

**МІНІСТЕРСТВО ВНУТРІШНІХ СПРАВ УКРАЇНИ  
ХАРКІВСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ  
ВНУТРІШНІХ СПРАВ  
КРЕМЕНЧУЦЬКИЙ ЛЬОТНИЙ КОЛЕДЖ**

**Циклова комісія авіаційного і радіоелектронного обладнання**

## **ТЕКСТ ЛЕКЦІЇ**

навчальної дисципліни «Загальні знання дистанційно пілотованих суден:  
Бортове і наземне обладнання БПЛА»  
обов'язкових компонент  
освітньо-професійної програми першого (бакалаврського) рівня вищої освіти

***272 Авіаційний транспорт  
(Оператор безпілотних літальних апаратів)***

**За темою № 3 - Навігаційне та пілотажне обладнання БПЛА**

**Кременчук 2023**

**ЗАТВЕРДЖЕНО**

Науково-методичною радою  
Харківського національного  
університету внутрішніх справ  
Протокол від 30.08.23 № 7

**СХВАЛЕНО**

Методичною радою  
Кременчуцького льотного коледжу  
Харківського національного  
університету внутрішніх справ  
Протокол від 28.08.23 № 1

**ПОГОДЖЕНО**

Секцією науково-методичної ради  
ХНУВС з технічних дисциплін  
Протокол від 29.08.23 № 7

Розглянуто на засіданні циклової комісії авіаційного і радіоелектронного  
обладнання, протокол від 28.08.2023 № 1

**Розробник:** викладач циклової комісії авіаційного і радіоелектронного  
обладнання, спеціаліст вищої категорії, викладач-методист  
Стущанський Ю.В.

**Рецензенти:**

1. К.т.н., спеціаліст вищої категорії, викладач-методист циклової комісії  
авіаційного і радіоелектронного обладнання Шмельов Ю.М.
2. Заступник директора з ОЛР, командир авіаційного загону ТОВ «ЕЙР  
ТАУРУС» Гетьман Ю.Ю.

### **План лекцій:**

1. Загальні характеристики навігації БПЛА.
2. GNSS для навігації БПЛА
3. Приймачі GNSS для БПЛА.
4. Інерціальна система навігації на базі польотних контролерів
5. Відеонавігація

### **Рекомендована література (основна, допоміжна), інформаційні ресурси в Інтернеті**

#### **Основна література:**

1. Повітряний кодекс України.
2. Наказ Державної авіаційної служби України, Міністерства оборони України 06.02.2017 № 66/73 АВІАЦІЙНІ ПРАВИЛА УКРАЇНИ «Загальні правила польотів у повітряному просторі України».
3. Наказ Державної авіаційної служби України 09 грудня 2021 року № 1920 АВІАЦІЙНІ ПРАВИЛА УКРАЇНИ «Організація повітряного руху».
4. Климаш М.М. Теоретичні основи телекомунікаційних мереж: навч. посіб. / М.М. Климаш, Б.М. Стрихалюк, М.В. Кайдан. – Львів: вид-во УАД, 2011. – 496 с.
5. Логачова Л.М. Поширення земних радіохвиль та мобільний зв'язок / Л.М. Логачова, Т. І. Бугрова / Навчальний посібник. – Запоріжжя: ЗНТУ, 2019. – 236 с.
6. Пилінський В.В. Технічна електродинаміка та поширення радіохвиль/ навчальний посібник/ В.В. Пилінський – Національний технічний університет України «КПІ», 2014. – 336с.

#### **Допоміжна література:**

1. Харченко В.П. Авіоніка. Навчальний посібник. К.: НАУ. 2013. – 272 с.
2. Eurocontrol airspace strategy for the ECAC states. ASM.ET 1. ST 03.4000 – EAS – 01-00. - Luxembourg, Eurocontrol, 2001. – 74 p.
3. Eurocontrol manual for airspace planning, common guidelines – Vol. 2. Luxembourg, Eurocontrol, - 2003. – 95 p.
4. Guidelines document for the implementation of the concept of the flexible use of airspace. ASM.ET 1. ST 08.5000 – GUI – 02-00. - Luxembourg, Eurocontrol, 2003. – 43 p.

#### **Інформаційні ресурси в Інтернеті:**

1. Юринець Ю. Л. Правовий статус безпілотних літальних апаратів [Електронний ресурс] / Ю. Л. Юринець, І. І. Романович // «АЕРО – 2017. Повітряне і космічне право»: матеріали Всеукраїнської конференції молодих і студентів. – Електрон. текст. дані. – Режим доступу: <http://er.nau.edu.ua/handle/NAU/31654.html>
2. Седов А. Поради дроноводам-початківцям [Електронний ресурс] / Аркадій Седов // 50o NORTH. – Опубліковано 31.07.2017. – Електрон. текст.

дані. – Режим доступу : <http://www.50northspatial.org/ua/tips-getting-started-with-drones/>

3. Сєдов А. Огляд сфер використання БПЛА в повсякденному житті [Електронний ресурс] / Аркадій Сєдов // 50o NORTH. – Опубліковано 13.05.2016. – Електрон. текст. дані. – Режим доступу: <http://www.50northspatial.org/ua/uavs-everyday-life/>

## **Текст лекції.**

### **1. Загальні характеристики навігації БПЛА.**

Зображення сьогодення спонукає до вирішення питань різних сфер в із застосування мінімуму зусиль та найголовніше часу. На початок повномасштабного вторгнення українські розробники БПЛА не були готові до того, що ці «пташки» будуть літати в таких тяжких умовах. Нажаль, саме війна сприяла вибору даної теми роботи, тому в написаному буде йти мова саме про використання БПЛА у військових цілях, про виконання завдань розвідки, корегування та ураження.

В мирний час, для точної навігації БПЛА, цілком достатньо використати дешевий та простий приймач GNSS, проте, надіятись на стабільних сигнал супутників в зонах дії РЕБ - марно. Як показує практика, GPS в таких зонах взагалі відсутній.

Навігація БПЛА включає в себе комплекс датчиків та приймачів. Використання цих сенсорів та процесорів дозволяє використовувати існуючі архітектури побудови БПЛА різних типів та класів. Більшість БПЛА, що виробляються, мають схожу та просту архітектуру побудови апаратної та програмної частини, що надає їм основну перевагу – дешевизна виготовлення.

### **2. GNSS для навігації БПЛА**

GNSS представляє собою систему супутникової навігації, створену з метою позиціонування (визначення місця розташування в просторі – тобто координат) об'єктів. Окрім визначення місця розташування об'єкта сучасні навігаційні системи дозволяють визначити напрямок його руху і швидкість.

На даний час близько 200 організацій, що займаються збором GNSS даних з базових станцій по всьому світу, об'єднані в IGS (International GNSS Service), яка, в свою чергу, входить до Міжнародної асоціації геодезії. GNSS системи складаються з двох складових: космічної та наземної.

Якщо не вдаватися в подробиці, то принцип роботи таких систем полягає у вимірюванні відстані від антени на об'єкті до супутників. Знаючи відстані до декількох супутників, положення яких відомо достатньо

точно, навігаційні системи за допомогою звичайних геометричних побудов обчислюють місцезнаходження об'єкта.

Основні діючі і перспективні GNSS системи: GPS (США), ГЛОНАСС (Росія), GELILEO (Євросоюз), BeiDou (Китай), QZSS (Японія). Основні діючі і перспективні GNSS системи: GPS (США), ГЛОНАСС (Росія), GELILEO (Євросоюз), BeiDou (Китай), QZSS (Японія).

З метою підвищення точності позиціювання з декількох метрів до сантиметрів у багатьох країнах створюються наземні системи радіомаяків, а також інформаційна радіосистема для передачі користувачам диференціальних поправок, що дозволяють значно підвищити точність визначення координат.

Диференціальна поправка пересилається або з геостаціонарних супутників (системи WAAS, EGNOS, MSAS і ін.), або з наземних базових станцій.

Найбільша точність досягається при використанні RTK-поправок саме з наземних базових станцій. Саме така мережа під назвою System.NET діє з 2011 р в Україні.

З метою підвищення точності позиціювання з декількох метрів до сантиметрів у багатьох країнах створюються наземні системи радіомаяків, а також інформаційна радіосистема для передачі користувачам диференціальних поправок, що дозволяють значно підвищити точність визначення координат.

Диференціальна поправка пересилається або з геостаціонарних супутників (системи WAAS, EGNOS, MSAS і ін.), або з наземних базових станцій.

Найбільша точність досягається при використанні RTK-поправок саме з наземних базових станцій. Саме така мережа під назвою System.NET діє з 2011 р в Україні.

Крім значного підвищення точності мережа System.NET дозволяє значно розширити зону позиціонування: визначення місця розташування стало можливо по всій зоні покриття мобільної мережі, де приймається GSM / GPRS сигнал, а так само в місцях з можливістю підключення до мережі Інтернет за допомогою інших каналів зв'язку.

Також стали можливими:

- виключення грубих помилок вихідних пунктів;
- підтримка єдиної міжнародної системи координат; можливість безпосередньої роботи в будь-якій необхідній системі координат; скорочення витрат на обладнання;
- контроль точності безпосередньо під час виконання вимірювань;
- збільшення продуктивності праці; використання додаткових сервісів – постобработка сирих даних RINEX, використання згенерованої віртуальної базової станції при постобробці кінематичних вимірювань (Virtual Reference Station), автоматична обробка даних і оцінка точності на сервері мережі (AutoPP, QC) і ін.

### 3. Приймачі GNSS для БПЛА.

Багато безпілотних систем, таких як БПЛА, UGV і AUV, потребують використання GPS/GNSS, щоб забезпечити їм високий ступінь точності позиціонування для таких застосувань, як картографування, геодезія, точне землеробство та пошук і порятунок.

Антену GNSS встановлюється десь на транспортному засобі, і супутникові дані зазвичай подаються в авіоніку, автопілот або навігаційні системи.

Окрім навігації, безпілотні транспортні засоби можуть використовувати GNSS для географічної прив'язки зібраних даних, уникнення зіткнень або забезпечення можливостей відстеження. Дані GNSS надають вхідні дані для контуру керування дроном або іншим автономним транспортним засобом, дозволяючи йому підтримувати позицію, повертатися додому або слідувати серії заданих маршрутних точок. Це особливо важливо для водних роботів, таких як AUV і ROV, на положення яких може суттєво вплинути приливна активність.

Мікросхеми приймача GNSS отримують супутникові дані та обробляють їх, щоб визначити положення, швидкість і час. Цю інформацію можна зберігати локально або відправляти на віддалену станцію моніторингу чи відстеження.

#### Архітектура GNSS приймача

Багато приймальних модулів GNSS можуть відстежувати кілька сузір'їв GNSS, а також багато супутників одночасно. Зазвичай кожен сигнал від кожного супутника призначається на власний виділений канал у системі приймача.

Багаточастотні приймачі можуть обробляти сигнали, що транслюються супутником на кількох частотах, наприклад L1, L2 і L5 для GPS. Приймачі з подвійною антеною забезпечують більшу точність курсу, особливо в ситуаціях із низькою динамікою.

Модулі зазвичай складаються з наступних блоків:

- Антена GNSS – фіксує сигнали L-діапазону (радіочастоти від 1 до 2 Гц) із супутника;
- Інтерфейс – фільтрує, підсилює та оцифровує вхідні сигнали;
- Обробка сигналів – використовується для отримання та відстеження різних сигналів;
- Обробка додатків – виконує обчислення інформації про сигнал і представляє результати відповідно до конкретного додатка.

Приймачі GNSS є здебільшого пасивними пристроями – винятком буде, коли європейська система Galileo стане повністю функціональною. Приймачі Galileo GNSS будуть оснащені аварійною функцією, яка зможе транслювати інформацію після активації.

GNSS стикається з обмеженнями, пов'язаними з необхідністю перебувати в зоні прямої видимості принаймні чотирьох супутників, щоб забезпечити надійну навігацію. У середовищах із поганим сигналом може бути вигідним поєднання GNSS з інерціальною навігаційною системою (INS), яка використовує інформацію про обертання та прискорення для обчислення відносного положення, яке можна використовувати для навігації під час втрати сигналу GNSS. У свою чергу, GNSS може забезпечити зовнішнє посилення на INS, що допомагає зменшити вплив помилок зсуву.

#### **4. Інерціальна система навігації на базі польотних контролерів**

Інерціальна навігаційна система (ІНС) - це автономний пристрій, що складається з інерціального вимірювального блоку / inertial measurement unit (IMU) і обчислювального блоку. IMU зазвичай складається з 3-осьового акселерометра, 3-осьового гіроскопа та іноді 3-осьового магнітометра та вимірює кутову швидкість і прискорення системи. Обчислювальний блок, який використовується для визначення орієнтації, позиції та швидкості системи на основі необроблених вимірювань від IMU з урахуванням початкової початкової позиції та орієнтації.

Інерційний вимірювальний блок (IMU) — це пристрій, який може вимірювати та повідомляти питому вагу та кутову швидкість об'єкта, до якого він прикріплений. IMU зазвичай складається з:

- Гіроскопи: забезпечення вимірювання кутової швидкості;
- Акселерометри: вимірювання питомої сили/прискорення;
- Магнітометри (опціонально): вимірювання магнітного поля, що оточує систему;

Додавання магнітометра та алгоритмів фільтрації для визначення інформації про орієнтацію призводить до створення пристрою, відомого як референтні системи положення та курсу (AHRS).

IMU доступні в кількох класах продуктивності. Вони поділяються на чотири категорії на основі характеристик акселерометра та гіроскопа:

- Споживча/автомобільна;
- Промислова;
- Тактична;
- Навігаційна.

Ці категорії продуктивності зазвичай визначаються на основі стабільності зсуву датчика під час руху, оскільки стабільність зміщення під час руху відіграє таку важливу роль у визначенні продуктивності інерційної навігації. У наведеній нижче таблиці підсумовано продуктивність різних сортів для цих специфікацій.

Таблиця 1 Порівняльна характеристика IMU

Категорія	ЦІНА, \$	Стабільність зміщення, °/годину	В зоні без GNSS, хв.	Застосування
Споживча	<10\$	–	–	Смартфони
Промислова	100-1000\$	<10°/годину	<1 хв.	БПЛА
Тактична	5000-50000\$	<1°/годину	<10 хв.	Розумні боєприпаси
Навігаційна	<100000\$	<0.1°/годину	1-3 год.	Військового призначення

Як вже згадували вище, інерціальна навігаційна система (ІНС) використовує інерціальний вимірювальний блок (IMU), що складається з акселерометрів, гіроскопів і іноді магнітометрів.

#### Акселерометр

Акселерометр є основним датчиком, який відповідає за вимірювання інерційного прискорення або зміни швидкості з часом, і його можна знайти в різних типах, включаючи механічні акселерометри, кварцові акселерометри та акселерометри MEMS. MEMS-акселерометр — це, по суті, маса, підвішена на пружині, як показано на малюнку 2. Маса відома як пробна маса, а напрямок, у якому маса може рухатися, називається вісю чутливості. Коли акселерометр піддається лінійному прискоренню вздовж осі чутливості, це прискорення спричиняє зміщення пробної маси вбік із величиною відхилення, пропорційною прискоренню.



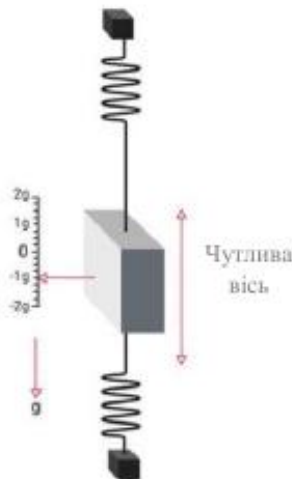


Рисунок 1.2 - Проста модель акселерометра.

## Магнітометр

Магнітометр — це тип датчика, який вимірює силу та напрямок магнітного поля. Хоча існує багато різних типів магнітометрів, більшість магнітометрів MEMS покладаються на магнітоопір для вимірювання навколишнього магнітного поля. Магніторезистивні магнітометри складаються з пермалою, який змінює опір через зміни магнітного поля. Як правило, магнітометри MEMS використовуються для вимірювання локального магнітного поля, яке складається з комбінації магнітного поля Землі, а також будь-яких магнітних полів, створюваних сусідніми об'єктами.

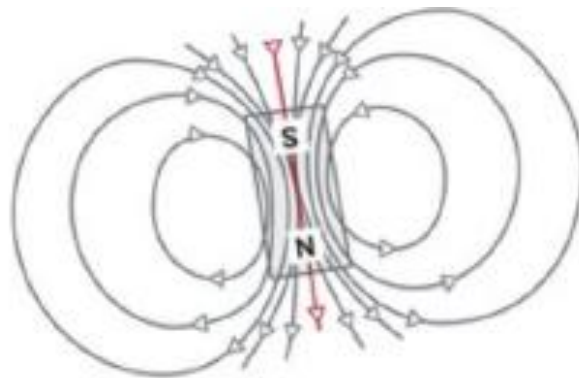


Рисунок 1.4 - Простий дипольний магніт

Гіроскоп і магнітометр надають системі ІНС такий самий внесок, як і AHRS. Вимірювання кутової швидкості гіроскопа інтегровано для рішення високої швидкості оновлення орієнтації, тоді як магнітометр (якщо використовується) забезпечує орієнтир курсу, подібний до магнітного компаса.

Обчислювальний блок відповідає за запис усіх інерційних вимірювань і виконання необхідних обчислень, як правило, за допомогою передової

фільтрації Калмана для визначення орієнтації, швидкості та кінцевого положення.

## 5. Відеонавігація

Високоточна навігація та здатність позиціонування БПЛА (безпілотних літальних апаратів) є ключовим фактором, що відображає ступінь його автоматизації. Візуальна навігація на основі зіставлення зображень стала однією з важливих областей досліджень для БПЛА для реалізації автономної навігації через її низьку вартість, потужну здатність запобігати перешкодам і хороший результат визначення місця розташування. Однак на візуальну якість зображень, отриманих БПЛА, серйозно вплинуть деякі фактори, такі як слабе освітлення або недостатня продуктивність його датчиків. Усунення серії погіршень зображень із слабким освітленням може покращити візуальну якість і покращити продуктивність візуальної навігації БПЛА.

Одним із найбільш використовуваних підходів є навігація на основі зору. Цей метод використовує монокулярні відеокамери як головний датчик. Камери дуже підходять для завдань навігації та уникнення перешкод завдяки своїй малій вазі та енергоспоживанню. Крім того, одне зображення може надавати різні типи інформації про навколишнє середовище одночасно. Також можна зменшити витрати, використовуючи камери, а не інші типи датчиків. Підходи до навігації на основі бачення вже є звичайними навігаційними системами для структурованих або напівструктурованих середовищ. Ці системи класифікують зображення з сегментацією доріжок для ідентифікації безпечної навігаційної зони, що призводить до реактивних моделей для керування навігацією. ALVINN і RALPH були одними з перших, хто застосував нейронні мережі для цього реактивного контролю у зовнішньому середовищі. У Shinzato розробив нейронний класифікатор, складений з ансамблю ШНМ, здатний виявляти та сегментувати судноплавні ділянки дороги через зображення. Пізніше цей класифікатор був прийнятий Союзом для реактивного керування на основі відповідності шаблонів. Чисто реактивні моделі не є цілком адекватними для розробки автономної навігаційної системи, оскільки миттєвої реакції на дані датчиків недостатньо, щоб гарантувати правильне керування в складних середовищах. Слід запровадити більш надійну систему, яка надає інформацію про послідовність і контекст, які відсутні в чисто реактивних моделях.