

УДК 531.383

Черненко С. О., аспірант; Бурнашев В. В., к.т.н., доцент;

*КПІ ім. Ігоря Сікорського, Київ, Україна*

## **МЕТОД ІНЕРЦІАЛЬНО-ВІЗУАЛЬНОЇ ОРІЄНТАЦІЇ ЛІТАЛЬНОГО АПАРАТА**

### **Анотація**

В статті запропонований метод визначення кутів орієнтації літального апарату за інформацією від оптичної камери та тріади датчиків кутової швидкості. Наведені основні формули, необхідні для визначення кутів орієнтації та розрахунку розміру області зображення для обробки. Виконане імітаційне моделювання роботи алгоритму визначення кута тангажу літального апарату на реальних зображеннях. При цьому враховувалися похибки чутливих елементів. Розглядалося використання датчиків кутової швидкості низького та середнього класу точності. Перевагами методу є відсутність необхідності виділення лінії горизонту та низькі вимоги до навігаційного обчислювача.

**Ключові слова:** візуальний метод орієнтації, літальний апарат, оптична камера, датчик кутової швидкості, екстремальний алгоритм

### **Abstract**

The article proposes a method for determining the orientation angles of an aerial vehicle based on information from an optical camera and a triad of angular velocity sensors. The basic formulae necessary for determining the orientation angles and calculating the size of the image area for processing are given. Simulation of the operation of the algorithm for determining the pitch angle of the aerial vehicle on real images was carried out. At the same time, the errors of sensors were taken into account. The use of angular velocity sensors of low and medium accuracy class was considered. The advantages of the method are the absence of the need to detect the horizon line and low requirements for the navigation computer.

**Keywords:** visual orientation method, aerial vehicle, optical camera, angular velocity sensor, extreme algorithm

### **Вступ**

В сучасних системах навігації літальних апаратів (ЛА) все більше використовуються камери. Здебільшого це оптичні та інфрачервоні камери, які надають критично важливу навігаційну інформацію для комплексування бортової безплатформної інерціальної навігаційної системи (БІНС). Оптичні візуальні вимірювачі є необхідною складовою частиною сучасних навігаційних систем, оскільки вони здатні частково або повністю вирішувати проблему накопичення похибок БІНС у часі.

Основною проблемою візуальних навігаційних алгоритмів ЛА є складність їх синтезу та обчислювальна складність. Існуючі алгоритми, які можливо застосувати на борту ЛА в реальному часі обмежені своїми можливостями. Так в роботах [1 – 5] описаний, промодельований та

експериментально підтверджений алгоритм орієнтації, який ґрунтується на використанні оптичної камери для визначення лінії горизонту. Однак такий алгоритм не забезпечує можливість визначення ризику ЛА. Крім того, його недоліком є неможливість застосування в умовах обмеженої видимості горизонту. Іншим підходом до визначення орієнтації ЛА за допомогою камери є використання одометричних алгоритмів [6]. Вони відрізняються складністю синтезу та аналізу якості роботи, а також збільшеним обчислювальним навантаженням. Такі методи отримали значний розвиток в останні роки, через наявність нових доступних обчислювальних потужностей на базі FPGA та GPU, а також ефективних візуальних одометричних методів, наприклад, таких як ORB-SLAM2 [7], ROVIO [8], OKVIS [9], VINS-Mono [10]. Однак вони все ще занадто вимогливі до навігаційних обчислювачів безпілотних літальних апаратів найменших розмірів. Таким чином, наявна актуальність розробки простих з точки зору обчислювального навантаження методів орієнтації з використанням камери для роботи в умовах неможливості або складності спостереження лінії горизонту.

#### **Постановка задачі**

Розглянемо задачу визначення орієнтації ЛА за допомогою візуального екстремального алгоритму з камерою в якості вимірювача та алгоритму орієнтації БІНС, що їм періодичною корегується.

#### **Будова системи та методи досліджень**

На борту літального апарату жорстко встановлено тріаду датчиків кутової швидкості (ДКШ). Приладові вимірювальні осі ДКШ співпадають з будівними осями ЛА та утворюють правосторонню систему координат. Оптична камера жорстко встановлена на борту. Її оптична вісь направлена паралельно поздовжньої осі ЛА.

Перевірку працездатності синтезованого алгоритму будемо виконувати в програмному середовищі MATLAB за допомогою імітаційного моделювання з використанням реальних фотографій, імітуючих низьковисотний політ з незмінною висотою.

Підчас моделювання будемо використовувати згенеровані в програмному середовищі MATLAB покази ДКШ з похибками зміщення нуля (ЗН), враховувати неідеальність початкової виставки, качку камери і зображення.

#### **Запропонований метод орієнтації**

Кут повороту пропонується визначати за зміщенням зображення з камери, що відбувається за певний проміжок часу, за допомогою екстремального алгоритму. Порівнюючи два зображення, еталонне (отримане перед початком повороту) та поточне, можна визначити зміщення поточного зображення в пікселях. Воно буде однозначно відповідати певному куту орієнтації. Виділяти лінію горизонту при цьому не потрібно.

Для прискорення роботи алгоритму пропонується порівнювати не повні зображення з камер, а лише смуги певної ширини. Це дозволить суттєво зменшити навантаження на навігаційний обчислювач.

Під час визначення кута тангажа для такого порівняння необхідно попередньо повернути поточне зображення на кут крену та вибрати відповідну смугу з урахуванням її зміщення за рахунок рискання. Інформацію про кути рискання та крену можна взяти з алгоритму орієнтації БІНС.

Структурно запропонований алгоритм (Рис .1) можна розділити на дві складові частини: визначення орієнтації з використанням алгоритму орієнтації з ДКШ та математичні дії з поточним зображенням камери.

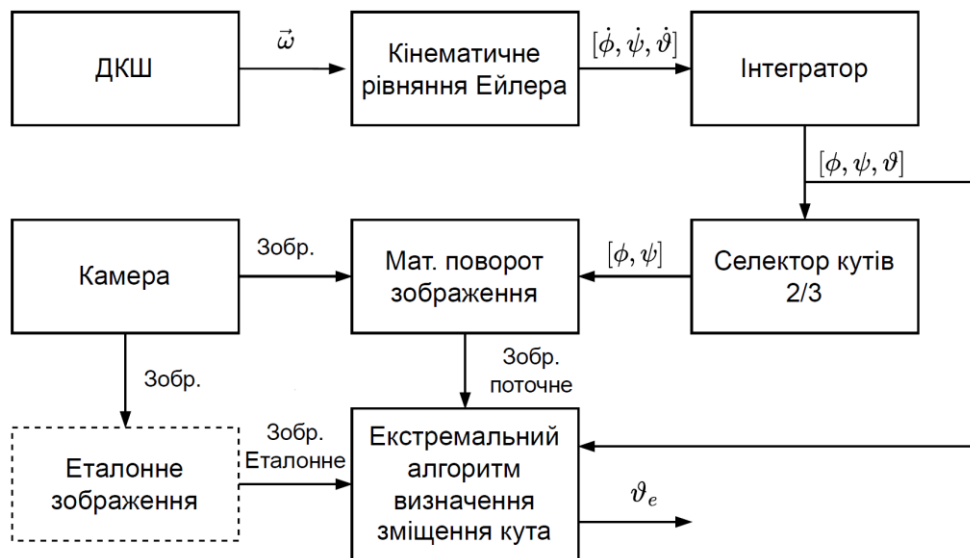


Рис. 1. Структурна схема запропонованого алгоритму

На рис. 1  $\phi, \psi, \vartheta$  - кути крену, рискання та тангажу;  $\vec{\omega}$  - вимірюваний ДКШ вектор кутової швидкості ЛА;  $\vartheta_e$  - кут орієнтації, що визначається методом візуальної орієнтації.

В ідеальних умовах роботи БІНС стабілізує поточне зображення з кутів крену та рискання навколо значень початкової виставки. При наявності похибок ДКШ стабілізація зображення не буде проходити в повній мірі, і визначена смуга для порівняння зі смугою попередньо отриманого еталонного зображення буде зміщуватись в часі.

В ідеальному випадку поточне зображення буде нестабілізоване лише з куту тангажу, що дає змогу його самостійного визначення за допомогою спрощеного екстремального алгоритму. Кут тангажу розраховується по зміщенню полоси поточного зображення на конкретну кількість пікселів. Залежність кута тангажу від кількості зміщених пікселів розраховується за формулою:

$$\vartheta_e = \frac{\alpha_{FOV} P_{зм}}{n_p},$$

де  $n_p$  – кількість рядків смужки,  $p_{зм}$  – кількість пікселів, розрахованих за екстремальним алгоритмом,  $\alpha_{FOV}$  – кут вертикального обзору камери.

Еталонне зображення пропонується формувати та запам'ятовувати в пам'яті навігаційного обчислювача на початку польоту, коли похибки навігаційної системи ще малі. Визначений таким методом кут тангажу не має залежати від похибок БІНС у часі.

Кількісною мірою співпадіння або схожості зображень був обраний метод найменших квадратів, але можна використовувати і інші функції цілі.

При русі камери по тангажу будь-який спостережуваний об'єкт на вихідному проєктивному зображенні камери буде виконувати відповідний рух в вертикальному напрямку. Тому можливо максимально обмежити кількість необхідних пікселів для зіставлення двох зображень. В крайньому варіанті це вертикальний стовбець, але для надійності алгоритму необхідно використовувати не стовбець (Рис.2), а смугу із стовбців певної ширини, що забезпечить роботу алгоритму при неточному врахуванні кутів крену та рискання.

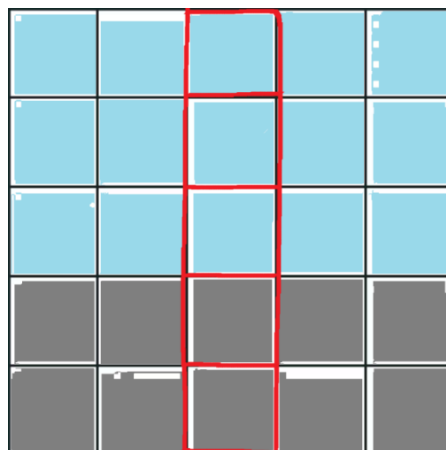


Рис. 2. Приклад смуги для корекції кута тангажу шириною в 1 піксель. Ескізно зображене небо синім кольором, Земля сірим кольором і вертикальна смуга червоним.

Неявна постановка оптимізаційної задачі в тривіальному варіанті з одночасним визначенням трьох кутів орієнтації полягає в наступному. Функція ціни відповідає методу найменших квадратів:

$$J(\phi, \psi, \vartheta) = \sum_{i=1}^r (h(i) - y(i))^2, \quad (1)$$

де  $h(i)$  – інтенсивність  $i$ -того пікселя еталонного зображення;  $y(i)$  – інтенсивність  $i$ -того пікселя поточного смугового зображення;  $r$  – кількість рядків смуги. Тоді ціль  $(\phi, \psi, \vartheta) = \arg \min J(\phi, \psi, \vartheta)$ .

В запропонованому варіанті функція ціни

$$J(\vartheta) = \sum_{i=1}^r (h(i) - y(i))^2 \quad (2)$$

тоді ціль  $\vartheta = \arg \min J(\vartheta)$ .

Запропонована функція ціни (2), на відміну від (1), дозволяє вирішити задачу орієнтації лише по одному оптимізуючому параметру. Інформація про інші два кути береться з БНС. На практиці при реалізації конкретного алгоритму це значно зменшить навантаження на навігаційний обчислювач. В результаті роботи описаного алгоритму отримаємо кут тангажу. Для визначення орієнтації ЛА по іншим кутам можливе використання запропонованого методу окремо та послідовно.

### Результати імітаційного моделювання

Розглянемо роботу запропонованого методу на реальних зображеннях з літального апарату. Зображення будемо перетворювати відповідно відомим еталонним гармонічним змінам кутів орієнтації камери (рис. 3).



Рис. 3. Зображення з качкою по трьом кутам орієнтації

Проведемо компенсацію кутів крену та рискання за інформацією від алгоритму орієнтації БНС. З отриманого зображення виріжемо вертикальну смугу шириною в 6 пікселів для подальшого використання в запропонованому екстремальному алгоритмі (рис. 4).



Рис. 4. Приклади поточного зображення та вирізаної смуги після компенсації кутів крену та рискання

Алгоритм, мінімізуючий функцію ціни (2) визначив зміщення поточного зображення з дискретністю в один піксель (рис. 5).

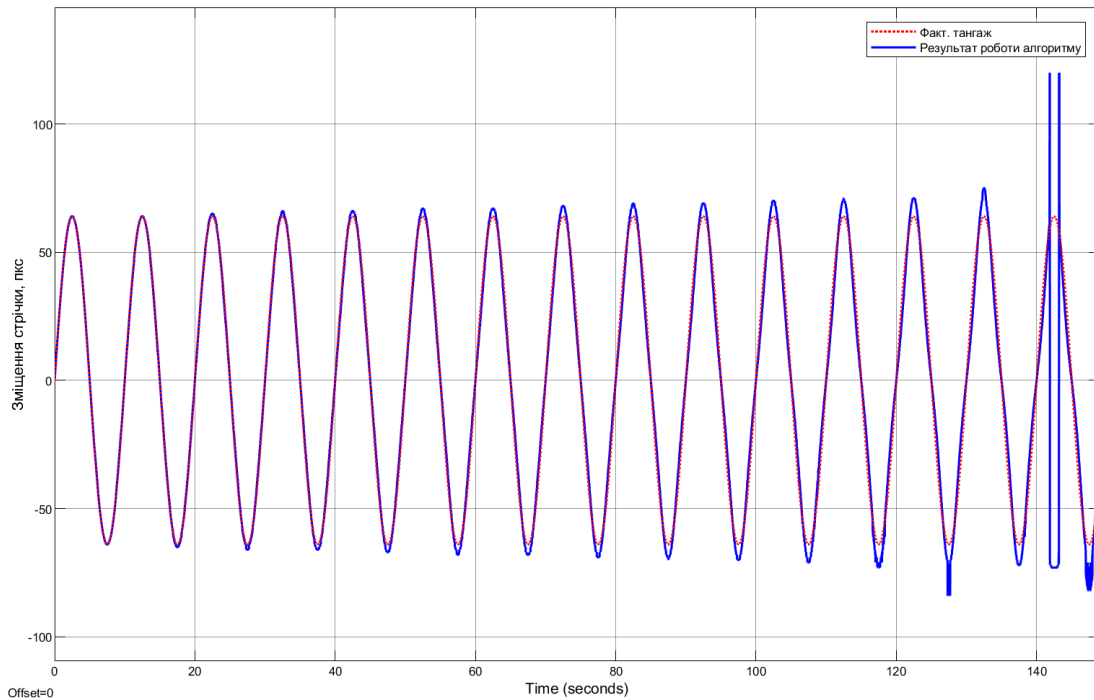


Рис. 5. Визначення зміщення смужки за допомогою екстремальної складової алгоритму.

При формуванні показів ДКШ враховувались похибки зміщення нуля. Для показаних результатів вони склали  $10^{-3}$  рад/с,  $2 \cdot 10^{-3}$  рад/с та  $3 \cdot 10^{-3}$  рад/с відповідно для кожного з трьох ДКШ. Такі похибки реально відповідають датчикам, виробленим за технологією МЕМС.

Як можна бачити на рис. 5, через 30 секунд роботи алгоритму орієнтації почалися спотворення істинного кута тангажа. Виникає це через відсутність корекції по рисканню. Пошук стовбця поточного зображення відбувається в межах смужки, у якій не може бути співпадіння, через значну похибку компенсації зміщення поточного зображення по куту рискання.

Вищезазначені явища виникають від накопичення похибки системою орієнтації БІНС. Зменшити їх вплив і тим самим збільшити час автономної роботи можна розширивши полосу зображення, що використовується для порівняння. Однак це ускладнює процес пошуку оптимального зміщення, що відповідає шуканому куту тангажа. Також можливо встановлення більш точного ДКШ або введення ідентифікованих періодичних корекцій по рисканню. Це питання балансу між періодом корекцій, ширини вертикальної полоси, та точністю ДКШ можна виразити за допомогою формули:

$$\psi_{px}(t) = \frac{180c_{cm} b_y t}{\pi \beta_{FOV}}, \quad (3)$$

де  $c_{ст}$  - кількість стовбців повного зображення;  $b_y$  – зміщення нуля ДКШ, встановленого по нормальній осі ЛА;  $t$  – час безперервної роботи алгоритму без введення корекцій;  $\beta_{FOV}$  – кут горизонтального обзору камери;  $\psi_{px}$  – зміщення зображення по горизонту в пікселях, через похибку ДКШ.

Згідно з (3) час автономної роботи алгоритму лінійно залежить від ширини смуги та похибки ДКШ. Тому найбільш вигідним способом його збільшення є проведення періодичних корекцій кута рискання. Для такої корекції потрібно за цей час використати такий же самий запропонований алгоритм, тільки з горизонтальною смужкою зображення.

При порівнянні кута тангажу від БІНС та від запропонованого алгоритму (рис. 6), можна визначити якісну тенденцію інваріантності оціненого кута тангажу до похибок ЗН ДКШ при малому часі роботи такого оптичного коректора. Це дає надію на потенційну зможу компенсувати похибки орієнтації БІНС при комбінації трьох таких коректорів для кожного з кутів. Похибка визначення тангажу після виходу величини похибки визначення кута рискання за ширину смуги зображення (3) починає наростати (Рис. 7).

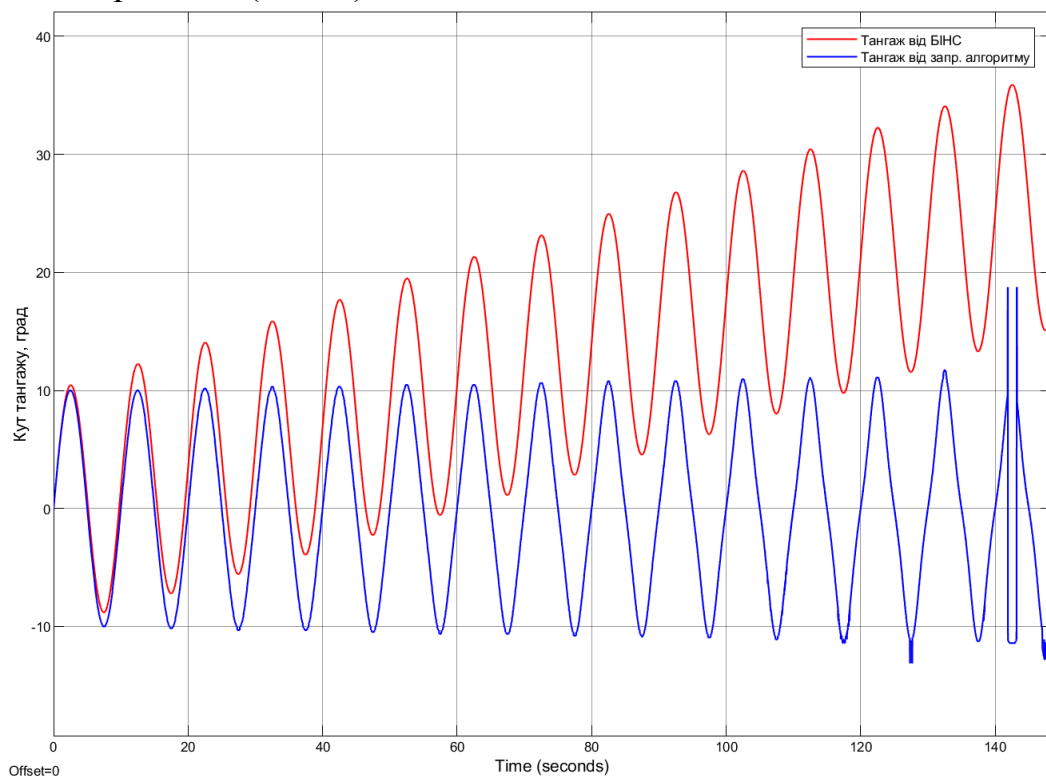


Рис. 6. Порівняння визначених кутів тангажу від БІНС та від запропонованого алгоритму

Досягнутий час роботи алгоритму в 140 секунд без жодної корекції демонструє високу робастність алгоритму, оскільки смуга поточного зображення не містить відповідний стовбець еталонного зображення більше половини часу роботи. Працездатність алгоритму при такому

експерименті забезпечується тим фактором, що зміщення полоси по рисканню не призводить до сильної зміни смуги поточного зображення.

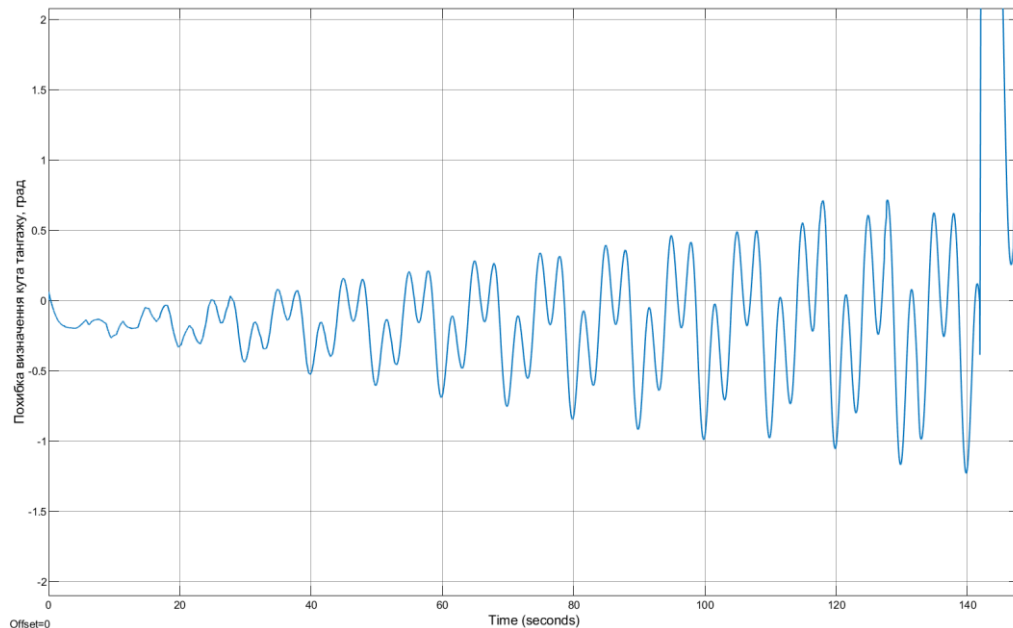


Рис.7. Похибка визначення кута тангажу для МЕМС ДКШ.

Моделювання розробленого алгоритму з ДКШ середнього класу точності з похибками  $3\text{H} \cdot 10^{-4}$  рад/с,  $2 \cdot 10^{-4}$  рад/с та  $3 \cdot 10^{-4}$  рад/с без корекцій по куту рискання показало можливість забезпечення часу автономної роботи більше 10 хв при ширині полоси в 5 пікселів (рис. 8), що підтверджується формулою (3).

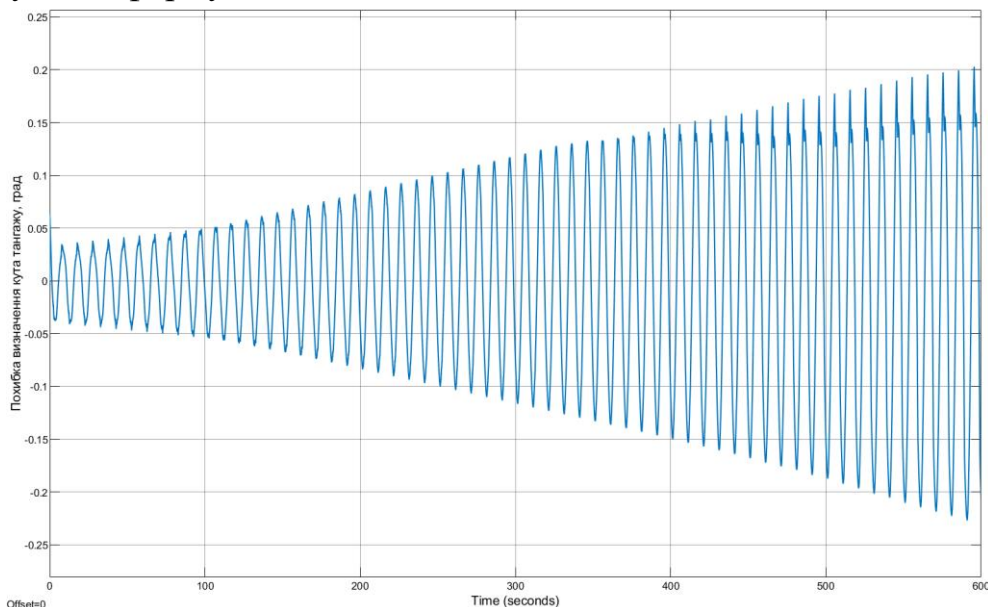


Рис. 8. Похибка визначення кута тангажу для ДКШ середнього класу точності

При збільшенні смуги до 11 пікселів запропонований алгоритм може автономно працювати більше 10 хвилин навіть з МЕМС ДКШ з зазначеними вище похибками (рис. 9).



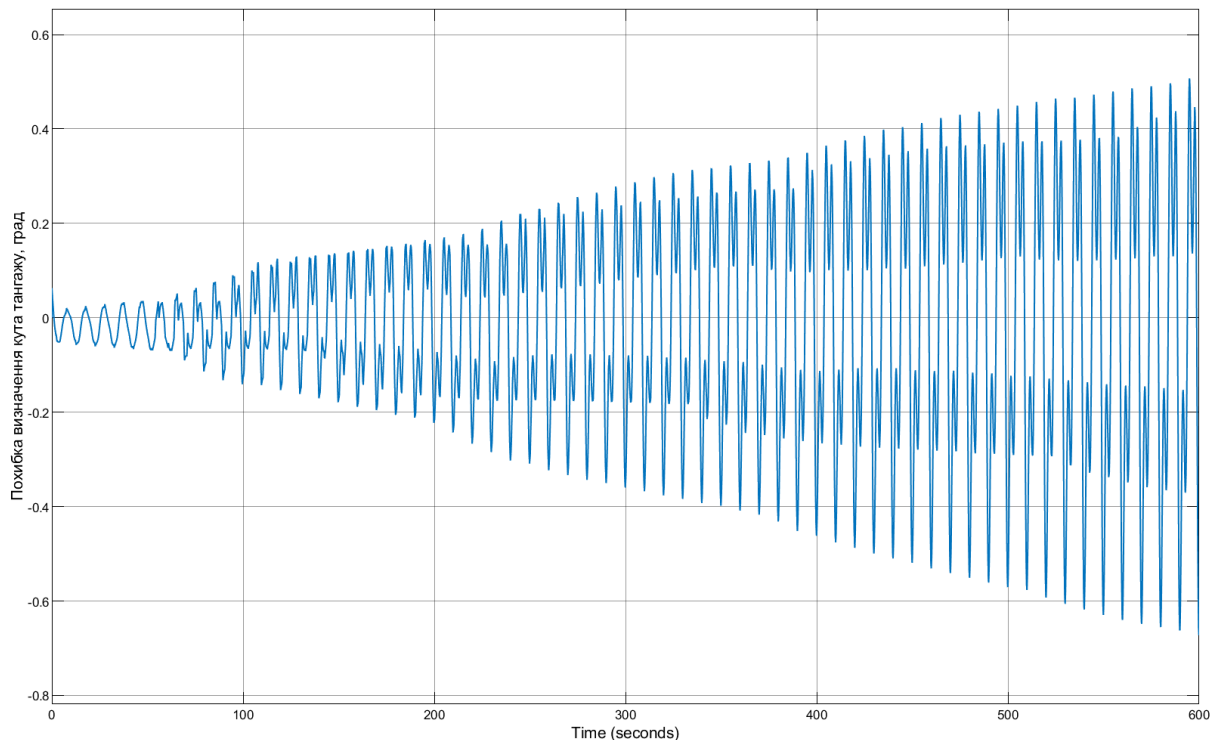


Рис. 9. Похибка визначення кута тангажу для МЕМС ДКШ та смуги зображення шириною 11 пікселів

### Висновки

Розроблений метод дозволяє визначати кути орієнтації ЛА під час прямолінійного польоту з постійною висотою на основі інформації від оптичної камери і блоку ДКШ та уникати накопичення похибки в часі за допомогою періодичної корекції.

Оцінка орієнтації здійснюється за зміщенням в пікселях поточного зображення відносно отриманого перед початком повороту. Для цього при визначенні одного з кутів поточне зображення зміщується за інформацією про інші два кути від інерціальної системи. Відповідні частини перетвореного зображення та початкового порівнюються за допомогою екстремального алгоритму. Завдяки простоті функції цілі з лише одним параметром оптимізації, а також використанню замість повних зображень вузьких смуг та кілець, метод може застосовуватись при обмежених обчислювальних ресурсах.

Однією з переваг методу є відсутність необхідності виділення на зображенні лінії горизонту. Однак при довготривалому польоті із значними поступальними переміщеннями для підвищення надійності алгоритму визначення кута доцільно використовувати частини зображення, що її містять.

Ширину смуги зображення, що необхідна для забезпечення певного часу автономної роботи алгоритму визначення кута, доцільно знаходити на основі запропонованої формули. Вона пов'язує переміщення зображення з похибкою ДКШ. Однак імітаційне моделювання показало також

ефективність використання вужчих смуг, ніж розраховані, через схожість сусідніх стовбців зображення.

Застосування розробленого методу для визначення кута тангажа продемонструвало можливість його автономної роботи без корекцій з інших кутів впродовж 10 хвилин з похибкою менше  $0,5^\circ$  навіть при використанні МЕМС ДКШ. Для цього використовувалася смуга зображення шириною 11 пікселів.

Очікується, що застосування розробленого методу послідовно для визначення і корекції трьох кутів орієнтації дозволить уникнути залежності точності візуального алгоритму від похибок ДКШ. В подальшому планується перевірити це в умовах швидких поступальних переміщень камери.

### Список літератури

1. Малишева Ю.О. – Інтегрована система навігації та орієнтації літального апарату з оптичними приладами. Київ 2016. 116 ст.

2. Malysheva J. An Integrated Aircraft Navigation System [Електронний ресурс] / J. Malysheva // IEEE 2nd International Conference Actual Problems of Unmanned Air Vehicles Developments Proceedings (APUAVD), Kyiv, 15-17 October, 2013. – Режим доступу:

<http://ieeexplore.ieee.org/xpl/articleDetails.jsp?arnumber=6705316>

3. Zbrutsky A., Malysheva Y. - Experimental tests of an algorithm of roll and pitch estimation using only optical information / A. Zbrutsky, J.A. Malysheva // Механіка гіроскопічних систем. – К.: НТУУ«КПІ», 2015. - Випуск 29. – С. 5-14. – ISSN 0203-3771.

4. Zbrutsky A. Experimental tests of an algorithm of roll and pitch estimation using only optical information / A. Zbrutsky, J.A. Malysheva // Механіка гіроскопічних систем. – К.: НТУУ«КПІ», 2015. - Випуск 29. – С. 5-14. – ISSN 0203-3771.

5. Zbrutsky A.V. Navigation and orientation system with optical horizon sensor for mini UAV / A.V. Zbrutsky, J.A. Malysheva., V.V. Burnashev // X Міжнародна науково-технічна конференція «Гіротехнології, навігація, керування рухом та конструювання авіаційно-космічної техніки»: Збірник доповідей, Частина I, 16-17 квітня – К. : ІВЦ „Видавництво «Політехніка»”, 2015.

6. Szeliski Richard - Computer Vision: Algorithms and Applications, 2nd ed., Springer, New York, 2nd edition, 2022.

7. Mur-Artal, R. and Tardós, J. D. (2017). ORB-SLAM2: An open-source SLAM system for monocular, stereo, and RGB-D cameras. IEEE Transactions on Robotics, 33(5):1255–1262.

8. Bloesch M., Omari S., Hutter M., Siegwart R. Robust visual inertial odometry using a direct EKF-based approach // IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS), 2015, pp. 298-304.

9. Leutenegger S., Furgale P., Bosse M., Siegwart R. Keyframe-Based

Visual-Inertial SLAM Using Nonlinear Optimization // The International Journal of Robotics Research, 2014, 34(3).

10. Tong Qin, Peiliang Li, Shaojie Shen. VINS-Mono: A Robust and Versatile Monocular Visual-Inertial State Estimator // IEEE Transactions on Robotics, 2018, 34.