

# ВИБІР ТА РЕАЛІЗАЦІЯ МЕТОДІВ НАВІГАЦІЇ ДЛЯ БЕЗПІЛОТНИХ ЛІТАЛЬНИХ АПАРАТІВ НА СУЧАСНИХ КОМП'ЮТЕРНИХ КОМПОНЕНТАХ

А.О. Музиченко, Р.Б. Дунець

Національний університет «Львівська політехніка»  
кафедра спеціалізованих комп'ютерних систем  
E-mail: [adrian.o.muzychenko@lpnu.ua](mailto:adrian.o.muzychenko@lpnu.ua), [roman.b.dunets@lpnu.ua](mailto:roman.b.dunets@lpnu.ua)

© Музиченко А.О., Дунець Р.Б., 2024

У статті проведено аналіз та вибір методів навігації для безпілотних літальних апаратів, які можуть бути реалізовані на сучасних комп'ютерних компонентах. Представлено класифікацію методів навігації за основними критеріями: принцип роботи системи, тип сенсорів, точність, надійність, енергоспоживання та можливість інтеграції з іншими системами апарату. Розглянуто використання інерційних систем на базі MEMS сенсорів, супутникових системах позиціонування та візуальній одометрії. Запропоновано підхід до комбінованого застосування сенсорів для підвищення точності та надійності навігації безпілотних літальних апаратів. Окреслено перспективи інтеграції MEMS сенсорів з системами на кристалі (SoC) для подальшого зменшення розмірів, ваги та енергоспоживання навігаційних систем. Результати дослідження показали, що використання MEMS сенсорів може забезпечити значне зменшення маси системи навігації з 250 г до менш ніж 50 г, а також істотне зниження енергоспоживання до 10-16,5 мВт в порівнянні з традиційними інерційними пристроями.

**Ключові слова:** інерційні сенсори, інтегровані системи, магнітометри, MEMS, навігаційні системи, системи на кристалі, супутникова навігація.

## 1. Вступ

У сучасному світі розвиток безпілотних апаратів став важливим напрямком технологічних досліджень та застосувань. За останні десятиріччя відбулася значна еволюція в галузі розробки точних та доступних сенсорів навігації з високою частотою оновлення. Сучасні технології, такі як, оптичні гірокомпаси та блоки інерційного вимірювання, доповнюють традиційні сенсори і створюють нові можливості для точної навігації.

Розвиток навігаційних методів не обмежується лише вдосконаленням сенсорів. Нові методології навігації виникають завдяки поєднанню даних з різних джерел, включаючи не лише сенсори, а й дані з динамічних або кінематичних моделей. Це відкриває шлях до створення більш ефективних та надійних систем навігації для безпілотних апаратів.

З іншого боку, розвиток багатоядерних мікроконтролерів, мікрокомп'ютерів дає змогу опрацювати в реальному масштабі часу великі обсяги інформації при відносно невеликій споживаній потужності, малих габаритних розмірах та низькій вартості. Проте, їх застосування не набуло ще системного характеру, не сформульовано критерії створення комп'ютерних засобів як стандартних для більшості типів безпілотних апаратів.

Отже, актуальною є задача вибору методів навігації, придатних для реалізації на сучасних комп'ютерних компонентах – системах на кристалі. Це дасть змогу покращити параметри навігаційних систем безпілотних літальних апаратів.

## 2. Огляд літературних джерел

У науковій літературі представлено широкий спектр досліджень, які стосуються класифікації методів навігації для безпілотних апаратів (БА). Різні підходи до класифікації методів навігації базуються на окремих критеріях, таких як принцип роботи [1], тип сенсорів [2], спосіб отримання сигналів [3], точність визначення положення [4], сфера застосування [5], рівень автономності [6] та інші. Існують також дослідження, які пропонують комплексні класифікації, що враховують кілька критеріїв одночасно [7]. Однак, для вибору найбільш ефективних методів навігації для безпілотних літальних апаратів (БПЛА), важливо розробити класифікацію, яка інтегрує всі основні аспекти, такі як принципи роботи системи, характеристики сенсорів, обробка навігаційних сигналів, точність визначення позиції, надійність та стійкість до зовнішніх впливів, енергоспоживання, вимоги до обчислювальних ресурсів, умови середовища, вартість та складність реалізації, а також інтеграція з іншими системами.

Для посилення ефективності використання MEMS сенсорів у навігаційних системах БПЛА, активно розробляються нові методи калібрування, що дозволяють компенсувати температурні зміни та довготривалі дрейфи, які можуть впливати на точність вимірювань. Це забезпечує підвищену стабільність роботи інерційних систем навіть у складних умовах експлуатації, таких як високі або низькі температури та вібраційні навантаження. Також ведуться дослідження щодо інтеграції MEMS із системами штучного інтелекту для оптимізації процесу обробки даних у реальному часі [8].

### **3. Постановка задачі**

Сучасні методи навігації для БПЛА стикаються з низкою викликів, що потребують подальшого дослідження. Основною метою цього дослідження є аналіз і вибір методів навігації для БПЛА, які можуть бути реалізовані на сучасних комп'ютерних компонентах, що підвищить ефективність та надійність навігаційних систем з урахуванням різноманітних критеріїв, таких як точність, надійність, енергоспоживання та інтеграція з іншими системами тощо. В рамках дослідження буде розглянуто ідею про те, що комбінація MEMS сенсорів з іншими навігаційними технологіями може суттєво підвищити точність та надійність навігації БПЛА, особливо в складних експлуатаційних умовах, при апаратній реалізації з використанням систем на кристалі.

### **4. Класифікація методів навігації та їх аналіз**

Відомі різні підходи до класифікації методів навігації за окремими критеріями – за принципом роботи, за типом сенсорів, за способом отримання сигналів, за точністю визначення положення, за сферою застосування, за рівнем автономності тощо. Відомо також підходи до класифікації, що враховують одночасно декілька критеріїв, проте для вибору методів навігації для безпілотних апаратів доцільно мати класифікацію, яка би враховувала всі основні критерії, а саме: принцип роботи навігаційної системи, тип та характеристики використовуваних сенсорів, спосіб отримання та обробки навігаційних сигналів, точність визначення положення та орієнтації, надійність та стійкість до зовнішніх перешкод, енергоспоживання та вимоги до обчислювальних ресурсів, можливість роботи в різних умовах середовища, вартість та складність реалізації, можливість інтеграції з іншими системами безпілотного апарату. Один із можливих варіантів класифікації наведений на рис. 1.

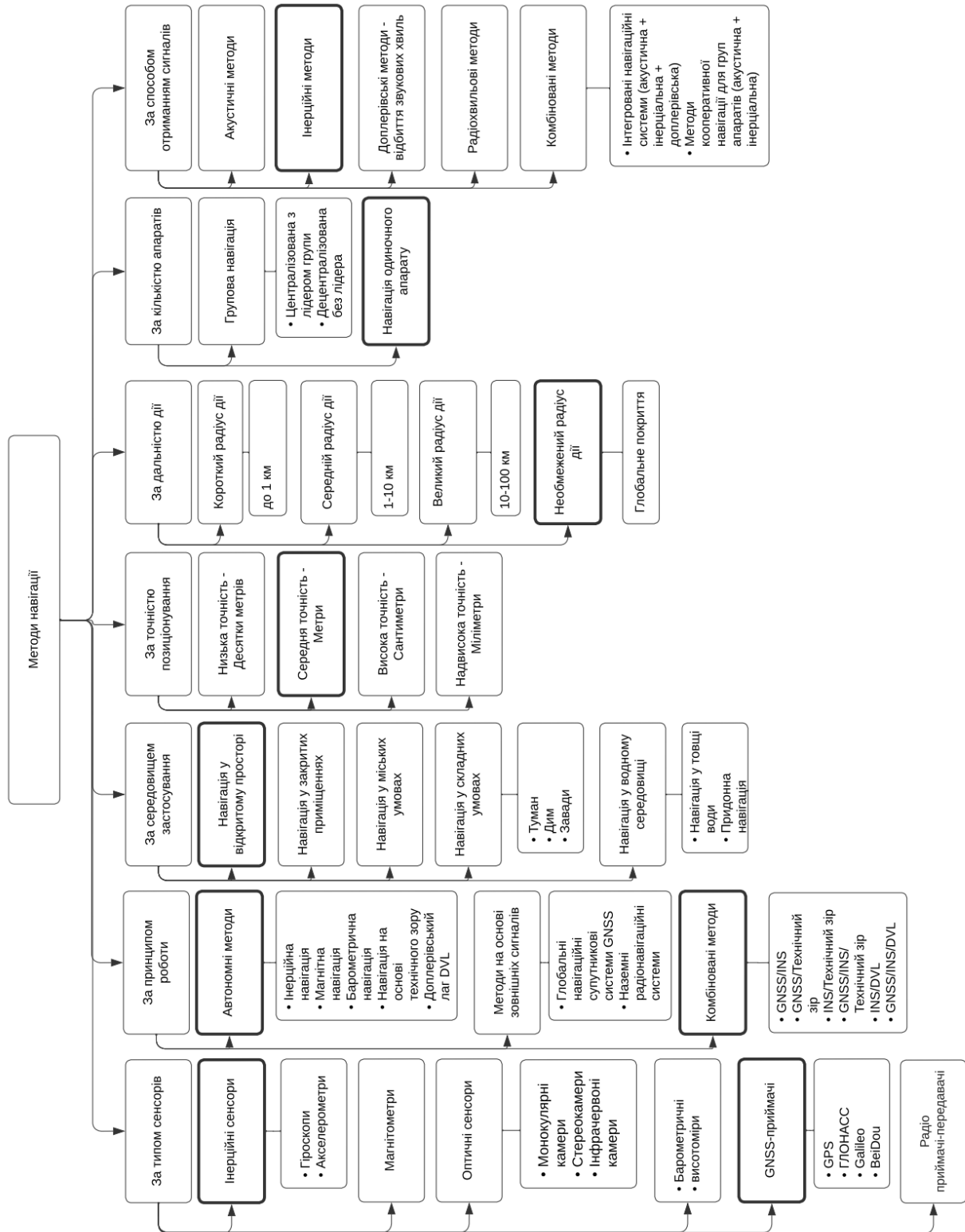
Проаналізуємо відомі методи навігації стосовно застосування їх для безпілотних апаратів з урахуванням як особливостей самих апаратів (вимоги до точності навігації, малогабаритних характеристик, завадостійкості, споживаної потужності, автономності роботи, швидкодії, надійності, вартості, можливості роботи в різних умовах навколишнього середовища, здатності до інтеграції з іншими системами апарату), так і можливостей до реалізації системами на кристалі.

*За типом сенсорів.* Серед достатньо великої кількості типів сенсорів для у БА застосовується інерційні, оптичні та GNSS (глобальні навігаційні супутникові системи) приймачі. Інерційні сенсори є базовими для БА. Гіроскопи забезпечують високу точність вимірювання кутової швидкості та орієнтації БА в просторі, а акселерометри – високу точність вимірювання прискорення БА по трьох осях. Крім цього ці сенсори забезпечують високу надійність, автономність роботи та завадостійкість. Недоліками таких сенсорів є висока споживча потужність, великі габаритні розміри та маса, а також достатньо великий час встановлення робочого режиму після подачі живлення.

Оптичні сенсори, зокрема й головки самонаведення, використовують технології комп'ютерного зору для візуальної навігації у різних частотних діапазонах – від ультрафіолетового до інфрачервоного.

*Вибір та реалізація методів навігації для безпілотних літальних апаратів на сучасних комп'ютерних компонентах*

Вони бувають монокулярні та стереокамери, Монокулярні камери фіксують зображення навколишнього середовища і визначають позицію БА відносно характерних об'єктів, тоді як стереокамери, які складаються з двох синхронізованих камер, забезпечують тривимірну інформацію про простір. Це дозволяє точно визначити позицію та орієнтацію апарату в просторі. Недоліком таких сенсорів є великий обсяг інформації, для опрацювання якого потрібно швидкодіючі комп'ютерні засоби в автономному режимі роботи БА або швидкодіючі, завадостійкі канали зв'язку з оператором.



*Рис. 1. Класифікація методів навігації*

GNSS приймачі широко застосовуються для навігації БА. Вони отримують сигнали від супутників навігаційних систем, таких як GPS, ГЛОНАСС, Galileo чи BeiDou, вимірюють час проходження сигналу до приймача від різних супутників та визначають позицію за допомогою трилатерації. Навігаційні супутникові системи забезпечують високу точність навігації та глобальне покриття, але при умові отримання GNSS приймачами сигналів.

Радіо приймачі-передавачі служать для обміну сигналами керування польотом БА за допомогою радіоканалу зв'язку. Вони, зокрема широко застосовуються в frv-дронах.

Стосовно інших типів сенсорів, то вони, у більшості випадків, застосовуються у пілотованих апаратах. Магнітометри вимірюють напруженість магнітного поля Землі та дають змогу визначити курс апарату відносно магнітного полюса Землі. Барометричні висотоміри, зокрема трубки Піто, застосовуються для визначення висоти польоту відносно рівня моря шляхом вимірювання різниці тисків. Дані висотомірів комбінуються з інформацією інших сенсорів для підвищення точності визначення висоти польоту. Радіонавігаційні сенсори VOR (VHF Omnidirectional Range), DME (Distance Measuring Equipment) та TACAN (Tactical Air Navigation) використовують наземні радіомаяки для визначення місцезнаходження. Зокрема, VOR надає інформацію про напрям до радіомаяка, DME визначає відстань, а TACAN комбінує функції VOR і DME. Ці сенсори часто використовуються як додаткові до пілотованих апаратів.

*За принципом роботи* Очевидно, що класифікація за принципом роботи тісно пов'язана із типами сенсорів. Проте, всі навігаційні системи за цим принципом можна поділити на три групи: автономні, на основі зовнішніх сигналів та комбінаційні.

Автономні методи навігації дають змогу визначити положення та орієнтацію БА без використання зовнішніх сигналів, покладаючись лише на інформацію від різного типу сенсорів. Тут потрібно мати на увазі, що автономні навігаційні системи потребують застосування швидкодійних комп'ютерних засобів для опрацювання великих масивів даних та формування керуючих сигналів, а, відтак, вони потребують потужних блоків живлення. Крім того, використання одного типу сенсора, наприклад, гіроскопа, часто приводить до накопичення з часом похибок, які потрібно усувати.

Навігаційні методи на основі зовнішніх сигналів використовують інформацію від зовнішніх джерел, таких як супутники, наземні радіомаяки чи радіо-сигнали керування БА. Реалізація таких методів не потребує застосування високопродуктивних комп'ютерних засобів, забезпечують достатньо високу точність навігації, але при цьому мають низьку завадостійкість через втрату сигналів, наприклад, у міських умовах або під впливом електромагнітних завад різної природи.

Комбіновані методи навігації є об'єднанням двох попередніх методів, що дає змогу отримати високу точність та надійність. Одним із поширених варіантів є інтеграція інерційних сенсорів з GNSS приймачами. Таке поєднання забезпечує високу точність навігації навіть під час короточасній втраті GNSS сигналу. Ще одним прикладом комбінованого методу є інтеграція візуальної одометрії або SLAM (одночасна локалізація і картографування) з інерційною навігацією і GNSS, де оптичні сенсори надають додаткову інформацію про переміщення БА, що підвищує точність і стійкість навігаційної системи загалом. Проте, комбіновані методи також поєднують й недоліки перших двох методів.

Методи навігації БА можуть бути класифіковані за *середовищем застосування*. Кожне середовище має свої особливості й висуває специфічні вимоги до навігаційних систем.

Навігація у відкритому повітряному чи водному просторі характеризується мінімальними перешкодами на шляху руху БА та наявністю прямої видимості супутників навігації. Типовим варіантом є поєднання інерційних сенсорів з GNSS приймачами із застосуванням досить потужних комп'ютерних засобів опрацювання інформації.

Навігація у міських умовах характеризується складнішим середовищем з численними перешкодами, такими як будівлі, мости та інші структури. Це створює проблеми для GNSS сигналів через ефект багатопроменевого поширення та затінення. У таких умовах ефективними є комбіновані методи, що поєднують інерційну навігацію, візуальну одометрію та SLAM. Додатково можуть використовуватися технології розпізнавання об'єктів та аналізу 3D-карт місцевості для підвищення точності позиціонування.

Підводна навігація стикається з унікальними викликами через неможливість використання GNSS та обмежене поширення радіохвиль у воді. У цьому середовищі перевага надається інерційним системам, доповненим гідроакустичними методами навігації.

## *Вибір та реалізація методів навігації для безпілотних літальних апаратів на сучасних комп'ютерних компонентах*

Таким чином, кожне середовище навігації вимагає спеціальних підходів для забезпечення надійності та точності навігаційних систем, а комбіноване використання різних сенсорних даних дає змогу компенсувати недоліки окремих методів.

Методи навігації БА можна класифікувати за *рівнем точності*, що відповідає конкретним завданням та вимогам:

Низька точність використовується для тих завдань, де точність не є критично важливою, наприклад, моніторинг довкілля, пошуково-рятувальні операції або розвідка. Для них, зазвичай, достатньо використання автономних методів, таких як навігація на основі інерційних сенсорів, які дають змогу відслідковувати переміщення БА без залежності від зовнішніх сигналів, хоч і з певними похибками.

Середня точність навігації, а це в межах кількох метрів, застосовується для тих завдань, де точне позиціонування є важливим, але не критичним, наприклад, картографування, інспекція інфраструктури або моніторинг у сільському господарстві. Досягнення середньої точності можливе за допомогою GNSS, а також завдяки інтеграції GNSS з інерційними сенсорами, що забезпечує додаткову надійність.

Висока точність навігації, а це в межах декількох сантиметрів, необхідне для прецизійних завдань, таких як геодезична зйомка, 3D-реконструкція або автоматичне приземлення. Для досягнення такої точності використовуються методи RTK (Real-Time Kinematic) GNSS, що дають змогу отримувати дані з поправками від базових станцій. Інтеграція RTK GNSS з інерційними й оптичними сенсорами забезпечує високу точність навіть у випадках короткочасної втрати супутникових сигналів.

Надвисока точність, а це в межах декількох міліметрів, необхідна для завдань найвищої складності, таких як промислова інспекція, монтаж конструкцій або медичні застосування. Досягнення такої точності вимагає використання спеціалізованих навігаційних систем, таких як лазерні трекери чи системи комп'ютерного зору з високою роздільною здатністю. Комбінація цих методів з інерційними сенсорами забезпечує безперервність і надійність навігаційних рішень у таких завданнях.

Методи навігації БА можна класифікувати за *кількістю апаратів*, що беруть участь у виконанні завдання, а це групова навігація та навігація одиночного апарату.

Групова навігація передбачає координацію та взаємодію між декількома БА. Вона характеризується підвищеною ефективністю виконання завдань за рахунок розподілу роботи між окремими апаратами, що дає змогу суттєво скоротити час на їх реалізацію. Перевагою групової навігації є збільшена надійність системи, оскільки у випадку виходу з ладу одного з БА, інші учасники групи здатні компенсувати його функції та продовжити виконання задачі. Реалізація групової навігації може відбуватися у двох основних формах: централізованій з визначенням лідера та децентралізованій без лідера. У першому випадку один з БА виконує роль координатора, визначаючи розподіл завдань між іншими апаратами та здійснюючи моніторинг прогресу виконання місії. Децентралізована форма передбачає рівноправну взаємодію між усіма БА, де прийняття рішень відбувається колективно на основі обміну інформацією та узгодження дій для ефективного виконання поставлених завдань.

На противагу груповій навігації, навігація одиночного апарату характеризується автономним виконанням завдань без координації з іншими БА. Основними функціональними компонентами такого підходу є локалізація, що передбачає визначення власного положення та орієнтації у просторі; планування траєкторії руху з метою обчислення оптимального маршруту до цілі; управління рухом для реалізації запланованої траєкторії; а також виявлення та уникнення перешкод на шляху слідування. Кожен з цих компонентів відіграє критичну роль у забезпеченні ефективної та безпечної навігації одиночного БА в різноманітних умовах експлуатації.

Отже, групова навігація підходить для великих територій, пошуково-рятувальних операцій або динамічного відстеження, навігація одиночного БА краще підходить для інспекції об'єктів або доставки вантажів. Поєднання групової та одиночної навігації може використовуватись для досягнення оптимального балансу між автономністю та координацією.

Насамкінець, класифікація методів навігації за *фізичним способом отримання сигналів* включає: акустичні, інерційні, доплерівські, радіохвильові та комбіновані. Акустичні методи використовують звукові хвилі для визначення положення та швидкості БА і є особливо ефективними у водному середовищі, де звукові хвилі можуть поширюватися на значні відстані з мінімальним загасанням.

Основні акустичні сенсори, такі як гідрофони та сонари, застосовуються для вимірювання глибини, визначення відстані до дна або поверхні за часом проходження звукового сигналу, а також для локалізації апарату відносно маяків чи інших об'єктів за часом приходу звукових хвиль. Акустичні методи застосовуються для картографування підводного рельєфу або виявлення перешкод. Перевагами цього методу є ефективність у водному середовищі, відносна простота й невисока вартість сенсорів. До недоліків відносяться низька роздільна здатність, обмежена дальність дії та висока чутливість до шумів.

Допплерівські методи навігації базуються на використанні ефекту Доплера для вимірювання швидкості апарату відносно середовища на основі зміни частоти звукових або радіохвиль, відбитих від поверхонь або об'єктів під час руху. Завдяки цьому можна визначити радіальну складову швидкості БА, тобто проєкцію вектора швидкості на напрямок поширення хвиль. Допплерівські методи забезпечують точне вимірювання швидкості, зокрема на малих відстанях до відбивача, що є їхньою ключовою перевагою. Проте, цей метод залежить від наявності відповідних відбивачів звукових або радіохвиль, а також обмежується вимірюванням лише радіальної складової швидкості.

Радіохвильові методи навігації використовують радіохвилі для визначення положення БА відносно маяків або супутників. Серед цих методів можна виокремити триангуляцію за вимірюванням кутів приходу сигналів від кількох маяків і трilaterацію за вимірюванням відстаней до маяків за часом або фазою сигналів.

Отже, класифікація методів навігації БА за фізичним способом отримання сигналів дає змогу систематизувати різноманітні підходи до вирішення задачі навігації апарату в різних середовищах.

В залежності від застосування, різні методи можуть бути більш чи менш ефективними, адже у кожного є свої переваги та обмеження. Тенденцією в розвитку навігаційних систем БА є інтеграція й комплексування різних методів і сенсорів для досягнення максимальної точності, надійності й автономності навігації.

## **5. Вибір методів навігації для безпілотних літальних апаратів**

БПЛА включають широкий спектр різних типів від апаратів з фіксованими крилами до дронів, але всі вони ставлять жорсткі вимоги щодо енергоспоживання, маси, габаритних розмірів, надійності, тощо, до сенсорів системи керування високоточних механізмів, тобто авіоніки, при забезпеченні високої точності навігації, швидкодії, завадостійкості. З цих міркувань серед інерційних сенсорів вибираються ті, які побудовані на базі мікроелектромеханічних систем (MEMS сенсорів), а також GNSS приймачі.

MEMS інерційні сенсори, такі як акселерометри та гіроскопи, мають значно менші розміри та вагу порівняно з традиційними інерційними пристроями. Завдяки мініатюрності вони легко інтегруються в компактні конструкції БПЛА, не вимагаючи додаткового простору або збільшення загальної ваги. Це дає змогу оптимізувати аеродинаміку та збільшити тривалість польоту БПЛА. Розглянемо більш детально особливості роботи та тенденції розвитку MEMS сенсорів.

Відомо три основні режими роботи MEMS гіроскопів: режим силового балансування (або режим вимірювання кутової швидкості), режим вимірювання кута повороту та диференціальний режим. У режимі силового балансування сила Коріоліса компенсується негативним зворотним зв'язком, утримуючи стоячу хвилю у фіксованому положенні. Режим вимірювання кута повороту характеризується відсутністю компенсації сили Коріоліса, що дає змогу досягти надзвичайно високого динамічного діапазону, смуги пропускання та стабільного масштабного коефіцієнта. Диференціальний режим роботи доповнює два попередні режими, він реалізується шляхом утримання стоячої хвилі між електродами, розташованими під рівними кутами 45 градусів один до одного для резонаторів кільцевого типу. Особливістю цього режиму є наявність двох вимірювальних каналів X та Y, кожен з яких надає сигнал, пропорційний кутовій швидкості з протилежними знаками. Диференціальний режим роботи має додаткові можливості для компенсації впливу як внутрішніх, так і зовнішніх дестабілізуючих факторів при вимірюванні кутової швидкості [9].

Важливим аспектом розвитку MEMS для БПЛА є інтеграція різних типів сенсорів на одному чіпі. Дослідження показують, що комбінування акселерометрів, гіроскопів та магнітометрів у єдиному MEMS пристрої не лише зменшує загальні габарити системи, але й покращує синхронізацію даних [10]. Даний підхід сприяє зниженню енергоспоживання та вартості виробництва, тому має потенціал для застосування на БПЛА.

## *Вибір та реалізація методів навігації для безпілотних літальних апаратів на сучасних комп'ютерних компонентах*

Попри те, що принципи функціонування багатьох MEMS пристроїв залишаються незмінними, постійна мініатюризація та вдосконалення технологій потребують ретельного моделювання та симуляції для запобігання потенційним помилкам у проектуванні. Хоча метод скінченних елементів вважається одним з найнадійніших підходів до симуляції, він часто потребує значних обчислювальних ресурсів та часу. Альтернативою може слугувати аналітичне моделювання, яке дозволяє суттєво скоротити час симуляції, проте вимагає певних спрощень, що може призвести до похибок у результатах. Оптимальним рішенням вбачається комбінація обох методів, що дозволяє поєднати їхні переваги та забезпечити ефективне проектування MEMS пристроїв для застосування у навігаційних системах безпілотних літальних апаратів [11].

MEMS сенсори характеризуються низьким енергоспоживанням, що є критично важливим для БПЛА з обмеженими ресурсами живлення. Це дозволяє продовжити тривалість роботи інерційної навігаційної системи і, відповідно, збільшити час польоту БПЛА без необхідності додаткових або більш потужних джерел живлення. Особливо це актуально для малогабаритних безпілотних літальних засобів, де кожен ват енергії має значення.

Ще однією перевагою MEMS інерційних сенсорів є їх висока стійкість до ударів, вібрацій та екстремальних температур, що є критично важливим для БПЛА, які працюють у важких умовах експлуатації. Ця стійкість забезпечує надійність інерційної навігаційної системи та зменшує ймовірність збоїв та відмов, що може бути вирішальним фактором у критичних ситуаціях. Крім того, ці сенсори є менш схильні до зносу та пошкоджень у порівнянні з традиційними механічними системами, що забезпечує довший термін служби та зменшує витрати на обслуговування.

З точки зору вартості, MEMS інерційні сенсори значно дешевші, ніж традиційні інерційні пристрої, завдяки масовому виробництву та використанню мікроелектронних технологій. Ця економічна перевага робить їх доступними для широкого кола застосувань БПЛА, дозволяючи розширити функціонал без додаткових витрат [12].

І найважливішим є те, що MEMS сенсори легко інтегруються з іншими електронними системами БПЛА, такими як бортовий комп'ютер, системи керування польотом та зв'язку. Це спрощує загальну архітектуру системи та полегшує обмін даними між різними компонентами, що сприяє підвищенню ефективності роботи всього комплексу.

Таким чином, використання MEMS інерційних сенсорів в інерційних навігаційних системах БПЛА забезпечує ряд переваг, включаючи компактні розміри, низьку вагу, низьке енергоспоживання, доступну вартість, підвищену стійкість та простоту інтеграції. Ці переваги роблять MEMS ідеальним рішенням для БПЛА, де вимоги до ваги, розмірів, витрат енергії та надійності мають вирішальне значення.

Незважаючи на те, що MEMS сенсори поступаються точністю традиційним інерційним пристроям, їх точність постійно покращується завдяки вдосконаленню технологій виробництва. Комбінація MEMS інерційних сенсорів з іншими навігаційними системами, такими як GPS, може значно підвищити загальну точність визначення положення та орієнтації БПЛА. Використання алгоритмів корекції та фільтрації також сприяє підвищенню точності [13].

GNSS приймачі забезпечують високу точність визначення місцезнаходження БПЛА у глобальному масштабі. За оптимальних умов, сучасні GNSS приймачі здатні визначати позицію з точністю до декількох сантиметрів, що є критично важливим для виконання складних місій та автономного польоту. Ця точність досягається завдяки використанню сигналів від множини супутників та застосуванню складних алгоритмів обробки даних. GNSS надає не лише інформацію про позицію, але й про швидкість та час, що є критичним для синхронізації бортових систем БПЛА та координації дій у групових польотах. Точне визначення часу з нано-секундною точністю дозволяє реалізувати складні алгоритми керування та навігації.

Інтеграція GNSS з іншими навігаційними системами, дає змогу створювати високонадійні гібридні системи. Таким чином, застосування GNSS приймачів у навігації БПЛА забезпечує високу точність позиціонування, глобальне покриття, можливість безперервної навігації та інтеграції з іншими системами. Ці переваги роблять GNSS незамінним компонентом сучасних навігаційних систем БПЛА, що дозволяє розширити спектр їх застосування та підвищити ефективність виконання різноманітних

місій. Проте, GNSS системи вразливі до електромагнітних завад, як природних, так і штучних, - навмисного глушіння або спуфінгу (фальсифікації) GNSS сигналів, що може призвести до повної втрати навігації або надання БПЛА неправильних координат.

## 6. Варіанти реалізації навігаційних систем БПЛА як систем на кристалі

Загальна структура систем навігації БПЛА включає набір сенсорів, цифрову систему опрацювання інформації та набору виконавчих механізмів (актюаторів). Цифрова система зазвичай базується на базі мікропроцесорів чи мікроконтролерів з RISC архітектурою. Крім центрального процесора, пам'яті така система, що містить АЦП, адаптери, що під'єднані до однієї системної шини. Загальний недолік такого підходу є необхідність створення окремої мікропроцесорної системи для кожного типу БПЛА. Можливий варіант реалізації цифрової системи на ПЛІС, проте така система має завжди нижчу швидкодію. Натомість пропонується створити для БПЛА низку уніфікованих цифрових систем, які реалізуються як системи на кристалі SoC. Нижче розглянемо варіанти побудови таких систем.

Для простих навігаційних систем БПЛА, що не містять оптичних сенсорів (відеокамер), але включають один MEMS сенсор, GNSS приймач та невелику кількість виконавчих механізмів цифрова система може бути побудована як одношинна система на кристалі, варіант якої наведено на рис. 2.

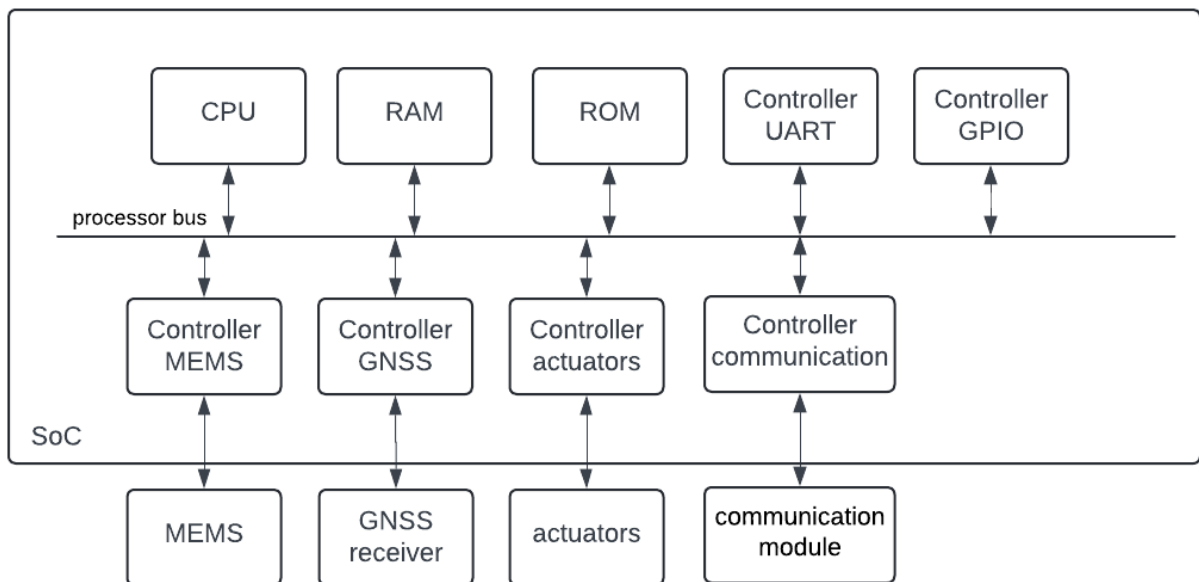


Рис. 2. Одношинна система на кристалі

Для керування роботою сенсорами та виконавчими механізмами, а також обміну інформацією, SoC містить контролери, що реалізують необхідні протоколи обміну даними, а саме: Controller MEMS та Controller GNSS для введення даних з відповідних сенсорів, Controllers actuators для керування роботою виконавчих механізмів, Controller UART та Controller GPIO обміну даними стандартними протоколами.

Програма роботи зберігається в постійній пам'яті ROM, а дані - в оперативній пам'яті RAM. Процесор CPU виконує обчислення згідно програми – визначає координати польоту БПЛА в просторі, а також швидкість, прискорення, висоту, на основі даних від сенсорів MEMS та GNSS згідно алгоритму роботи. Процес обробки даних включає попередню обробку сигналів для зменшення шумів, калібрування сенсорів, компенсацію систематичних похибок та застосування фільтрів похибок для об'єднання інформації з різних сенсорів. Алгоритми обробки даних, що реалізуються на SoC, зазвичай базуються на розширених або безрозмірних фільтрах Калмана, які дають змогу оптимально поєднувати дані з різних сенсорів з урахуванням їх статистичних характеристик та особливостей[14], комплементарні фільтри різних типів для оптимального поєднання даних з гіроскопів та акселерометрів, алгоритми слабозв'язаної, тіснозв'язаної та глибокозв'язаної інтеграції для комплексування даних MEMS та GNSS, адаптивні алгоритми, що автоматично налаштовують



## Вибір та реалізація методів навігації для безпілотних літальних апаратів на сучасних комп'ютерних компонентах

параметри фільтрації залежно від поточних умов роботи, та методи компенсації систематичних похибок, включаючи температурний дрейф та вібраційні впливи. Застосування цих алгоритмів дає змогу суттєво підвищити точність навігаційного рішення за рахунок оптимального використання переваг кожного типу датчиків та компенсації їх недоліків.

Процесор CPU також формує сигнали керування на виконавчі механізми, за допомогою яких виконується коригування польоту БПЛА.

Попри такі можливості одношинна система має суттєвих недолік – обмежену кількість, зазвичай до 5-7 елементів, що під'єднані до системної шини. Збільшення кількості елементів, під'єднання сенсорів, що видають великі обсяги даних, починає суттєво знижувати продуктивність такої системи в цілому. У цьому випадку можна застосовувати двошинну систему SoC.

Приклад реалізації двошинної системи SoC наведено на рис.3.

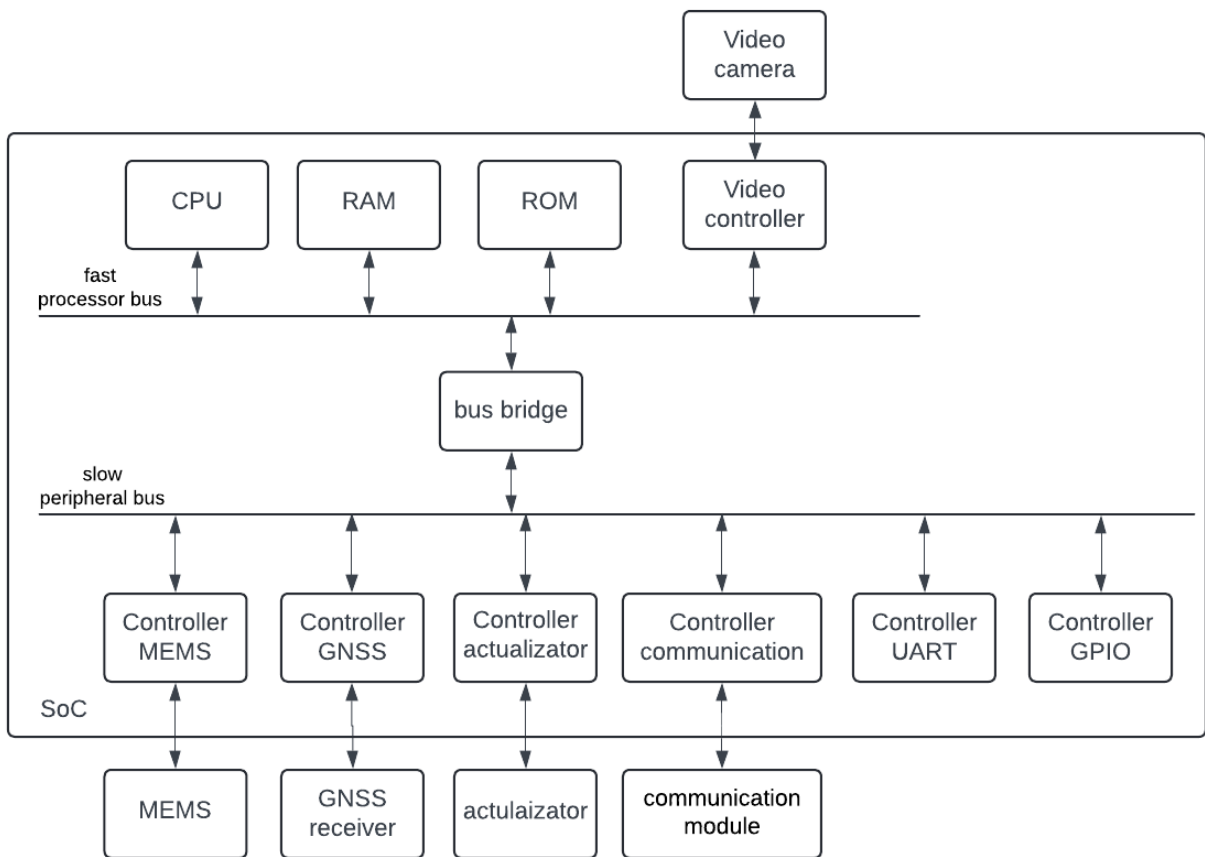


Рис.3 Двошинна система на кристалі

Система навігації для БПЛА, що побудована на базі SoC з двома шинами, передбачає наявність швидкої процесорної (fast processor bus), до якої крім процесора та пам'ятей RAM та ROM, під'єднано ще Video controller. Саме через нього поступають дані з відеокамери в пам'ять RAM. Великий обсяг даних з відеокамери потребує не лише швидкого завантаження їх в пам'ять, а й швидкого опрацювання процесором.

Всі інші пристрої підключаються через відповідні контролери до відносно повільної периферійної шини (slow peripheral bus), яка, в свою чергу, з'єднана з процесорною за допомогою моста bus bridge.

Така двошинна структура забезпечує ефективну роботу навігаційної системи БПЛА, оскільки швидкий та повільний обмін даними виконується різними шинами. Збільшення кількості сенсорів, що під'єднуються до периферійної шини не приводить до зниження загальної продуктивності роботи системи. Така навігаційна система може застосовуватися практично для всіх нешвидкісних БПЛА, зокрема для дронів з відеокамерами.

Для високошвидкісних БПЛА, наприклад крилатих ракет, що мають декілька відеокамер чи головок самонаведення, їй потребують опрацювання великого обсягу інформації (даних та команд) у реальному масштабі часу, а також тоді, коли задіяно групу БПЛА, що взаємодіють між собою, двошинна система може виявитися неспроможною виконувати ці завдання, а тому, в таких випадках, потрібно застосовувати тришинну систему, приклад якої наведено на рис. 4.

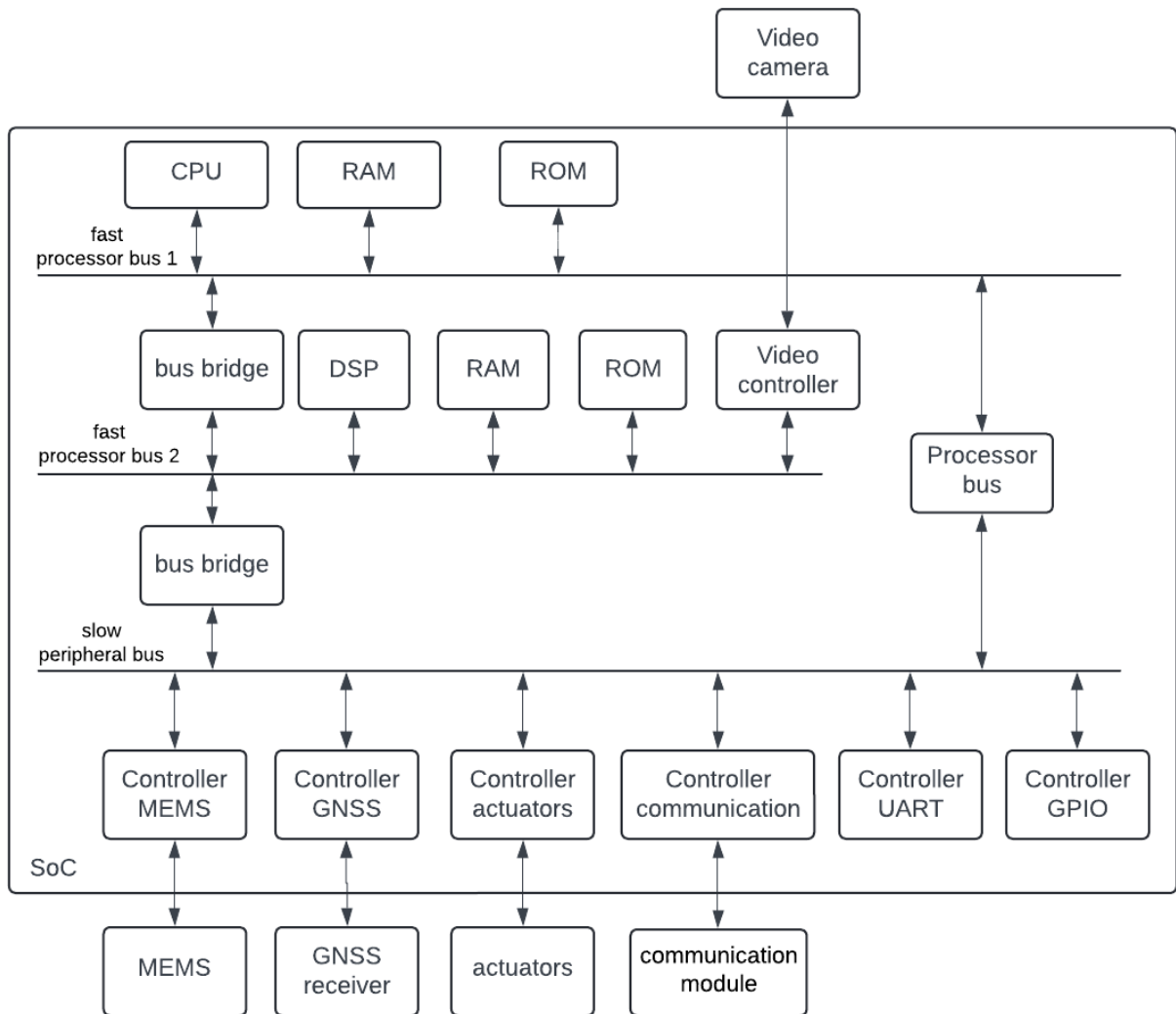


Рис.4. Тришинна система на кристалі

Система навігації для БПЛА, що побудована на базі SoC з трьома шинами, передбачає наявність двох процесорів CPU та DSP зі своїми швидкими шинами, до яких під'єднані пам'яті RAM та ROM, та мости. Процесор CPU забезпечує загальне керування роботою БПЛА, а також опрацьовує сигнали керування, що можуть поступати як з давачів, так і з каналів зв'язку.

Процесор DSP опрацьовує відео чи інші дані в реальному масштабі часу. Для цього на його швидку шину під'єднані окремі блоки пам'яті RAM та ROM, а також контролери відеокамер чи головок самонаведення. Результати опрацювання можуть додатково аналізуватися процесором CPU, для цього результати передаються через міст в пам'ять RAM процесора CPU, або через відповідний контролер у канал зв'язку з операторами.

До периферійної шини під'єднуються всі інші сенсори та актуатори, аналогічно попереднім схемам. Конкретна їх кількість визначається призначенням та задачами, які повинні вирішувати БПЛА, проте можливості мікроелектроніки на сьогодні забезпечують реалізацію достатньої кількості контролерів на кристалі, так би мовити «з запасом», що дає змогу застосовувати такі системи на кристалі для різних варіантів побудови навігаційних систем БПЛА.

Отже, реалізація навігаційних систем БПЛА на базі систем на кристалі, дає змогу створити низку універсальних навігаційних систем для різних типів БПЛА, а їх застосування потребуватиме лише

створення програм роботи та відлагодження і не виникатиме потреби в проектуванні окремої навігаційної системи для кожного типу БПЛА. Крім того, одночасне застосування різнотипних сенсорів з різними принципами роботи, що під'єднані до системи на кристалі, з використанням ефективних алгоритмів опрацювання даних, покращує характеристики БПЛА та розширити їх функціональні можливості, а також призводить до зменшення габаритних розмірів та енергоспоживання навігаційних систем.

### **7. Результати досліджень**

Використання MEMS є оптимальним для БПЛА, забезпечуючи ряд значних переваг. За результатами порівнянь, MEMS сенсори, наприклад, забезпечують значне зменшення маси та габаритів у порівнянні з традиційними інерційними пристроями. Наприклад, вагу системи навігації можна знизити з 250 г, при використанні традиційних інерційних сенсорів, до менш ніж 50 г завдяки використанню MEMS. Це дозволяє зменшити загальну масу невеликого БПЛА на 15–20%, що збільшує тривалість польоту.

Енергоспоживання різних типів сенсорів, які застосовуються в навігаційних системах, значно варіюється залежно від технології, конструкції та режиму роботи. Наприклад, сучасні MEMS гіроскопи, такі як Bosch BMI160 або InvenSense MPU-6000, мають споживання близько 3–5 мА при 3,3 В, що відповідає приблизно 10–16,5 мВт. У режимі енергозбереження це споживання можна знизити до 1 мА або навіть менше. Так само MEMS акселерометри, наприклад ADXL345 від Analog Devices або Bosch BMA400, споживають у середньому 170 мкА при 3,3 В (приблизно 0,6 мВт) у режимі низького енергоспоживання, а в активному режимі можуть досягати до 500 мкА.

Для порівняння, традиційні механічні гіроскопи, такі як волоконно-оптичні або лазерні, значно перевищують ці значення – їхнє споживання може досягати 2–5 Вт. Наприклад, волоконно-оптичний гіроскоп споживає приблизно 3 Вт у стандартному режимі роботи. Подібно до них, лазерні гіроскопи споживають від 5 до 10 Вт через високі вимоги до стабільності променя.

Гібридні системи, такі як GNSS-приймачі, наприклад, u-blox M8, потребує близько 100–200 мВт під час активного прийому сигналу. Комбіновані рішення з інтеграцією GNSS та MEMS-сенсорів, які застосовуються для забезпечення стабільної навігації, мають сукупне споживання до 200 мВт, що дозволяє зберігати баланс між продуктивністю та енергоефективністю. Комбінація MEMS інерційних сенсорів з GNSS приймачами дозволяє створювати високоточні гібридні навігаційні системи. При оптимальних умовах, вони можуть забезпечувати точність позиціонування до декількох сантиметрів, надаючи глобальне покриття, безперервність та синхронізацію навігації.

Реалізація навігаційних систем БПЛА у вигляді SoC дає змогу створювати уніфіковані цифрові системи, які можуть застосовуватись для різних типів безпілотників. Такі рішення дозволяють поєднувати різні сенсори та актуатори з ефективними алгоритмами обробки даних, зменшуючи габаритні розміри та енергоспоживання, а також розширюючи функціональні можливості БПЛА.

### **8. Висновки**

У статті проведено комплексний аналіз і класифікацію методів навігації для БПЛА, враховуючи різні критерії, такі як принцип роботи, тип сенсорів, точність, надійність та інтеграція з іншими системами. Визначено, що оптимальним рішенням для навігаційних систем БПЛА є комбінація MEMS сенсорів і GNSS приймачів, яка забезпечує високу точність позиціонування, малі габарити та вагу, низьке енергоспоживання, стійкість до механічних впливів і доступну вартість.

Також запропоновано три варіанти реалізації навігаційних систем на основі SoC: одношарова для виконання БПЛА простих завдань, двошарова для опрацювання великих обсягів даних від швидкодіючих сенсорів на борту БПЛА та тришарова для опрацювання великих обсягів даних в реальному масштабі часу та для одночасної роботи групи БПЛА.

Окреслено перспективи подальшого розвитку навігаційних систем БПЛА на базі систем на кристалі з перспективою покращення їх характеристик, розширення функціональних можливостей, а також зменшення габаритних розмірів та енергоспоживання таких систем.

### **Список літератури**

1. Groves, P. D. (2013). Navigation Methods for Unmanned Aerial Vehicles: Principles and Classifications. *Journal of Navigation*, 66(4), 571-591. DOI: 10.1017/S0373463313000301

2. Borenstein, J., Everett, H. R., & Feng, L. (1996). Sensor-Based Navigation for Autonomous Mobile Robots: A Review. *Autonomous Robots*, 4(2), 113-156. DOI: 10.1007/BF00148536
3. Barton, J. D. (2012). Signal Processing Techniques for Navigation Systems in Unmanned Vehicles. *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*, 48(3), 28-30. DOI: 10.1109/TAES.2012.6237563
4. Kuznetsov, A. V., & Petrov, M. N. (2018). Classification of Navigation Methods for Unmanned Systems Based on Signal Acquisition. *International Journal of Advanced Robotic Systems*, 15(2), 1-12. DOI: 10.1177/1729881418766541
5. Zhang, L., Wang, Y., & Sun, Z. (2020). Comprehensive Survey on Navigation Systems for Unmanned Vehicles: Applications and Environments. *IEEE Access*, 8, 101-107. DOI: 10.1109/ACCESS.2020.2996468
6. Lee, J. H., Choi, J. S., & Lee, B. H. (2019). Navigation Techniques for Different Application Domains of Unmanned Systems: A Comprehensive Review. *Robotics and Autonomous Systems*. DOI: 10.1016/j.robot.2019.03.003
7. Bingham, B., & Seering, W. (2006). Hypothesis Grids: Improving Long Baseline Navigation for Autonomous Underwater Vehicles. *IEEE Journal of Oceanic Engineering*, 31(1), 209-218. DOI: 10.1109/JOE.2006.872220
8. May, C., & Szemerei, M. (2020). Influence of Fringing Fields on Parallel Plate Capacitance for Capacitive MEMS Accelerometers. In *IEEE XVIth International Conference on Perspective Technologies and Methods in MEMS Design (MEMSTECH)*, 82-85. DOI: 10.1109/MEMSTECH49584.2020.9109500
9. Chikovani, V., Suschenko, O., & Azarskov, V. (2020). Errors Compensation of Ring-Type MEMS Gyroscope Operating in Differential Mode. In *IEEE XVIth International Conference on Perspective Technologies and Methods in MEMS Design (MEMSTECH)*, 68-71. DOI: 10.1109/MEMSTECH49584.2020.9109476
10. Lee, J., et al. (2022). Integrated MEMS IMU for Compact and Efficient UAV Navigation. *Journal of Microelectromechanical Systems*, 31, 456-467. DOI: 10.1109/JMEMS.2022.3157685
11. Wang, R.-y., & Ma, H. (2020). An INS/GNSS integrated navigation in GNSS denied environment using recurrent neural network. *Defence Technology*, 16(2), 334-340. DOI: 10.1016/j.dt.2019.08.011
12. Тристан, А. В., Бережний, А. О., & Крижанівський, І. М. (2019). Математичні моделі та методи планування повітряної розвідки рухомих й стаціонарних об'єктів з застосуванням БПЛА. In *Збірник матеріалів VII-ої міжнародної науково-технічної конференції "Проблеми інформатизації"* (Vol. 3, p. 41). URL: <https://repository.kpi.kharkov.ua/handle/KhPI-Press/68285>
13. Zhang, L., Xu, D., Liu, M., Yan, W., & Gao, J. (2009). An Algorithm for Cooperative Navigation of Multiple UUVs. In *Proc. of the sixth Int. Symposium on Underwater Technology, UT2009* (No. 78, pp. 1-6). DOI: 10.1109/UT.2009.5416910
14. Lora-Millan, J. S., Hidalgo, A. F., & Rocon, E. (2021). An IMUs-Based Extended Kalman Filter to Estimate Gait Lower Limb Sagittal Kinematics for the Control of Wearable Robotic Devices. *IEEE Access*, 9, 144540-144554. DOI: 10.1109/ACCESS.2021.3122160

*Вибір та реалізація методів навігації для безпілотних літальних апаратів на сучасних комп'ютерних компонентах*

## **SELECTION AND IMPLEMENTATION OF NAVIGATION METHODS FOR UNMANNED AERIAL VEHICLES ON MODERN COMPUTER COMPONENTS**

**A.O. Muzychenko, R.B. Dunets**

National University "Lviv Polytechnic"  
Department of Specialized Computer Systems  
*E-mail: adrian.o.muzychenko@lpnu.ua, roman.b.dunets@lpnu.ua*

© Muzychenko A., Dunets R., 2024

**This article presents an analysis and selection of navigation methods for unmanned aerial vehicles (UAVs) that can be implemented using modern computer components. A classification of navigation methods is provided based on key criteria: system operating principles, sensor types, accuracy, reliability, power consumption, and the potential for integration with other UAV systems. The use of inertial systems based on MEMS sensors, satellite positioning systems, and visual odometry is considered. A combined sensor application approach is proposed to enhance the accuracy and reliability of UAV navigation. Prospects for the integration of MEMS sensors with system-on-chip (SoC) solutions are outlined to further reduce the size, weight, and power consumption of navigation systems. The research results showed that the use of MEMS sensors can provide a significant reduction in the weight of the navigation system from 250 g to less than 50 g, as well as a significant reduction in power consumption to 10-16.5 mW, compared to traditional inertial devices.**

**Keywords: inertial sensors, integrated systems, magnetometers, MEMS, navigation systems, system-on-chip, satellite navigation.**