

**ВИЗНАЧЕННЯ ВИСОТИ В АВТОПІЛОТАХ
БЕЗПІЛОТНИХ ЛІТАЛЬНИХ АПАРАТІВ**

Стальчук Є.О.

e-mail: yehor.stalchuk@nure.ua

Науковий керівник – к.т.н. Яковченко О.І.

Харківський національний університет радіоелектроніки, каф. МІРЕС
м. Харків, Україна

This work is devoted to the study of methods for determining the height of UAVs. Methods for determining the height using GNSS, barometric methods, and determining the height using altimeters are considered. The advantages and disadvantages of the methods are given. The results are compared using the example of real data from UAVs with the PX4 autopilot.

Однією з ключових ознак сучасної епохи є широке застосування безпілотних літальних апаратів (БПЛА). БПЛА широко використовуються як для вирішення різноманітних цивільних задач (аерофотозйомка, дистанційне зондування Землі, моніторинг інфраструктури, спостереження тощо), так і для вирішенні спеціальних задач під час військових дій (розвідувальні, ударні БПЛА). Важливою задачею є точне визначення просторового місцеположення БПЛА, одним з ключових параметрів якого є висота польоту. З точки зору безпечності польотів вимоги до визначення висоти більш жорсткі, ніж вимоги до визначення горизонтальних координат БПЛА. При великих похибках визначення висоти існує ризик зіткнення з землею або наземними перешкодами під час посадки або польотів на низьких висотах. Для багатьох прикладних задач, таких як дистанційне зондування землі або фотограмметрія, висота польоту визначає просторову роздільну здатність отримуваних даних.

Метою роботи є аналіз методів визначення висоти безпілотних літальних апаратів та експериментальне порівняння результатів, отриманих за допомогою глобальних навігаційних супутникових систем (ГНСС) і барометричного методу на основі реальних польотних даних.

Визначення висоти за допомогою супутникових навігаційних систем. Одним із найпоширеніших способів визначення висоти БПЛА є використання сигналів ГНСС, таких як GPS, Galileo або Beidou.

Основними перевагами цього методу є глобальне покриття, відсутність необхідності у додаткових датчиках та можливість отримання абсолютного значення висоти. Разом з тим, точність визначення висоти за допомогою ГНСС зазвичай у 1,5-2 рази нижча, ніж точність визначення горизонтальних координат. Похибки можуть досягати кількох метрів і залежать від геометрії супутників, рівня шумів приймача та умов поширення сигналів. Крім того, за допомогою ГНСС визначається не висота над землею поверхнею, яка найчастіше потрібна для БПЛА, а висота відносно еліпсоїда.

Барометричний метод. Іншим поширеним методом є визначення висоти на основі вимірювання атмосферного тиску за допомогою барометричних датчиків.

В автопілотах зазвичай використовується наступна формула обчислення висоти:

$$H = 44330 \left(1 - \left(\frac{P_H}{P_0} \right)^{\frac{1}{5.255}} \right) \quad (1)$$

де P_H – тиск на висоті H ; P_0 – тиск на рівні початку відліку висоти.

Тиск на рівні початку відліку (наприклад, місці старту) і на висоті під час польоту вимірюється безпосередньо на БПЛА за допомогою барометра (анероїда), а такий пристрій вимірювання висоти називають барометричним висотоміром.

Перевагою барометричного методу є висока роздільна здатність та стабільність вимірювань на невеликих висотах. Барометричні датчики мають невеликі розміри, малу масу та низьке енергоспоживання, що робить їх придатними для використання на малих БПЛА.

Недоліком цього методу є залежність результатів вимірювання від атмосферних умов. Зміни температури, вологості та атмосферного тиску можуть призводити до накопичення похибок, особливо під час тривалого польоту.

Радіовисотоміри. Для визначення висоти відносно земної поверхні можуть застосовуватися радіовисотоміри. Принцип їх роботи базується на вимірюванні часу проходження радіосигналу від БПЛА до поверхні землі та назад. Основною перевагою радіовисотомірів є висока точність вимірювання висоти над земною поверхнею. Однак їх застосування обмежене відносно невеликою максимальною висотою вимірювання та залежністю від характеристик відбивної поверхні.

Комбіновані методи. Для підвищення точності визначення висоти в автопілотах БПЛА часто використовуються комбіновані підходи, що поєднують дані кількох датчиків, наприклад приймача ГНСС та барометричного висотоміра. Об'єднання даних здійснюється за допомогою спеціальних алгоритмів фільтрації, зокрема фільтра Калмана.

Такий підхід дозволяє компенсувати недоліки окремих методів та отримати більш стабільну оцінку висоти.

Результати досліджень. Для проведення досліджень і порівняння результатів визначення висоти різними методами були використані дані БПЛА зі встановленим контролером Pixhawk 2.1 CUBE ORANGE+, який працює під керуванням автопілоту PX4. БПЛА здійснював політ на відстані до 6 км від точки старту на висоті до 200 м зі значними варіаціями (перепад висоти складає близько 130 м). Тривалість польоту ~6 хвилин. Дані автопілоту були зареєстровані та записані у файл стандартного формату ulog. Зчитування і обробка даних виконувались в пакеті Matlab.

На рисунку 1 зображені результати визначення висоти БПЛА за даними приймача ГНСС та висоти, розрахованої барометричним методом за даними барометра MS5611 з використанням формули (1).

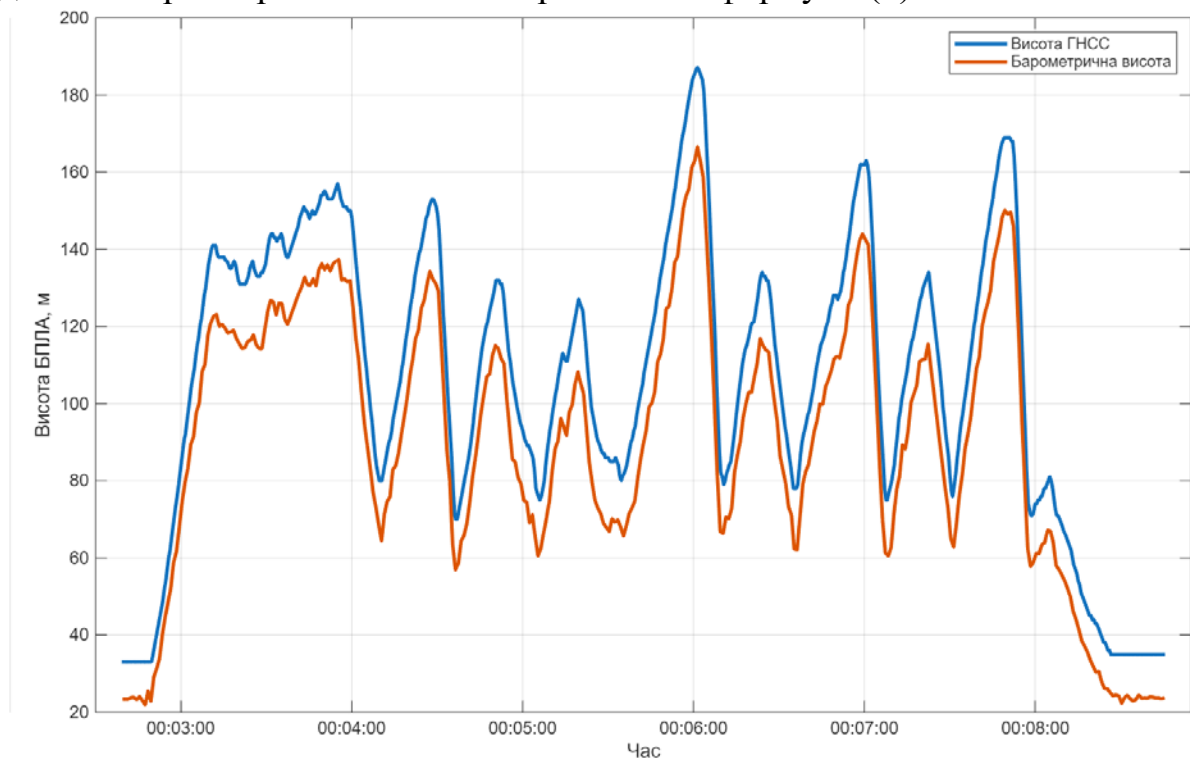


Рисунок 1 – Порівняння результатів визначення висоти різними методами

Як видно з рисунка, результати визначення висоти за допомогою ГНСС та барометричного методу дуже схожі, але мають систематичний зсув з середнім значенням близько 20 м. Цей зсув обумовлений різними принципами визначення висоти. Приймач ГНСС обчислює абсолютне значення висоти над еліпсоїдом і потім перераховує його в висоту над землею поверхнею, в той час як за допомогою барометра визначається відносна висота (висота відносно точки старту). При барометричному методі обов'язково повинно бути виконано калібрування.

Висновки. Встановлено, що оцінки висоти, отримані за допомогою ГНСС та барометричного методу, мають подібний характер зміни, однак між ними спостерігається систематичний зсув. Використання комбінованих методів обробки вимірювань із застосуванням алгоритмів фільтрації, зокрема фільтра Калмана, дозволяє підвищити точність та стабільність визначення висоти в автопілотах БПЛА.

Список використаних джерел:

1. PX4 Autopilot User Guide. ULog File Format. [Електронний ресурс]. – режим доступу https://docs.px4.io/main/en/dev_log/ulog_file_format.html (дата звернення 01.03.2026).