

УДК 531.383

DOI: <https://doi.org/10.20535/0203-3771482024317881>

С. О. Черненко¹, PhD студент, В. В. Бурнашев², к.т.н., доцент

АЛГОРИТМ ІНЕРЦІАЛЬНО-ВІЗУАЛЬНОЇ ОРІЄНТАЦІЇ ЛІТАЛЬНОГО АПАРАТА З ДВОМА ОПТИЧНИМИ КАМЕРАМИ

Ua Стаття присвячена визначенню кутів орієнтації літального апарата за інформацією з двох оптичних камер і тріади гіроскопів. Описані функції ціни необхідні для обчислення крену, рискання та тангажу. Проведено імітаційне моделювання роботи алгоритму з використанням реальних зображень. При цьому враховувалися похибки датчиків кутової швидкості низького класу точності. Наведені графіки зміни похибок визначення кутів інерціально-візуального алгоритму орієнтації в часі. Перевагами застосованого методу є відсутність необхідності виділення лінії горизонту та невисокі вимоги до обчислювальних ресурсів навігаційної системи.

En The article presents an algorithm for determining the orientation angles of an aircraft using data from two optical cameras and a gyroscope triad. The cost functions required for calculating roll, yaw, and pitch are described. A simulation of the

¹ КПІ ім. Ігоря Сікорського

² КПІ ім. Ігоря Сікорського

algorithm's performance was conducted using real images, along with sequential correction of orientation angles based on the proposed approach. The algorithm takes into account errors from low-accuracy angular velocity sensors. Among the advantages of the method are its independence from the need to detect the horizon line and its low computational resource requirements for the navigation system.

Вступ

Оптичні та інфрачервоні камери все частіше відіграють ключову роль у забезпеченні навігаційної інформації для інтеграції з безплатформними інерціальними навігаційними системами (БІНС) у складі бортового обладнання літальних апаратів (ЛА). Використання таких камер дозволяє суттєво зменшити проблему накопичення похибок у БІНС із плином часу.

Основною складністю під час реалізації візуальних навігаційних алгоритмів є їх розробка та високе обчислювальне навантаження. Також такі алгоритми залишаються обмеженими у своїх можливостях у разі реалізації їх у реальному часі. У роботах [1] – [5] розглядається алгоритм, що використовує оптичну камеру для визначення лінії горизонту. Цей підхід був успішно змодельований та експериментально підтверджений, проте він не дозволяє визначати рискання ЛА і не може бути використаний у ситуаціях, де спостереження горизонту ускладнене.

Принципово іншим підходом до задачі визначення орієнтації рухомого об'єкта за допомогою камери є сімейство одометричних алгоритмів [6]. Вони базуються на складному аналізі поточних зображень із камери, а саме, відносній зміні кутового положення камери, як центра проекції спостережуваної сцени. Такі методи відрізняються складнішим процесом розробки, потребують ретельного аналізу якості роботи і дають велике навантаження на навігаційний обчислювач. У той же час, завдяки розвитку обчислювальних платформ на базі *FPGA* та *GPU*, сучасні методи візуальної одометрії: *ORB-SLAM2* [7], *ROVIO* [8], *OKVIS* [9], *VINS-Mono* [10]; демонструють значний прогрес. Проте вони залишаються надто ресурсомісткими для найменших безпілотних літальних апаратів.

Таким чином, існує потреба у розробці найпростіших алгоритмів орієнтації ЛА за допомогою камер, які б могли ефективно працювати навіть за умов обмеженої видимості горизонту та не накладали надмірного навантаження на обчислювачі.

Постановка задачі

Розглянемо задачу визначення кутів крену, рискання та тангажу літального апарата за допомогою алгоритму класичної орієнтації на основі тріади ортогональних датчиків кутової швидкості із періодичними корек-

ціями від візуального екстремального алгоритму, який використовує інформацію двох взаємно перпендикулярних камер.

Будова системи та методи досліджень

На ЛА нерухомо закріплена тріада гіроскопічних датчиків, що вимірюють кутові швидкості. Система із двох оптичних камер жорстко встановлена на борту в горизонтальній площині (X - Z зв'язаної системи координат ЛА). Оптична вісь першої камери спрямована вздовж поздовжньої осі ЛА, а оптична вісь другої камери – перпендикулярно до неї, у напрямку правого напівкрила ЛА.

Перевірка ефективності розробленого алгоритму проведена у програмному середовищі *MATLAB* шляхом імітаційного моделювання, використовуючи реальні фотографії, які імітують низьковисотний політ зі сталою висотою.

У процесі програмно-математичного моделювання використовувались покази БІНС на ДКШ із урахуванням похибок зміщення нулів, а також неідеальності початкової виставки, впливу качки камер та зображень.

Запропонований алгоритм орієнтації

Метод інерціально-візуальної орієнтації [11] вдосконалимо для визначення трьох кутів орієнтації літального апарата (ЛА), використовуючи дві спеціально встановлені камери.

Поточне зображення із конкретної камери необхідно стабілізувати на по двох кутах орієнтації, відмінних від тих, які корегуються. Інформація про кути необхідного математичного повороту зображення потрапляє у візуальний алгоритм від алгоритму орієнтації БІНС.

Кут тангажа визначається за зміщенням зображення із камери, встановленої по поздовжній осі ЛА [11].

Кут крену пропонується визначити аналогічно, розраховуючи зміщення між двома зображеннями у пікселях, по камері, направленій вздовж правого напівкрила.

Кут рискання розраховується за допомогою спеціальної функції ціни, яка враховує зміщення поточного зображення відносно еталонного з обох камер:

$$J(s) = \text{cov}(x_1 + s, y_1) + \text{cov}(x_2 + s, y_2), \quad (1)$$

де x_1, x_2 – вектори інтенсивностей пікселів рядка поточного зображення першої та другої камери, y_1, y_2 – вектор інтенсивностей пікселів рядка еталонного зображення першої та другої камери; $\text{cov}(x_1 + s, y_1)$, $\text{cov}(x_2 + s, y_2)$ – коваріаційні функції між векторами, s – зміщення поточного зображення у пікселях. Тому функція ціни (1) розраховується для

всіх рядків вибраної смуги еталонного зображення. Визначені на основі максимізації (1) зміщення однозначно можуть бути перераховані у кути орієнтації ЛА. Порівняння двох зображень відбувається по вертикальній смузі конкретної ширини, що дозволяє сильно зменшити навантаження на бортовий обчислювач.

З цією ж метою можливе використання спрощеної функції ціни для розрахунку зміщення зображення по рисканню:

$$J(s) = \text{cov}(x_1 + s, Y_1). \quad (2)$$

У випадку використання (1) зображення обробляються тільки з однієї камери.

Окрім функцій ціни (1), (2) для співставлення смуг із двох зображень використовувались мінімум абсолютної різниці та мінімум квадрату похибки. Особливою відмінністю цих варіантів алгоритмів є реакція значення функції ціни на шум, який може бути присутній в смугах зображення для порівняння. Мінімізація квадрату різниці в функції ціни «штрафує» похибку зміщення квадратично під час розрахунку суми, а використання абсолютної різниці призводить до «штрафування» зміщення пропорційно значенню похибки.

Розраховані таким чином або за допомогою (1), (2) зміщення поточних смуг у пікселях необхідно перерахувати в відповідні кути крену та рискання ЛА за формулами:

$$\varphi_e = \frac{\alpha_{VFOV} P_{3MZ}}{n_p}; \quad (3)$$

$$\psi_e = \frac{\alpha_{HFOV} P_{3MX}}{n_c}, \quad (4)$$

де n_p – кількість рядків смужки камери направленої в сторону правого напівкрила, n_c – кількість стовбців смужки камери направленої в сторону поздовжньої осі ЛА, P_{3MZ} – кількість пікселів, розрахованих за екстремальним алгоритмом по камері направленої в сторону правого напівкрила, P_{3MX} – кількість пікселів, розрахованих за екстремальним алгоритмом по камері направленої по поздовжній осі ЛА, α_{VFOV} – кут вертикального обзору камери, α_{HFOV} – кут горизонтального обзору камери.

Візуальне визначення кута рискання виконується на основі двох горизонтальних смуг зображення нижче рівня горизонту для конкретної висоти польоту ЛА. Це дозволяє захопити полем зору фотокамери більше особливих об'єктів, що полегшує задачу співставлення.

Корекція кутів крену, рискання та тангажа виконується послідовно для зменшення обчислювального навантаження. Період корекції для кожного кута обирається в результаті імітаційного моделювання таким, щоб не

була накопичена похибка візуальної складової алгоритму. Він залежить від похибок гіроскопів. Чим точніші гіроскопи встановлені на ЛА, тим більший період корекції можна обрати.

Оскільки при польоті ЛА спостережуваний вид змінюється, необхідно виконувати періодичні заміни еталонного зображення на поточні. Це додає похибку у визначення поточного куту орієнтації у разі кожного переприсвоєння на величину кута еквівалентну зміщенню одного пікселя у найгіршому випадку. Похибка орієнтації від БІНС залежить пропорційно від часу роботи, а похибка запропонованого алгоритму залежить від кількості переприсвоєнь еталонного зображення.

Результати імітаційного моделювання

Під час моделювання роботи запропонованого алгоритму імітувалися покази гіроскопів споживчого класу точності з похибками зміщення нуля 0,1 %с. Імітація показів двох камер відбувалась шляхом повороту та зміщення реального зображення на відповідні ідеальні кути орієнтації.

Для корекції кута крену із зображення камери, направленої на праве напівкрило ЛА, здійснюється поворот зображення на кут тангажу та лінійне зміщення по рисканню, що визначені алгоритмом інерціальної системи. Отримане зображення буде скомпенсоване по куту тангажу та рисканню ЛА, але не буде скомпенсоване по куту крену. Поворот ЛА по куту крену буде призводити до зростання зміщення поточного зображення із камери вздовж вертикалі зображення. Пропонується вирізати із поточного зображення вертикальну смугу шириною 1 піксель і висотою 320 пікселів. З еталонного зображення вирізається вертикальна смуга шириною 12 пікселів і висотою 640 пікселів.

Корекція кута тангажа виконується аналогічно до кута крену лише з тією відмінністю, що зображення береться із поздовжньої камери і стабілізація зображення відбувається на всі кути орієнтації окрім куту тангажу (рис. 1).

Для корекції кута рискання в імітаційному моделюванні використовується зображення із поздовжньої камери, вирізається горизонтальна смуга на 50 пікселів нижче середини зображення, ширина смуги складає 320 пікселів, а її висота 1 піксель. З еталонного зображення використовується горизонтальна смуга шириною 640 пікселів, і висотою 12 пікселів. Попередньо, перед корекцією кута рискання, необхідно зробити стабілізацію зображення по куту крену і тангажу.

Вирізані смуги із кожної пари зображень використовуються у екстремальному алгоритмі візуального визначення кута орієнтації на основі (1), (3), (4).



Рис. 1. Приклади поточного зображення та вирізаної смуги після компенсації кутів крену та рискання

У разі використання описаної імітаційної моделі були визначені похибки орієнтації ЛА по куту крену, тангажу і рисканню за допомогою класичного алгоритму орієнтації БІНС і за допомогою запропонованого візуального алгоритму (рис. 2). Похибки кутів орієнтації БІНС мають тенденцію до накопичення, а кути визначені за допомогою візуального алгоритму очікувано їй не мають.

Задавшись необхідною точністю орієнтації, із графіку похибки БІНС можна визначити час польоту ЛА без необхідності використання корекцій. Для подальшого моделювання період корекцій від візуального алгоритму прийнято рівним 0,5 секунди.

Імітаційне моделювання алгоритму визначення кутів орієнтації ЛА із послідовною корекцією по кутах крену, рискання і тангажу за періодом корекції 0,5 секунд свідчить про його працездатність і правильність вибору параметрів (рис. 3).

Максимальні значення похибок орієнтації інерціально-оптичної системи склали для кута крену $0,22^\circ$, для кута рискання $0,13^\circ$, для кута тангажа $0,21^\circ$

На точність візуального алгоритму орієнтації суттєвий вплив має кут обзору камер. Результати роботи алгоритму, показані на рис. 3, отримані для кутів обзору 30° . Розглянемо точність системи при кутах обзору 60° (рис. 4).

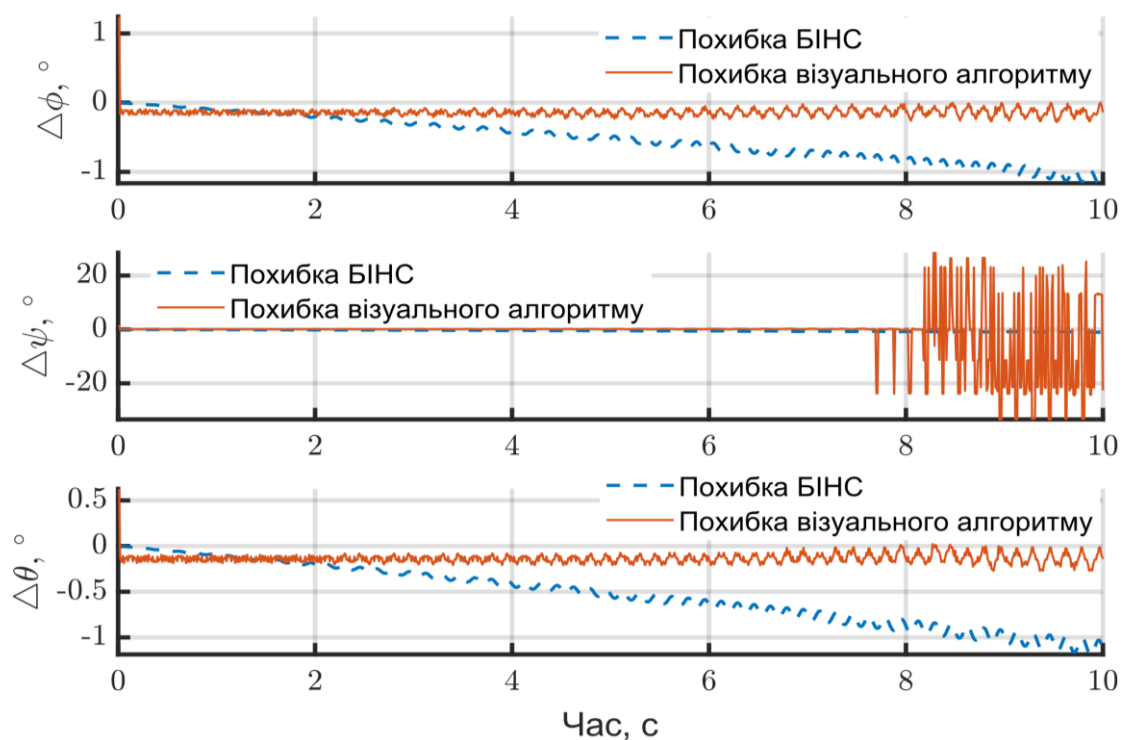


Рис. 2. Імітаційне моделювання алгоритму орієнтації без корекцій

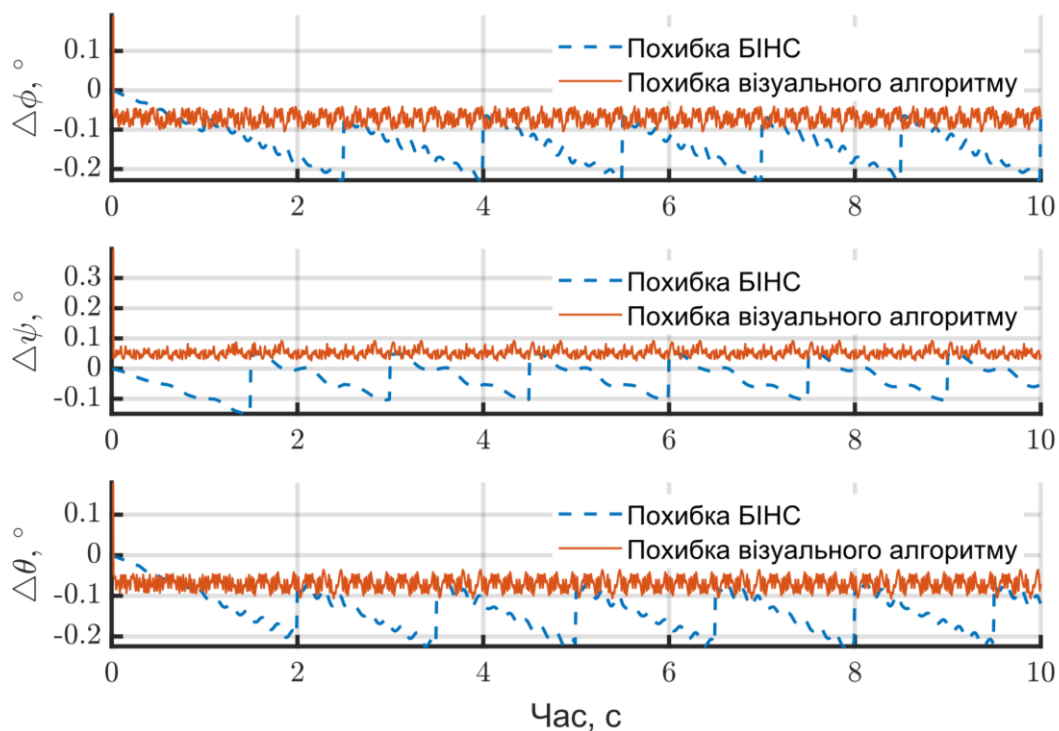


Рис. 3. Робота алгоритму послідовної корекції трьох кутів орієнтації

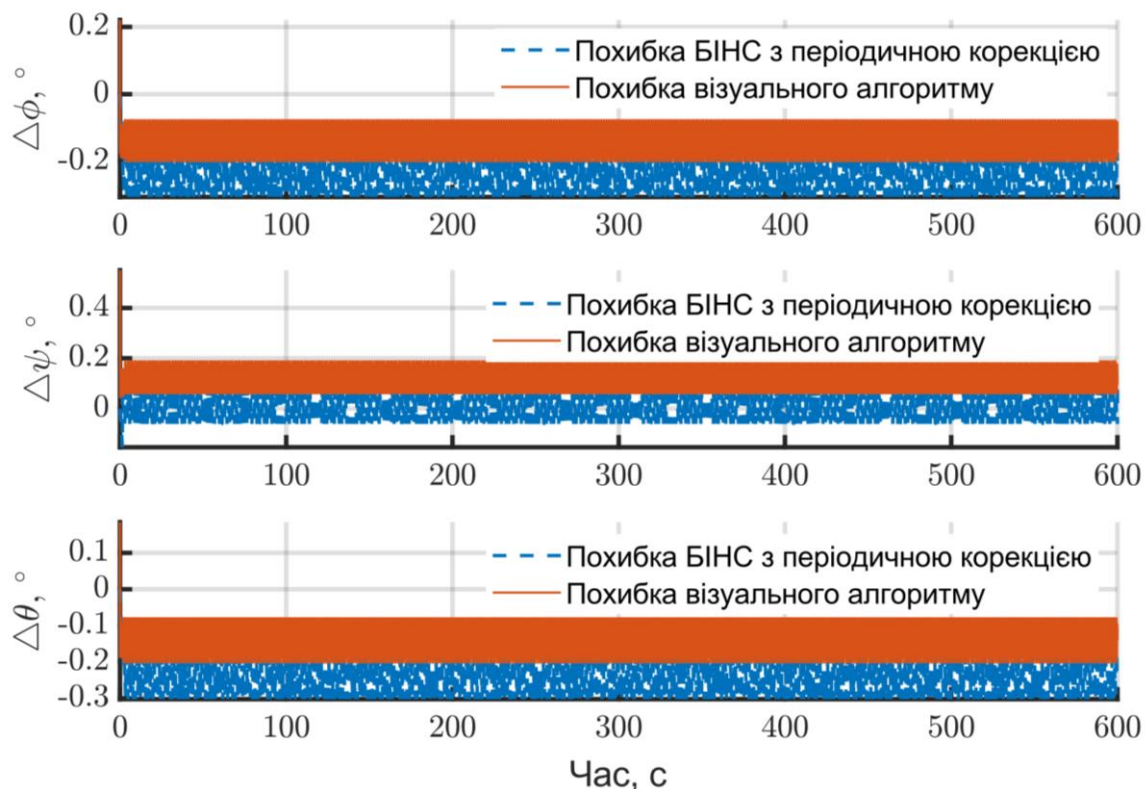


Рис. 4. Точність інерціально-візуального алгоритму зі збільшеним кутом обзору камер

За тими ж ДКШ та частотою корекцій, у даному випадку похибка орієнтації кута крену досягає $0,29^\circ$, кута рискання – $0,19^\circ$, кута тангажа – $0,3^\circ$, що майже у 1,5 рази вище значень, показаних на рис. 3.

Виявлений вплив кута обзору камер на точність алгоритму свідчить про його кращу застосованість для орієнтації повільних об'єктів з високою точністю стабілізації.

Висновки

Розроблений алгоритм орієнтації забезпечує автономне визначення кутів крену, рискання та тангажа літального апарату за рахунок використання тріади ДКШ та двох взаємно перпендикулярних камер, жорстко встановлених на його борту. Корекція інерціальної системи за інформацією візуальної частини алгоритму дозволяє обмежити накопичення похибок орієнтації.

Візуальна частина алгоритму визначає кожен кут по чергово, шляхом розрахунку зміщення пікселів у поточному зображенні відносно еталонного, отриманого від цієї ж камери певний час назад. Для цього поточне зображення із камери стабілізується по інформації від інерціальної системи за двома кутами, окрім оцінюваного у даний момент. Частина двох отриманих зображень порівнюються екстремальним алгоритмом. Завдяки ви-

користанню функції цілі, яка має лише один параметр оптимізації, а також застосуванню вузьких смуг замість повноцінних зображень, алгоритм характеризується низькою обчислювальною складністю.

Одна з ключових переваг застосованого методу полягає в тому, що він не вимагає попереднього виділення лінії горизонту на зображенні. Це значно спрощує обробку та підвищує його стійкість до умов із поганою видимістю або складною структурою сцени. Але вздовж горизонту необхідно спостерігати об'єкти для визначення зміщення смуги зображення за різною інтенсивністю пікселів. Такої можливості не буде, а отже не буде можливості застосовувати розроблений алгоритм візуальної корекції при польоті над відкритим морем, далеко від берегу.

Точність алгоритму суттєво залежить від кутів обзору камер. З огляду на це її найбільш високі показники можуть бути досягнуті при застосуванні на повільних ЛА у режимах горизонтального польоту із високою точністю стабілізації.

Список використаної 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 / J. Malysheva // IEEE 2nd International Conference Actual Problems of Unmanned Air Vehicles Developments Proceedings (APUAVD), Kyiv, 15-17 October, 2013.
3. *Zbrutsky A., Malycheva 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 Tard'os, 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.
11. *Черненко С. О., Бурнашев В. В.* – Метод інерціально-візуальної орієнтації літального апарату, Механіка гіроскопічних систем № 46, 2023.