

## **СИСТЕМИ КООРДИНАТ БЕЗПІЛОТНИХ ЛІТАЛЬНИХ АПАРАТІВ**

доцент, к.т.н. Хрустальов К. Л., студент Іванов О. В.

Харківський національний університет радіоелектроніки, кафедра  
комп'ютерно-інтегрованих технологій, автоматизації та мехатроніки,  
e-mail: kirill.khrustalev@nure.ua, oleh.ivanov@nure.ua

**Abstract.** The given work is devoted to modern research in the field of unmanned aerial vehicle devices, commonly known as a drone, their orientation in space and areas of use of this technology. The article describes the types of coordinate systems what used to describe the position and movement of unmanned aerial vehicles in space. Such as inertial reference systems, moving and static coordinate systems, as well as connected, speed, and trajectory coordinate systems. The concept of Euler angles of a general basis in 3-dimensional linear algebra, and their components as yaw angle, pitch angle, and roll angle is also described.

**Вступ.** Однією з головних цілей мехатроніки є створення автоматичних пристроїв, які мають усі шанси замінити людину-оператора в умовах, що загрожують життю. У зв'язку з цим значно зростає роль безпілотних літальних апаратів (БПЛА) [1]. Це пояснюється успіхом їх впровадження для виконання складних технологічних процесів та операцій, таких як моніторинг небезпечних об'єктів, фотограмметрія фасадів, огляд мостів, важкодоступних місць. Для реалізації цих технологічних процесів необхідно контролювати політ, що є неможливим без впровадження опису положення та руху літальних апаратів на основі систем координат, що обумовлює актуальність дослідження.

**Основна частина.** Для опису положення та руху БПЛА у просторі використовують різні системи координат: інерційні, рухомі та нерухомі [2].

Інерційні системи відліку – це системи, де об'єкт, на який не діють жодні сили (або сили, що діють на нього компенсують одна одну, тобто рівнодійна сила дорівнює нулю), рухається рівномірно та прямолінійно. Нерухомі системи координат, у яких осі та початок координат фіксовані відносно землі, використовуються як системи відліку швидкостей, прискорень, переміщень літального апарата. Прикладом такої системи є земна система координат. Рухомі системи координат, початок яких розташовується в центрі мас літального апарата (звідси їх друга назва – ЛА-центричні системи координат), звичайно використовуються для запису рівнянь руху літального апарата. У якості рухомих систем частіше за все використовуються: нормальна, зв'язана, швидкісна та поточна системи координат.

Вибір системи координат зазвичай обумовлений поставленим завданням. В роботі розглянуто нормальну земну систему координат  $E$  та рухому систему  $B$ , що наведено на рисунку 1.

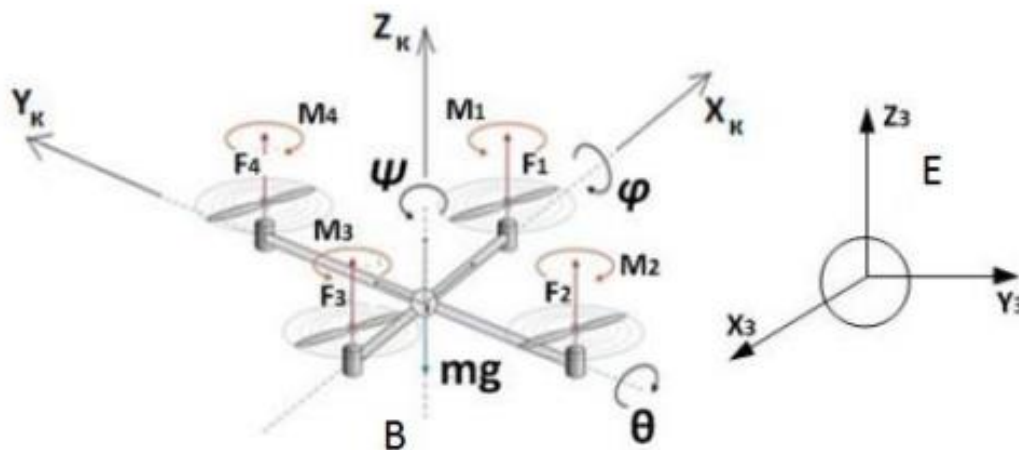


Рисунок 1 – Нормальна земна система координат БПЛА

Земна система координат лежить на поверхні землі та осі фіксовані щодо її початку. Вісь  $Z$  спрямована вгору прямою збігається з напрямом сили тяжіння. Осі  $Y$  та  $X$  лежать у горизонтальній площині, утворюючи праву прямокутну Декартову систему координат [3].

Рухома система координат  $B$  – це система координат осі якої збігаються з осями літального апарата. Її початок лежить у центрі маси ЛА, а осі повернуті на кути тангажу, крену та рискання, щодо осей земної системи координат. Орієнтація корпусу літального апарату в просторі задається обертанням від  $R$  до  $E$ , де  $R$  є ортогональною матрицею обертання.

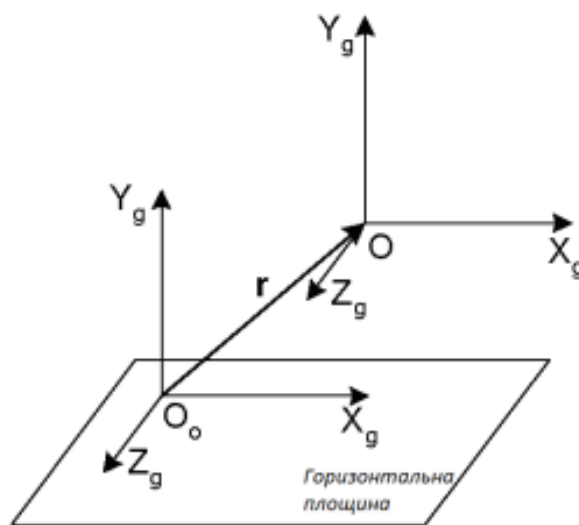


Рисунок 2 – Нормальна земна та зв'язана системи координат

Зв'язана система координат  $OXYZ$ . Початок координат розміщено в центрі мас БПЛА. Вісь  $OX$  лежить в площині симетрії і напрямлена уздовж лінії хорд крила до носової частини літального апарату. Вісь  $OY$  лежить в площині симетрії ЛА і спрямована вгору (при горизонтальному польоті), вісь  $OZ$  доповнює систему координат до правої системи координат.

Швидкісна система координат – це рухома система координат, швидкісна вісь  $OX_a$  якої збігається з напрямком вектору повітряної швидкості. Вісь підйомної сили  $OY_a$  розташована в площині симетрії та спрямована до верхньої частини ЛА, а бокова вісь  $OZ_a$  доповнює осі  $OX_a$ ,  $OY_a$  до правої системи координат.

Система координат траєкторії  $OX_kY_kZ_k$  – це рухома ЛА-центрична система координат, в якій напрямком вектору земної швидкості  $V_k$  (швидкість ЛА відносно земної поверхні) збігається з віссю  $OX_k$ , а вісь  $OY_k$  спрямована вгору відносно землі і знаходиться у вертикальній площині, що проходить через вісь  $OX_k$ . Осі  $OX_k$  і  $OY_k$  доповнює  $OZ_k$ , що до правої частини. Вісь  $OX_k$  траєкторної системи координат співпадає з віссю  $OX_a$  швидкісної системи координат, за відсутності вітру.

Кутом атаки  $\alpha$  називається кут між поздовжньою віссю БПЛА і проекцією швидкості на площину  $OXY$ . Кут позитивний якщо, проекція повітряної швидкості БПЛА на вісь  $OY$  негативна. Кутом ковзання  $\beta$  називається кут між повітряною швидкістю БПЛА і площиною  $OXY$  пов'язаної системи координат. Кут позитивний, якщо проекція повітряної швидкості на поперечну вісь позитивна.

Положення зв'язаної системи координат  $OXYZ$  відносно нормальної системи координат  $O X_g Y_g Z_g$  може бути повністю визначене трьома кутами:  $\psi$ ,  $\vartheta$ ,  $\gamma$ , що називаються кутами Ейлера [4]. Послідовно обертаючи пов'язану систему координат на кожен із кутів Ейлера, можна прийти до будь-якого кутового положення пов'язаної системи відносно нормальної системи координат.

При дослідженні динаміки ЛА використовують такі поняття кутів Ейлера:

– кут рискання –  $\psi$  – кут між віссю  $OX_g$ , нормальної системи координат і проекцією пов'язаної осі  $OX$  БПЛА на горизонтальну площину. Кут позитивний, якщо вісь  $OX_g$  поєднується з проекцією 33 пов'язаної осі  $OX$  на горизонтальну площину поворотом навколо осі  $OY_g$  проти часової стрілки;

– кут тангажу –  $\vartheta$  – кут між поздовжньою віссю БПЛА  $OX$  і місцевою горизонтальною площиною  $OX_gZ_g$ . Кут позитивний, якщо поздовжня вісь знаходиться вище горизонту;

– кут крену –  $\gamma$  – кут між місцевою вертикальною площиною, що проходить через вісь  $OX$ , і пов'язаною з нею віссю  $OY$  БПЛА. Кут

позитивний, якщо вісь  $OY$  БПЛА поєднується з місцевою вертикальною площиною обертом навколо осі  $OX$  за годинниковою стрілкою.

**Висновки.** На даний час управління польотом у БПЛА здійснюється в напівавтоматичному режимі за командами оператора з веденням навігації за опорними точками, або дистанційно за допомогою пульта управління. Поряд з цим значно зростає роль програмованого керування БПЛА, заснованого на використанні інтелектуальних автопілотів. Це пов'язано з загальносвітовою тенденцією що до підвищення автономності БПЛА при вирішенні завдань, таких як планування, автоматичне керування польотом на основі опорних точок та переслідування опорного об'єкта.

Наведені системи координат можна використовувати при аналізі стійкості і керованості безпілотного летального апарату. Перехід від однієї системи координат до іншої може бути здійснено за допомогою матриць косинусів напряму, за правилами сферичної тригонометрії, або за допомогою кватерніонів.

#### **Список використаних джерел.**

1. Беспилотный летательный аппарат БПЛА (дрон) [Електронний ресурс] – Режим доступу: <https://www.tadviser.ru/a/341580>
2. Аэродинамика и динамика полета. Системы координат [https://ozlib.com/978300/tehnika/skorostnaya\\_sistema\\_koordinat](https://ozlib.com/978300/tehnika/skorostnaya_sistema_koordinat)
3. Векторна алгебра та аналітична геометрія. Прямокутна декартова система координат [Електронний ресурс] – Режим доступу: <http://moodle.ipk.kpi.ua/moodle/mod/resource/view.php?id=10716>
4. Лисенко О.І., Явіся В.С. Вчені записки ТНУ імені В.І. Вернадського. Аналіз методів отримання сигналів управління для систем орієнтації та стабілізації наносупутника [Електронний ресурс] – Режим доступу: [http://www.tech.vernadskyjournals.in.ua/journals/2017/2\\_2017/10.pdf](http://www.tech.vernadskyjournals.in.ua/journals/2017/2_2017/10.pdf)