

ПІДВИЩЕННЯ ТОЧНОСТІ КОНТРОЛЮ РУХУ МОДУЛІВ БПЛА ЗА ДОПОМОГОЮ ІНЕРЦІЙНИХ СИСТЕМ З ОДНОРІДНИМИ ДАТЧИКАМИ

¹Хмельницький національний університет

В роботі запропонована методика покращення контролю та управління рухом додаткових модулів безпілотного літального апарату (БПЛА) за допомогою інерційних систем вимірювання, які використовують кілька датчиків одного типу. Реалізація цієї методики базується на застосуванні двох MEMS-акселерометрів MPU6050. Досліджено вплив використання двох акселерометрів разом з фільтром Калмана (ФК) на точність вимірювань при відслідковуванні руху БПЛА без фіксованої точки прив'язки. Показано, що використання додаткових датчиків дозволяє порівнювати та комбінувати дані з двох незалежних джерел, що сприяє підвищенню точності вимірювань. Застосування ФК в цій системі дозволяє зменшити випадкові коливання та перешкоди. Використання двох датчиків разом з ФК, який автоматично коригує нові дані системи, забезпечує покращення точності вимірювання руху об'єкта. Це є критично важливим для систем, що потребують підтримки запланованої траєкторії руху у разі пошкодження, відсутності або втрати зв'язку з зовнішніми системами позиціонування. Показано, що БПЛА часто функціонують у складних умовах, де традиційні системи позиціонування, наприклад GPS, можуть мати обмеження через погану видимість супутників або інші перешкоди. Використання інерційних систем у таких умовах забезпечує більш надійне відслідковування руху, що значно покращує автономність БПЛА. У роботі також описано перспективу інтеграції MEMS-акселерометра в інерційну систему відслідковування руху на основі штучного інтелекту (ШІ). Обговорюються питання оптимізації кількості датчиків при розробці алгоритмів обробки даних з використанням нейронних мереж та методів машинного навчання.

Ключові слова: БПЛА, фільтр Калмана, MEMS, акселерометр, інерційна навігаційна система, датчик, навігація

Вступ

У сучасних реаліях розвитку безпілотних літальних апаратів (БПЛА) одним з актуальних напрямків є питання підвищення точності та надійності систем відслідковування їх руху. Проблема забезпечення стабільної траєкторії польоту у випадках, коли традиційні системи позиціонування, такі як GPS, виявляються малоефективними через зовнішні перешкоди, виходу з ладу або обмежену доступність супутникових сигналів, є однією з основних. Перспективними рішеннями для цієї проблеми є використання інерційних вимірювальних систем (IMU), які здатні підвищувати точність та продовжувати відслідковування руху об'єкта навіть у складних умовах. Можливість інтеграції кількох датчиків одного типу привертає особливу увагу, адже це дає змогу покращити точність вимірювань за рахунок комбінування показників.

У даній роботі запропоновано методику покращення відслідковування руху, шляхом використання додаткових модулів БПЛА, що використовують два MEMS-акселерометра MPU6050 та фільтр Калмана для обробки отриманих даних. Комбінація кількох датчиків з фільтром Калмана дозволяє не лише зменшити випадкові коливання та перешкоди, але й підвищити точність оцінки руху об'єкта. Це є особливо важливим у випадках, коли зовнішні системи навігації стають недоступними або працюють з похибками. Додатково розглядається можливість інтеграції даних з інерційних систем на базі MEMS-акселерометрів для застосування їх штучним інтелектом, що в сучасних реаліях відкриває великий простір для розвитку.

Результати дослідження

Одним з основних методів покращення керування безпілотного літального апарату є використання додаткових модулів. У даній доповіді пропонується застосування інерційної системи вимірювання для збільшення можливостей БПЛА або приладів, що наявні у додаткових комплектаціях. Наразі немає легкодоступних та дешевих інерційних систем вимірювання переміщення об'єктів, що можуть використовуватись масово у різних сферах. Дана система має надавати дані про пройдений шлях, відхилення об'єкту і тд. при виході з ладу інших навігаційних систем. В даній доповіді наведено використання двох MEMS датчиків акселерометра та лінійного фільтра Калмана для зменшення завад, що з часом призводять до відхилення вимірювань.

Важливим напрямком розвитку інерційних MEMS також може бути поєднання з ШІ, що дасть БПЛА у разі втрати зв'язку, змогу знайти пункт призначення керуючись внутрішніми картами та інерційною системою, навіть якщо у полі зору камер немає об'єкта для розпізнання кінцевої точки призначення.

Розвиток та дослідження MEMS (рис.1) інерційних систем дають змогу все більше витіснити габаритні та дорогі механічні конструкції датчиків прискорення.

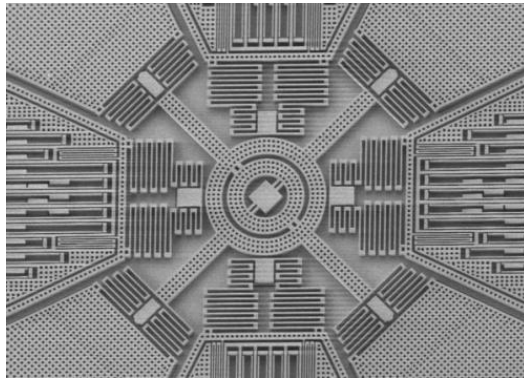
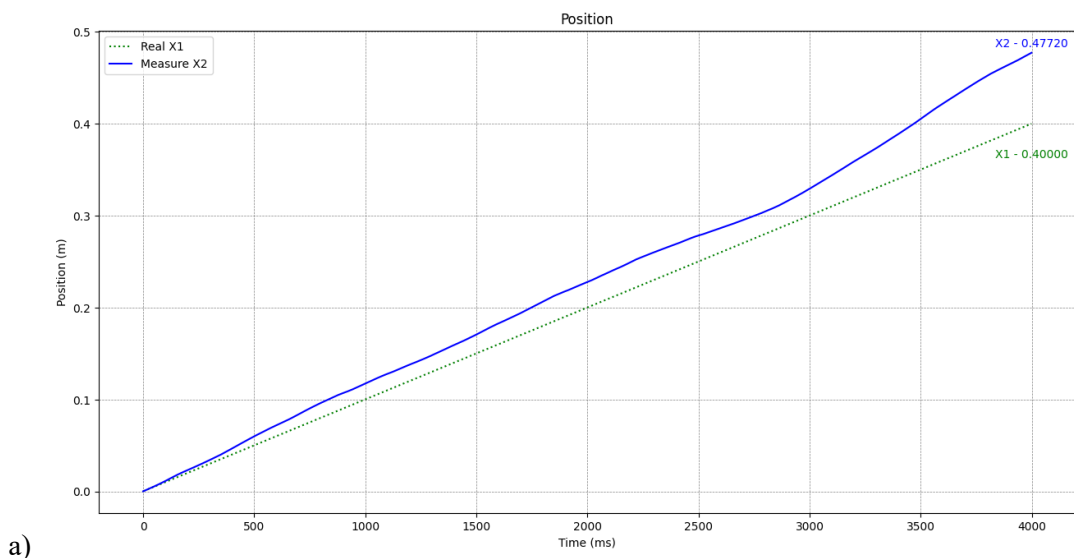


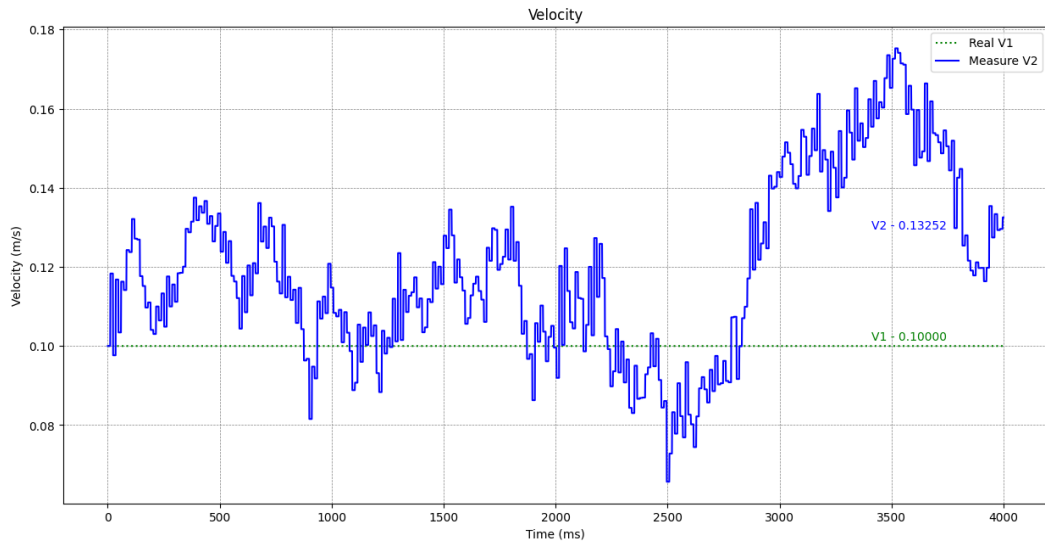
Рис. 1. Зображення внутрішньої будови MEMS датчика акселерометра.

У даній роботі розглядається можливість зменшення завад, що створюють відхилення при довготривалому русі без корегування за допомогою зовнішніх навігаційних систем з прив'язками у просторі, для інерційної системи створеної на базі MEMS датчиків акселерометра MPU6050. Запропоновано алгоритм та програмний метод застосування фільтра Калмана у реальному часі для лінійної динамічної системи у поєднанні з збільшенням кількості датчиків MPU6050 до двох.

На рис. 2 графічно зображено рівень відхилення переміщення а) та переміщення швидкості б) під час симуляції вимірювань на основі реальних значень прискорення. Отримані практичним шляхом дані показали, що при русі значення зняті з датчиків акселерометра мають завади ± 0.06 м/с², що може давати суттєву похибку та з часом призведе до відповідного відхилення. Дані завад прискорення при рівномірному русі було взято з випробувального стенду, що зображено на рис.2.



а)



б)

Рис. 2. Графічне зображення впливу завад на розрахунки а) переміщення та б) швидкості.

Одним з основних інструментів в обробці даних отриманих з датчиків акселерометра є фільтр Калмана. Він оцінює внутрішній стан системи, її послідовного потоку даних з врахуванням рівня завад, тобто базується на дискретизованих за часом лінійних динамічних системах.

Даний фільтр відстежує оцінюваний стан системи та невизначеність оцінки, що оновлюється з використанням покрокового переходу та вимірювань (рис. 3).

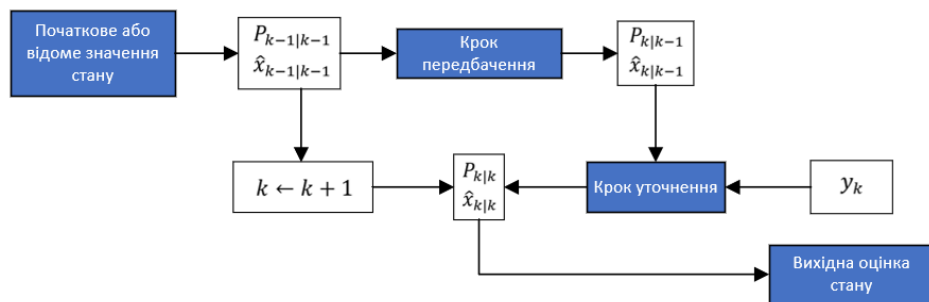


Рис. 3. Графічне зображення структурної схеми фільтра Калмана

Де:

\hat{x}_k – оцінене або прогнозоване значення на кроці часу k ;

P_k – коваріаційна матриця;

u_k – значення вимірювання;

$k \leftarrow k + 1$ – перехід до наступного часового кроку.

Для отримання практичних даних з IMU датчика, розроблено модуль передачі значень акселерометра по радіоканалу Bluetooth (рис.4)

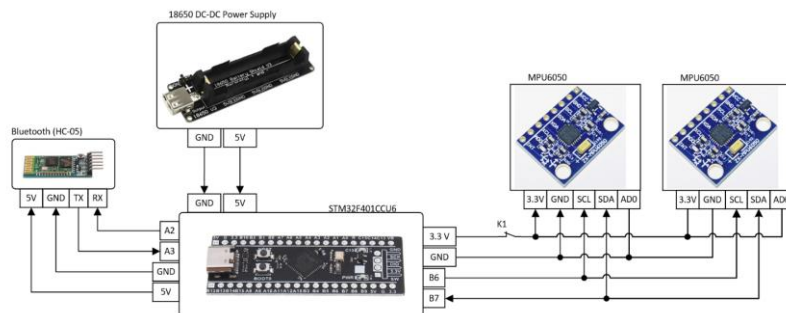


Рис. 4. Зображення функціональної схеми модуль передачі значень акселерометра по радіоканалу Bluetooth

Було створено 3D модель корпусу для кріплення модуля на CNC станок, що використовується для отримання значень акселерометра при лінійному русі інерційної системи. Корпус роздруковано на 3D принтері(рис.5, а).

Для здійснення збору даних, корпус було прикріплено до CNC станку, що було налаштовано на швидкість 0.1 м/с (рис.5, б).

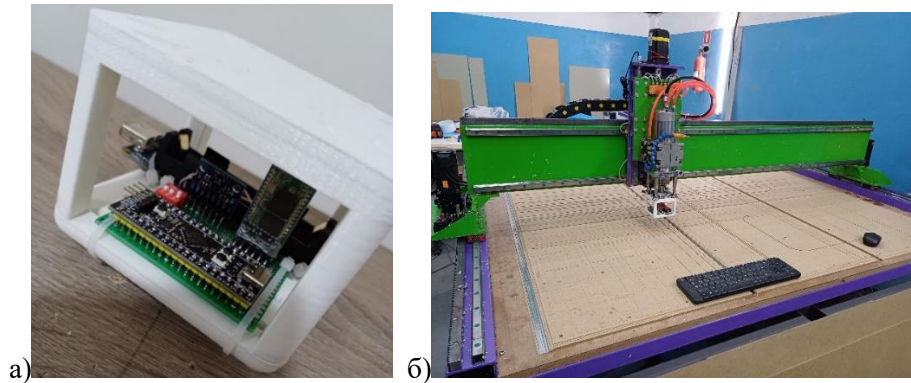


Рис. 5. Зображення роздрукованого корпусу а) та випробувального стенду б) на базі CNC станка з прикріпленням інерційним модулем.

Блок схема алгоритму отримання даних з використанням мікроконтролера STM32 та MEMS-акселерометра MPU6050 наведено нижче (рис.6). Передача даних відбувається по радіоканалу Bluetooth.

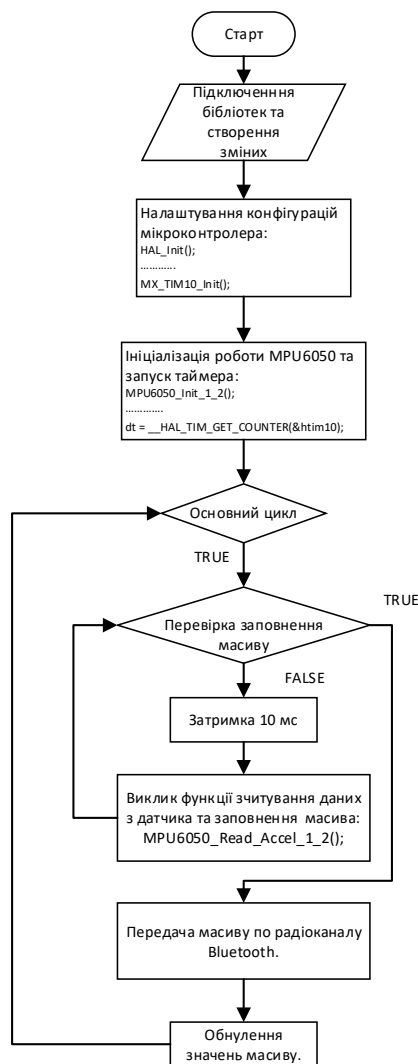
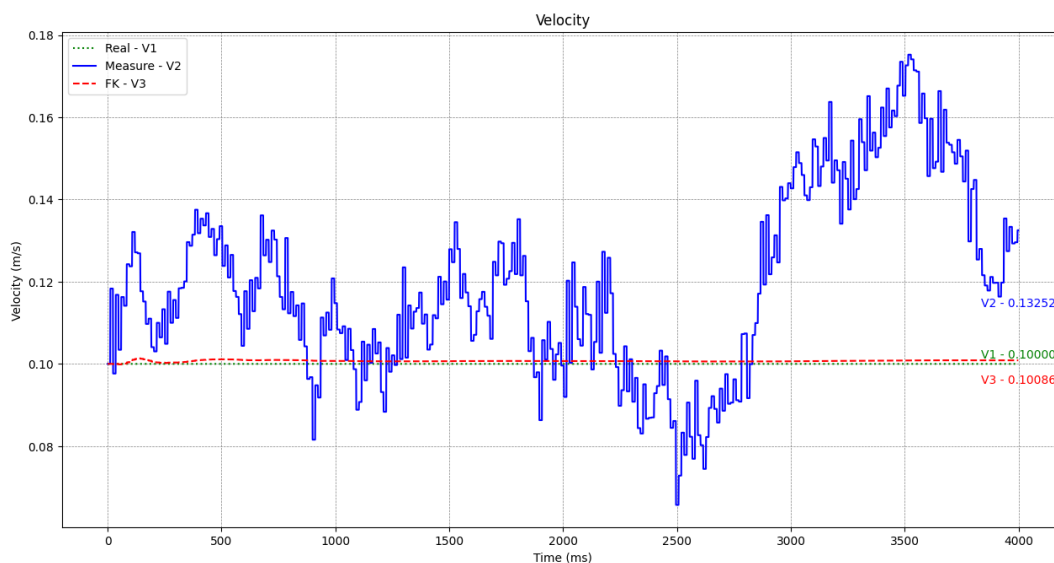


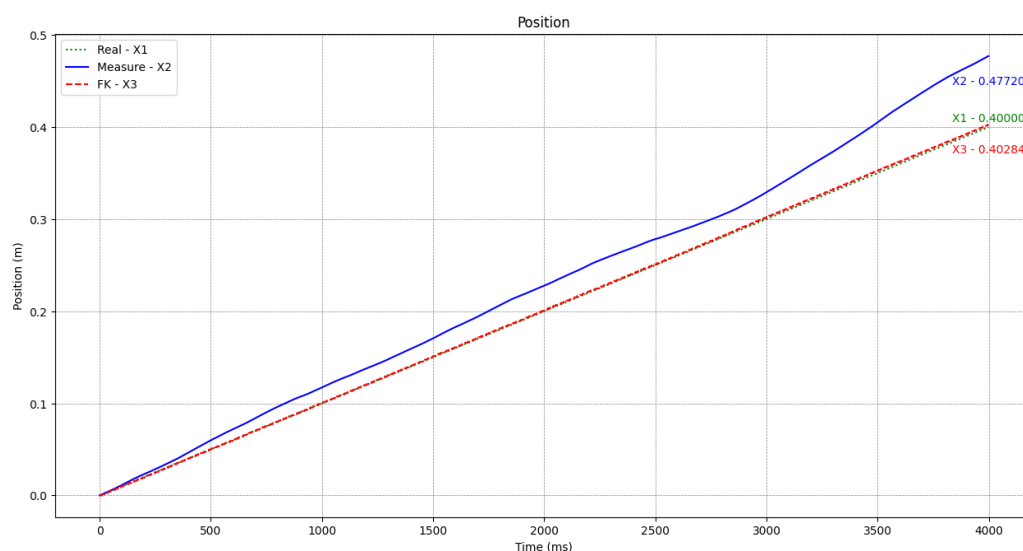
Рис. 6. Зображення блок-схеми алгоритму коду отримання реальних значень з датчика MPU6050.

Після передачі, дані обробляються з використанням фільтра Калмана за структурною схемою, що зображена на рис.3.

На рис. 7 для порівняння наведено графічне зображення результатів послідовних розрахунків та виконаних з використанням фільтра Калмана, суцільною та пунктирною лініями, відповідно. Пунктирною лінією з меншим інтервалом зображено реальні значення швидкості а) та переміщення б).



а)



б)

Рис. 7. Графічне зображення результатів розрахунків швидкості а) та переміщення б) при завадах у межах $\pm 0.06 \text{ м/с}^2$.

З графіків видно, що фільтр Калмана у поєднанні з використанням двох датчиків MPU6050, суттєво зменшує рівень завад. Для оцінки зменшення відхилення, з допомогою стенда (рис.8) виконано 11 замірів руху тривалістю у 4 секунди.

Було визначено середню квадратичну похибку (таблиця 1) для значень швидкості та переміщення отриманих з використанням двох датчиків акселерометра та фільтра Калмана.

Таблиця 1

Отримані дані відхилення у відсотках, для швидкості (Velocity) та позиції (Position), відповідно.

Velocity		Position	
KF, %	Measure, %	KF, %	Measure, %
2,45	65,49	2,40	44,77

Для подальшого покращення інерційних систем варто використати глибоке навчання (Deep Learning) штучного інтелекту(ШІ). Застосування такого методу навчання, разом з оптимальною кількістю датчиків акселерометра, дозволить збільшити точність трекінгу інерційних систем. Глибоке навчання дає можливість послідовного аналізу даних, що є складовою інерційних систем, адже зазвичай дані з них часто є часовими послідовностями. Довга короткострокова пам'ять, що притаманна такому навчанню може використовуватися для аналізу даних про рух і прогнозування майбутніх положень об'єкта. Також, глибоке навчання дає можливість врахування комбінованих даних з інерційних систем та GPRS, що дозволяє одночасно враховувати і фізичні і позиційні дані.

ВИСНОВКИ

У даній роботі досліджено переваги використання двох датчиків акселерометра та лінійного фільтра Калмана у інерційних системах вимірювання на базі MEMS-акселерометра. Також, запропоновано алгоритм фільтрації завад, що у даному випадку зменшило відсоток відхилення результатів значень швидкості до 2,45% та переміщення до 2.4%. У порівнянні з звичайними послідовними обрахунками в лінійних динамічних системах руху, використання фільтра Калмана зменшує відхилення у 26.7 рази для швидкості та у 18.6 рази для переміщення у лінійних системах.

Отримано та використано у симуляції реальні значення завад, що впливають на обрахунки. Можливість використання лінійного фільтра Калмана у системах з невеликими обчислювальними потужностями дає можливість адаптування та використання запропонованого методу використання мікроелектромеханічних систем до безпілотних літальних апаратів, або до його модулів. Дослідження показали, що використання фільтра Калмана суттєво зменшує вплив завад на відхилення кінцевих результатів обрахунків.

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

- [1] J. Boiko, O. Svachii, and T. Kałaczyński. "Control of unmanned aerial vehicle modules based on inertial measurement system and MEMS sensor." MATEC Web of Conferences. Vol. 391. EDP Sciences, 2024.
- [2] Z. Ren, W. Fu, Y. Li, B. Yan, S. Zhu and J. Yan, "Enhanced attitude control of unmanned aerial vehicles based on virtual angular accelerometer", IEEE Access, vol. 7, pp. 104330-104343, 2019
- [3] W. Chen and G. Xin, "Research on estimation method of UAV attitude information based on MEMS sensor", Proc. IEEE 6th Advanced Information Technology Electronic and Automation Control Conference (IAEAC), pp. 1768-1772, 2022. [4] SKY68001-31: LTE universal multi-band front-end module, 2018. [Online]. Available: <http://surl.li/yhsaju>. Accessed on: September 26, 2024
- [4] B. Kada, K. Munawar, M.S. Shaikh, M.A. Hussaini and U.M. Al-Saggaf, "UAV attitude estimation using nonlinear filtering and low-cost MEMS sensors", Proc. IFAC-PapersOnLine, vol. 49, no. 21, pp. 521-528, Nov. 2016.
- [5] O. Hanif and V. Kedia, "Evolution of proportional integral derivative controller", Proc. 2018 International Conference on Recent Innovations in Electrical Electronics & Communication Engineering (ICRIECEE), pp. 2655-2659, 2018.
- [6] J. Boiko and L. Karpova, "Increasing efficiency in the correlation processing of information signals for radar", Proc. Fourth International Conference on Communication Computing and Electronics Systems. Lecture Notes in Electrical Engineering, vol. 977, March 2023.
- [7] I. Parkhomey, J. Boiko, I. Zeniv and T. Bondarenko, "Method for measuring voltages in channels of a hemispherical resonator gyroscope with an arbitrary orientation axes", Indonesian Journal of Electrical Engineering and Computer Science (IJECS), vol. 29, no. 2, pp. 715-724, Feb. 2023.
- [8] W.-m. Niu, F. Li-qing, Z.-y. Qi and D.-q. Guo, "Small displacement measuring system based on MEMS accelerometer", Mathematical Problems in Engineering, vol. 2019, Oct. 2019.
- [9] M. Ghamari, P. Rangel, M. Mehrubeoglu, G. S. Tewold and R. S. Sherratt, "Unmanned aerial vehicle communications for civil applications: a review", IEEE Access, vol. 10, pp. 102492-102531, 2022.
- [10] J. Boiko, O. Svachii, I. Parkhomey and O. Horskyi, "Software Simulation of a MEMS Accelerometer for Cargo Unmanned Aerial Vehicle," 2023 IEEE 7th International Conference on Methods and Systems of Navigation and Motion Control (MSNMC), Kyiv, Ukraine, 2023, pp. 120-125, doi: 10.1109/MSNMC61017.2023.10329094.
- [11] Ігор Пархомей, Юлій Бойко, Віталій Ткачук, Олег Свачій, "Методика підвищення точності автоматизованого керування робототехнічними системами додаткових модулів БПЛА", Вісник Хмельницького національного університету. Серія: Технічні науки, Том. 337, no. 3(2), pp. 99–108, May 2024, doi: 10.31891/2307-5732-2024-337-3-14.

Свачій Олег Ігорович – аспірант кафедри технології машинобудування, e-mail: oleg.svachiy.ninety-nine19@gmail.com;

Хмельницький національний університет, Хмельницький.

Бойко Юлій Миколайович – д-р техн. наук, професор кафедри телекомунікації, медійних та інтелектуальних технологій, e-mail: boiko_julius@ukr.net;

Хмельницький національний університет, Хмельницький.

Віталій Павлович Ткачук – канд. техн. наук, доцент, завідувач кафедри технології машинобудування, e-mail: tkachukv.p@gmail.com;

Хмельницький національний університет, Хмельницький.

O.I. Svachii¹
J.M. Boiko¹
V.P. Tkachuk¹

IMPROVING THE ACCURACY OF UAV MODULE MOTION CONTROL USING INERTIAL SYSTEMS WITH HOMOGENEOUS SENSORS

¹Khmelnyskyi National University

The proposed method in the work focuses on improving the control and management of the movement of additional modules of an unmanned aerial vehicle (UAV) through the use of inertial measurement systems, which employ multiple sensors of the same type. The implementation of this method is based on the use of two MEMS accelerometers MPU6050. The influence of using two accelerometers combined with a Kalman filter (KF) on the accuracy of measurements in tracking the movement of the UAV without a fixed reference point has been investigated. It is shown that the use of additional sensors allows comparing and combining data from two independent sources, which contributes to an increase in measurement accuracy. The use of the KF in this system helps to reduce random fluctuations and noise. The integration of two sensors with the KF, which automatically adjusts the system's new data, ensures improved accuracy in tracking the movement of the object. This is critically important for systems that require maintaining a planned trajectory in cases of damage, absence, or loss of connection with external positioning systems. It has been demonstrated that UAVs often operate in challenging environments where traditional positioning systems, such as GPS, may face limitations due to poor satellite visibility or other interference. In such conditions, the use of inertial systems provides more reliable movement tracking, significantly enhancing the autonomy of the UAV. The work also describes the prospect of integrating the MEMS accelerometer into an inertial movement tracking system based on artificial intelligence (AI). It discusses the issues of optimizing the number of sensors when developing data processing algorithms using neural networks and machine learning methods.

Keywords: UAV, Kalman filter, MEMS, accelerometer, inertial navigation system, sensor, navigation

Svachii Oleh – PhD student at the Department of Manufacturing Engineering, Khmelnytskyi National University, e-mail: oleg.svachiy.ninety-nine19@gmail.com;

Boiko Juliy – Dr. Sc. (Eng.), Professor, Department of Telecommunications, Media and Intelligent Technologies, Khmelnytskyi National University, e-mail: boiko_julius@ukr.net;

Tkachuk Vitalii – Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Head of the Department of Manufacturing Engineering, Khmelnytskyi National University, e-mail: tkachukv.p@gmail.com;