УДК 629.7.054.07

Черняк М.Г., к. т. н., доцент

Третяк А.О., студентка

КПІ ім. Ігоря Сікорського Київ, Україна

МІКРОМЕХАНІЧНИЙ АКСЕЛЕРОМЕТРИЧНИЙ ІНЕРЦІАЛЬНИЙ ВИМІРЮВАЛЬНИЙ МОДУЛЬ ДЛЯ ВИЗНАЧЕННЯ ПАРАМЕТРІВ РУХУ ЛІТАЛЬНОГО АПАРАТУ

Вступ. Сучасні інерціальні вимірювальні модулі (ІВМ) є невід'ємною складовою систем автономної навігації. Одним із перспективних напрямів розвитку ІВМ є створення безгіроскопічних систем, у яких кутові швидкості визначаються не за допомогою традиційних гіроскопів, а шляхом обробки даних акселерометрів. Такий підхід дозволяє суттєво зменшити вартість, енергоспоживання та габарити пристрою, одночасно підвищуючи його надійність і технологічну гнучкість.

Постановка проблеми. У безгіроскопічних ІВМ, де оцінка кутових швидкостей виконується на основі сигналів акселерометрів, ключовим є правильне просторове розміщення сенсорів. Від орієнтації чутливих осей залежить можливість виокремлення інформації про лінійне прискорення та кутову швидкість об'єкта.

Незважаючи на теоретичні дослідження у цій галузі, досі не існує усталеного підходу до практичного визначення оптимальної орієнтації сенсорів у компактному акселерометричному ІВМ. Таким чином, постає задача: визначити просторову конфігурацію акселерометрів, яка забезпечить повноцінне відновлення параметрів руху та буде придатною до реалізації в мініатюрному пристрої. Додатково необхідно розробити структурну схему та описати відповідний алгоритм обробки сигналів, що забезпечить точну оцінку навігаційних параметрів.

Методологія досліджень. Об'єктом розробки є акселерометричний інерціальний вимірювальний модуль, який призначений для визначення

параметрів руху літального апарату. Принцип дії даного ІВМ ґрунтується на використанні лише акселерометрів для вимірювання лінійного прискорення та кутової швидкості шляхом створення керованого руху платформи, на якій розміщені сенсори. Застосування масиву просторово рознесених акселерометрів дозволяє визначати кутові швидкості за допомогою алгоритмічної обробки, що, за словами Вільяма Конліна, суттєво спрощує конструкцію та виключає потребу в гіроскопах [1, с. 3].

Результати. Було визначено оптимальну конфігурацію акселерометрів на основі патенту US4841773 "Miniature Inertial Measurement Unit" [2]. Конструктивно ІВМ складається з трьох пар одноосьових акселерометрів, закріплених на жорсткій платформі, яка здійснює контрольовані гармонічні коливання навколо центральної осі Z.

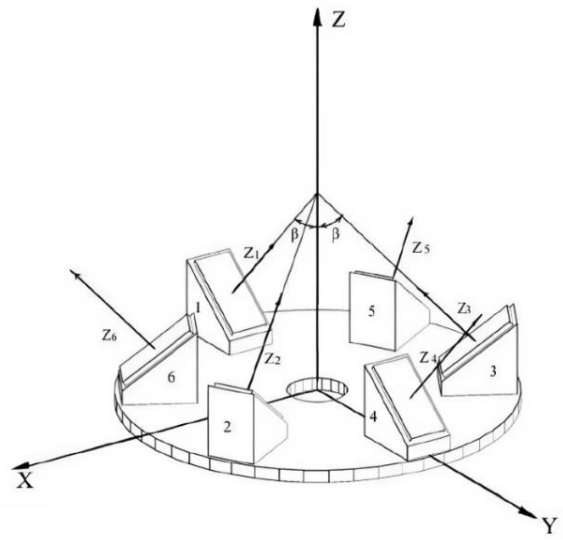


Рисунок. 1 Конфігурація акселерометрів на платформі ІВМ

Акселерометри розміщені під однаковим кутом β до площини платформи та на однаковій відстані ρ від її центру. Таким чином, осі чутливості акселерометрів 1–3 нахилені до вертикальної осі Z під однаковим кутом β, при цьому кожен із акселерометрів 4–6 орієнтований паралельно до відповідного акселерометра з першої трійки, утворюючи три пари з однаково спрямованими осями чутливості.

Коливальний рух платформи з відомими параметрами (амплітуда, частота) створює умови для виникнення прискорення Коріоліса, яке реєструється акселерометрами та використовується для визначення кутової швидкості.

Було розроблено просторову схему орієнтації локальних осей акселерометрів відносно платформи (рис. 2).

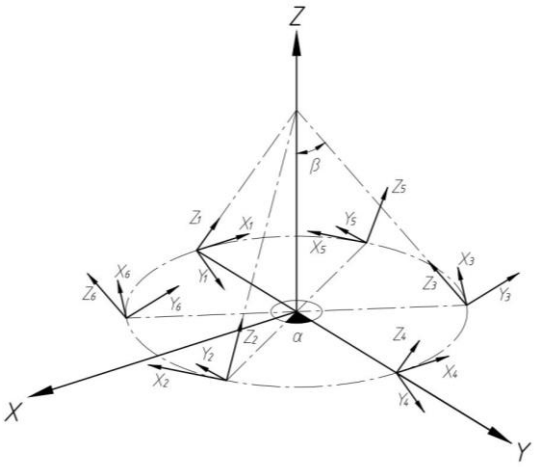


Рисунок. 2 – Просторова схема орієнтації локальних осей акселерометрів відносно платформи

До кожної осі Z_i, що відповідає напрямку осі чутливості акселерометра у площині, перпендикулярній до неї, умовно задаються допоміжні осі X_i і Y_i, які разом утворюють локальну систему координат акселерометра. Це дозволяє математично описати просторову орієнтацію ІВМ.

Реалізовано структурну схему ІВМ, яка передбачає використання лише акселерометрів, розміщених у спеціальній просторовій конфігурації. Така побудова забезпечує формування вимірювальних сигналів, що містять інформацію як про лінійне прискорення, так і про кутову швидкість об’єкта, без необхідності застосування гіроскопів.

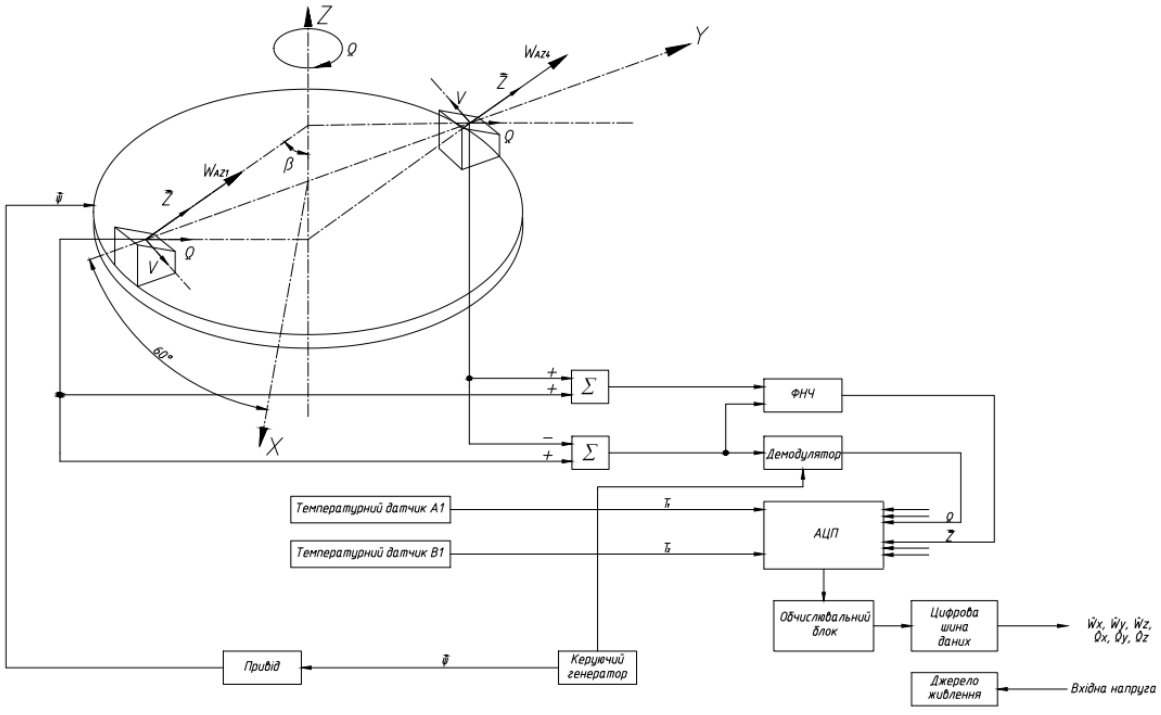


Рисунок. 3 – Структурна схема ІВМ

На рис. 3 представлено структурну схему розроблюваного ІВМ з симетричним розміщенням акселерометрів на платформі, що здійснює гармонічні коливання навколо осі Z. Кожен із акселерометрів реєструє проекцію абсолютного прискорення на свою чутливу вісь. Повний векторний вираз абсолютного прискорення має вигляд [3, с.56 (5.12)]:

$$\overrightarrow{W_a} = \frac{d\vec{v}_e}{dt} + \frac{d\vec{v}_r}{dt} = \frac{d\vec{v}_o}{dt} + \frac{d\vec{\Omega}}{dt}\vec{r} = \overrightarrow{W_o} + \dot{\vec{\Omega}} \times \vec{r} + \vec{\Omega}\left(\vec{\Omega} \times \vec{r}\right) + 2\vec{\Omega} \times \frac{d\vec{r}}{dt} + \frac{d^2\vec{r}}{dt^2} \quad , \quad (1)$$

Де $\overrightarrow{W_a}$ – абсолютне прискорення; $\overrightarrow{W_o}$ – прискорення полюса, тобто базової точки, до якої прив'язаний акселерометр; $\dot{\vec{\Omega}} \times \vec{r}$ – обертальне прискорення; $\dot{\vec{\Omega}}$ – кутове прискорення; $\vec{r}$ – радіус-вектор точки установки акселерометра в рухомій системі координат XYZ; $\vec{\Omega}\left(\vec{\Omega} \times \vec{r}\right)$ – доосьове (доцентрове) прискорення; $\vec{\Omega}$ – кутова швидкість; $2\vec{\Omega} \times \frac{\mathrm{d}\vec{\mathrm{r}}}{\mathrm{dt}}$ – прискорення Коріоліса; $\frac{d\vec{r}}{dt} = \vec{V}_r$ – відносна швидкість; $\frac{d^2\vec{r}}{dt^2} = \overrightarrow{W_r}$ – відносне прискорення.

Визначено алгоритм обробки сигналів отриманих із акселерометрів. Завдяки симетричному розміщенню сенсорів із паралельними осями чутливості обробка вихідних сигналів кожної пари здійснюється шляхом сумування та різниці. Сумарний канал забезпечує визначення лінійного прискорення. Різницевий канал дозволяє виділити складову сигналу, пропорційну кутовій швидкості, а також додаткові компоненти, пов'язані з проєкціями Wx і Wy, які виникають унаслідок рознесення акселерометрів на монтажній платформі з неспівпадінням осей X і Y приладової системи координат та коливань платформи у горизонтальній площині.

Сигнали підсумовуючого і різницевого каналів подаються на фільтр нижніх частот (ФНЧ), який усуває високочастотні компоненти, зокрема ті, що спричинені коливанням платформи, і пропускає лише низькочастотну складову, яка відповідає дійсному лінійному прискоренню об'єкта. Натомість

сигнал з різницевого каналу подається окремо на демодулятор. Демодуляція дозволяє виділити складову сигналу, пропорційну кутовій швидкості об'єкта.

Після попередньої обробки отримані аналогові сигнали та дані температурних датчиків надходять на аналого-цифровий перетворювач. Оцифровані дані обробляються обчислювальним модулем, що формує оціночні значення лінійного прискорення та кутової швидкості з урахуванням температурної компенсації. Вихідний пакет даних передається зовнішнім системам через стандартний інтерфейс, а стабільність роботи забезпечується окремим джерелом живлення.

Висновки. У результаті дослідження визначено оптимальну просторову конфігурацію шести одноосьових акселерометрів, яка дозволяє повноцінно визначати параметри руху об’єкта.

Реалізовано структурну схему ІВМ та визначено алгоритм обробки сигналів, який забезпечує розділення інформації про лінійне прискорення та кутову швидкість об’єкта шляхом збудження гармонічного коливального руху платформи та подальшої математичної обробки отриманих сигналів на виході сенсорів. Застосування фільтрації, синхронної демодуляції та температурної компенсації дозволяє підвищити точність обчислення навігаційних параметрів. Структура модуля забезпечує його інтеграцію з зовнішніми системами через стандартний цифровий інтерфейс, що робить розробку перспективною для застосування в компактних і енергоефективних авіаційних системах навігації.

Джерела

1. Conlin W. T. Review Paper: Inertial Measurement. arXiv. 2017. P. 10. URL: http://arxiv.org/abs/1708.04325 (date of access: 12.05.2024)
2. Miniature Inertial Measurement Unit : пат. US 4841773 США : G01P 9/04. заявл. 01.05.1987 ; опубл. 27.06.1989. 23 с.
3. Лазарєв Ю. Ф. Кінематика твердого тіла: навчальний посібник. – К.: НТУУ "КПІ", 2014. – 61 с. URL:

https://cions.kpi.ua/Arhiv/Method/ktt_otcheso.pdf (дата звернення: 19.05.2025).