

УДК 623.746. – 519, 004.93'11

DOI: <http://dx.doi.org/10.20535/0203-377131201680075>

**О. О. Пікенін<sup>1</sup>**, аспірант, **О. П. Мариношенко<sup>2</sup>**, к. т. н., доцент,  
**О. В. Прохорчук<sup>3</sup>**, к. т. н., доцент

## РЕАЛІЗАЦІЯ ПОЛЬОТУ ГРУПИ БЕЗПЛОТНИХ ЛІТАЛЬНИХ АПАРАТІВ

**En**

To decentralize leader following for autonomous approach for UAV formation flight is proposed in the article. The objective of UAV formation flight is that UAVs have to fly to a specified region maintaining the distances and spatial angles between UAVs. To design the control system algorithms, the coupled dynamics of multiple UAVs is considered with assumption that each UAV follows (after) the leader UAV. For the leader following approach algorithms of guidance system and control system algorithms are created. To verify the performance of the proposed algorithms, numerical simulation is performed for two UAVs flight mission.

Implementation of multiple UAVs control, especially control of UAVs formation flying using the leader following approach, is presented in the article. Based on these obtained algorithms the most appropriate method is virtual leader method, which behaviour algorithm is researched and developed.

For the creation of neighbor-to-neighbor communication and synchronization

---

<sup>1</sup> Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут», факультет авіаційних і космічних систем

<sup>2</sup> Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут», кафедра теоретичної механіки

<sup>3</sup> Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут», кафедра приладів та систем керування літальними апаратами

the algorithm that used electro optical or infrared cameras and pattern recognition approaches is proposed and realized. Also, the approach for implementation of such control system, as well as algorithms and principles of works, based on appropriate mathematical models are introduced.

**Ru**

В этой статье предлагается применение и реализация подхода для автономного управления полетом группы беспилотных летательных аппаратов. Цель полета группы беспилотных летательных аппаратов заключается в осуществлении полета в заданную область с выдерживанием пространственных углов ориентации и дистанции между участниками группового полета. Для разработки алгоритмов систем управления объединена динамика нескольких беспилотных летательных аппаратов с предположением, что каждый беспилотный летательный аппарат следует за ведущим лидером. Проверяя эффективность предложенных алгоритмов, было выполнено численное моделирование выполнения полетного задания группы БПЛА, состоящей из двух летательных аппаратов.

### **Вступ**

В даний час одним з важливих завдань для використання безпілотних літальних апаратів (БПЛА) є забезпечення польоту БПЛА в групі (поліформації безпілотних літальних апаратів). При вирішенні цієї задачі виникає ряд істотних технічних проблем, дослідженням яких займаються провідні авіаційні організації розвинених країн світу.

Авіабудівні підприємства та науково-дослідні організації, які займаються практичними та науковими дослідженнями і розробками в області керування пілотажною групою літаків в основному зосередженні на великих літаках, які в свою чергу рухаються з великими інтервалами та дистанціями між ними, але для безпілотних літальних апаратів ставляться інші вимоги – здійснення польоту в групі (формації) як зі значними віддалями, так і з невеликими інтервалами від декількох до десятків метрів.

Технічно актуальною і важливою задачею на сьогодні є розробка недорогих, точних систем керування польотом безпілотних літальних апаратів у формації, що, в свою чергу, призведе до економічно ефективних і відмовостійких систем. Сучасні досягнення в області авіоніки, навігації на основі датчиків *MEMS/GPS*, нові методи керування польотом і дешева електроніка надають змогу широкого застосування безпілотних літальних апаратів для комерційних та військових цілей. Разом з тим такі майбутні БПЛА повинні бути більш автономними, ніж дистанційно пілотовані літаючі платформи, що використовуються сьогодні.

### **Постановка задачі**

Керування польотом групи безпілотних літальних апаратів є важливим напрямком багатьох сучасних досліджень [1] – [4] з великою кількістю практичних застосувань, таких як: екологічний та промисловий моніто-

ринг, забезпечення зв'язку у важкодоступних регіонах, пошуково-рятувальні роботи.

На даний час існує кілька методів реалізації керування групою БПЛА: слідування за ведучим БПЛА [1], режим формування групи, що базується на зближенні з ведучим БПЛА або лідером [3], та слідування за віртуальним лідером [4]. У всіх цих підходах до реалізації польоту БПЛА у формації ключовим питанням є отримання інформаційних даних щодо поведінки (просторового положення) ведучого літального апарату.

Для реалізації польоту формації БПЛА найбільш важливим питанням є створення надійного зв'язку та синхронізація дій між сусідніми БПЛА в польотному строю. На сьогодні добре відомі методи для зв'язку і синхронізації дій всередині групи безпілотних літальних апаратів, серед яких є: методи, основані на використанні засобів технічного зору [2], а також методи, основані на передачі необхідних навігаційних даних по радіоканалу [5].

Необхідність розробки технології контролю польоту групи безпілотних літальних апаратів задає дуже важливий напрямок аналітичних та прикладних досліджень, а саме - створення малогабаритної міжбортової безпілотної навігаційної системи (МБНС) для БПЛА.

Потреба в цьому визначається тим фактом, що відсутність такої навігаційної системи суттєво обмежує можливості БПЛА через їх неузгоджене поодинокі використання.

Розробка міжбортової безпілотної навігаційної системи може реалізовуватись двома способами: створення повністю автономних МБНС, які не використовують наземних станцій наведення [4], та систем, які використовують наземні радіо маяки [5]. Кожен з цих способів має свої переваги та недоліки. Автономна система керування дозволяє вирішувати завдання польоту групою без обмежень, що накладаються каналами зв'язку з наземним пунктом управління, а також в умовах радіопротидії та радіоперешкод.

### **Модель польоту групи безпілотних літальних апаратів**

Група рухомих механічних систем – безпілотних літальних апаратів, з математичної точки зору розглядається як система твердих тіл із декількома ступенями вільності. Отже, число ступенів вільності істотно зростає із збільшенням числа безпілотних літальних апаратів в групі, що робить модель просторового руху надзвичайно складною і не дозволяє зручно здійснювати вирішення задач синтезу та узгодженого керування всією групою безпілотних літальних апаратів. У зв'язку з цим широко використовується модель відносного руху БПЛА, згідно з якою у групі виділяється ведучий літальний апарат – лідер та ведені об'єкти. У той же час, будь-який тип строю (порядок розміщення в польоті), як то: колона, фронт,

ромб, пара, клин або змішаний тип строю можна розглядати як пару ведучий-ведений. Слід зазначити, що формування таких пар може бути створене на основі двох принципів. В першому випадку зв'язок (скріплення) у польотній формації здійснюється за допомогою веденого БПЛА, який слідує за ведучим лідером. В другому випадку всі ведені безпілотні літальні апарати визначають та задають свій рух по відношенню до загального для всіх ведучого лідера.

Без більш детального огляду і характеристики кожного способу формування польотної групи БПЛА в даній статті ми розглянемо модель керування, яка відповідає принципу ведучого загального лідера для формації БПЛА.

Як уже зазначалося, завдання керування груповим рухом пов'язане з необхідністю вивчення руху БПЛА, які знаходяться в певному груповому зв'язку. Отже, на перший план виступає дослідження їх відносного руху.

Розглядаючи відносний рух літального апарату, ми можемо використати різні системи координат. Кожна із систем має свої переваги та недоліки. Вибір системи координат визначається конкретним завданням, маючи за мету отримати рівняння динаміки польоту БПЛА в наглядному та простому виді. Подальше забезпечення простої інтеграції таких рівнянь для загального аналізу руху групи БПЛА, а також з урахуванням особливостей корисного навантаження, що розташоване на борту кожного літального апарату та для проведення подальших досліджень, оберемо зв'язані з кожним літальним апаратом системи координат.

Початок системи координат повинен бути з'єднаний з центром мас кожного веденого літального апарату. Вважається, що на кожному веденому БПЛА встановлене вимірювальне обладнання для визначення параметрів його руху відносно просторового положення ведучого БПЛА. Виходячи з вище наведеного, приходимо до висновку, що найбільш прийнятною системою відліку є траєкторна система координат, як показано на рис. 1.

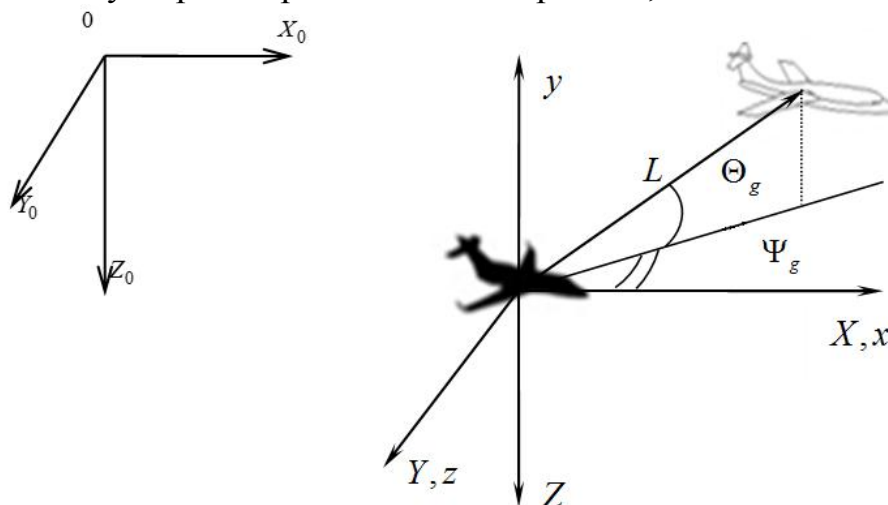


Рис. 1. Траєкторна система координат

*Навігаційні параметри камери*

Технічні засоби для здійснення групового польоту повітряного судна – це, в першу чергу, ті інструменти та пристрої, які дозволяють визначити параметри відносного руху літального апарату. Вони повинні забезпечувати вимірювання необхідних відстаней та траєкторних кутів. Такі вимірювальні пристрої можуть базуватися на різноманітних фізичних принципах: радіо, оптичному та квантово-механічному.

Основними причинами зростаючого інтересу до малої безпілотної авіації, при поодинокому та груповому використанні БПЛА є те, що вони є недорогими літаючими платформами для встановлення електродопоміжних (ЕО) та інфрачервоних (ІК) камер.

Для вирішення нашої задачі припустимо, що оптична вісь камери збігається з поздовжньою віссю безпілотно літального апарату (вісь  $OX$  зв'язаної системи координат  $OXYZ$ ;  $Oxyz$  – локальна система координат камери).

Припускаємо, що камера розташована в центрі ваги літака. Просторове положення веденого БПЛА по відношенню до ведучого БПЛА визначається двома кутами: кутом азимута цілі  $\Psi_g$ , та кутом вертикального наведення на ціль  $\Theta_g$ . Розглянемо, у відповідності до рис. 1, наступні матриці, що описують відносну просторову орієнтацію ведучий-ведений БПЛА:

$$R_{\Psi_g} = \begin{bmatrix} \cos \Psi_g & 0 & -\sin \Psi_g \\ 0 & 1 & 0 \\ \sin \Psi_g & 0 & \cos \Psi_g \end{bmatrix} \text{ – матриця поворотів для кута азимуту;}$$

$$R_{\Theta_g} = \begin{bmatrix} \cos \Theta_g & \sin \Theta_g & 0 \\ -\sin \Theta_g & \cos \Theta_g & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \text{ – матриця поворотів для кута вертикального наведення.}$$

Результатом добутку вказаних вище матриць буде так звана матриця наведення [5] на ведучий БПЛА:

$$R_b^g = R_{\Theta_g} R_{\Psi_g} = \begin{bmatrix} \cos \Theta_g \cos \Psi_g & \sin \Theta_g \cos \Psi_g & -\sin \Psi_g \\ -\sin \Theta_g & \cos \Theta_g & 0 \\ \sin \Psi_g \cos \Theta_g & \sin \Theta_g \sin \Psi_g & \cos \Psi_g \end{bmatrix}.$$

## Математична модель камери

Відомо, що  $f$  - це фокусна відстань камери в одиницях пікселів, то можна визначити скільки  $P$  метрів в одному пікселі. Для спрощення припустимо, що пікселі і масиви пікселів є квадратними. Якщо ширина квадратної матриці пікселів в одиницях пікселів є деякою величиною  $M$ , а  $\vartheta$  - це кут обзору камери, то можемо записати:

$$f = \frac{M}{2 \operatorname{tg}\left(\frac{\vartheta}{2}\right)}.$$

Положення проєкції об'єкта виражається в кадрі камери як  $(P\varepsilon_x, P\varepsilon_y, P_f)$ , де  $P\varepsilon_x$  і  $P\varepsilon_y$  визначають положення об'єкта в пікселях відносно геометричного центру матриці камери. Відстань від початку системи координат камери (геометричного центру матриці камери) до об'єкта може бути визначена як його положення в пікселях  $F = \sqrt{\varepsilon_x^2 + \varepsilon_y^2 + f^2}$ , що показано на рис. 2.

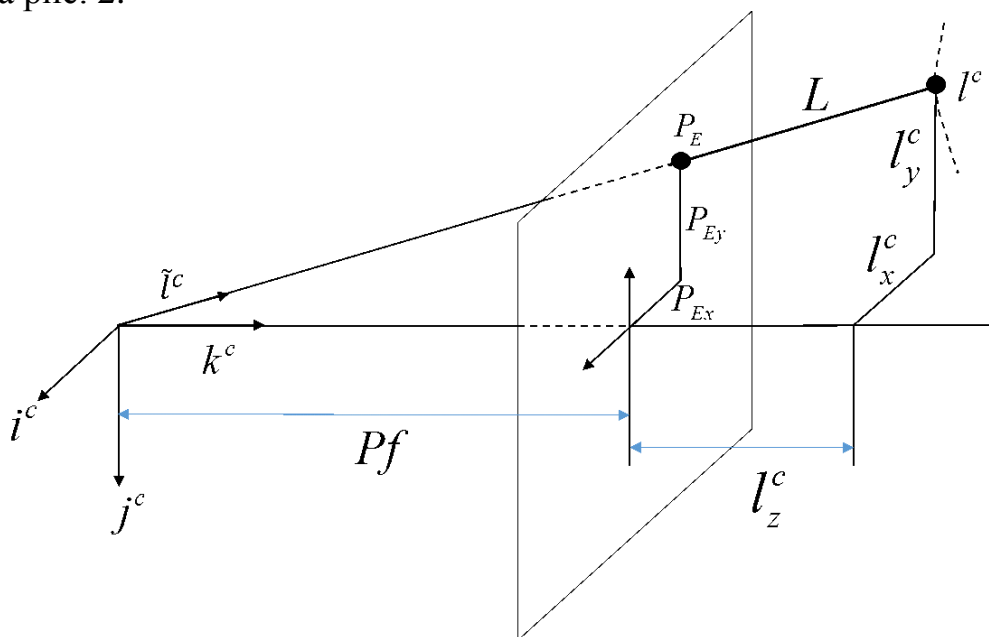


Рис. 2. Система координат камери

Для визначення орту (одичного вектора), за допомогою якого надалі задаватимемо напрямок польоту від веденого до ведучого БПЛА, будемо використовувати наступне співвідношення:

$$\bar{l} = \frac{1}{F} \begin{bmatrix} \varepsilon_x \\ \varepsilon_y \\ f \end{bmatrix} = \frac{1}{\sqrt{\varepsilon_x^2 + \varepsilon_y^2 + f^2}} \begin{bmatrix} \varepsilon_x \\ \varepsilon_y \\ f \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \bar{l}_x \\ \bar{l}_y \\ \bar{l}_z \end{bmatrix}.$$

## Алгоритм наведення

Опишемо простий алгоритм керування та наведення літального апарату для реалізації польоту у формації. Припустимо, що відбулося траєкторне відхилення ведучого БПЛА, тоді команди для керування веденого літального апарату можна описати у вигляді відповідних рівнянь керування для зміни азимуту та кута нахилу траєкторії:

$$\Psi_g = W_{\Psi_g}^{\delta_{rc}} \delta_{rc}, \quad \Theta_g = W_{\Theta_g}^{\delta_{ec}} \delta_{ec},$$

де  $\delta_{rc}$ ,  $\delta_{ec}$  – команди керування відповідно для керуючих поверхонь висоти та напрямку (або елеронів у випадку аеродинамічної схеми БПЛА – літаюче крило).

Рівняння оптичної осі системи наведення має вигляд:

$$l = \frac{1}{\sqrt{\varepsilon_x^2 + \varepsilon_y^2 + f^2}} \begin{bmatrix} \varepsilon_x & \varepsilon_y & f \end{bmatrix}^T.$$

Необхідне положення оптичної осі системи наведення визначається у відповідності до наступного співвідношення:  $l_r = R_b^g l$ .

Наступним кроком є отримання необхідних кутів азимуту і вертикального наведення для вирівнювання (націлювання) оптичних осей, які між собою узгоджені наступним співвідношенням:

$$l_r = \begin{bmatrix} l_{xr} \\ l_{yr} \\ l_{zr} \end{bmatrix} = R_b^{gT} \begin{bmatrix} l_x \\ l_y \\ l_z \end{bmatrix};$$

$$l_r = \begin{bmatrix} l_{xr} \\ l_{yr} \\ l_{zr} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos \Theta_g \cos \Psi_g & \sin \Theta_g \cos \Psi_g & -\sin \Psi_g \\ -\sin \Theta_g & \cos \Theta_g & 0 \\ \sin \Psi_g \cos \Theta_g & \sin \Theta_g \sin \Psi_g & \cos \Psi_g \end{bmatrix}^T \begin{bmatrix} l_x \\ l_y \\ l_z \end{bmatrix}. \quad (1)$$

Розв'язання рівняння (1) відносно кутів азимута і вертикального наведення на ведучий БПЛА дають нам наступні вирази для командних кутів:

$$\Theta_{gc} = \operatorname{tg}^{-1} \left( \frac{l_y}{l_x} \right), \quad \Psi_{gc} = \sin^{-1}(-l_z). \quad (2)$$

Таким чином сформовані команди для відхилення керуючих поверхонь веденого БПЛА описуються наступними співвідношеннями:

$$\delta_e = K_e (\Theta_{gc} - \Theta_g) = K_e \left[ \operatorname{tg}^{-1} \left( \frac{l_y}{l_x} \right) - \Theta_g \right]; \quad (3)$$

$$\delta_r = K_r (\Psi_{gc} - \Psi_g) = K_r \left[ \sin^{-1}(-l_z) - \Psi_g \right].$$

## Математична модель безпілотних літальних апаратів

## Траєкторне рівняння керування безпілотних літальних апаратів

Узгодження відносного руху ведених безпілотних літальних апаратів в траєкторній системі координат (як бачимо з рис. 1) може бути представлено у вигляді наступної системи рівнянь:

$$\begin{aligned}\Delta V_{xgi} &= \frac{dx_{g1}}{dt} - \frac{dx_{gi}}{dt}; \quad \Delta V_{ygi} = \frac{dy_{g1}}{dt} - \frac{dy_{gi}}{dt}; \quad \Delta V_{zgi} = \frac{dx_{z1}}{dt} - \frac{dx_{zi}}{dt}; \\ x_{gi}^{(1)} &= \Delta x_{gi} \cos \Theta_{gi} \cos \Psi_{gi} + \Delta y_{gi} \sin \Theta_{gi} - \Delta z_{gi} \cos \Theta_{gi} \sin \Psi_{gi}; \\ y_{gi}^{(1)} &= \Delta x_{gi} \sin \Psi_{gi} + \Delta y_{gi} \cos \Psi_{gi}; \\ z_{gi}^{(1)} &= \Delta x_{gi} \sin \Theta_{gi} \cos \Psi_{gi} - \Delta z_{gi} \cos \Theta_{gi} - \Delta y_{gi} \sin \Theta_{gi} \sin \Psi_{gi}; \\ \Delta V x_{gi}^{(1)} &= \Delta V x_{gi} \cos \Theta_{gi} \cos \Psi_{gi} + \Delta V y_{gi} \sin \Theta_{gi} - \Delta V z_{gi} \cos \Theta_{gi} \sin \Psi_{gi}; \\ \Delta V y_{gi}^{(1)} &= \Delta V x_{gi} \sin \Psi_{gi} + \Delta V y_{gi} \cos \Psi_{gi}; \\ \Delta V z_{gi}^{(1)} &= \Delta V x_{gi} \sin \Theta_{gi} \cos \Psi_{gi} - \Delta V z_{gi} \cos \Theta_{gi} - \Delta V y_{gi} \sin \Theta_{gi} \sin \Psi_{gi},\end{aligned}$$

де  $x_{gi}^{(1)}, y_{gi}^{(1)}, z_{gi}^{(1)}$  та  $\Delta V_{xgi}, \Delta V_{ygi}, \Delta V_{zgi}$  – координати і відносні швидкості  $i$ -того веденого БПЛА відносно ведучого БПЛА в траєкторній системі координат, кути: кут вертикального наведення на ціль  $\Theta_{gi}$  та кут азимуту цілі  $\Psi_{gi}$  для кожного БПЛА в групі. Параметр  $i$  визначає порядковий номер БПЛА, які знаходяться в групі.

Лінеаризація рівнянь (4) забезпечує набір рівнянь, які визначають траєкторії групи безпілотних літальних апаратів, що рухаються відносно до траєкторії ведучого БПЛА:

$$\begin{aligned}\delta x_{gi}^{(1)} &= c_{11}^{(i)} \delta \theta_1 + c_{12}^{(i)} \delta \Psi_1 + c_{13}^{(i)} \delta x_{g1} + c_{14}^{(i)} \delta y_{g1} + \\ &+ c_{15}^{(i)} \delta z_{g1} - c_{13}^{(i)} \delta x_{gi} - c_{14}^{(i)} \delta y_{gi} - c_{15}^{(i)} \delta z_{gi}; \\ \delta y_{gi}^{(1)} &= c_{22}^{(i)} \delta \Psi_1 + c_{23}^{(i)} \delta x_{g1} + c_{25}^{(i)} \delta z_{g1} - c_{23}^{(i)} \delta x_{gi} - c_{25}^{(i)} \delta z_{gi}; \\ \delta z_{gi}^{(1)} &= c_{31}^{(i)} \delta \theta_1 + c_{32}^{(i)} \delta \Psi_1 + c_{33}^{(i)} \delta x_{g1} + c_{34}^{(i)} \delta y_{g1} + \\ &+ c_{35}^{(i)} \delta z_{g1} - c_{33}^{(i)} \delta x_{gi} - c_{34}^{(i)} \delta y_{gi} - c_{35}^{(i)} \delta z_{gi}.\end{aligned}\tag{4}$$

де  $\delta$  – позначення «невеликих» відхилень від програмних значень польотних параметрів.



Повну систему рівнянь просторового руху кожного окремо взятого БПЛА з формації наведемо в траєкторній системі координат (рис. 1). Для реалізації законів керування групою безпілотних літальних апаратів будемо використовувати лінеаризовану математичну модель – лінеаризовану систему рівнянь руху БПЛА.

$$\begin{aligned}
 \delta V_i &+ a_{12}^{(i)} \delta \alpha_i + a_{13}^{(i)} \delta \beta_i + a_{14}^{(i)} \delta \gamma_i + a_{15}^{(i)} \delta \theta_i + a_{16}^{(i)} \delta \Psi_i + \dots; \\
 \delta \theta_i &= a_{21}^{(i)} \delta V_i + a_{22}^{(i)} \delta \alpha_i + a_{23}^{(i)} \delta \beta_i + a_{24}^{(i)} \delta \gamma_i + a_{25}^{(i)} \delta \theta_i + a_{26}^{(i)} \delta \Psi_i + \dots; \\
 \delta \dot{\Psi}_i &= a_{31}^{(i)} \delta V_i + a_{32}^{(i)} \delta \alpha_i + a_{33}^{(i)} \delta \beta_i + a_{34}^{(i)} \delta \gamma_i + a_{35}^{(i)} \delta \theta_i + a_{36}^{(i)} \delta \Psi_i + \dots; \\
 \delta \dot{\omega}_{\dot{x}} &= a_{41}^{(i)} \delta V_i + a_{42}^{(i)} \delta \alpha_i + a_{43}^{(i)} \delta \beta_i + a_{44}^{(i)} \delta \gamma_i + a_{45}^{(i)} \delta \theta_i + a_{46}^{(i)} \delta \Psi_i + \dots; \\
 \delta \dot{\omega}_{\dot{y}} &= a_{51}^{(i)} \delta V_i + a_{52}^{(i)} \delta \alpha_i + a_{53}^{(i)} \delta \beta_i + a_{54}^{(i)} \delta \gamma_i + a_{55}^{(i)} \delta \theta_i + a_{56}^{(i)} \delta \Psi_i + \dots; \\
 \delta \dot{\omega}_{\dot{z}} &= a_{61}^{(i)} \delta V_i + a_{62}^{(i)} \delta \alpha_i + a_{63}^{(i)} \delta \beta_i + a_{64}^{(i)} \delta \gamma_i + a_{65}^{(i)} \delta \theta_i + a_{66}^{(i)} \delta \Psi_i + \dots; \\
 \delta \dot{X}_g &= a_{71}^{(i)} \delta V_i + a_{72}^{(i)} \delta \alpha_i + a_{73}^{(i)} \delta \beta_i + a_{74}^{(i)} \delta \gamma_i + a_{75}^{(i)} \delta \theta_i + \dots; \\
 \delta \dot{Y}_g &= \delta \dot{H}_i = a_{81}^{(i)} \delta V_i + a_{82}^{(i)} \delta \alpha_i + \dots + b_{84}^{(i)} \delta u_{iT} = a_{81}^{(i)} \delta V_i = -\delta V_{i0} \theta_{i0}; \\
 \delta \dot{Z}_g &= a_{91}^{(i)} \delta V_i + a_{92}^{(i)} \delta \alpha_i + a_{93}^{(i)} \delta \beta_i + \dots + b_{94}^{(i)} \delta u_{iT} = a_{91}^{(i)} \delta V_i = \delta V_{i0} \Psi_{i0},
 \end{aligned} \tag{5}$$

де  $V$  – модуль повітряної швидкості;  $\alpha$  – кут атаки;  $\beta$  – кут ковзання;

$a_{ml}^{(i)}$  – лінеаризовані коефіцієнти аеродинамічних сил, моментів, сили

тяги та ваги кожного окремо розглядуваного БПЛА;

$\theta$  – кут нахилу траєкторії;  $\psi$  – кут шляху;

$\omega_{ij}$  – кутові швидкості обертання БПЛА;

$\gamma, \vartheta, \psi$  – кути крену, тангажу, рискання;

$X_g, Y_g, Z_g$  – координати літака відносно нормальної системи координат

$O_0 X_0 Y_0 Z_0$ ;

$H = -Z_g$  – висота польоту.

### **Система керування польотом групи безпілотних літальних апаратів**

В основу системи керування груповим польотом покладена система, що складається з наступних модулів-блоків: (1) - система наведення, в склад якої входять системи технічного зору (наприклад відеокамера) та система розпізнавання образів (для формування контрольної інформації щодо положення ведучого БПЛА); (2) - система керування польотом веденого БПЛА, в основу якої покладені закони керування для витримування веде-

## Системи та процеси керування

ного БПЛА у відповідності до заданої програми польоту - положення БПЛА в групі; (3) - навігаційна система для забезпечення контурів керування необхідною польотною інформацією.

Системи технічного зору, які встановлені на борту кожного з БПЛА, а також алгоритми розпізнавання образів утворюють систему наведення.



Дана система, відповідно до схеми, наведеної на рис. 3, обчислює дані просторового положення ведучого БПЛА. Дані перетворюються в команд-ні сигнали, що характеризують зміну відстаней до ведучого БПЛА, його вертикальні та горизонтальні переміщення. Приклад таких сигналів наведений на рис. 4. Система керування генерує команди на контури керування БПЛА для зміни кутів орієнтації та контролює відстані між літаками. До таких сигналів керування також включені польотні команди для витримання порядку в формації (польотного строю) для кожного безпілотного літального апарату в групі. Система керування (автопілот) подає команди на керуючі поверхні (керма висоти, елерони) безпілотного літального апарату. В той самий час автопілот включає в себе керування та стабілізацію не тільки по лінійним і кутовим переміщенням, а також по швидкостям та прискоренням БПЛА. Досягнення необхідних параметрів для перехідних

процесів реалізовані на основі ПІ та ПІД-регуляторів для поздовжнього та бічного каналів руху.

*Моделювання роботи системи автономного керування польотом БПЛА в групі*

Для моделювання системи, що пропонується, було обрано БПЛА *ZAGI*. Геометричні та повний список аеродинамічних характеристик цього БПЛА наведено в [6]. До складу системи, зображеної на попередньому рис. 2, додамо блоки, що математично моделюють нелінійну поведінку БПЛА, включаючи аеродинамічні навантаження, що діють на нього.

Крім того, для уніфікації системи керування можна додати до її структурного складу блок ідентифікації параметрів об'єкту керування, що особливо стосується визначення його аеродинамічних похідних, оскільки ці параметри є індивідуальними для кожного окремо взятого літака.

В якості даних для створення робочого алгоритму наведення використано рівняння (1) і (2), які описують віддаль до ведучого БПЛА, кути нахилу траєкторії та азимутальний курс до ведучого БПЛА. Система автоматичного керування (автопілот) включає в себе контури керування з витриманням заданих команд польотного завдання (швидкість, висота, курсовий напрямок польоту групи) та додаткових команд керування стосовно формування польотного порядку групи БПЛА.

Моделювання запропонованого алгоритму та відповідної системи керування польотом групи БПЛА проводилось в середовищі *Matlab Simulink*. Як вже зазначали раніше, для прикладу імітаційної моделі системи керування розглядається політ двох БПЛА з польотним порядком ведучий – ведений (порядок - лінія вздовж напрямку польоту ведучого БПЛА). Політ здійснюється горизонтально на заданій висоті. Порядок польоту в групі формується на основі рівнянь (4), (5).

Для моделювання системи наведення і формування наступних команд для керування польотом БПЛА була використана модель системи, коли моделювання проводилося зі зміною параметрів горизонтального польоту ведучого БПЛА. Горизонтальне та вертикальне зміщення ведучого БПЛА і відповідна зміна відстані між парою БПЛА мали місце на другій і четвертій секундах моделювання. Ці сигнали, при віддалі між БПЛА рівній ста метрам, відповідають горизонтальному і вертикальному зміщенню ведучого БПЛА відповідно на 2 та 1 метри.

На наведеному нижче рис. 4 представлені командні виходи систем наведення, які характеризують вертикальне і горизонтальне зміщення ведучого БПЛА.

## Системи та процеси керування

Відповідна реакція веденого БПЛА при збереженні заданого порядку в групі наведена на рис. 5.



Рис. 4. Вихідні команди з системи наведення

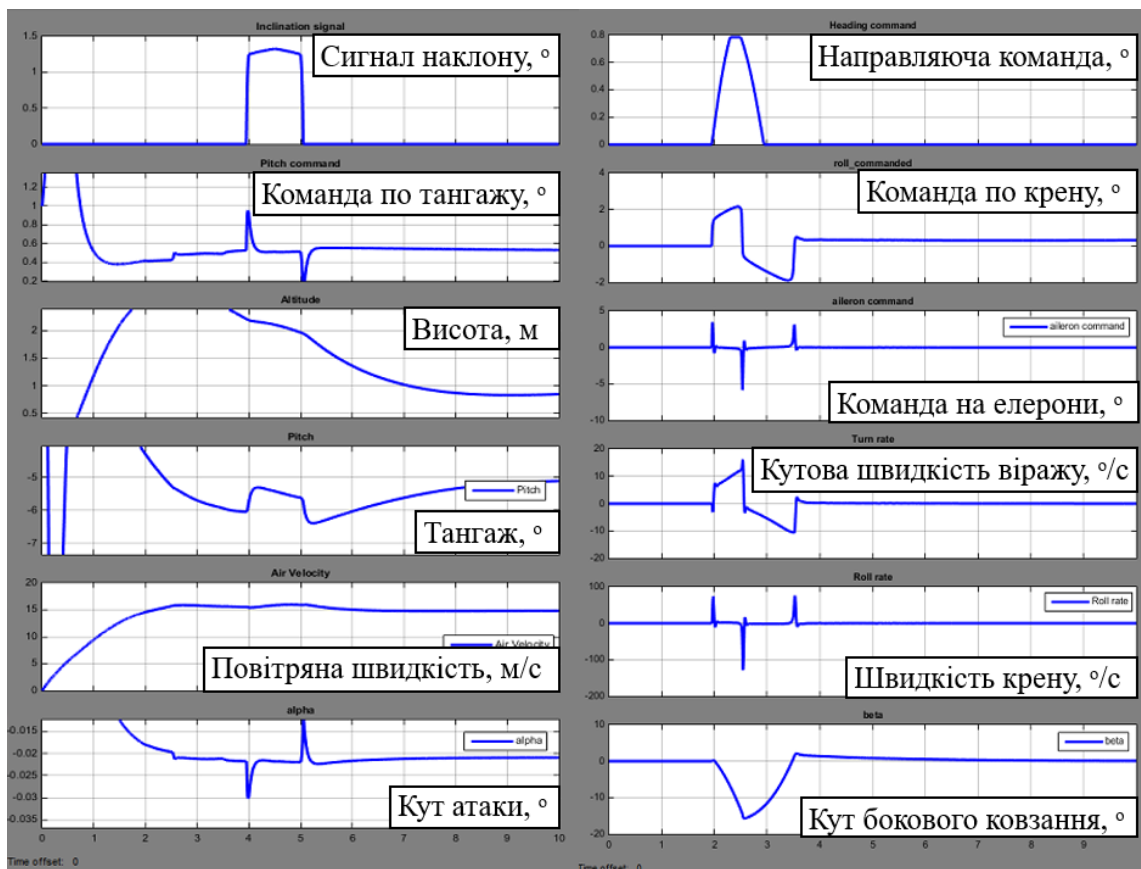


Рис. 5. Реакція веденого БПЛА у відповідь на зміну параметрів польоту ведучого БПЛА

Як бачимо з рис. 5, результати моделювання системи практично не мають ніяких похибок у вихідних параметрах польоту, а також забезпечують мінімальне перерегулювання та коливальність перехідних процесів.

### **Висновки**

В даній роботі була представлена та реалізована методика керування групою БПЛА при використанні польотного порядку ведучий - ведений. Для створення зв'язку та синхронізації між двома сусідніми БПЛА при їх польоті в формації був запропонований та реалізований алгоритм, який використовує електромеханічні оптичні або інфрачервоні камери та алгоритми розпізнавання образів. Крім того, приведено підхід до реалізації такої системи керування, а також алгоритм та принцип роботи системи на основі відповідних отриманих математичних моделей.

На основі отриманих алгоритмів, результатів моделювання, та враховуючи сучасні вимоги щодо використання групи БПЛА (надійність, живучість формації БПЛА як системи вцілому) найбільш підходящим методом для реалізації керування групою БПЛА є метод віртуального лідера. Алгоритм роботи такого методу буде розроблено та досліджено в наступних роботах авторів.

### **Список використаної літератури**

1. *T.Soleymani, F. Saghafi* "Behavior-Based Acceleration Commanded Formation Flight Control" International Conference on Control, Automation and Systems 2010 Oct. 27-30, in KINTEX, Gyeonggi-do, Korea. 2010.
2. *A.K. Das, R. Fierro, V. Kumar, J.P. Ostrowski, J. Spletzer, and C.J. Taylor*, "A Vision-Based Formation Control Framework," IEEE Transaction on Robotics and Automation, Vol. 18, No. 5, 2002.
3. *J. Hammer, G. Piper, O. Thorp, and J. Watkins*, "Investigating Virtual Structure Based Control Strategies for Spacecraft Formation Maneuvers," AIAA Guidance, Navigation, and Control Conference and Exhibit, Providence, Rhode Island, 2004.
4. *Z. Gosiewski, L. Ambroziak*, "UAV Autonomous Formation Flight Experiment with Virtual Leader Control Structure", Solid State Phenomena, Vol. 198, pp. 254-259, 2013.
5. *T. Paul, T. R. Krogstad, and J. T. Gravdahl*, "Modelling of UAV Formation Flight Using 3D Potential Field," Simulation Modelling Practice and Theory, vol. 16, no. 9, pp. 1453–1462, Oct. 2008.
6. *Randal W. Beard, Timothy W. McLain* "Small Unmanned Aircraft: Theory and Practice" by Princeton University Press, 2012.

