

# Шляхи вдосконалення навігаційних систем для безпілотних літальних апаратів

<https://doi.org/10.31713/MCIT.2024.109>

Роман Дунець  
Національний університет «Львівська  
політехніка».  
м. Львів, Україна

Адріан Музиченко  
Національний університет «Львівська  
політехніка».  
м. Львів, Україна  
adrian.muzychenko@gmail.com

**Анотація** – У даних тезах розглядаються сучасні методи навігації безпілотних літальних апаратів (БПЛА). Особлива увага приділяється системам супутникової та інерціальним навігаційним системам. Аналізуються переваги і недоліки різних підходів до навігації, включаючи використання машинного навчання для підвищення точності і надійності систем. Досліджуються питання інтеграції різних типів навігаційних даних і їх обробки в реальному часі. Також розглядаються перспективи розвитку навігаційних технологій для БПЛА у контексті забезпечення безпеки польотів та автономного виконання завдань.

**Ключові слова** – безпілотні літальні апарати, навігація, GPS, інерціальні навігаційні системи, машинне навчання, інтеграція даних, безпека польотів.

Стрімкий розвиток безпілотних літальних апаратів (БПЛА) в останні роки обумовлений їх широким спектром застосувань у різноманітних сферах, від військових операцій до цивільних задач, таких як моніторинг навколишнього середовища, картографування, доставка вантажів та пошуково-рятувальні місії. Ключовим фактором, що визначає ефективність та безпеку польотів БПЛА, є наявність надійних та точних навігаційних систем. Традиційні методи навігації, такі як інерційні навігаційні системи (ІНС) та супутникова навігація, мають певні обмеження, пов'язані з розмірами, вагою, енергоспоживанням та вартістю компонентів. Розвиток мікроелектромеханічних систем (МЕМС) відкриває нові можливості для створення компактних, енергоефективних та економічно доступних навігаційних рішень для БПЛА.

МЕМС-датчики, зокрема акселерометри, гіроскопи та магнітometri, є основними компонентами сучасних інерційних навігаційних систем для БПЛА. Завдяки мініатюрним розмірам, низькому енергоспоживанню та високій стійкості до зовнішніх впливів, вони ідеально підходять для інтеграції в конструкцію літальних апаратів.

Акселерометри МЕМС вимірюють прискорення БПЛА за трьома ортогональними осями, дозволяючи визначити його траєкторію руху. Ці датчики реєструють як динамічні прискорення, спричинені рухом апарату, так і статичне прискорення,

зумовлене гравітацією. Шляхом подвійного інтегрування показань акселерометрів можна отримати дані про швидкість та переміщення БПЛА.

Гіроскопи МЕМС, своєю чергою, вимірюють кутові швидкості обертання навколо трьох осей, забезпечуючи інформацію про орієнтацію БПЛА в просторі. Ці датчики використовують ефект Коріоліса для реєстрації обертального руху. Інтегрування показань гіроскопів дозволяє визначити кути повороту апарату навколо осей крену, тангажу та ролання.

Магнітometri МЕМС застосовуються для визначення напрямку руху БПЛА відносно магнітного поля Землі. Вони вимірюють магнітну індукцію за трьома осями, що дозволяє визначити курс апарату. Проте магнітometri можуть бути чутливими до магнітних збурень, спричинених наявністю феромагнітних матеріалів або електромагнітних полів.

Комбінація даних з акселерометрів, гіроскопів та магнітometri МЕМС дає змогу отримати повну інформацію про положення та орієнтацію БПЛА в просторі. Проте МЕМС-датчики мають певні недоліки, зокрема накопичення похибок з часом через дрейф нуля та шуми вимірювань. Для мінімізації впливу цих факторів застосовуються алгоритми фільтрації та злиття даних, найпоширенішим з яких є фільтр Калмана. Цей рекурсивний алгоритм дозволяє оптимально поєднувати вимірювання різних датчиків, враховуючи їх статистичні характеристики та модель динаміки системи. Фільтр Калмана оцінює стан системи на основі попередніх вимірювань та прогнозує її поведінку, мінімізуючи середньоквадратичну похибку оцінки.[1]

Перспективним напрямком розвитку МЕМС-датчиків для навігаційних систем БПЛА є їх інтеграція з обчислювальними ядрами в єдину систему на кристалі (SoC). Такі рішення об'єднують акселерометри, гіроскопи, магнітometri, приймачі глобальних навігаційних супутникових систем (ГНСС), а також потужні процесори для обробки даних в одному компактному модулі. Це дозволяє спростити архітектуру навігаційної системи, зменшити її розміри та енергоспоживання, а також підвищити надійність та стійкість до зовнішніх впливів.

Інтеграція МЕМС-датчиків з іншими методами навігації, такими як супутникова навігація та візуальна одометрія, відкриває нові можливості для створення комплексних навігаційних систем для БПЛА.[2] Супутникова навігація, зокрема GPS, забезпечує високу точність визначення положення апарату в глобальній системі координат. Проте вона може бути недоступною в певних умовах, наприклад, при втраті сигналу через перешкоди або навмисне глушіння. Візуальна одометрія, яка базується на аналізі послідовних зображень з бортових камер, дозволяє визначати переміщення та орієнтацію БПЛА відносно навколишнього середовища. Цей метод є автономним та не залежить від зовнішніх джерел інформації, проте також схильний до накопичення похибок з часом.

Комбінування МЕМС-датчиків з супутниковою навігацією та візуальною одометрією в єдину інтегровану навігаційну систему дозволяє компенсувати недоліки кожного з цих методів та отримати більш надійне та точне рішення. Інформація з МЕМС-датчиків використовується для безперервного відстеження руху БПЛА між оновленнями даних від супутникових приймачів та для корекції похибок візуальної одометрії. Своєю чергою, супутникова навігація та візуальна одометрія дозволяють періодично коригувати накопичені похибки МЕМС-датчиків та забезпечують абсолютну прив'язку до глобальної системи координат.[3]

Подальший розвиток МЕМС-технологій для навігаційних систем БПЛА спрямований на підвищення точності, стабільності та розширення функціональних можливостей датчиків. Впровадження нових матеріалів, таких як п'єзоелектричні та оптичні, дозволяє створювати датчики з покращеними характеристиками та меншою чутливістю до зовнішніх факторів. Вдосконалення конструкцій МЕМС-датчиків, зокрема використання багатовісних та диференціальних схем, сприяє підвищенню їх точності та зменшенню дрейфу нуля.

Важливим аспектом розвитку МЕМС-датчиків є оптимізація алгоритмів обробки даних та їх адаптація до специфічних умов застосування в БПЛА. Розробка нових методів фільтрації, таких як адаптивні фільтри Калмана, фільтри частинок та нейромережеві підходи, дозволяє ефективніше боротися з шумами вимірювань та покращувати точність оцінки навігаційних параметрів. Інтеграція МЕМС-датчиків з алгоритмами інерціальної

навігації, такими як безплатформні інерціальні навігаційні системи (БІНС), відкриває нові можливості для створення автономних навігаційних рішень для БПЛА.[4]

Перспективним напрямком є також поєднання МЕМС-датчиків з технологіями штучного інтелекту, зокрема з глибокими нейронними мережами. Застосування методів машинного навчання дозволяє автоматично виявляти та компенсувати систематичні похибки датчиків, адаптуватися до змінних умов навколишнього середовища та підвищувати загальну точність та надійність навігаційної системи.

Подальші дослідження в галузі МЕМС-технологій для навігації БПЛА спрямовані на вдосконалення характеристик датчиків, розробку нових архітектур систем на кристалах, оптимізацію алгоритмів обробки даних та інтеграцію з методами штучного інтелекту. Ці напрямки розвитку відкривають нові можливості для створення адаптивних, інтелектуальних та високоточних навігаційних рішень.

Розвиток МЕМС-датчиків та їх застосування в навігаційних системах БПЛА сприятиме розширенню функціональних можливостей безпілотних літальних апаратів та їх ефективному використанню в різноманітних сферах. Це дозволить покращити безпеку польотів, підвищити автономність БПЛА та розширити спектр задач, які вони можуть виконувати.

### ЛІТЕРАТУРА

- [1] Comparing Kalman and particle filter approaches to coordinated multi-vehicle navigation / Mirabellot D., Sandersont A., Blidberg D.—// Proc. of the Int. Conf. UUST 2007.— 2007.— № 78.— [1, с.1-6].
- [2] Long-Distance GNSS-Denied Visual Inertial Navigation for Autonomous Fixed-Wing Unmanned Air Vehicles: SO(3) Manifold Filter Based on Virtual Vision Sensor / Gallo, E., Barrientos, A. — // Aerospace. — 2023. — Vol. 10, No. 8. — [2, с.708].
- [3] On autonomous navigation of unmanned aerial vehicles: 3D path planning and vision-based environmental mapping and machine learning / Petrov, P., Sarkisov, Y., Nadotozki, V. — // IEEE Aerospace and Electronic Systems Magazine. — 2020. — Vol. 35, No. 11. — [3, с.28-47].
- [4] Тристан А.В. Математичні моделі та методи планування повітряної розвідки рухомих й стаціонарних об'єктів з застосуванням БПЛА / А.В. Тристан., А.О. Бережний, І.М. Крижанівський // Збірник матеріалів VII-ої міжнародної науково-технічної конференції “Проблеми інформатизації”. – Черкаси, 13-15 листопада 2019 р. – Т. 3. – [4, с.41].