алгоритми, такі як комплементарний фільтр або фільтр Калмана, які дозволяють ефективно комбінувати дані від різних сенсорів.

Комплементарний фільтр поєднує швидкі та точні зміни від гіроскопа з повільними та стійкими даними від акселерометра. Він дозволяє зменшити похибки через шуми або дрейф кожного сенсора окремо, надаючи точніші результати.

Фільтр Калмана використовує модель динаміки робота і враховує похибки сенсорів для отримання найбільш точної оцінки положення та орієнтації. Це більш складний математичний інструмент, який використовує модель динаміки системи та статистичні методи для оптимізації даних з різних сенсорів. Він враховує випадкові похибки та шум сенсорів, що дозволяє досягти більшої точності у прогнозуванні руху та орієнтації робота.

На рис. 1.4 показано приклад роботи комплементарного фільтру та одночасного використання двох сигналів [9].

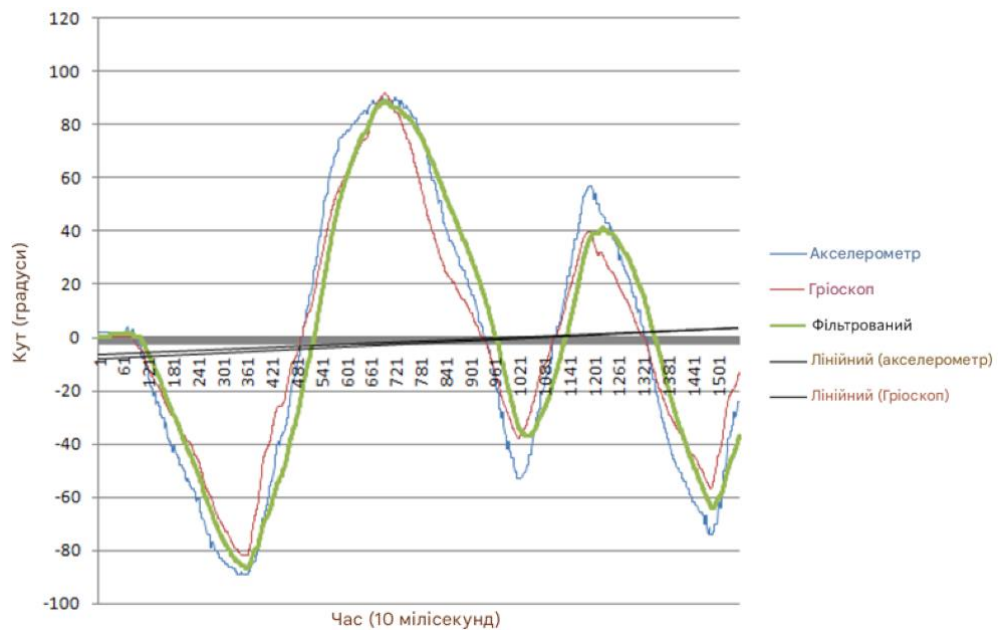


Рисунок 1.4 – Приклад роботи комплементарного фільтру та одночасного використання двох сигналів

Одночасний аналіз даних дозволяє зменшити помилки в режимі реального часу, забезпечуючи стабільнішу траєкторію руху робота. Це

особливо важливо при швидких маневрах, коли необхідно постійно коригувати рух у реальних умовах.

Для того, щоб досягти максимальної точності навігації, необхідно застосовувати складні алгоритмічні рішення для обробки даних.

1.3 Аналіз методу визначення куту повороту мобільного роботу з використанням МЕМС датчиків

У статичних випадках дані акселерометра містять гравітаційну складову постійного струму g , що дорівнює $9,81 \text{ м/с}^2$, яка, як правило, не змінюється в заданій локальній області [7, 8]. У динамічних умовах, коли акселерометр обертається, сила тяжіння змінюється відповідно до обертання датчика. Обертання навколо осей x , y та z називають відповідно $\text{roll}(\varphi)$, $\text{pitch}(\theta)$ та $\text{yaw}(\psi)$. Розрахувати орієнтацію для статичного випадку легко – нам потрібно визначити фактичний напрямок (обертання) вектора сили тяжіння. Зрозуміло, що існують ситуації, коли певне обертання не впливає на вектор сили тяжіння, та інші проблеми (наприклад, проблема блокування диференційного приводу, яка може виникнути під час роботи з обертаннями [7]). Для повного визначення орієнтації робота необхідний додатковий датчик, наприклад, гіроскоп.

Щоб отримати лінійне прискорення, необхідно застосувати інший підхід. Наявність гравітації має збурюючий (деформаційний) вплив на вимірювання, що слід звести до мінімуму. У стаціонарних ситуаціях, коли на об'єкт діє лише сила тяжіння (а орієнтація не змінюється), можна обчислити зміщення постійного струму. Після видалення постійного струму будь-яке ненульове прискорення явно є результатом шуму датчика. Однак, коли об'єкт рухається, його орієнтація може змінитися так, що гравітація суттєво заважає вимірюванню лінійного прискорення. Навіть невеликі похибки орієнтації мають суттєве значення для результатів інтегрування. Якщо припустити,

наприклад, використання 1-осьового акселерометра, де вісь ортогональна вектору сили тяжіння, обертання навколо цієї осі на 1 градус призводить до додаткового внеску прискорення $0,17 \text{ м/с}^2$.

Насправді мобільний робот може зіткнутися зі швидкими обертаннями протягом короткого періоду часу. Така ситуація типова, коли робот проходить через невелику перешкоду або їде по нерівній місцевості (рис. 1.5) [10].

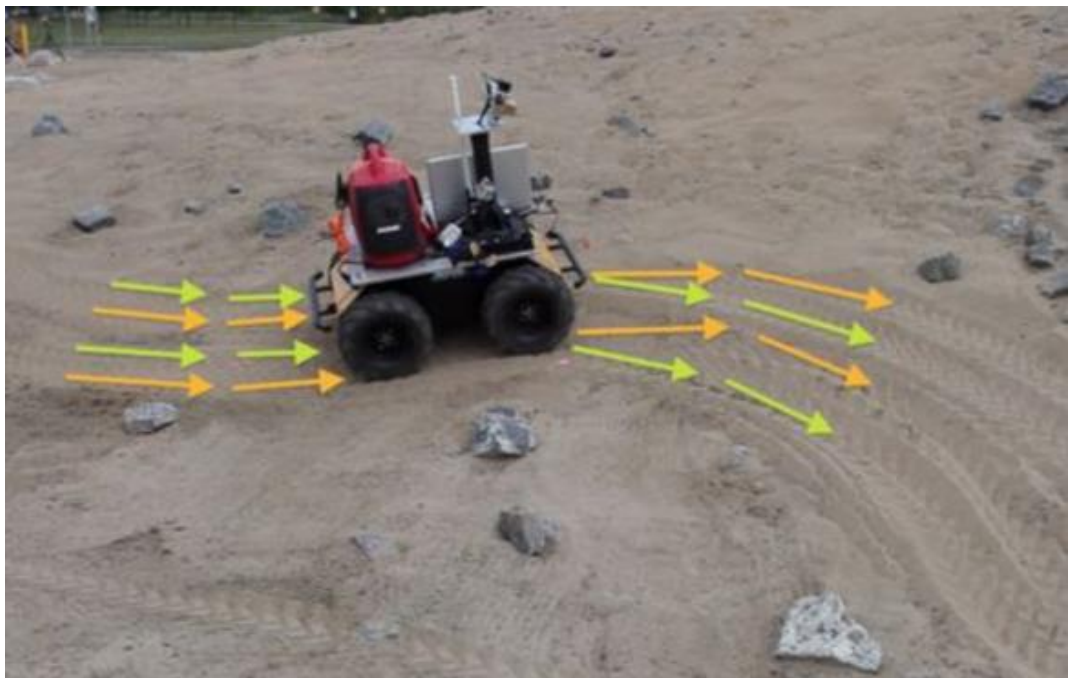


Рисунок 1.5 – Рух мобільного робота по перешкодам

Якщо датчик встановлений не точно в точці перетину, де перетинаються всі 3 осі обертання об'єкта, з'являється додаткове прискорення. Причина цього ефекту полягає в топографії землі, траєкторії робота (рух по колу) або зміщенні кріплення IMU. Реальний рух по нерівній місцевості може сприяти переміщенню одного колеса вгору або вниз і зсуву центру обертання робота. Важко визначити величину цього зрушення. Водночас вплив динаміки обертів на вимірювання акселерометра суттєвий [7].

Коли переміщення (r) відмінне від нуля, слід враховувати відцентрові та тангенціальні прискорення. Відцентрове прискорення a_{cf} перпендикулярно

напрямку обертання і відмінне від нуля, коли відповідна кутова швидкість $\dot{\phi}$, $\dot{\theta}$, $\dot{\psi}$ відмінна від нуля. Тангенціальне прискорення a_{tg} паралельне напрямку обертання і приймає ненульове значення, коли кутове прискорення ($\ddot{\phi}$, $\ddot{\theta}$, $\ddot{\psi}$) відмінне від нуля.

На рис. 1.6 показано метод визначення орієнтації мобільного робота по сигналам з трьох датчиків: акселерометра, гіроскопа та магнітометра [11].

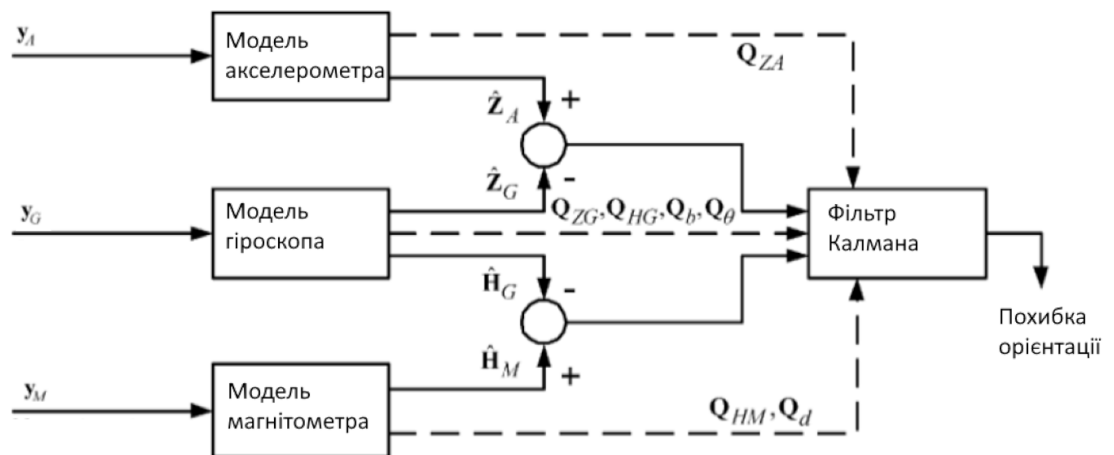


Рисунок 1.5 – Метод визначення орієнтації мобільного робота по сигналам з трьох датчиків: акселерометра, гіроскопа та магнітометра

В роботі [11] додатковий фільтр Калмана був використаний для оцінки орієнтації мобільного робота шляхом поєднання сигналів повного 3-D сенсорного MEMS модуля, включаючи три гіроскопи швидкості, три акселерометри та три магнітометри.

Фільтр Калмана корисний для поєднання даних кількох різних непрямих вимірювань і вимірювань із шумом. Таким чином, у той час як гіроскопи вимірюють орієнтацію шляхом об'єднання кутових швидкостей, а акселерометр і магнітометр забезпечують вільне від дрейфу вимірювання орієнтації. Фільтр Калмана зважує три джерела інформації відповідно до знань про характеристики сигналу на основі їхніх моделей, щоб якнайкраще використовувати всі дані від кожного з датчиків.

З цієї комбінації або злиття сигналів датчиків отримують інформацію про зміщення гіроскопів, акселерометрів і магнітометрів, які можна використовувати для повторного калібрування датчиків, що використовуються.

Додатковий фільтр Калмана базується не на моделі процесу, а на моделі помилок. Переваги полягають у тому, що ця структура підтримує високий динамічний відгук, необхідний для змінних стану положення, і більшість процесів помилок в інерційних вимірювальних одиницях (IMU) можна описати лінійними процесами. Чотири частини дуги додаткового фільтра: прогноз апріорної моделі стану, модель помилки, фільтр Калмана та корекція стану, що дає апостериорну оцінку стану (рис. 1.6).

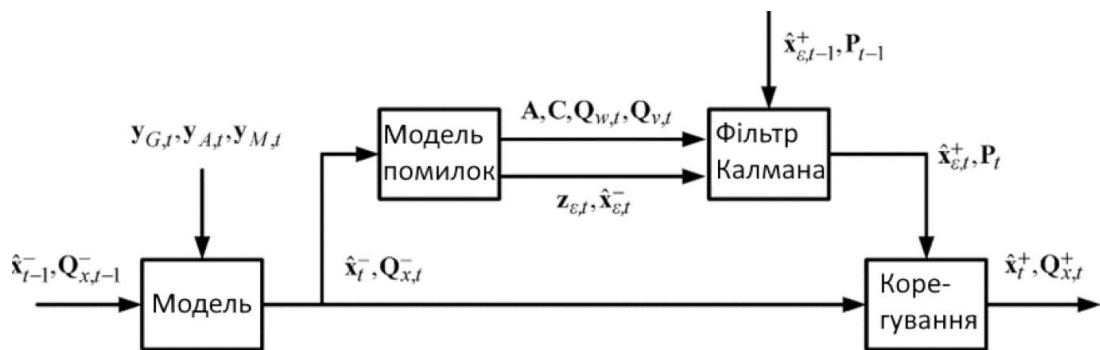


Рисунок 1.6 – Структура додаткового фільтра Калмана

Трикутна позначка у верхній частині символу позначає оцінку, верхній індекс мінус – апріорну оцінку, зроблену за допомогою моделі датчика, а верхній індекс плюс – оцінку, зроблену після виправлення фільтром.

На структурі додаткового фільтра Калмана для оцінки орієнтації використовуються наступні позначки:

– x – вектор, що відображає стани моделі, які використовуються для оцінки орієнтації;

– x_ε представляє помилки в станах моделі: помилка зміщення гіроскопа, помилка орієнтації та магнітна помилка порушення;

– Q_x – описує коваріаційні матриці станів фільтра.

Сигнали датчиків y_G – гіроскоп, y_A – акселерометр та y_M – магнітометр, з якого вхід фільтра вимірювання Z_ε може бути розрахований за допомогою моделі помилки. У моделі кутові швидкості інтегруються до кутової орієнтації та робляться апріорні прогнози сигналу. A , C , Q_ω і Q_v – це матриці, що описують модель помилок, а P – коваріаційна матриця, яка використовується у фільтрі Калмана.

1.4 Висновки по першому розділу

Проведено аналіз систем орієнтації безпілотних мобільних роботів в просторі з використанням МЕМС датчиків. Проведено аналіз методів та принципів використання інерційних систем навігації у випадку застосування засобів радіоелектронної боротьби. Проаналізовані переваги та недоліки одночасного використання акселерометра та гіроскопа для вирішення задачі підвищення точності позиціонування.

Проведено аналіз методу визначення куту повороту мобільного роботу з використанням МЕМС датчиків.

2 МЕТОДИ ФІЛЬТРАЦІЇ ДАНИХ ВІД МЕМС-ДАТЧИКІВ

Як показали попередні дослідження, фільтрація сигналів необхідна для забезпечення точності та стабільності роботи мобільних роботів, що дозволяє їм більш ефективно орієнтуватися в просторі та виконувати свої завдання.

Дані від акселерометра та гіроскопа можуть бути зашумленими через вібрації, зовнішні впливи або неточності сенсорів. Фільтрація допомагає усунути ці небажані сигнали, що покращує якість вимірювань і робить дані точнішими.

В реальних умовах робота акселерометра та гіроскопа може призводити до коливань у вимірюваннях через швидкі рухи або зміни напрямків. Фільтрація згладжує такі коливання, що дозволяє більш стабільно визначати стан та орієнтацію мобільного робота.

Для точного визначення положення та орієнтації робота будемо використовувати поєднання даних з акселерометра і гіроскопа (фільтри Калмана або комплементарні фільтри). Це дозволяє отримати точнішу інформацію про рухи, компенсуючи слабкі сторони кожного з сенсорів.

2.1 Фільтр Калмана

Фільтр Калмана є звичайним фільтром, який використовується для датчиків. Він складається з циклу, який містить два етапи: оновлення часу, який є процесом передбачення, та оновлення вимірювання, яке є процесом корекції. Процес фільтра Калмана виглядає наступним чином:

- спочатку отримують початкові оцінки для \hat{x}_{k-1} та P_{k-1} .
- потім вводиться двоетапний цикл, як показано нижче.

Процес оновлення часу можна записати наступним чином:

$$\hat{x}_{\bar{k}} = A\hat{x}_{k-1} + Bu_{k-1}, \quad (2.1)$$

$$P_{\bar{k}} = AP_{k-1}A^T + Q, \quad (2.2)$$

де \hat{x} – апостеріорний оцінений стан;

$\hat{x}_{\bar{k}}$ – апріорний стан;

u – вектор керування;

k – дискретна точка часу;

A – модель переходу стану;

B – модель входу керування;

P – коваріація помилки;

Q – коваріація шуму процесу;

T – функція часу.

Процес оновлення вимірювань можна записати наступним чином:

$$K_k = P_{\bar{k}}H^T (HP_{\bar{k}}H^T + R)^{-1} = \frac{P_{\bar{k}}H^T}{HP_{\bar{k}}H^T + R}, \quad (2.3)$$

$$\hat{x}_k = \hat{x}_{\bar{k}} + K_k(z_k - H\hat{x}_{\bar{k}}), \quad (2.4)$$

$$P_k = (I - K_kH)P_{\bar{k}}, \quad (2.5)$$

де z – сигнал вимірювання;

R – коваріація помилки;

K – підсилення Калмана;

H – матриця вимірювання;

R – виміряна коваріація шуму;

I – матриця ідентичності;

T – функція часу.

Деякі з поширених застосувань фільтра Калмана – це зменшення шуму, прогнозування та оцінка сигналу. Це один із найпоширеніших алгоритмів для вирішення проблем датчиків, таких як компенсація дрейфу датчика гіроскопа.

Фільтр Калмана розроблений на основі фільтра стаціонарного підсилення, отриманого в результаті аналізу спостережуваності фільтра Калмана з метою зменшення дрейфу зміщення та шуму від вихідного сигналу MEMC гіроскопа [12].

Фільтр використовує вектор стану системи, який моделюється на основі як справжньої кутової швидкості ω , так і зсуву b . Параметри коваріаційних матриць Q і R виводяться з дисперсії шуму кутового випадкового блукання (angular random walk – ARW) і швидкості випадкового блукання (rate random walk – RRW) і дисперсії q_ω . Коефіцієнт підсилення фільтра Калмана K_s в стаціонарному режимі аналізується заздалегідь в автономному режимі. Параметри A і B розраховуються на основі матриці власних векторів S і власних значень λ_1 і λ_2 . Процес оцінки дискретного фільтра Калмана показано на рис. 2.1.

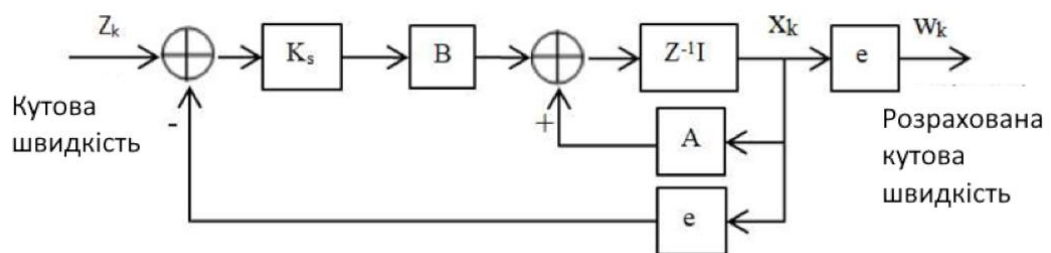


Рисунок 2.1 – Процес оцінки дискретного фільтра Калмана

Спрощений базовий фільтр Калмана можна використовувати для зменшення шуму і температурного дрейфу. Також такий фільтр використовується для оцінки зсуву та тенденції дрейфу. Структурна схема процесу зменшення дрейфу значення вихідного сигналу за допомогою фільтра Калмана проілюстрована на рис. 2.2.

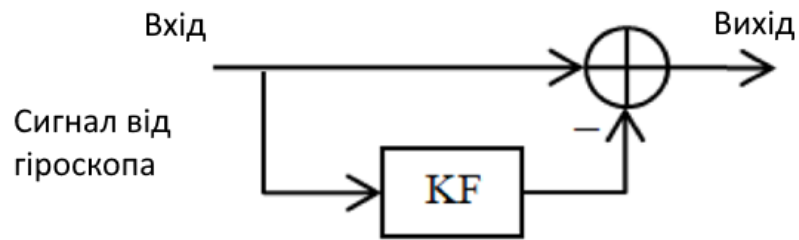


Рисунок 2.2 – Структурна схема процесу зменшення дрейфу значення вихідного сигналу за допомогою фільтра Калмана

Алгоритм оцінки положення на основі фільтра Калмана застосовується для корекції повороту з використанням гіроскопу. Його структурна схема показана на рис. 2.3 [12, 13].

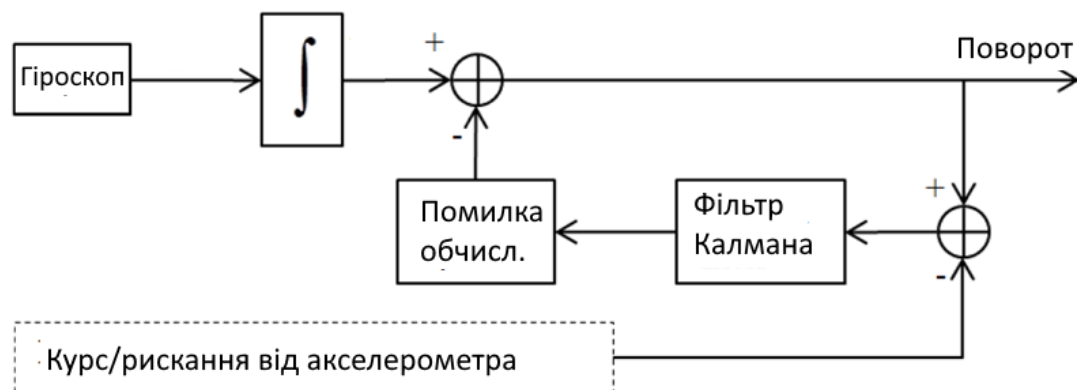


Рисунок 2.3 – Структура алгоритму оцінки позиції мобільного робота на основі фільтра Калмана.

Даний алгоритм також може застосовуватись для організації взаємозв'язку між МЕМС-гіроскопом, фільтром Калмана та додатковими датчиками – акселерометром і магнітометром.

2.2 Алгоритм найменшого середнього квадрата (LMS).

Структура адаптивного фільтра LMS проілюстрована на рис. 3.4.

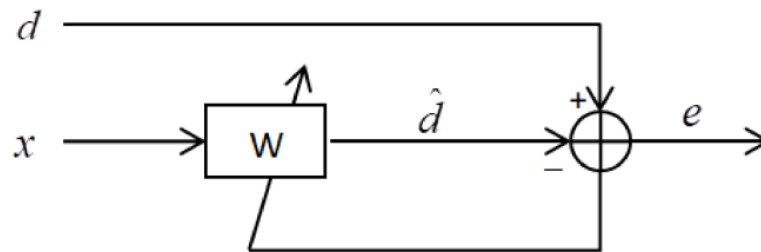


Рисунок 2.4 – Структура адаптивного фільтра LMS

На рис. 2.4 застосовуються наступні позначки:

d – бажаний сигнал;

x – вхід;

\hat{d} – вихід адаптивного фільтра;

e – сигнал помилки;

W — адаптивний фільтр LMS.

LMS активний фільтр (Least Mean Squares filter) – це адаптивний фільтр, який використовує алгоритм найменших середніх квадратів (LMS) для оптимізації своїх параметрів з метою мінімізації похибки між бажаним і реальним виходом системи. LMS-фільтр належить до класу адаптивних фільтрів, які автоматично підлаштовуються під умови сигналу в реальному часі.

Основні характеристики LMS активного фільтра:

– адаптивність – фільтр може підлаштовувати свої коефіцієнти на основі вхідних даних і похибки;

– алгоритм LMS – мінімізує похибку шляхом корекції вагових коефіцієнтів фільтра відповідно до градієнтного спуску;

– мінімізація помилки – фільтр мінімізує різницю між фактичним виходом і бажаним значенням за допомогою методу найменших середніх квадратів.

LMS активні фільтри широко використовуються в задачах шумоприглушення, прогнозування сигналів, еквалізації каналів зв'язку та інших областях обробки сигналів, де необхідно адаптивно змінювати параметри фільтра залежно від вхідного сигналу.

2.3 Адаптивний контролер режиму ковзання

Адаптивний контролер режиму ковзання для MEMS гіроскопа може компенсувати в режимі реального часу недоліки вимірювання та оцінювати кутову швидкість, а також враховувати коефіцієнти демпфування та жорсткості. Блок-схема алгоритму показана на рис. 2.5, де W позначає адаптивний контролер непрямого режиму ковзання.

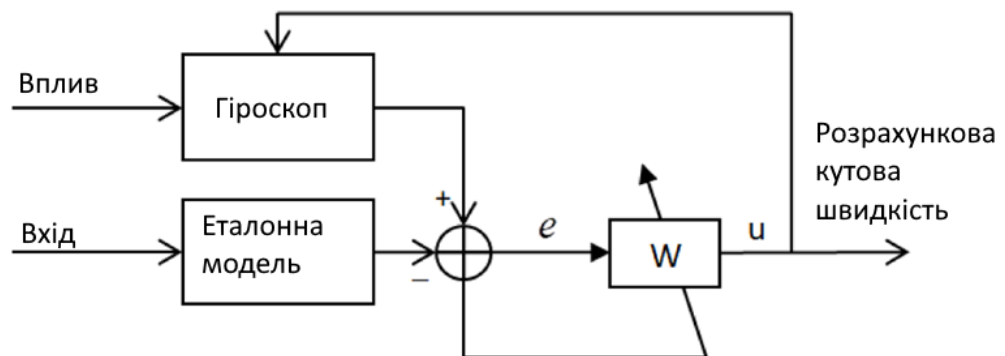


Рисунок 2.5 – Непряме адаптивне керування режимом ковзання для MEMC-гіроскопа

2.4 Адаптивний смуговий фільтр

Алгоритм ABPF (Adaptive Bandpass Filter) є базовим алгоритмом для зменшення типових шумів і тремтіння в даних інерційних датчиків [12]. Дані можуть збиратися за допомогою гіроскопа та акселерометра.

Як показано на рис. 2.6, метод можна застосовувати, як смугову фільтрацію та адаптацію центральної частоти фільтра.

Передавальна функція смугового фільтра записується наступним чином:

$$H(s) = \frac{\sqrt{2}\omega_a s}{s^2 + \sqrt{2}\omega_a s + \omega_a^2}, \quad (2.6)$$

де ω_a – центральна частота фільтра, яка адаптується в замкнутому контурі на основі домінуючої частоти вхідного сигналу.

На рис. 2.6 частота f дорівнює $2\pi\omega_a$. Блок демпфування обмежує зміни оцінки частоти тремору з кроком Δf відповідно до вхідної модальної частоти f_{mod} для регулювання швидкості адаптації.

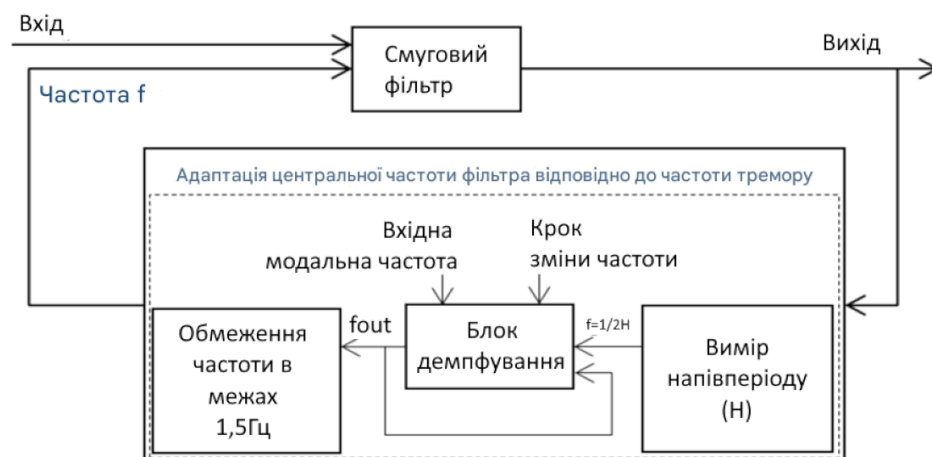


Рисунок 2.6 – Основна структура адаптивного смугового фільтра

2.5 Алгоритми фільтрації на основі змішування даних від різних датчиків

Підходи сенсорного синтезу – це адаптивні алгоритми, які поєднують сенсорні дані з незалежних джерел, незалежно від їхніх переваг і недоліків, для оптимізації продуктивності системи, як зазначено в [14]. Вони часто передбачають комбінування даних акселерометра та магнітометра для їх компенсаційних характеристик, що є гарним рішенням для доповнення гіроскопа без дрейфу.

Метод змішування даних від датчиків часто застосовується для зменшення розповсюдження помилок і отримання початкових умов процесу інтегрування. У цих випадках сигнал МЕМС гіроскопа все ще є основою для оцінки орієнтації, але він уточнюється за допомогою даних МЕМС акселерометра і магнітних датчиків у мініатюрному інерціальному вимірювальному блоці (МІМУ).

Основна структура підходу об'єднання датчиків, що використовує дані акселерометра та магнітометра, представлена на рис. 2.7.

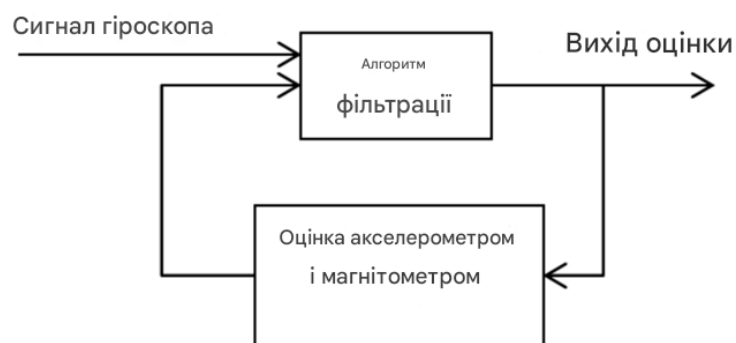


Рисунок 2.7 – Основна структура підходу об'єднання датчиків із використанням даних акселерометра та магнітометра.

Окремі алгоритми залежать від реалізації алгоритмів фільтрів. Найпоширенішим використовуваним алгоритмом фільтра є фільтр Калмана,

який складається з кроків передбачення та корекції та підключається для адаптації оцінки акселерометра та магнітометра.

2.6 Висновки по другому розділу

В результаті виконання другого розділу кваліфікаційної роботи проведено аналіз методи фільтрації даних від MEMS-датчиків. розглянуто фільтр Калмана, який використовується для датчиків та містить два етапи: оновлення часу, який є процесом передбачення, та оновлення вимірювання, яке є процесом корекції.

Розглянуто особливості застосування методу LMS, який використовує алгоритм найменших середніх квадратів (LMS) для оптимізації своїх параметрів з метою мінімізації похибки між бажаним і реальним виходом системи.

Наведена блок-схема адаптивного контролеру режиму ковзання для MEMS гіроскопа, що може компенсувати в режимі реального часу недоліки вимірювання та оцінювати кутову швидкість, а також враховувати коефіцієнти демпфування та жорсткості.

Розглянуто алгоритм ABPF, що є базовим алгоритмом для зменшення типових шумів і тремтіння в даних інерційних датчиків. Також, розглянуті алгоритми фільтрації на основі змішування даних від різних датчиків.

3 ПІДВИЩЕННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ ВИЗНАЧЕННЯ КУТА ПОВОРОТУ ЗМІШУВАННЯМ ДАНИХ ВІД РІЗНИХ ДАТЧИКІВ

3.1 Метод комбінація сигналів від декількох датчиків

Будь-яка інерційна система відстеження руху містить такі ключові компоненти, як акселерометр, гіроскоп і магнітометр для обчислення орієнтації датчика [14].

Гіроскоп відомий своєю компактністю, легкою вагою та низькою вартістю. В ідеальному світі орієнтацію каркаса тіла можна отримати, виконавши інтеграцію даних гіроскопа. Однак через білий шум від зчитування інтеграція фактично накопичує шумові ефекти, що призводить до відхилення від очікуваних значень. Щоб покращити продуктивність популярних, але недорогих інерціальних датчиків, дослідники постійно впроваджують нові методи, які базуються на підходах змішування даних різних датчиків і вдосконалених методах обробки сигналів [13]. Алгоритми синтезу часто включають поєднання акселерометра та магнітометра для їх компенсованих характеристик, і вважається, що це найкраще рішення для доповнення гіроскопа без дрейфу.

Для опису запропонованого методу поєднання сигналів з двох МЕМС датчиків будемо використовувати поняття кватерніона. Кватерніони, вперше введені ірландським математиком Вільямом Гамільтоном у 1843 році, є потужним математичним інструментом для опису обертання в тривимірному просторі [15]. Вони використовуються в багатьох галузях, зокрема в комп'ютерній графіці, робототехніці, аерокосмічній техніці та доповненій реальності, оскільки мають ряд переваг порівняно з іншими методами представлення орієнтації, такими як кути Ейлера чи матриці обертання.

Кватерніон був обраний тому, що час його обчислення менший, ніж час обертання матриці. Крім того, він зменшує числові помилки множення

матриць, що виконується на мікропроцесорі, оскільки він широко використовується для представлення орієнтації в області комп'ютерної графіки.

Кватерніонна нотація сформульована згідно з [16], щоб представити проблеми в об'єднанні даних з точки зору інтегрування швидкості зміни, оцінки положення шляхом злиття акселерометра та гіроскопа, і оцінки положення рухомої платформи шляхом злиття магнітометра з гіроскопом.

Кватерніонне обертання являє собою будь-який поворотний кут α твердого тіла щодо одиничного вектора \vec{u} в 3-вимірному просторі (3.1) згідно з теоремою про обертання Ейлера (рис. 3.1).

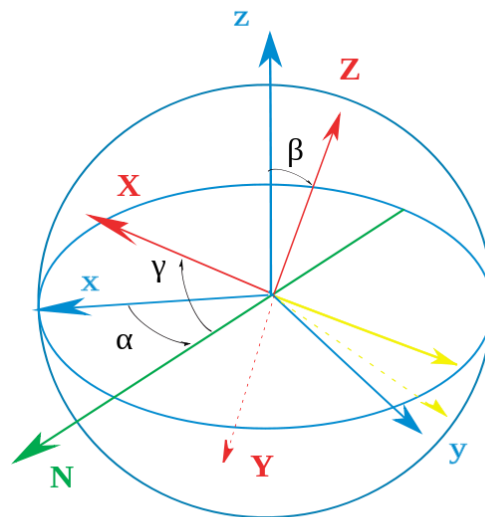


Рисунок 3.1 – Класичні кути Ейлера

Кватерніон q обчислюється за формулою:

$$q = \cos \frac{\alpha}{2} + (iu_x + ju_y + ku_z) \sin \frac{\alpha}{2}, \quad (3.1)$$

де $i = (1, 0, 0)$;

$j = (0, 1, 0)$;

$k = (0, 0, 1)$.

Для спрощення виразу 3.1 скористуємось рівнянням:

$$q = (q_w, q_x, q_y, q_z). \quad (3.2)$$

Тоді формула 3.1 можна записати наступним чином:

$$q = q_w + iq_x + jq_y + kq_z. \quad (3.3)$$

Обертання об'єкта в системі координат А зазвичай позначають відносно опорної координати В як ${}^A_B q$. Для операції інверсії або транспонування використовується наступна залежність

$${}^A_B q^{-1} = {}^B_A q. \quad (3.4)$$

Одиничний кватерніон відноситься до кватерніону з одиничною нормою:

$$q_{unit} = \frac{q}{N(q)}, \quad (3.5)$$

де $N(q)$ – норма кватерніона.

Норма кватерніона обчислюється за формулою:

$$N(q) = \sqrt{q_w^2 + q_x^2 + q_y^2 + q_z^2}. \quad (3.6)$$

Щоб встановити зв'язок між кватерніоном і кутовою швидкістю (ω), кутове обертання можна отримати шляхом інтегрування кутової швидкості від гіроскопа, якщо дрейф не враховується.

Диференціювання кватерніонів відносно кутової швидкості виводиться як

$$\dot{q} = \frac{1}{2} \omega * q, \quad (3.7)$$

або

$$\dot{q} = \frac{1}{2} \begin{bmatrix} 0 & -\omega_z & \omega_y & \omega_x \\ \omega_z & 0 & \omega_x & \omega_y \\ -\omega_y & \omega_x & 0 & \omega_z \\ \omega_x & \omega_y & \omega_z & 0 \end{bmatrix}, \quad (3.8)$$

де $\omega = (\omega_x, \omega_y, \omega_z)$ – кутова швидкість на виході гіроскопа.

Фільтр Калмана відомий своєю характеристикою байєсівського впливу при роботі з невизначеними шумами. Він використовується в багатьох системах від роботизованого до комп'ютерного бачення з основною метою створення чистого вихідного сигналу за наявності білого та гауссового шумів, щоб вихідний сигнал був якомога ближчим до реального стану.

В даному методі фільтр Калмана використовується для об'єднання сигналів МЕМС датчиків головним чином на 2 критичних етапах:

- застосування його до даних гіроскопа для прогнозування наступної змінної стану;
- застосування його до орієнтації з акселерометра та магнітометра для виправлення передбачення від гіроскопа.

Пропонована модель сформульована з лінійної змінної стану з використанням кватерніону, який дорівнює $q = (q_w, q_x, q_y, q_z)$. З рівняння (2.8), кутова швидкість від гіроскопа була використана для обчислення прогнозованого стану на першому етапі шляхом інтегрування:

$$\begin{cases} q_0 = (1,0,0,0) \\ q_{k+1} = q_k + \frac{1}{2} \dot{q}_k \Delta t \end{cases}, \quad (3.8)$$

де Δt – представляє частоту дискретизації;

q_k – містить попередній кватерніон для включення на етапі поширення кватерніону (рис. 3.1).

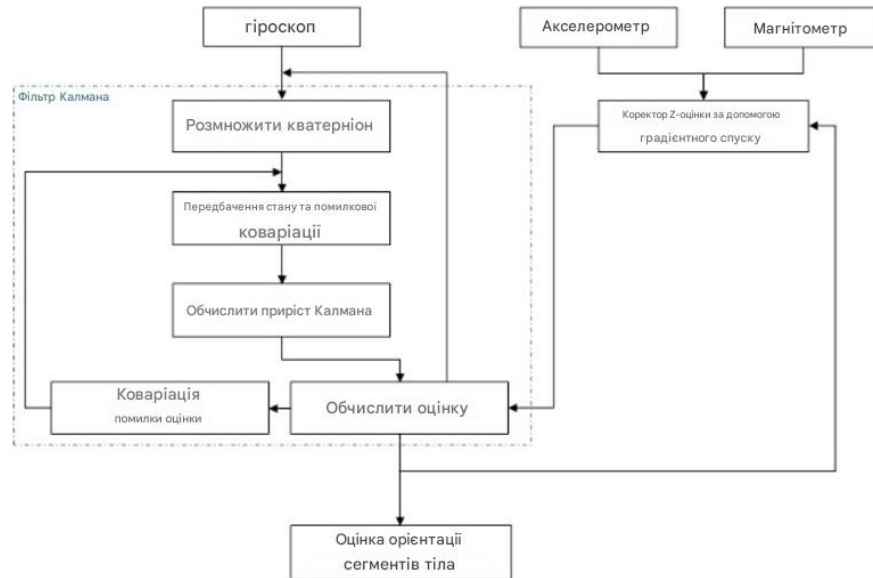


Рисунок 3.1 – Пропонована модель поєднання сигналів з декількох датчиків

Діапазон руху мобільної платформи та різка зміна швидкості створюють зсув векторів $\vec{\omega}$ та \vec{a} , \vec{m} :

$$\begin{cases} \vec{\omega} = K_g \vec{\omega}_{true} + \vec{b}_g + \vec{v}_g \\ \vec{a} = K_a (\vec{g} + \vec{a}_{user}) + \vec{b}_a + \vec{v}_a, \\ \vec{m} = K_m \vec{h} + \vec{b}_m + \vec{v}_m \end{cases} \quad (3.9)$$

де \vec{b}_i та \vec{v}_i – зміщення та некорельований білий гаусівський шум вимірювання;

K_g , K_a – шкала факторних матриць.

Зсув і шум від різних осей вважаються незалежними.

Таким чином в практичній конструкції фільтра Калмана дуже важливо відфільтрувати шум процесу у вигляді змінних Q_d і R .

Q_d позначає невизначену коваріацію шуму гіроскопа. Чим менший Q_d , тим меншою є очікувана корекція зовнішнього впливу, оскільки Q_d робить внесок у прогнозовану коваріацію помилки $P_{\bar{k}}$, яка має посилюючий вплив на підсилення Калмана K_k , отже, корекцію сигналу Δc :

$$P_{\bar{k}} = AP_k A^T + Q_d, \quad (3.10)$$

$$K_k = P_{\bar{k}}(HP_k H^T + R), \quad (3.11)$$

$$\Delta c = K_k(q_z - q_{\bar{k}+1}), \quad (3.12)$$

$$q_{k+1} = q_{\bar{k}+1} + \Delta c. \quad (3.13)$$

Таким чином, Q_d не має бути занадто великим або занадто малим, інакше корекція q_z не зможе виправити помилку гіроскопа. Так само враховується коваріація невизначеності шуму датчика R від спостережуваних показань датчика, позначених у посиленні Калмана K_k і корекції сигналі Δc . Іншими словами, це розрив між поточним показанням і реальним очікуваним значенням.

Відома проблема визначення куту обертання навколо вісі z пов'язана з вилученням сили тяжіння при обчисленні вихідного значення датчику (рис. 3.2).

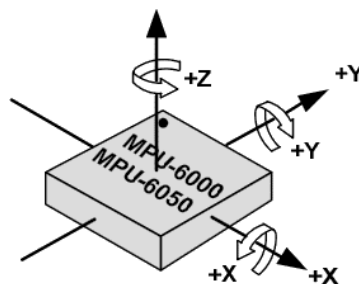


Рисунок 3.2 – Напрямки орієнтації чутливих вісей МЕМС датчика

Для підвищення точності остаточного значення пропонується додатков використовувати дані з акселерометра та магнітометра.

Прогнозована оцінка стану q_k , отримана в результаті інтегрування кутової швидкості, залежить від проблеми дрейфу на додаток до невідомих джерел помилок. Вилучення сили тяжіння з акселерометра дозволяє коригувати прогнозований стан, оскільки він не страждає від проблеми дрейфу. Крім того, дані магнітометра забезпечуються магнітним полем Землі, за допомогою якого можна обчислити зміну напрямку, особливо обставину динамічного прискорення та руху в напрямку (кут осі z).

Метою отримання оптимальної оцінки q_z як миттєвої орієнтації з акселерометра та магнітометра є мінімізація функції помилки:

$$E(q, g, b, m) = \begin{bmatrix} f_g(q, g) \\ f_b(q, b, m) \end{bmatrix}, \quad (3.14)$$

де g – позначає силу тяжіння, отриману з акселерометра за допомогою фільтра низьких частот;

b і m – відтворюють нахил поля та вимірювання магнітометра відповідно.

Цільова функція визначає оптимальний кватерніон, який дає збіжність за допомогою ітераційного процесу з використанням методу градієнтного спуску. Таким чином,

$$q_{z+1} = q_z - \mu \frac{\nabla E}{\|\nabla E\|}, \quad (3.15)$$

де $\nabla E = J_{g,b}^T(q, b)E(q, g, b, m)$.

3.2 Моделювання роботи автоматизованої системи стабілізації заданого куту оберту

Для моделювання роботи автоматизованої системи стабілізації заданого куту оберту розглянемо типову структуру замкненої автоматичної системи.

Принцип управління за відхиленням (принцип зворотного зв'язку) є одним з найбільш ранніх і широко розповсюджених принципів управління. Відповідно до цього управляючий вплив $v(t)$ виробляється в автоматичному пристрої як функція відхилення $\varepsilon(t)$ регульованої величини $y(t)$ від заданого значення $g(t)$

$$v = \varphi(\varepsilon), \quad (3.16)$$

де $\varepsilon(t) = g(t) - y(t)$.

Використання інформації з виходу об'єкту управління для формування управляючого впливу називається зворотним зв'язком.

Оскільки знак неузгодженості $\varepsilon(t)$ протилежний знаку $y(t)$ такий зворотній зв'язок називається негативним.

На рис. 3.3 цей зв'язок показаний стрілкою, спрямованою з виходу ОУ на вхід АП, а кружком, розділеним на сектори, показаний суматор.

Стрілки, що підходять до секторів, позначають складові, стрілка, що відходить від одного із секторів – суму. Складові, що вводяться в суматор зі зворотним знаком (від'ємники), відзначаються знаком «-» біля вершини стрілки.

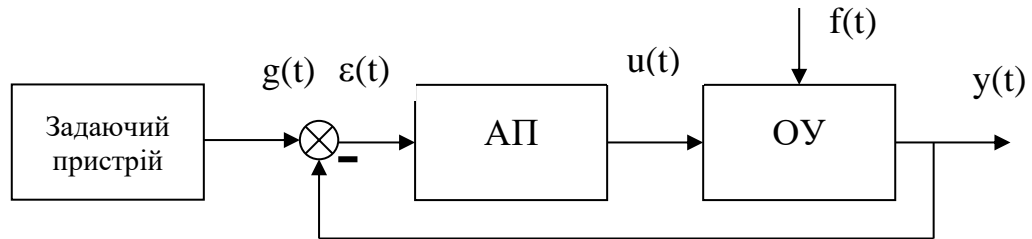


Рисунок 3.3 – Схема управління за відхиленням

Перевагою принципу зворотного зв'язку є його висока точність. Майже завжди можна відшукати таку функцію, що забезпечить досить точний збіг вихідної величини із заданим значенням (аргументами φ можуть бути також похідні або інтеграли ϵ за часом).

У той же час управління по відхиленню має й серйозний принциповий недолік. Він проявляється в тому, що управління завжди трохи запізнюється. У системах, які побудовані на цьому принципі, вихідна величина спочатку повинна відхилитися від завдання, а вже потім регулятор приводить її до потрібного значення.

Уявимо нашу систему у вигляді ПД регулятора (рис. 3.4).

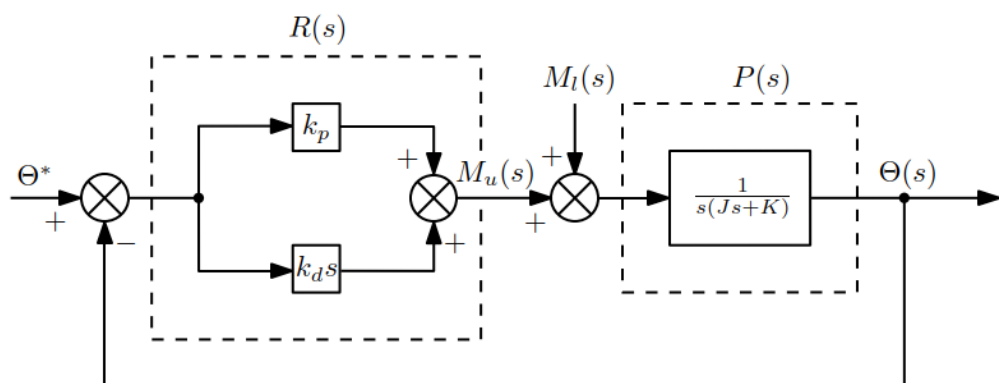


Рисунок 3.4 – Модель замкненої системи з ПД-регулятором

Розрахуємо передавальну функцію замкненої системи:

$$W(s) = \frac{R(s)P(s)}{1+R(s)P(s)} = \frac{\frac{k_p+k_d s}{J_s^2+k_s}}{1+\frac{k_p+k_d s}{J_s^2+k_s}} = \frac{k_p+k_d s}{J_s^2+(K+k_d)s+k_p}. \quad (3.17)$$

Далі при відомих параметрах об'єкта J (сумарний момент інерції двигуна і зубчатої передачі редуктора) та K (сумарний коефіцієнт) на основі коренів характеристичного поліному передавальної функції

$$J_s^2 + (K + k_d)s + k_p \quad (3.19)$$

можна розрахувати такі коефіцієнти ПД регулятора k_p та k_d , щоб забезпечити потрібні якості замкненої системи.

Сумарний коефіцієнт K розраховується за наступною формулою (формулою):

$$K = K_f + \frac{K_\varepsilon K_\mu}{R}, \quad (3.18)$$

де K_f – коефіцієнт тертя;

K_ε – коефіцієнт зворотної ЕДС;

K_μ – коефіцієнт моменту сил.

Для моделювання використовуємо програму Simulink. Побудована структурна схема PD-регулятора показана на рис. 3.5.

Для моделювання будемо використовувати спрощений запис передавальної функції:

$$W(s) = \frac{1}{s(J_s+K)}. \quad (3.19)$$

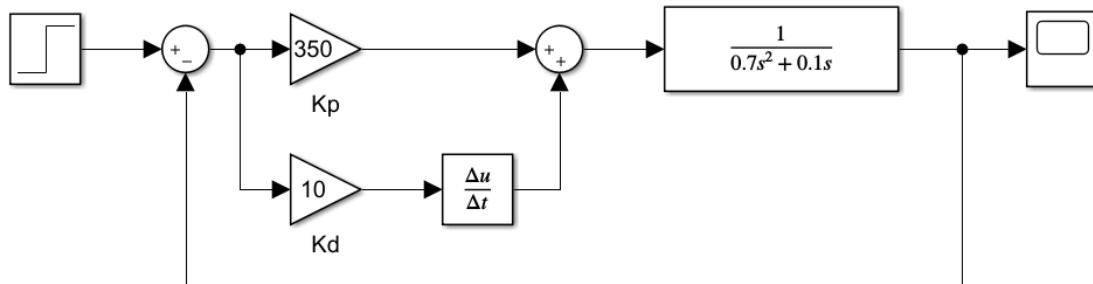


Рисунок 3.5 – Побудована структурна схема PD-регулятора

Налаштування передавальної функції (3.19) показано на рис. 3.6.

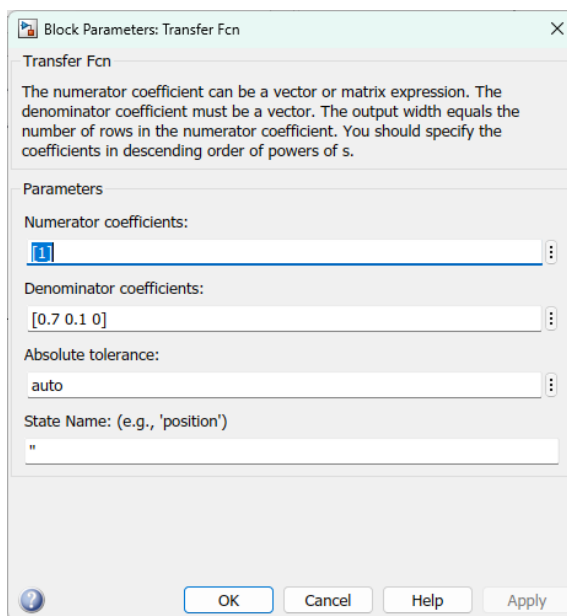


Рисунок 3.6 – Налаштування передавальної функції

В результаті моделювання отримана наступна реакція системи, що моделюється (рис. 3.7).

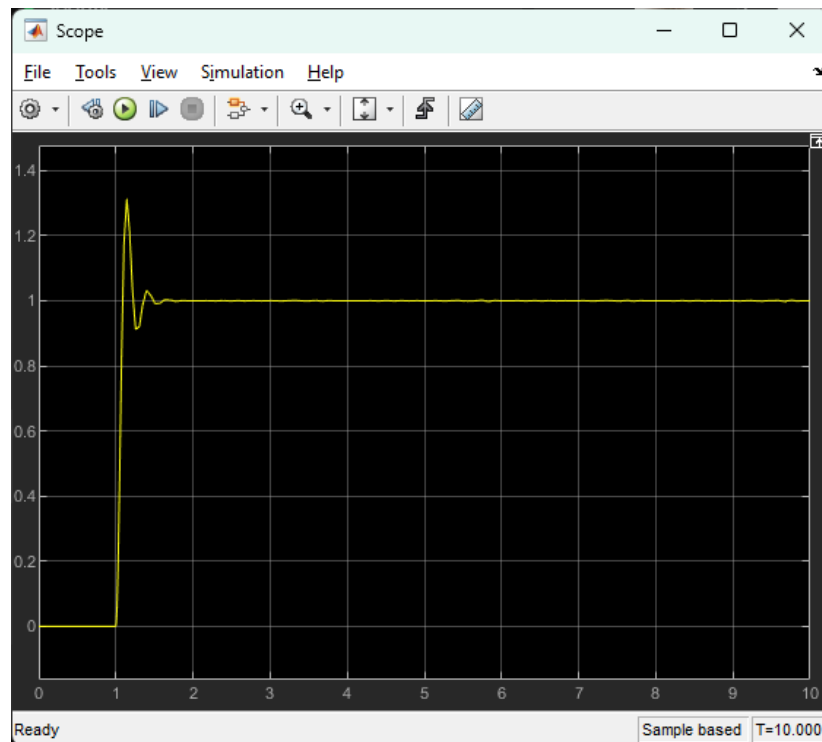


Рисунок 3.7 – Реакція системи, що моделюється

В результаті моделювання можна бачити, що при обраних параметрах J і K система стійка.

3.3 Висновки по третьому розділу

Злиття інформації з різних датчиків охоплює різноманітні методи, які:

- змінюють слабкі сторони окремих датчиків, щоб обчислити отримані дані з більшою точністю, ніж можна обчислити за допомогою окремих компонентів;

- покращити якість сигналу і знизити рівень шуму обчислених результатів, використовуючи методи фільтрації.

Об'єднання даних з кількох джерел дозволяє зменшити похибки, притаманні кожному окремому датчику. Гіроскоп надає стабільну інформацію

про швидкі зміни, тоді як акселерометр і магнітометр допомагають коригувати довготривалі похибки.

Поєднання вхідних даних робить систему менш вразливою до раптових спотворень одного типу датчика (наприклад, магнітних збурень магнітометра чи ударів, що впливають на акселерометр).

Фільтри, такі як Калмана або комплементарний, допомагають усунути вплив шумів та дрейфу, що призводить до стабільного та точного вимірювання кута повороту.

Проведено моделювання системи позиціонування, що показало стійкість системи при обраних параметрах J і K.

4 ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНІ ДОСЛІДЖЕННЯ

4.1 Опис експериментальної установки

Структурна схема експериментальної установки показана на рис. 4.1.

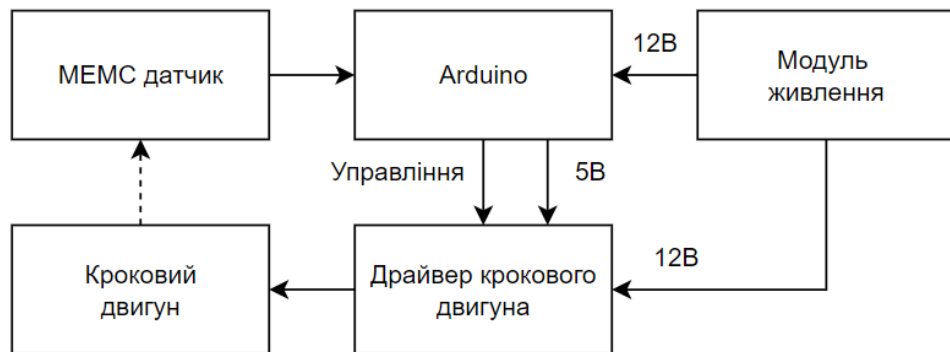


Рисунок 4.1 – Структурна схема експериментальної установки

До складу експериментальної установки входять:

- комбінований MEMC датчик;
- контролер Arduino;
- драйвер крокового двигуна;
- кроковий двигун;
- блок живлення.

В якості комбінованого MEMC датчика обрано MPU-6050 (рис. 4.2).

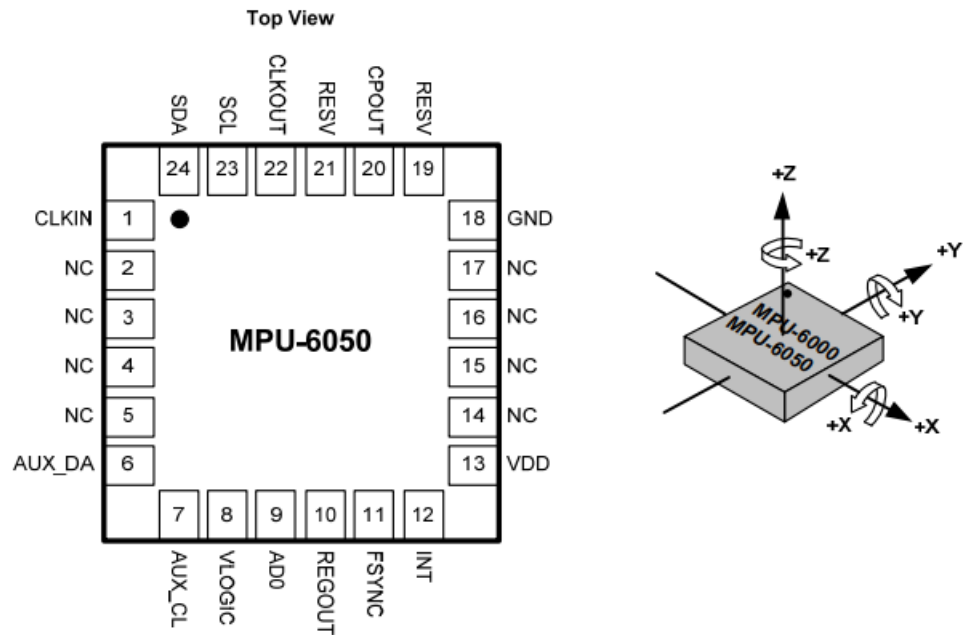


Рисунок 4.2 – Зовнішній вигляд МЕМС-датчика MPU-6050

MPU-6050 — це інерційний вимірювальний модуль (IMU) від компанії InvenSense, який об'єднує в собі 3-осьовий гіроскоп і 3-осьовий акселерометр в одному корпусі. Завдяки цьому він дозволяє вимірювати прискорення, кутову швидкість і орієнтацію об'єктів у просторі. MPU-6050 є популярним вибором для проектів, де потрібне точне відстеження руху, як, наприклад, у робототехніці, дронах, ігрових консолях, смартфонах та системах віртуальної реальності.

Основні характеристики акселерометра:

- діапазон вимірювань: $\pm 2g$, $\pm 4g$, $\pm 8g$, $\pm 16g$;
- вимірює прискорення по трьох осях (X, Y, Z), що дозволяє визначати напрямок гравітації або прискорення під час руху.

Основні характеристики гіроскопа:

- діапазон вимірювань: $\pm 250^\circ/\text{сек}$, $\pm 500^\circ/\text{сек}$, $\pm 1000^\circ/\text{сек}$, $\pm 2000^\circ/\text{сек}$;
- вимірює кутову швидкість (швидкість обертання) навколо трьох осей (X, Y, Z).

MPU-6050 має вбудований цифровий процесор руху (Digital Motion Processor), який здатний обробляти сигнали з гіроскопа і акселерометра та зменшувати навантаження на зовнішній мікроконтролер.

DMP дозволяє обчислювати кватерніони, значення кута Ейлера, фільтрувати дані для отримання більш точних показників орієнтації.

MPU-6050 є універсальним та широко використовуваним сенсором для вимірювання орієнтації, прискорення та кутових швидкостей. Завдяки інтеграції акселерометра і гіроскопа, він забезпечує точні та швидкі вимірювання з мінімальними затратами енергії, що робить його ідеальним для застосування у сучасних мобільних і вбудованих системах.

Кроковий двигун використовується для проведення точного позиціонування MEMS датчика при проведенні експериментальних досліджень.

В якості крокового двигуна обрано NEMA 17 17HS2408. Зовнішній вигляд та схема підключення показані на рис. 4.3.

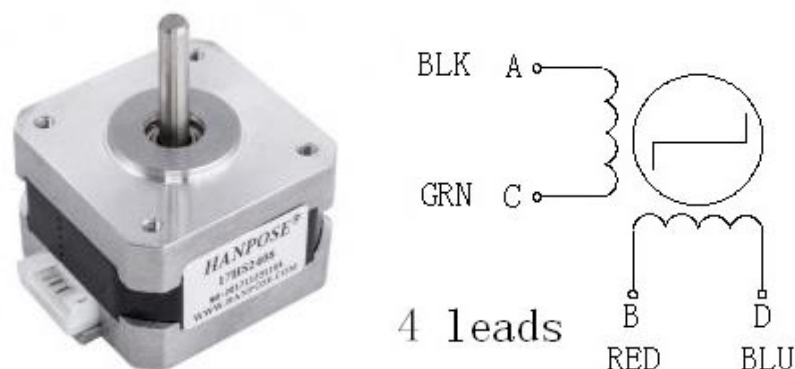


Рисунок 4.3 – Зовнішній вигляд та схема підключення крокового двигуна обрано NEMA 17 17HS2408

Для керування кроковим двигуном застосовується драйвер A4988 та плата розширення для його підключення.

Драйвер A4988 – це модуль, що призначено для керування біполярними кроковими двигунами, та забезпечує точний контроль їхньої позиції та швидкості за допомогою мікрокрокування. Це дозволяє плавно змінювати положення валу двигуна з високою точністю.

A4988 підтримує різні режими мікрокрокування, включаючи повний крок, половину кроку, 1/4, 1/8 та 1/16 кроку, що робить його універсальним у застосуванні. Він працює при напрузі живлення від 8 до 35 В, що дозволяє використовувати його з різними джерелами енергії. Крім того, драйвер має функцію налаштування максимального струму через потенціометр, що допомагає уникнути перевантаження двигуна.

A4988 також оснащений захисними функціями, такими як захист від перегріву, короткого замикання та перевантаження по струму, що робить його надійним рішенням для застосувань, де потрібне точне керування кроковими двигунами.

Схема підключення драйвера A4988 показана на рис. 4.4.

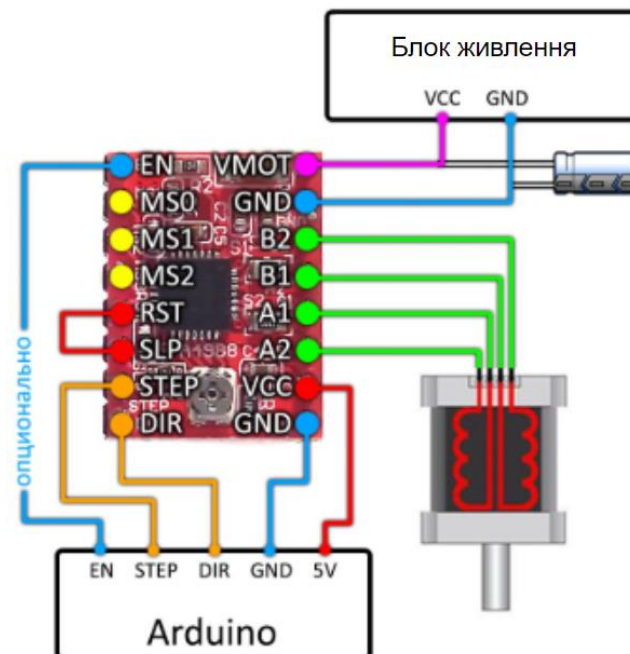


Рисунок 4.4 – Схема підключення крокового двигуна до драйверу A4988

Для зручного підключення драйвера A4988 використовується плата розширення, зовнішній вигляд якої показано на рис. 4.5.

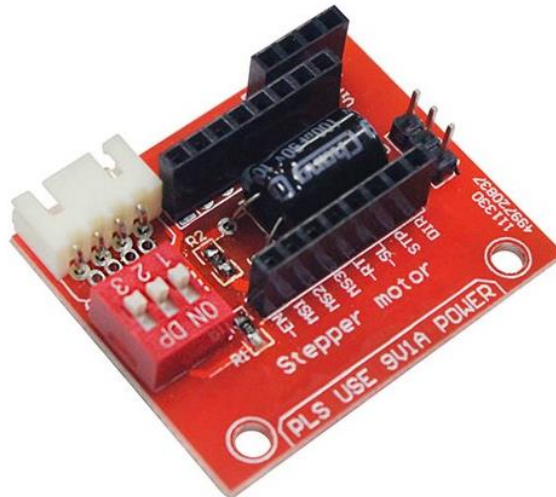


Рисунок 4.5 – Плата розширення для зручного підключення драйвера A4988

Дана плата – це спеціальний адаптер, який полегшує інтеграцію драйвера з мікроконтролерами та кроковими двигунами. Вона забезпечує просте і швидке підключення всіх необхідних компонентів завдяки наявності зручних пін-конекторів для двигуна, живлення та керуючих сигналів. Плата дозволяє окремо подавати живлення на логічну частину драйвера та на сам кроковий двигун, що робить систему більш гнучкою та захищеною.

Крім того, на платі можуть бути передбачені елементи для налаштування параметрів струму та мікрокрокування, що полегшує налаштування системи. За допомогою даної плати можна задавати крок двигуна: повний, напівкрок, 1/4 кроку, 1/8 кроку та 1/16 кроку.

На рис. 4.6 показано зібраний макет для проведення експериментальних досліджень.

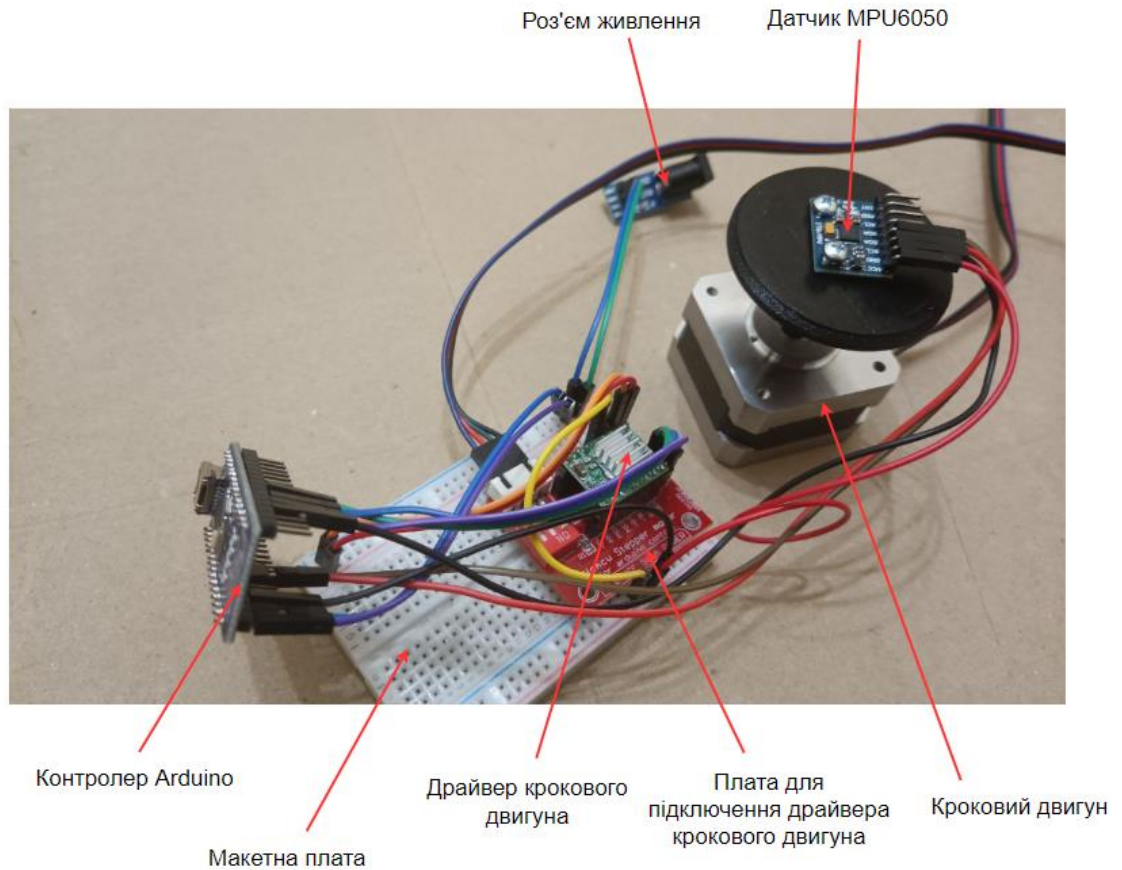
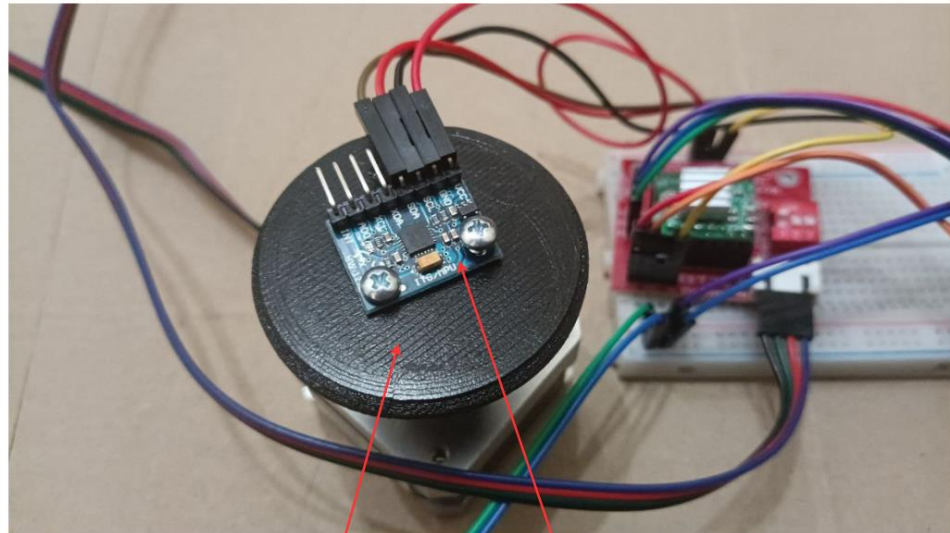


Рисунок 4.6 – зібраний макет для проведення експериментальних досліджень

Всі зазначені вище компоненти поєднує макетна плата на яку, за допомогою конекторів, підключаються датчик, контролер, драйвер крокового двигуна.

Блок живлення підключається до макету через відповідний конектор. 12В вхідної напруги подається на вхід Vin контролеру Arduino. Напруга 5В, що необхідна для живлення датчика MPU6050 та драйверу крокового двигуна, беруться з контролера Arduino.

На рис. 4.7 показано кріплення датчика MPU6050 до поворотного столика.



Поворотний столик

Датчик MPU6050

Рисунок 4.7 – Поворотний столик

Поворотний столик жорстко закріплений на вісі крокового двигуна та дозволяє повертати датчик MPU6050 на заданий кут навколо вісі Z.

4.2 Опис програмного забезпечення для контролера Arduino

Вся основна робота по обробці даних від датчика MPU6050 зосередина всередині контролера Arduino. Функціональна схема програми показана на рис. 4.8.

Як зазначено в документації на модуль MPU6050, всередині нього знаходяться два датчики: акселерометр та гіроскоп. Для реалізації запропонованого методу в програмі реалізовано поєднання сигналів двох датчиків для отримання точного позиціонування.

Дані з кожного датчика попередньо оброблюються фільтром Калмана для стабілізації отриманих даних. Після фільтрів дані потрапляють на суматор,

де за допомогою розробленого алгоритму відбувається комбінація даних з двох датчиків для отримання точного значення куту оберту.

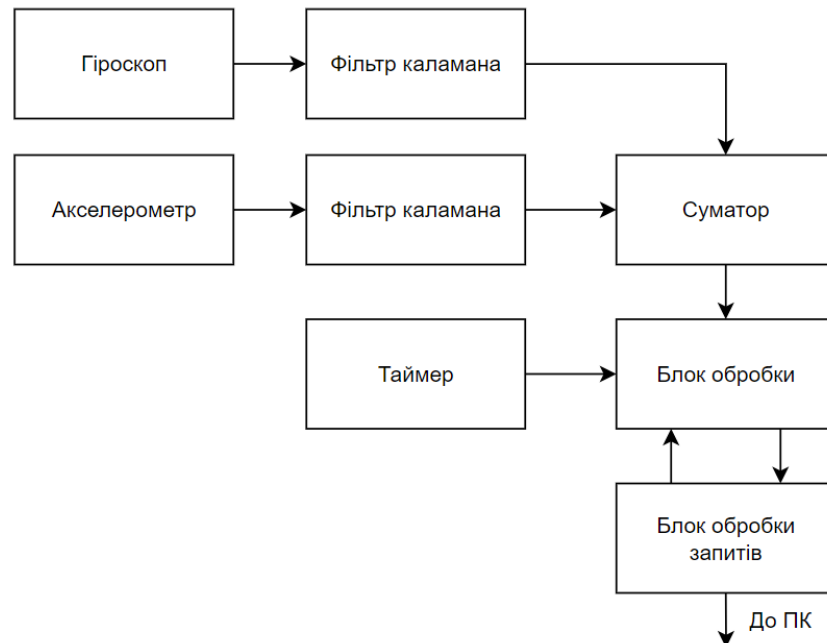


Рисунок 4.8 – Функціональна схема програми

Блок обробки за сигналами внутрішнього таймеру формує повідомлення для відправки на ПК для подальшого оброблення.

На рис. 4.9 показано алгоритм роботи програми для контролера Arduino.

Алгоритм роботи програми для обробки даних з датчика MPU6050 на контролері Arduino працює наступним чином.

На першому кроці відбувається ініціалізація датчика MPU6050. На даному етапі встановити підключення з MPU6050 через I2C інтерфейс, використовуючи бібліотеки для роботи з I2C та MPU6050. Виконується ініціалізація акселерометра і гіроскопа, налаштування їх на потрібні діапазони вимірювання (наприклад, $\pm 2g$ для акселерометра та $\pm 250^\circ/s$ для гіроскопа).

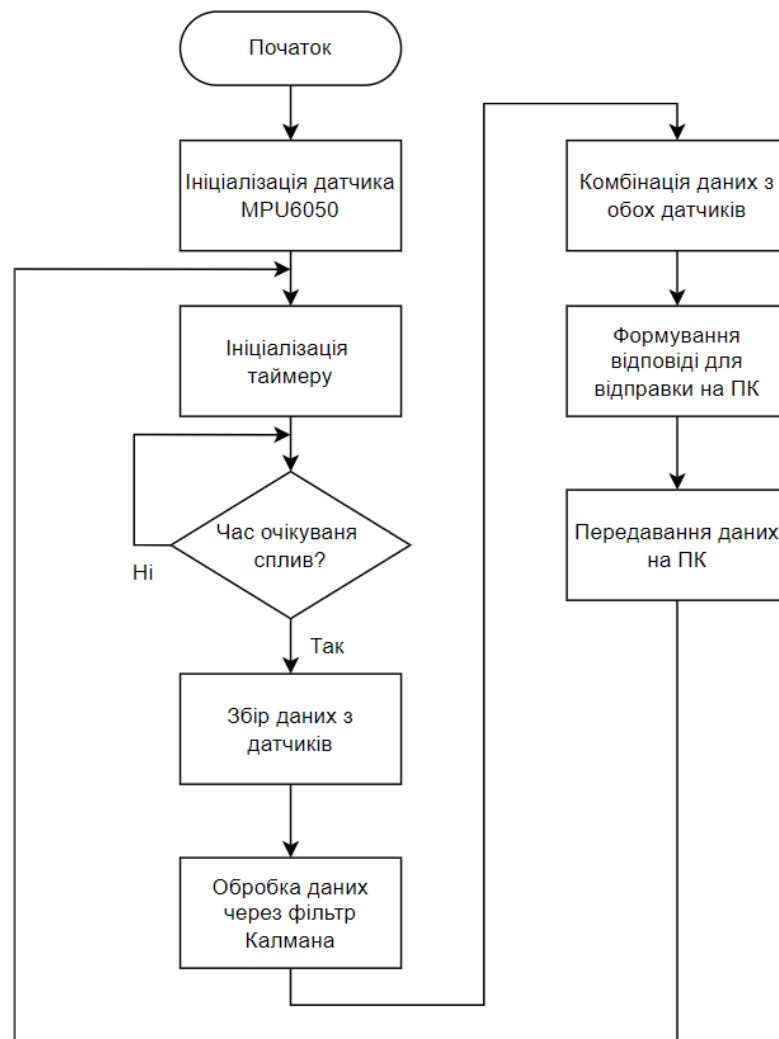


Рисунок 4.9 – Алгоритм роботи програми для контролера Arduino

Далі запускається таймер для забезпечення постійної виборки даних через задані інтервали часу. Таймер налаштовано на 10 мс для виконання збирання даних з датчика.

На етапі збирання даних відбувається читання даних з акселерометра (лінійне прискорення по трьох осях: X, Y, Z) та гіроскопа (кутову швидкість по трьох осях: X, Y, Z).

На наступному кроці виконується обробка даних через фільтр Калмана. Фільтр застосовується для кожного з датчиків (акселерометр і гіроскоп) для стабілізації отриманих даних. Для акселерометра фільтруються значення лінійного прискорення, для гіроскопа фільтрується кутова швидкість.

На наступному етапі обчислюються кути за допомогою оброблених значень обох датчиків. Використовується фільтр Калмана для поєднання цих двох джерел даних, забезпечуючи точніше та більш стабільне значення кута обертання.

Для виконання комбінації даних з обох датчиків виконується сумування стабілізованих даних з акселерометра та гіроскопа для отримання точного значення кута обертання.

Для передавання даних на ПК відбувається формування пакету протоколу Modbus. Сформовані дані передаються через послідовний інтерфейс.

Програма, що реалізує даний алгоритм наведена у додатку А.

Зчитування даних з датчиків MPU6050 відбувається за допомогою функцій:

```
Vector norm_G = mpu.readNormalizeGyro();
```

```
Vector norm_A = mpu.readNormalizeAccel();
```

За допомогою вказаних функцій зчитуються нормалізовані значення з гіроскопа та акселерометра, що надаються інерційним датчиком MPU-6050. Змінна `norm_G` містить нормалізовані значення кутової швидкості, а `norm_A` – прискорення.

Використовуючи значення кутової швидкості з гіроскопа, програма обчислює кути нахилу (Pitch), повороту (Roll) та ротації (Yaw):

```
pitch = pitch + norm_G.YAxis * timeStep;
```

```
roll = roll + norm_G.XAxis * timeStep;
```

```
yaw = yaw + norm_G.ZAxis * timeStep;
```

Вони оновлюються на основі часу (`timeStep`) та відповідних осей гіроскопа (`XAxis`, `YAxis`, `ZAxis`).

Обчислення значення прискорення по осі Z, помножене на часовий інтервал `timeStep` виконується для обчислення акселерації по осі Z:

```
ax = norm_A.ZAxis * timeStep;
```

Для покращення точності вимірювань кута ротації (Yaw) застосовується фільтр Калмана:

```
float kalAngleZ = kalmanX.getAngle(ax, yaw, millis());
Kalman_angle = (int)kalAngleZ;
```

Функція `getAngle()` приймає значення акселерометра по осі Z (`ax`), значення кута Yaw та поточний час (`millis()`). В результаті отримується відфільтрований кут, що зберігається у змінній `Kalman_angle`.

Далі програма перевіряє, чи поточний кроковий двигун знаходиться в позиції, меншій або більшій за цільову (`target_step`). Якщо поточний крок (`cur_step`) менший за цільовий, виконується інкрементування кроків, рухаючи двигун вперед. Якщо більший – зменшення кроків для руху назад. Під час цього генеруються імпульси на лініях CLK, DIR, та EN для керування напрямком і швидкістю руху двигуна. Якщо цільове положення досягнуто, двигун вимикається (`EN = HIGH`).

4.3 Опис програмного забезпечення для персонального комп'ютера

Для відображення результатів експериментальних досліджень розроблена програма для персонального комп'ютера. На рис. 4.10 показано інтерфейс програми.

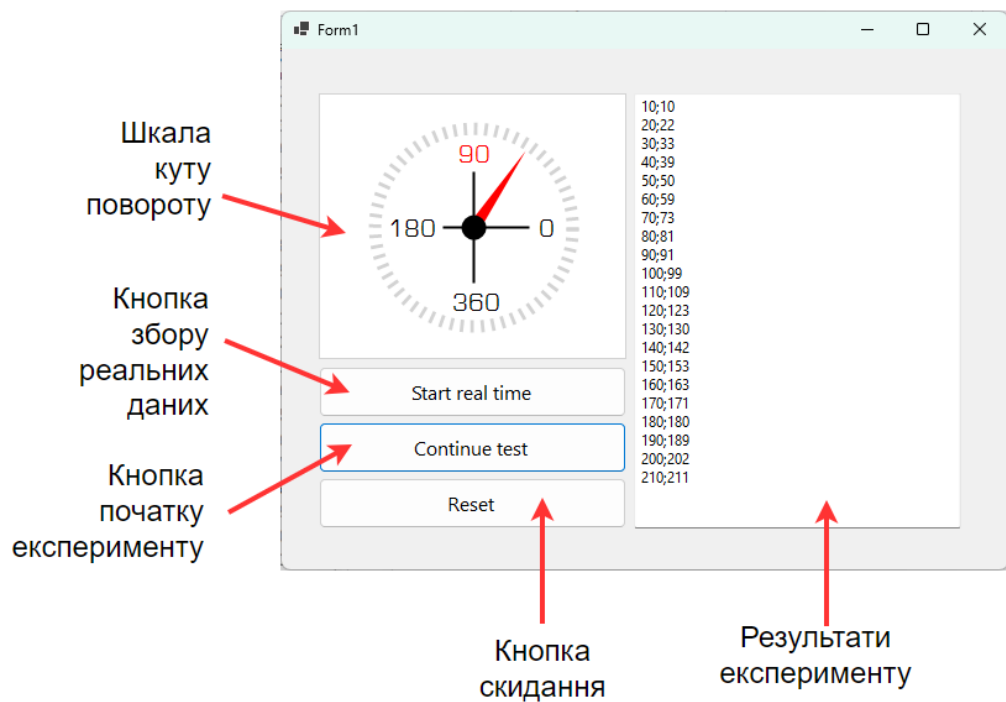


Рисунок 4.10 – Інтерфейс програми для відображення результатів експериментальних досліджень

На основній формі програми розташовані наступні органи керування:

- кнопка збору реальних даних;
- кнопка початку циклу експериментальних досліджень;
- кнопка скидання поточних результатів;
- шкала для відображення поточного куту оберту;
- вікно для відображення результатів експерименту.

Для відображення даних з макету в реальному часі потрібно натиснути на кнопку «Start real time». Після цього запускається відповідна функція (рис. 4.11).

Функція `button1_Click`, яка викликається при натисканні кнопки «Start real time», виконує ініціалізацію послідовного порту, зчитування даних із текстового поля і передає команди підлеглому пристрою за протоколом Modbus RTU.

```

1 reference
private void button1_Click(object sender, EventArgs e)
{
    if (serialPort == null)
    {
        serialPort = new SerialPort(); //Create a new SerialPort object.
        serialPort.PortName = "COM4";
        serialPort.BaudRate = 115200;
        serialPort.DataBits = 8;
        serialPort.Parity = Parity.None;
        serialPort.StopBits = StopBits.One;
        serialPort.ReadTimeout = 200;
        serialPort.WriteTimeout = 200;
        serialPort.Open();
        master = ModbusSerialMaster.CreateRtu(serialPort);
    }
    byte slaveID = 10;
    ushort startAddress = 0;
    ushort value = 1;
    angle = ushort.Parse(textBox1.Text);

    master.WriteSingleRegister(slaveID, 00, 2); //reset
    Thread.Sleep(20);
    master.WriteSingleRegister(slaveID, 00, 1); //Calibrate
    Thread.Sleep(20);

    master.WriteSingleRegister(slaveID, startAddress, value);
    timer1.Start();
}

```

Рисунок 4.11 – Функція запуску зчитування даних в реальному часі

Спочатку перевіряється, чи не є об'єкт serialPort порожнім. Якщо він не ініціалізований, створюється новий екземпляр SerialPort, який налаштовується для роботи з портом COM4, задається швидкість передачі даних (115200 біт/с), 8 біт даних, відсутність парності, 1 стоп-біт і тайм-аут на читання та запис по 200 мс. Після цього відкривається з'єднання і створюється об'єкт ModbusSerialMaster для обміну даними за протоколом Modbus RTU через цей серійний порт.

Далі програма визначає ідентифікатор підлеглого пристрою (slaveID = 10), початкову адресу регістру (startAddress = 0) і значення, яке буде записане в цей регістр (value = 1). Кут повороту, який користувач вводить у текстове поле, перетворюється на тип ushort і зберігається у змінній angle.

Після цього програма відправляє команди до підлеглого пристрою. Спочатку викликається команда скидання, яка записує значення 2 в регістр 00

пристрою, що може вказувати на необхідність перезавантаження або скидання. Потім програма викликає команду калібрування, яка записує значення 1 в той самий регістр, що ініціює процес калібрування пристрою. Між цими командами встановлюється затримка у 20 мілісекунд, щоб дати пристрою час на обробку команд.

Після цього програма записує значення 1 у вказаний раніше регістр `startAddress = 0` підлеглого пристрою з ID `slaveID = 10`. Нарешті, запускається таймер `timer1`, який буде періодично оновлювати або опитувати стан підлеглого пристрою.

Фрагмент функції обробки переривань таймера показано на рис. 4.12.

```

1 reference
private void timer1_Tick(object sender, EventArgs e)
{
    timer1.Enabled = false;
    byte slaveID = 10;
    if (is_reset == true)
    {
        master.WriteSingleRegister(slaveID, 00, 2); //Calibrate
        Thread.Sleep(20);
        master.WriteSingleRegister(slaveID, 00, 1); //Calibrate
        Thread.Sleep(20);
        is_reset = false;
    }
    ushort startAddress = 1;
    ushort numOfPoints = 3;
    ushort[] holding_register = master.ReadHoldingRegisters(slaveID, startAddress, numOfPoints);
    ushort value = holding_register[0];
    dir = holding_register[1];
    metallVal = holding_register[2];

    label1.Text = metallVal.ToString();

    textBox2.Text = value.ToString();
    panel1.Refresh();

    int compas = value;
    if (dir == 1) compas = 360 - compas;

    dashCompass1.update(compas);
    timer1.Enabled = true;
}

```

Рисунок 4.12 – Фрагмент функції обробки переривань таймера

Функція `timer1_Tick` викликається після кожного спрацьовування таймера і виконує кілька завдань, пов'язаних із періодичним опитуванням підлеглого пристрою через Modbus RTU, а також оновленням інтерфейсу користувача.

Спочатку таймер вимикається, щоб уникнути повторного виклику функції під час її виконання. Встановлюється ідентифікатор підлеглого пристрою `slaveID = 10`, який використовується для відправки команд. Якщо змінна `is_reset` дорівнює `true`, виконується скидання і калібрування пристрою: у регістр `00` записується значення `2` для скидання, після затримки у `20` мілісекунд — значення `1` для калібрування. Після цього змінна `is_reset` скидається в `false`, щоб уникнути повторної калібровки.

Далі здійснюється читання трьох регістрів починаючи з адреси `1` підлеглого пристрою. Перший регістр містить значення кута або іншої величини, другий – напрямок. Зчитані значення присвоюються відповідним змінним: `value` – це кут, `dir` – напрямок. Ці дані оновлюються в інтерфейсі: значення сенсора металу відображається у `label1`, кут – у `textBox2`, а для оновлення графічного елемента інтерфейсу панелі `panel1` викликається метод `Refresh()`.

Далі обчислюється значення датчику повороту. Якщо напрямок `dir` дорівнює `1`, значення кута інвертується за формулою $360 - value$. Після цього нове значення датчику повороту оновлюється на графічному елементі `dashCompass1`.

Наприкінці роботи функції таймер знову вмикається для наступного циклу опитування.

4.4 Аналіз результатів експерименту

В процесі виконання експериментальних досліджень отримані набори даних для двох випадків:

- використання «сирих» даних з гіроскопу;
- використання даних після застосування методу комбінації даних з різних типів датчиків (акселерометр та гіроскоп), а також після застосування фільтра Калмана.

Фрагмент отриманих даних з гіроскопу без оброблення наведено в табл. 4.1.

Таблиця 4.1 – Фрагмент отриманих даних з гіроскопу без оброблення

Номер експерименту	Реальний кут оберту, грд.	Обчислений кут оберту, грд.	Похибка
1	10	12	2
2	20	24	4
3	30	36	6
4	40	48	8
5	50	61	11
6	60	68	8
7	70	81	11
8	80	86	6
9	90	110	20

На рис. 4.13 показано графік зміни виміряних та реальних значень, а також обчислена похибка на кожному вимірі.

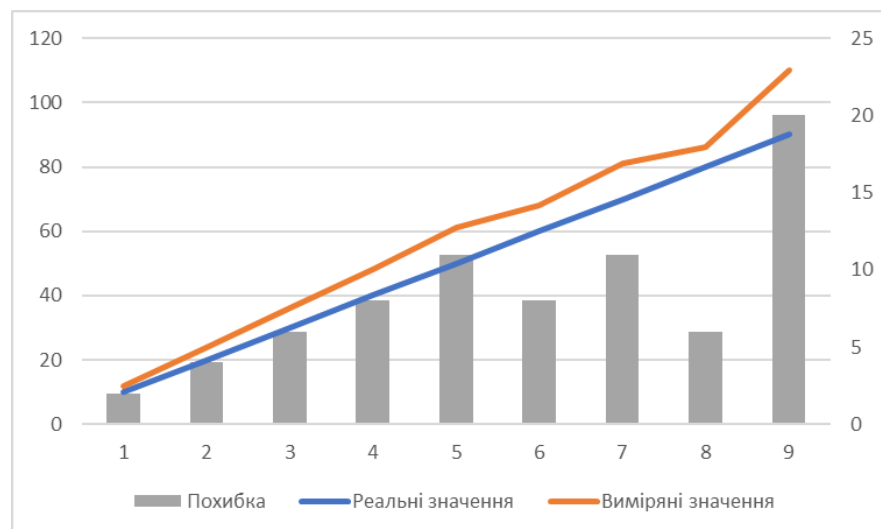


Рисунок 4.13 – Графік зміни виміряних та реальних значень куту оберту

Аналіз отриманих даних показує систематичне зростання похибки між реальним і обчисленим кутом обертут під час експерименту.

Похибка в кожному експерименті починається від невеликих значень (2 градуси в першому експерименті) і збільшується до суттєвих розмірів (20 градусів у дев'ятому експерименті). Це свідчить про систематичну помилку в обчисленнях та у вимірювальній системі.

Зміна похибки в залежності від кута повороту показана на рис. 4.14.

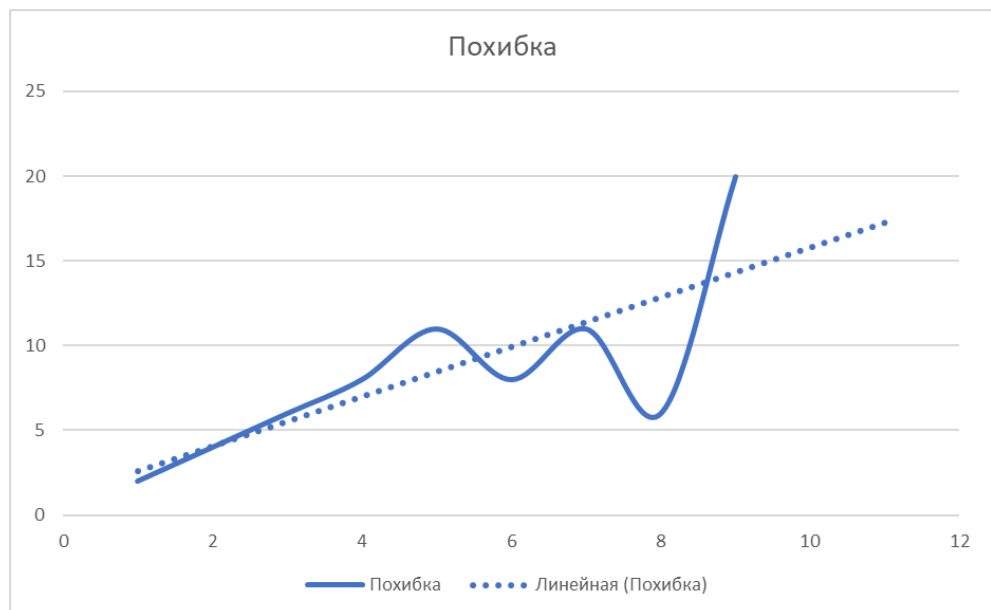


Рисунок 4.14 – Зміна похибки в залежності від кута повороту

Похибка збільшується пропорційно до зростання реального кута обертання. Це може вказувати на нелінійність системи вимірювання або накопичення помилок у процесі обчислень. Наприклад, при реальному куті 10 градусів похибка становить 2 градуси (20% від реального значення). При реальному куті 90 градусів похибка сягає 20 градусів (22% від реального значення).

Обчислений кут обертання в кожному експерименті завжди більше, ніж реальний. Це свідчить про те, що вимірювальна система або алгоритм обчислення систематично переоцінює значення кута.

Хоча загальна тенденція зростання похибки є очевидною, у деяких експериментах вона зростає більш нерівномірно. Наприклад, в експерименті 5 похибка стрибнула до 11 градусів (при реальному куті 50 градусів), в експерименті 6 вона зменшилася до 8 градусів, хоча реальний кут продовжує зростати.

Таким чином, похибка в обчисленні кута обертання систематично зростає зі збільшенням реального кута. Це свідчить про проблеми з калібруванням сенсорів або про нелінійність алгоритму обробки даних. Для покращення точності необхідно використати запропонований метод обчислення, та застосувати додаткову корекцію похибки.

Після застосування методу комбінації показань з двох датчиків (акселерометра та гіроскопу), а також застосування фільтру Калмана були отримані наступні результати експерименту (табл. 4.2).

Таблиця 4.2 – Експериментальні дані при використанні запропонованого методу

Номер експерименту	Реальний кут оберту, грд.	Обчислений кут оберту, грд.	Похибка	Номер експерименту	Реальний кут оберту, грд.	Обчислений кут оберту, грд.	Похибка
1	10	10	0	19	190	190	0
2	20	21	1	20	200	200	0
3	30	31	1	21	210	211	1
4	40	43	3	22	220	221	1
5	50	51	1	23	230	230	0
6	60	62	2	24	240	239	1
7	70	69	1	25	250	253	3
8	80	82	2	26	260	263	3
9	90	91	1	27	270	272	2
10	100	100	0	28	280	279	1

Продовження таблиці 4.2

Номер експерименту	Реальний кут оберту, грд.	Обчислений кут оберту, грд.	Похибка	Номер експерименту	Реальний кут оберту, грд.	Обчислений кут оберту, грд.	Похибка
11	110	109	1	29	290	291	1
12	120	122	2	30	300	300	0
13	130	133	3	31	310	309	1
14	140	142	2	32	320	322	2
15	150	149	1	33	330	332	2
16	160	162	2	34	340	343	3
17	170	172	2	35	350	350	0
18	180	183	3	36	360	361	1

За даним з табл. 4.2 побудовано графік зміни реального та виміряного куту оберту, що показано на рис. 4.15.

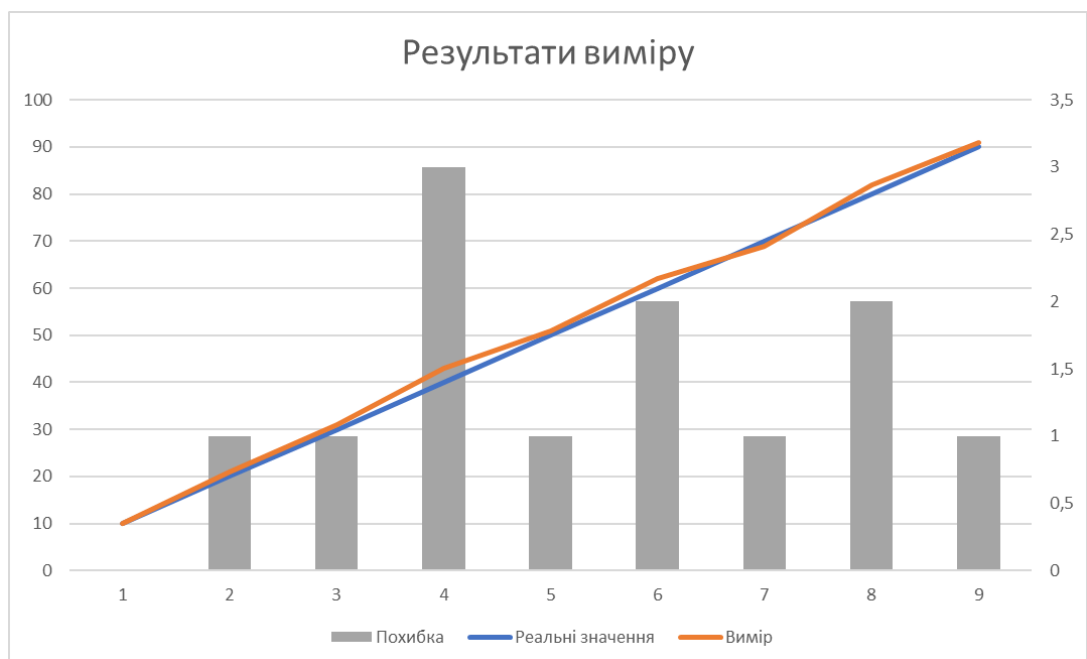


Рисунок 4.15 – Графік зміни реального та виміряного куту оберту

Аналіз даних після застосування комбінованого методу поєднання інформації з двох датчиків (акселерометра та гіроскопа) демонструє значне поліпшення точності вимірювання кутів обертання порівняно з попередніми даними, отриманими при використанні лише одного датчика.

Низька похибка в більшості експериментів не перевищує 3 градусів. У багатьох випадках похибка дорівнює 0 градусам, що свідчить про краще співпадіння обчисленого кута з реальним (наприклад, у експериментах 1, 10, 19, 20, 23, 30, 35).

На рис. 4.16 показано залежність похибки від куту повороту.

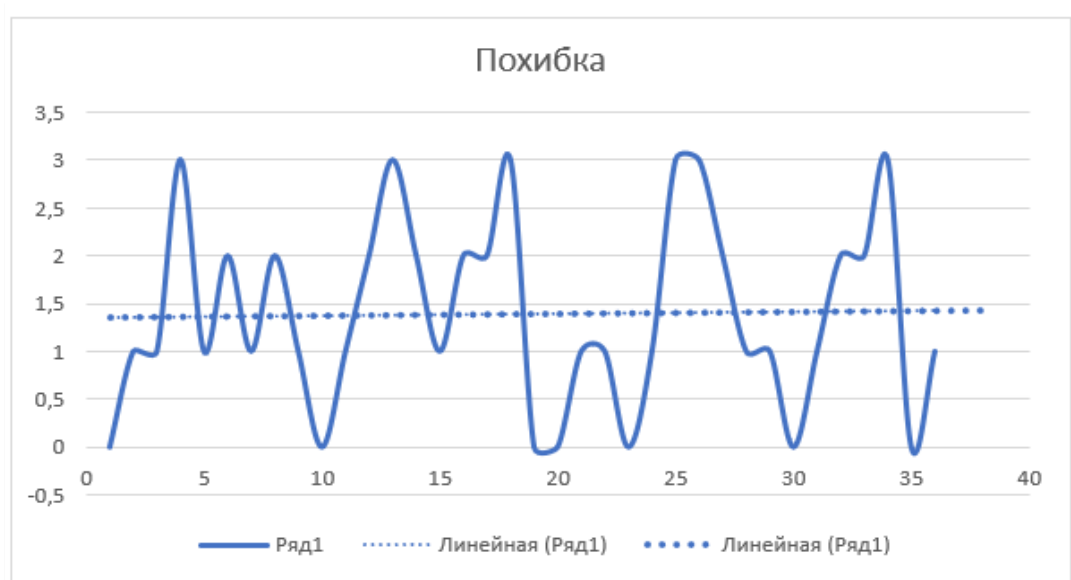


Рисунок 4.16 – Залежність похибки від куту повороту

Найбільша похибка спостерігається в кількох експериментах, де вона досягає 3 градусів (експерименти 4, 13, 25, 26, 34), проте ця похибка значно менша порівняно з попередніми даними. У більшості експериментів похибка знаходиться в межах 1-2 градусів, що свідчить про високу стабільність вимірювань. Окремі випадки, коли обчислений кут трохи менший за реальний (наприклад, експеримент 7, де при реальному значенні 70 градусів було виміряно 69), не є суттєвими та знаходяться в межах допустимої похибки.

Порівняно з попередніми даними, де похибка систематично зростала зі збільшенням кута обертання і досягала 20 градусів (як у дев'ятому експерименті), після застосування комбінованого методу похибка не перевищує 3 градусів. Це свідчить про значне покращення точності. Також у нових даних відсутня тенденція до систематичного збільшення похибки з ростом кута, як це було в попередніх вимірюваннях, де похибка зростала від 2 градусів у першому експерименті до 20 градусів у дев'ятому.

4.5 Висновки по четвертому розділу

Після використання комбінованого методу похибка залишається стабільно низькою, навіть при великих кутах обертання до 360 градусів. Похибка в нових експериментах значно знизилася на всіх етапах, особливо при великих кутах, де попередні вимірювання були менш точними. Наприклад, при реальному куті 90 градусів у попередніх даних похибка становила 20 градусів, тоді як після використання комбінованого методу — лише 1 градус. Раніше обчислений кут систематично завищувався, але після використання комбінованого методу таких значних відхилень більше не спостерігається.

Таким чином, застосування комбінованого методу поєднання інформації з акселерометра та гіроскопа значно підвищило точність вимірювань кута обертання мобільного робота. Похибка у більшості експериментів становить лише 1-3 градуси, що набагато краще порівняно з попередніми даними. Цей метод демонструє високу стабільність вимірювань навіть при великих кутах обертання, що робить його ефективним для використання в системах управління роботами або іншими мобільними об'єктами.

ВИСНОВКИ

В результаті виконання кваліфікаційної роботи виконано вдосконалення методу визначення куту повороту мобільної платформи для покращення процесу слідкування за визначеною траєкторією руху на основі даних від акселерометру та гіроскопу.

Проведено аналіз систем орієнтації безпілотних мобільних роботів в просторі з використанням МЕМС датчиків. Показано, що застосування системи, що одночасно аналізує сигнали від акселерометра та гіроскопа, є важливим кроком до підвищення точності навігації наземних мобільних роботів. Поєднання даних цих сенсорів дозволяє компенсувати їхні індивідуальні недоліки, знижуючи рівень похибок і забезпечуючи стабільність траєкторії руху робота в умовах реального часу.

Проведено аналіз методів та принципів використання інерційних систем навігації у випадку застосування засобів радіоелектронної боротьби. Застосування інерційних систем навігації (ІНС) набуває особливої важливості в сучасних умовах ведення бойових дій та використання радіоелектронних засобів впливу.

Проаналізовані переваги та недоліки одночасного використання акселерометра та гіроскопа для вирішення задачі підвищення точності позиціонування.

Проведено аналіз методу визначення куту повороту мобільного роботу з використанням МЕМС датчиків. Виконано огляд методів фільтрації даних від МЕМС датчиків. Як показали проведені дослідження, фільтрація сигналів необхідна для забезпечення точності та стабільності роботи мобільних роботів, що дозволяє їм більш ефективно орієнтуватися в просторі та виконувати свої завдання.

Для точного визначення положення та орієнтації робота виконується поєднання даних з акселерометра і гіроскопа, що дозволяє отримати точнішу інформацію про рухи, компенсуючи слабкі сторони кожного з сенсорів.

Проведені експериментальні дослідження показали працездатність запропонованого методу. Таким чином, застосування комбінованого методу поєднання інформації з акселерометра та гіроскопа значно підвищило точність вимірювань кута обертання мобільного робота. Похибка у більшості експериментів становить лише 1-3 градуси, що набагато краще порівняно з попередніми даними. Цей метод демонструє високу стабільність вимірювань навіть при великих кутах обертання, що робить його ефективним для використання в системах управління роботами або іншими мобільними об'єктами.

ПЕРЕЛІК ДЖЕРЕЛ ПОСИЛАНЬ

1. ДСТУ 3008–2015. Звіти у сфері науки і техніки. Структура і правила оформлення. Документація. – Введ. 2015-06-22. - К.: Держстандарт України, 2015. - 31 с.
2. Методичні вказівки з підготовки та захисту кваліфікаційної роботи здобувачами другого (магістерського) рівня вищої освіти спеціальності 174 Автоматизація, комп'ютерно-інтегровані технології та робототехніка, освітньо-професійних програм: «Комп'ютерно-інтегровані технологічні процеси і виробництва», «Комп'ютеризовані та робототехнічні системи» / Упоряд. І. Ш. Невлюдов, Р. В. Артюх, В. В. Безкоровайний, Н. П. Демська, В. В. Євсєєв, О. І. Филипенко, О. М. Цимбал. Харків: ХНУРЕ, 2023. 55 с..
3. Кафедра технології та автоматизації виробництва РЕЗ та ЕОЗ [Електронний ресурс] – Режим доступу: [www/ URL: https://tapr.nure.ua/wp-content/uploads/2020/12/buklet_17-30.pdf](http://www.tapr.nure.ua/wp-content/uploads/2020/12/buklet_17-30.pdf)
4. Основи наукових досліджень: Навч. посібник / І.Ш. Невлюдов, Ю.М. Олександров, А.О. Андрусевич, О.О. Чала. – Кривий Ріг: Криворізький коледж НАУ, 2019. – 396 с.
5. Гіроскопи на радіокерованих моделях. Радіокеровані моделі та аксесуари - modelistam.com.ua. URL: <https://modelistam.com.ua/ua/giroskopy-radioupravlyaemyh-modelyah-a-43/> (дата звернення: 22.10.2024).
6. Акселерометр – як він працює і для чого потрібен?. Elektronische Teile. Vertriebshändler und Onlineshop - Transfer Multisort Elektronik Deutschland. URL: <https://www.tme.eu/ua/news/library-articles/page/22568/aksielromietr-iak-vin-pratsiuie-i-dlia-chogho-potribien/> (дата звернення: 22.10.2024).
7. Kowalczyk Z., Merta T. Evaluating the Position of a Mobile Robot Using Accelerometer Data. *Advances in Intelligent Systems and Computing*. Cham, 2015. P. 131–143. URL: https://doi.org/10.1007/978-3-319-23180-8_10.

8. Liu H. H. S., Pang G. K. H. Accelerometer for mobile robot positioning. *IEEE Transactions on Industry Applications*. 2001. Vol. 37, no. 3. P. 812–819. URL: <https://doi.org/10.1109/28.924763>.

9. Combine Gyroscope and Accelerometer Data. *Stack Overflow*. URL: <https://stackoverflow.com/questions/1586658/combine-gyroscope-and-accelerometer-data> (date of access: 22.10.2024).

10. Ostafew C. J., Schoellig A. P., Barfoot T. D. Visual teach and repeat, repeat, repeat: Iterative Learning Control to improve mobile robot path tracking in challenging outdoor environments. 2013 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS 2013), Tokyo, 3–7 November 2013. 2013. URL: <https://doi.org/10.1109/iros.2013.6696350>

11. Compensation of Magnetic Disturbances Improves Inertial and Magnetic Sensing of Human Body Segment Orientation / D. Roetenberg et al. *IEEE Transactions on Neural Systems and Rehabilitation Engineering*. 2005. Vol. 13, no. 3. P. 395–405. URL: <https://doi.org/10.1109/tnsre.2005.847353>.

12. Du J., Gerdtnan C., Lindén M. Signal Quality Improvement Algorithms for MEMS Gyroscope-Based Human Motion Analysis Systems: A Systematic Review. *Sensors*. 2018. Vol. 18, no. 4. P. 1123. URL: <https://doi.org/10.3390/s18041123>.

13. Neto P., Pires J. N., Moreira A. P. 3-D position estimation from inertial sensing: Minimizing the error from the process of double integration of accelerations. *IECON 2013 - 39th Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society*, Vienna, Austria, 10–13 November 2013. 2013. URL: <https://doi.org/10.1109/iecon.2013.6699780>.

14. Algorithm for 3D orientation estimation based on Kalman Filter and Gradient Descent / S. Yean et al. 2016 IEEE 7th Annual Information Technology, Electronics and Mobile Communication Conference (IEMCON), Vancouver, BC, Canada, 13–15 October 2016. 2016. URL: <https://doi.org/10.1109/iemcon.2016.7746263>.

15. Кватерніони – Вікіпедія. Вікіпедія. URL: <https://uk.wikipedia.org/wiki/Кватерніони> (дата звернення: 18.12.2024).

16. Renaudin V., Combettes C. Magnetic, Acceleration Fields and Gyroscope Quaternion (MAGYQ)-Based Attitude Estimation with Smartphone Sensors for Indoor Pedestrian Navigation. *Sensors*. 2014. Vol. 14, no. 12. P. 22864–22890. URL: <https://doi.org/10.3390/s141222864>.