

Леонід Михайлович Артюшин (доктор технічних наук, професор)¹
Анатолій Анатолійович Лобанов (доктор військових наук, професор)²
Володимир Вікторович Герасименко (кандидат військових наук)²

¹Державний науково-дослідний інститут авіації України, Київ, Україна

²Національний університет оборони України імені Івана Черняховського, Київ, Україна

МАТЕМАТИЧНА МОДЕЛЬ ПОБУДОВИ БОЙОВОГО ПОРЯДКУ СПІЛЬНОЇ АВІАЦІЙНОЇ ГРУПИ ПІЛОТОВАНОЇ ТА БЕЗПІЛОТНОЇ АВІАЦІЇ

Для здійснення автоматизованого управління бойовими порядками спільних авіаційних груп необхідно створення системи математичних моделей етапів функціонування бойового порядку, а також засобів реалізації цієї системи, включно з процедурами управління та інтеграції. Найбільш вдало така задача може бути розв'язана при застосуванні логіко-динамічних моделей та теорії логіко-динамічних систем.

Метою статті є створення банку моделей, як системи моделей математичного опису етапів функціонування бойового порядку спільної авіаційної групи, що становить основу математичної моделі бойового порядку спільної авіаційної групи пілотованої та безпілотної авіації.

Задача синтезу логіко-динамічних моделей полягає у розділенні вихідної моделі на сукупність структурних станів (режимів), причому систему у кожному структурному стані можна розглядати як самостійну. Моделювання кожного з станів полягає у об'єднанні ряду режимів, що характеризуються постійним значенням аеродинамічних характеристик пілотованих та безпілотних літальних апаратів залежно від значення функцій предикат змінних. Відповідно, модель виконання бойового завдання спільною авіаційною групою пілотованої та безпілотної авіації розбивається на ряд етапів. Зміст задачі дослідження передбачає використання повної нелінійної моделі динаміки польоту без розділення руху на повздовжній, боковий та вертикальний, при прийнятих припущеннях.

Визначення заданого відносного положення пілотованих та безпілотних літальних апаратів у бойовому порядку дозволить описати їх спільний відносний рух, що формує особливості системи управління бойовим порядком, а обрання системи координат відносно веденого надасть переваги на всіх подальших етапах розв'язання задачі управління.

Ключові слова: автоматизоване управління; банк моделей; модель бойового порядку; траєкторна система координат; рівняння руху; спільна авіаційна група.

Вступ

Сьогодні, для управління бойовими порядками пілотованої та безпілотної авіації при виконанні ними спільного завдання використовується широке розмаїття систем управління, в основу яких покладено як ручне, так і автоматизоване керування з використанням систем штучного інтелекту. Але недоліки та переваги кожної з систем управління вимагають пошуку та створення системи моделей математичного опису етапів функціонування бойового порядку з процедурами управління та інтеграції. Ця задача може бути розв'язана при застосуванні логіко-динамічних моделей та теорії логіко-динамічних систем. Синтез логіко-динамічних моделей полягає у розділенні вихідної моделі на сукупність структурних станів (режимів), а моделювання кожного з станів полягає у об'єднанні ряду режимів, що характеризуються постійним значенням аеродинамічних характеристик пілотованих та безпілотних літальних апаратів. Відповідно, модель виконання бойового завдання спільною авіаційною групою пілотованої та безпілотної авіації розбивається на ряд етапів. Отже, зміст задачі дослідження

передбачає використання повної нелінійної моделі динаміки польоту без розділення руху на повздовжній, боковий та вертикальний, при прийнятих припущеннях, та визначення заданого відносного положення пілотованих та безпілотних літальних апаратів у бойовому порядку, що дозволяє описати їх спільний відносний рух.

Постановка проблеми. Ефективність бойового застосування авіації у спільних бойових порядках буде значно перевищувати ефективність окремого застосування пілотованої та безпілотної авіації саме за рахунок поєднання їх сильних та взаємної нейтралізації слабких сторін. Таким чином, виникає проблема створення складної математичної моделі або системи моделей, що дозволять з прийнятними точністю та достовірністю відтворити процес управління бойовим порядком спільної авіаційної групи пілотованої та безпілотної авіації, що є складним як у теоретичному, так і у практичному розумінні, а розв'язання цієї проблеми у науковій спільноті не набуло широкого розмаху і є актуальним науковим завданням.

Аналіз останніх досліджень та публікацій.

Створення комплексу моделей на основі якого формується банк моделей описано у [1]. Моделі, що описують функціональну динаміку бойового порядку спільної авіаційної групи та структуру бойового порядку, що представлена у класі відносин “частина – ціле”, представлено у [2, 3]. Приклади розв’язання задач ієрархічності управління та координації взаємодії в групі літальних апаратів при застосуванні підходів та апарату логіко-динамічних моделей та теорії логіко-динамічних систем наведено у [4, 5]. Етапи польоту, що моделюються, наведені у [6], а порядок опису маневрів літальних апаратів на цих етапах наведені у [7]. Закони змінення перевантаження за відповідними осями при маневруванні описані у [8], а рівняння динаміки польоту літального апарату на цих маневрах описані у [9, 10]. Прототип моделі турбореактивного двигуна наведено у [11], а обернена задачі динаміки, на основі якої синтезований закон функціонування автомату тяги турбореактивного двигуна, наведена у [12]. Опис руху літального апарату в системах координат, що прийняті у механіці та динаміці польоту, наведено у [13]. Висновки та рівняння, як основа синтезу алгоритмів управління відносним рухом літаків у траєкторній системі координат веденого та складова частина математичної моделі бойового порядку спільної авіаційної групи пілотованої та безпілотної авіації наведені у [14]. Погляди військового керівництва провідних країн світу щодо теоретичних та практичних розробок у спільному застосуванні пілотованої та безпілотної авіації наведені у [15, 16].

Метою статті є створення банку моделей, як системи моделей математичного опису етапів функціонування бойового порядку спільної авіаційної групи, а також засобів реалізації цієї системи, включно з процедурами управління та інтеграції, що становить основу математичної моделі бойового порядку спільної авіаційної групи пілотованої та безпілотної авіації.

Виклад основного матеріалу дослідження.

Комплекс моделей $M = \{M_i\}$ математичного опису етапів функціонування бойового порядку (модель літального апарату пілотованого або безпілотної) та модель обстановки функціонування $M^{0\Phi}$) утворює склад банку моделей [1]. Банк моделей дає можливість задати набір відносин \mathcal{J} , що дозволяють обирати визначенні співвідношення послідовності моделей, необхідних при моделюванні певних етапів функціонування бойового порядку та розв’язання задач, що при цьому виникають. Цей набір відносин визначає структуру банку моделей. Крім цього, необхідно задати також набір відношень \mathcal{D} перетворення моделей. Тоді банк математичних моделей може бути визначений наступним чином:

$$BM = \{M, \mathcal{J}, \mathcal{D}\}.$$

Складність структури процесів та взаємозв’язків пари моделей $M^{БП}, M^{0\Phi}$ може бути

представлена множиною часткових моделей.

Вихідним положенням для побудови системи моделей є множина цілей $\mathcal{C}\{C_i\}$, для досягнення яких формується бойовий порядок спільної авіаційної групи. Таким чином, першою базовою моделлю бойового порядку спільної авіаційної групи будемо вважати модель динамічної операції D_i , що здійснюється для досягнення цілі C_i . Множини $\mathcal{C}\{C_i\}$ та $\mathcal{D}\{D_i\}$ повинні мати спільне відображення. Моделі D_i мають складну ієрархічну структуру, у якій об’єднані динаміки пілотованих та безпілотної літальних апаратів, динаміка зміни структури, динаміка взаємодії підсистеми тощо.

Для заданої послідовності C_1, C_2, \dots, C_k будується відповідна послідовність D_1, D_2, \dots, D_k , що розглядається як деяка цільова структура $\mathcal{P}\{D_i\}^k$, тобто пакет динамічних операцій для досягнення конкретних цілей. Моделі $D_i, \mathcal{P}\{D_i\}$ описують функціональну динаміку бойового порядку спільної авіаційної групи, яка у загальному вигляді описується у моделі $M_{0\Phi}^{БП}$. Другою базовою моделлю бойового порядку спільної авіаційної групи є модель структури бойового порядку $M_C^{БП}$, що представлена у класі відносин “частина – ціле” [2, 3].

Положеннями класичної теорії управління, що описують бойовий порядок спільної авіаційної групи геометрично визначеною сукупністю рухомих тіл, неможливо відобразити ієрархічність управління та координацію взаємодії в групі пілотованих та безпілотної літальних апаратів, а також ввести у модель відповідну категорію цілей для бойового порядку взагалі та декомпованих підцілей для кожного окремого пілотованого чи безпілотної літального апарату. Дана задача може бути розв’язана при застосуванні підходу та апарату логіко-динамічних моделей (ЛДМ) та теорії логіко-динамічних систем [4, 5].

Задача синтезу ЛДМ полягає у розділенні вихідної моделі на сукупність структурних станів (режимів), причому систему у кожному структурному стані можна розглядати як незалежну, таку, що функціонує самостійно. Відповідно до такого підходу модель виконання бойового завдання спільною авіаційною групою пілотованої та безпілотної авіації розбивається на ряд етапів: зліт; збір у повітрі та побудова бойового порядку спільної авіаційної групи; політ у район виконання завдання; виконання завдання; повернення на аеродром посадки; розпуск бойового порядку та захід на посадку; посадка [6]. Кожен з етапів представляє собою виконання визначеного маневру або їх сукупності [7]. Маневр задається законом змінення перевантаження за відповідними осями [8].

У загальному вигляді кусково-безперервна функція структурного стану записується як неупорядкована i -послідовність N_{iy} , функції перевантажень n_{yij} :

$$N_{iy}(H, \Theta) = \sum_{i=1}^n L_{ij}^{n_y}(H, \Theta) n_{yij}, \quad (1)$$

де $L_{ij}^{n_y}$ – логічні змінні, що є функціями предикат

дійсних змінних H та Θ ; n_{yij} – значення n_y при визначених H та Θ польоту; $j = 1, 2, \dots, n$ – номер стану. При цьому L_j повинні задовольняти умовам єдиності $L_S \wedge L_P = 0, S \neq P$, та повноти $\bigvee_{S=1}^S L_S = 1$ ($i = 1, 2, \dots, N$ – номер пілотованого чи безпілотної літального апарату в строю).

Моделювання кожного з станів полягає у об'єднанні ряду режимів, що характеризуються постійним значенням аеродинамічних характеристик пілотованих та безпілотної літальних апаратів залежно від значення функцій предикат змінних M та H . При такій характеристиці режиму польоту літального апарату коефіцієнти, що входять до логічних рівнянь моделі, представляються у вигляді

$$Z_i(H, M) = \sum_{j=1}^n L_{ij}(H, M) K_{ij} \quad (2)$$

де $Z_i(H, M)$ – мета функціонування літального апарату, як функція предикат дійсних змінних M та H ;

$L_{ij}(H, M)$ – логічні змінні, що є функціями предикат дійсних змінних M та H ;

H, M – змінні, що входять до формул визначення аеродинамічних характеристик пілотованих та безпілотної літальних апаратів залежно від мети функціонування Z_i ;

K_{ij} – значення відповідних коефіцієнтів при H та M (залежать від типу літального апарату);
 i – номер пілотованого або безпілотної літального апарату в бойовому порядку;
 j – номер режиму.

Область існування логічних змінних – $L_{ij} \{0,1\}$, а область визначення – підмножини $\{H_L \pm \Delta H\}$ та $\{M_V \pm \Delta M\}$ множин $\{H\}$ та $\{M\}$, тобто

$$L_{ij} = \begin{cases} 1 \text{ при } H \in (H_L \pm \Delta H) \text{ та } M \in \{M_V \pm \Delta M\} \\ 0 \text{ у всіх решті випадків} \end{cases} \quad (3)$$

де $L = 1, 2, \dots, q$ – множина значень H ;

$V = 1, 2, \dots, p$ – множина значень M ;

$j = 1, 2, \dots, k, k = q \times p$.

Наведене вище розбиття моделі виконання бойової задачі групою пілотованих та безпілотної літальних апаратів є основою синтезу логічної частини моделювання та визначає набір відношень Ж банку моделей. Логічними операціями відбувається “зшивання” режимів у стани, стани у маневри тощо. На рис. 1 та 2 представлені, відповідно, структура виконання бойової задачі пілотованою та безпілотною авіацією та структурно-логічна схема маневру бойового порядку пілотованих та безпілотної літальних апаратів у вертикальній площині.

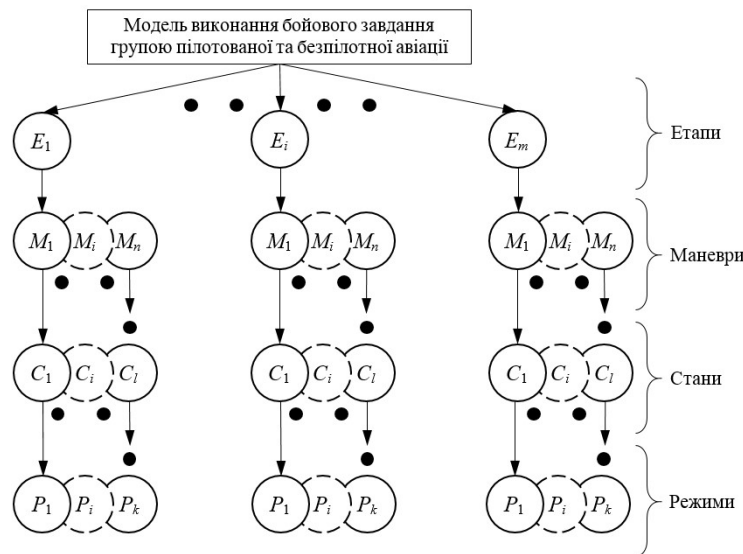


Рисунок 1 – Структура виконання завдання групою пілотованої та безпілотної авіації

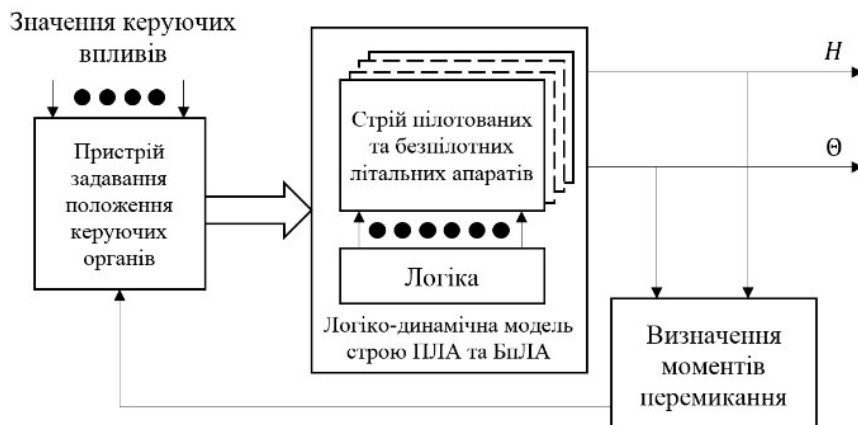


Рисунок 2 – Структурно-логічна схема виконання маневру строю пілотованої (ПЛІА) та безпілотної (БПЛА) авіації

Підсумовуючі наведене, а також використовуючи результати та позначення [3], представимо на рис. 3 узагальнену логіко-математичну модель бойового порядку спільної авіаційної групи пілотованої та безпілотної авіації, що містить в собі моделі пілотованих та безпілотнох літальних апаратів та систем управління ними, структурну та логічну частину.

Зміст задачі дослідження передбачає використання достатньо повної нелінійної моделі динаміки польоту без розділення руху на повздовжній та боковий. При цьому прийняті наступні припущення:

- літак розглядається як тверде тіло;
 - політ виконується над плоскою Землею, що не обертається;
 - центробіжні моменти інерції дорівнюють 0;
 - тяга двигунів спрямована вздовж осі OX літака.
- Рівняння динаміки польоту можуть бути прийняті відповідно до [9,10]. До них додається модель турбореактивного двигуна [11]:

$$T_{дв} \Delta P + \Delta P = \left(\frac{\partial P}{\partial \delta_{руд}} \right)_0 \Delta \delta_{руд}, \quad (4)$$

де ΔP – приріст тяги, Н;

$\Delta \delta_{руд}$ – пересування ричагу управління двигуном, рад;

$T_{дв}$ – константа часу роботи двигуна, 1/с;

$\left(\frac{\partial P}{\partial \delta_{руд}} \right)_0$ – прийомистість двигуна, Н/рад.

Закони управління системи автоматизованого управління мають вигляд:

для каналу управління по тангажу

$$\begin{aligned} \ddot{x} &= a_{ix} - \dot{V}_j + \ddot{\theta}_j y - \ddot{\Psi}_j z \cos \theta_j - \frac{1}{2} \dot{\Psi}_j^2 y \sin 2\theta_j - \dot{\Psi}_j \dot{\theta}_j z \sin \theta_j + \dot{\Psi}_j^2 x \cos^2 \theta_j + \dot{\theta}_j^2 x - 2\dot{\Psi}_j \dot{z} \cos \theta_j + 2\dot{\theta}_j \dot{y}; \\ \ddot{y} &= a_{iy} - \dot{\theta}_j \dot{V}_j - \ddot{\theta}_j x + \ddot{\Psi}_j z \sin \theta_j - \frac{1}{2} \dot{\Psi}_j^2 x \sin 2\theta_j - \dot{\Psi}_j \dot{\theta}_j z \cos \theta_j + \dot{\Psi}_j^2 y \sin^2 \theta_j + \dot{\theta}_j^2 y - 2\dot{\theta}_j \dot{x} + 2\dot{\Psi}_j \dot{z} \sin \theta_j; \\ \ddot{z} &= a_{iz} - \dot{\Psi}_j \dot{V}_j \cos \theta_j - \ddot{\Psi}_j y \sin \theta_j + \ddot{\Psi}_j x \cos \theta_j - \dot{\Psi}_j \dot{\theta}_j x \sin \theta_j - \dot{\Psi}_j \dot{\theta}_j y \cos \theta_j + \dot{\Psi}_j^2 z - 2\dot{\Psi}_j \dot{y} \sin \theta_j + 2\dot{\Psi}_j \dot{x} \cos \theta_j. \end{aligned} \quad (8)$$

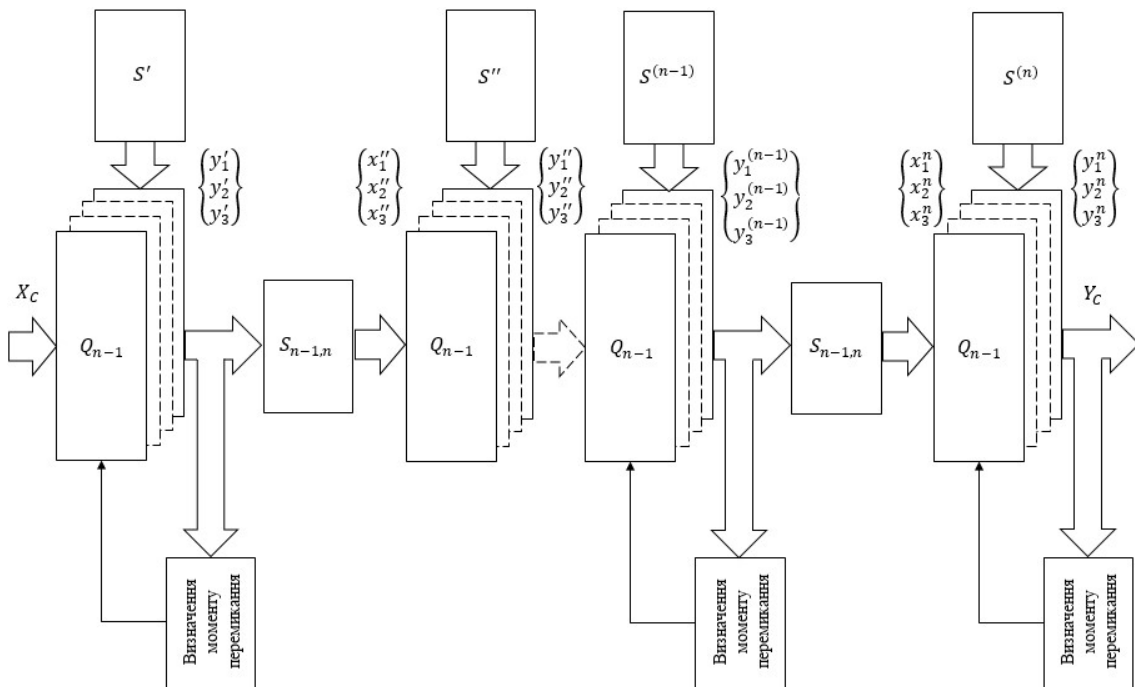


Рисунок 3 – Узагальнена логіко-математична модель бойового порядку пілотованої та безпілотної авіації

$$\varphi_{ст} = \frac{T_{иP+1}}{T_{иP}} \left[\mu_z(q) \frac{T_\delta}{T_{\delta+1}} \omega_z + \int_{\Delta n_y = n_y - n_{y \min}(q)}^{\Delta n_y = n_y - n_{y \max}(q)} i_{\Delta \vartheta} (\vartheta - \vartheta_{зад}) \frac{T_\vartheta}{T_{\vartheta+1}} \right];$$

для каналу управління по крену

$$\delta_e = \frac{T_{иP+1}}{T_{иP}} \left[i_{\Delta \gamma} \frac{2T_{1P+1}}{T_{1P+1}} \frac{T_{\gamma P}}{T_{\gamma P+1}} (\gamma - \gamma_{зад}) + \mu_x(q) \omega_x \right]; \quad (5)$$

для каналу управління по курсу

$$\delta_e = \frac{T_{иP+1}}{T_{иP}} \left[i_{\Delta \gamma} \frac{2T_{1P+1}}{T_{1P+1}} \frac{T_{\gamma P}}{T_{\gamma P+1}} (\gamma - \gamma_{зад}) + \mu_x(q) \omega_x \right];$$

$$\gamma_{зад} = i_{\Delta \Psi} \frac{1}{T_{2P+1}} (\Psi - \Psi_{зад}).$$

Відхилення руля напрямку відбувається відповідно до закону

$$\delta_n = \frac{T_{иP+1}}{T_{иP}} \mu_y(q) \omega_y. \quad (6)$$

Закон функціонування автомату тяги, синтезованого на основі розв'язання оберненої задачі динаміки [12], має структуру

$$\delta_{руд} = K_V [r(\bar{V} - V) - \dot{V}], \quad (7)$$

де K_V [рад/с/м], r [1/с] – константи;

\bar{V}, V – задане та поточне значення повітряної швидкості;

\dot{V} – прискорення літака, мс⁻².

Вказані рівняння разом з рівняннями відносного руху є основою синтезу алгоритмів управління відносним рухом літаків (8) та суттєвою складовою частиною математичної моделі бойового порядку [3].

Для пояснення питання управління параметрами бойових порядків спільної авіаційної групи пілотованої та безпілотної авіації розглянемо порядок управління на прикладі управління конфігурацією складної механічної системи. Елементом системи тут є літальний апарат, рух якого описується у загальноприйнятих системах координат, що застосовуються у механіці та динаміці польоту [13].

При розв'язанні задачі забезпечення заданого відносного положення пілотованих та безпілотної літальних апаратів у бойовому порядку природно розкрити опис їх відносного руху. Існуюче уявлення руху здебільшого визначить особливості

відповідної системи управління. Обрання системи координат на початковому етапі дає суттєві переваги на всіх подальших етапах розв'язання задачі.

Незалежно від причин відхилення параметрів бойового порядку пілотованої та безпілотної авіації від запрограмованих, виникаючі розбіжності усуваються за рахунок зміни режимів польоту ведених літаків. Це основний аргумент за організацію управління маневруванням літаків у бойовому порядку у траекторній системі координат O_i, X_k, Y_k, Z_k пов'язаної з i -м веденим безпілотною літальним апаратом (рис. 4, 5).

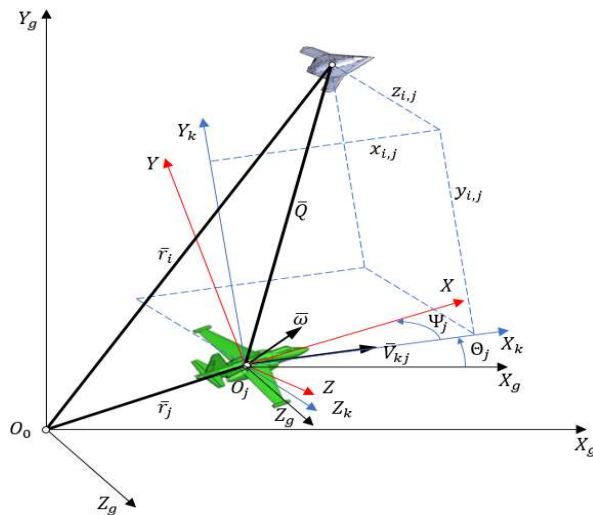


Рисунок 4 – Схема сил, що діють на пілотований літак ведучого в траекторній системі координат веденого безпілотної літака

Як швидко i -й ведений безпілотної літак оцінює своє положення відносно j -го ведучого пілотованого літака у “власній” системі координат і відповідно до цього здійснює рух, процес організації управління маневруванням літаків у бойовому порядку позбавлений труднощів, пов'язаних з додатковими перетвореннями координат. Крім того, інформація про вектор швидкості \bar{V}_{ki} веденого безпілотної літака дозволяє контролювати траекторію його руху відносно пілотованого літака.

Формування на борту веденого безпілотної літака потрібних значень керуючих функцій забезпечує ув'язку розв'язання задачі управління рухом пілотованих та безпілотної літаків у бойовому порядку з практикою групового маневрування, відповідно до чого ведені безпілотної літаки виконують необхідні для витримування заданого бойового порядку маневри.

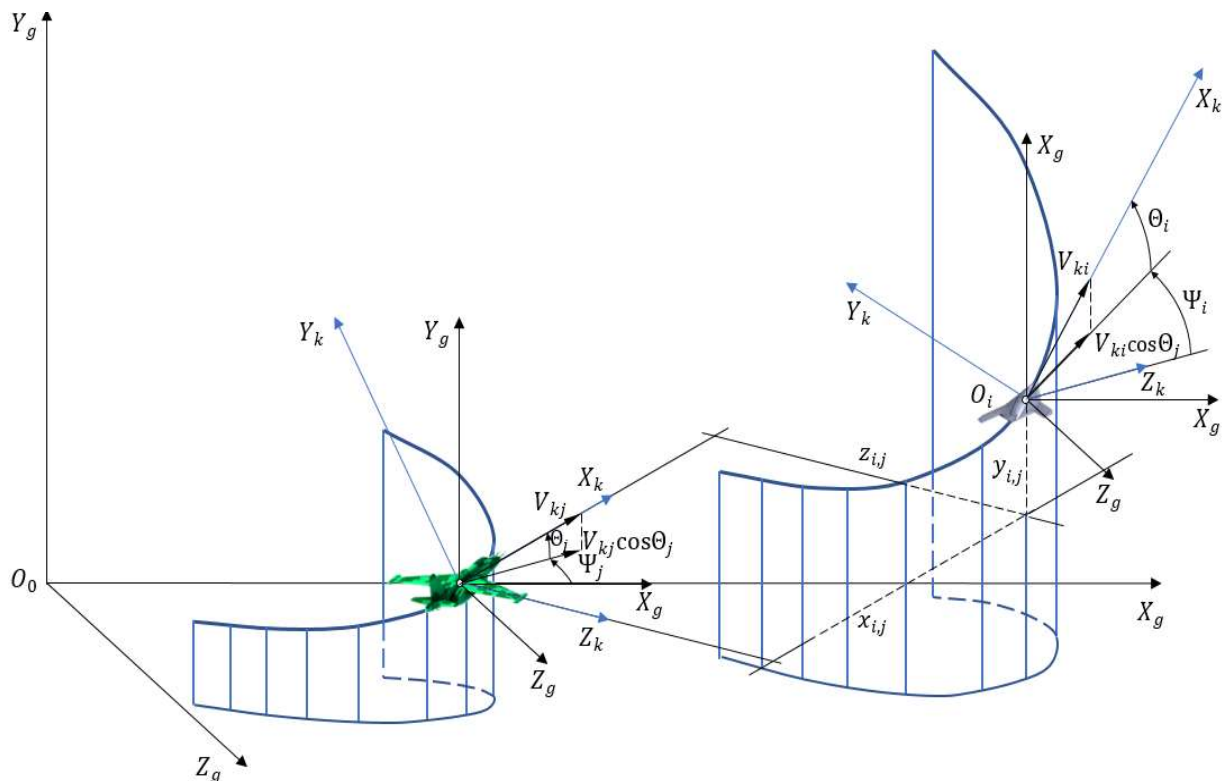


Рисунок 5 – Схема сил на маневрі, що діють на пілотований літак ведучого та ведений безпілотної літак

Прийняття у якості базової траєкторної системи координат веденого дозволить обійти ряд труднощів принципового характеру, притаманних організації управління в системі координат ведучого. Так, складові переносного прискорення, обумовлені обертальними рухами ведучого, досить суттєво впливають на величини відносних прискорень. Вони зростають пропорційно значенням параметрів строю та можуть бути компенсовані тільки за рахунок значної зміни абсолютних прискорень веденого літака з можливим виходом на відповідні обмеження. У відносному русі ведучого літака в системі координат веденого переносне прискорення створює ведений та сам його ж компенсує. Це ж прискорення може бути використано для компенсації складових відносного прискорення, викликаного маневруванням ведучого літака, що забезпечить зменшення абсолютних прискорень веденого літака у процесі управління.

Використання траєкторної системи координат ведучого пов'язано з необхідністю передачі додаткової інформації з пілотованого літака ведучого на ведений безпілотний літак: або заданих значень керуючих функцій, або інформації щодо кутового положення та швидкості польоту ведучого літака. Для такого специфічного об'єкту управління, як бойовий порядок, недолік досить суттєвий. Тому, спираючись на запропоновані моделі, на нашу думку, синтез алгоритмів управління літальними апаратами у бойовому порядку спільної авіаційної групи доцільно здійснювати на базі апарату теорії нейронних мереж.

Рівняння відносного руху літальних апаратів у траєкторній системі координат веденого (8) та висновки з них розкриті у теорії, що використовується для міжлітакової навігації [14].

Література

1. **Жук К. Д.** О построении банков летательных моделей в программировании жизненных циклов объектов новой техники // Электронное моделирование. – 1981, № 14. – С. 14–21. 2. **Артюшин Л. М.,** Герасименко В. В., Коваль В. В. Метод формування спільної авіаційної групи. Сучасні інформаційні технології у сфері безпеки та оборони № 1(40)/2021. – С. 63–68. URL: <https://doi.org/10.33099/2311-7249/2021-40-1-63-68>. 3. **Артюшин Л. М.,** Герасименко В. В., Коваль В. В. Синтез раціональних структур бойових порядків спільних авіаційних груп. Журнал наукових праць “Соціальний розвиток та безпека”. Том 11, № 3, – 2021. – С. 209–220. DOI: 10.33445/sds.2021.11.3.20. 4. **Жук К. Д.,** Тимченко А. А., Доленко Т. И. Исследование структуры и моделирование логико-динамических систем. – К.: Наукова думка, 1975. – 197 с. 5. **Жук К. Д.,** Тимченко А. А. Автоматизированное проектирование логико-динамических систем. – К.: Наукова думка, 1981. – 320 с. 6. Наказ Міністерства оборони України від 05 січня 2015 року № 2 “Про затвердження правил виконання польотів державної авіації України”. розділ IX, глава 14 – Особливості виконання групових польотів. 7. **Крюков Н. П.,** Кремень М. А. Методом опорных точек // Авиация и космонавтика. – 1983. – № 6. – С. 26–27. – № 7. – С. 27–28. 8. **Лебедь В. Г.,** Миргород Ю. И., Українець Є. О. Аерогідродинаміка. Харків : ХУПС

Рівняння (8) є основою синтезу алгоритмів управління відносним рухом літаків та суттєвою складовою частиною математичної моделі бойового порядку спільної авіаційної групи пілотованої та безпілотної авіації.

Висновки і перспективи подальших досліджень

Таким чином, темпи розвитку авіаційної техніки підштовхують керівництво збройних сил провідних країн світу до теоретичного обґрунтування і практичної розробки питань спільного застосування пілотованої і безпілотної авіації [15, 16].

На теперішній час, основною метою дослідницьких робіт є підвищення ефективності виконання авіацією бойових завдань та забезпечення дій при одночасному зниженні ризику втрат дороговартісних пілотованої авіаційної техніки та льотних екіпажів при значному скороченні матеріальних витрат. Для цього, під час виконання завдань, до бойових порядків пілотованої авіації буде залучатися і безпілотна авіація, управління якою буде здійснюватися з використанням нейронних мереж [16], в ланці вироблення керуючих сигналів без втручання людини. Подібне спільне застосування літальних апаратів різних типів, класів і приналежності є лише проміжним етапом на шляху створення груп безпілотних літальних апаратів, що зможуть самоорганізовуватися та діяти з високим ступенем автономності, самостійно приймати рішення з урахуванням ситуаційної обізнаності. Тому, цілком ймовірно, що в майбутньому виконання всіх основних завдань авіації буде покладено на безпілотні авіаційні комплекси.

ім. Івана Кожедуба, 2011. – 415 с. 9. **Немешілов Ю. О.** Моделі систем управління літальними апаратами та методи експериментальних досліджень: Навч. посібн./ Ю.О. Немешілов. – Харків: Нац. аерокосмічн. ун-т ім. М.С. Жуковського “ХАІ”, 2019. – 160 с. 10. **Силков В. И.** Динамика полета и боевого маневрирования летательных аппаратов. Часть 2. Устойчивость и управляемость. Учебное пособие. – К.: КВВАИУ, 1984. – 318 с. 11. Справочник по теории автоматического управления // Под ред. А. А. Красовского. – М.: Наука, 1987. – 712 с. 12. **Крутько П. Д.,** Попов Е. П. Синтез управления скоростью движения летательных аппаратов на основе решения обратной задачи динамики // Докл. АН СССР, 1986. – Т.260, № 4. – С.809–812. 13. **Горбатенко С. А.** Механика полета: общие сведения. Уравнения движения / Горбатенко С.А. и др. – М.: Машиностроение, 1969. – 500 с. 14. **Тарасов В. Г.** Межсамолетная навигация. – М.: Машиностроение, 1980. – 184 с. 15. **Greg L. Zacharias.** 2019. Autonomous Horizons: Autonomy in the Air Force – A Path to the Future, Volume 1: Human Autonomy Teaming (AF/ST TR 15-01). Air University Press. 16. **Greg L. Zacharias.** March 2019. Autonomous Horizons: Autonomy in the Air Force – A Path to the Future, Volume 2: Autonomous Horizons. The Way Forward. (AF/ST TR 15-02). Air University Press.

**МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ПОСТРОЕНИЯ БОЕВОГО ПОРЯДКА СОВМЕСТНОЙ
АВИАЦИОННОЙ ГРУППЫ ПИЛОТИРУЕМОЙ И БЕСПИЛОТНОЙ АВИАЦИИ**

Леонид Михайлович Артюшин (доктор технических наук, профессор)¹

Анатолий Анатолиевич Лобанов (доктор военных наук, профессор)²

Владимир Викторович Герасименко (кандидат военных наук)²

¹*Государственный научно-исследовательский институт авиации Украины, Киев, Украина*

²*Национальный университет обороны Украины имени Ивана Черняховского, Киев, Украина*

Для осуществления автоматизированного управления боевыми порядками совместных авиационных групп необходимо создание системы математических моделей этапов функционирования боевого порядка, а также средств реализации этой системы, включая процедуры управления и интеграции. Наиболее удачно такая задача может быть решена при применении логико-динамических моделей и теории логико-динамических систем.

Цель статьи состоит в создании банка моделей, как системы математического описания этапов функционирования боевого порядка совместной авиационной группы, как основы математической модели боевого порядка совместной авиационной группы пилотируемой и беспилотной авиации.

Задача синтеза логико-динамических моделей состоит в разделении исходной модели на составляющие структурных состояний (режимов), причем систему в каждом структурном состоянии можно рассматривать как самостоятельную. Моделирование каждого из состояний состоит в объединении ряда режимов, которые характеризуются постоянным значением аэродинамических характеристик пилотируемых и беспилотных летательных аппаратов в зависимости от значения функции предикат переменных. Соответственно, модель выполнения боевой задачи совместной авиационной группой пилотируемой и беспилотной авиации разбивается на ряд этапов. Содержание задачи исследования предусматривает использование полной нелинейной модели динамики полета без разделения движения на продольное, боковое и вертикальное, при принятых допущениях.

Определение заданного относительного положения пилотируемых и беспилотных летательных аппаратов в боевом порядке позволит описать их совместное относительное движение, которое формирует особенности системы управления боевым порядком, а выбранная система координат относительно ведомого даст преимущества в решении задачи управления.

Ключевые слова: автоматизированное управление; банк моделей; модель боевого порядка; траекторная система координат; уравнения движения; совместная авиационная группа.

**THE MATHEMATICAL MODEL OF MANNED AND UNMANNED
TEAMING COMBAT FORMATION**

Leonid Artyushin (Doctor of technical sciences, professor)¹

Anatoliy Lobanov (Doctor of military sciences, professor)²

Volodymyr Herasymenko (Candidate of military sciences)²

¹*State Aviation Research Institute of Ukraine, Kyiv, Ukraine*

²*National Defence University of Ukraine named after Ivan Cherniakhovskyi, Kyiv, Ukraine*

To implement automatic control of joint aviation groups combat formations, it is necessary to create a system of the mathematical models of combat formations functioning stages, as well as means of implementing this system, including control and integration procedures. This problem can be most successfully solved when applying logical-dynamic models and the theory of logical-dynamical systems.

The goal of the article is to create a bank of models as a system of mathematical description of combat formations functioning stages, as a basis of the mathematical model of a manned and unmanned teaming combat formation.

The task of synthesis of logical-dynamic models is to divide the initial model into components of structural states (modes), and the system in each structural state can be considered as independent. Modeling of each of the states consists in combining a number of modes that are characterized by a constant of the aerodynamic characteristics of manned and unmanned aerial vehicles, depending on the data of the variables predicate function. Accordingly, the combat mission model of a joint aviation group of manned and unmanned aircraft is divided into a number of stages. The content of research task provides to use of a complete nonlinear model of flight dynamics without dividing into longitudinal, lateral and vertical motion, with the taken assumptions.

Determination of the relative position of manned and unmanned aerial vehicles in combat formation will allow to describe their joint relative movement, which forms the features of the combat formation control system,

and the selected coordinate system relative to the loyal wing aircraft will give advantages in solving the control problem.

Keywords: automatic control; bank of models; model of combat formation; trajectory coordinate system; equations of motion; joint aviation group.

References

1. **Zhuk K. D.** (1981), O postroenii bankov letatelnykh modeley v programmirovani zhidnennykh tsiklov ob'ektov novoy tehniky [About construction of the aircraft models banks in the programming of life cycles of new equipment objects], Elektronnoye modelirovaniye, № 14, p. 14–21.
2. **Artiushyn L. M., Herasymenko V. V., Koval V. V.** (2021), Metod formuvannya spilnoi aviatsiinoi hrupy [The method of a joint aviation group formation], Suchasni informatsiini tekhnologii u sferi bezpeky ta oborony, № 1(40), p. 63–68. DOI:10.33099/2311-7249/2021-40-1-63-68.
3. **Artiushyn L. M., Herasymenko V. V., Koval V. V.** (2021), Syntez ratsionalnykh struktur boiovykh poriadkiv spilnykh aviatsiinykh hrup [Synthesis of rational structures of joint aviation groups combat formation], Zhurnal naukovykh prats "Sotsialnyi rozvytok ta bezpeka", Tom 11, № 3, p. 209–220. DOI: 10.33445/sds.2021.11.3.20.
4. **Zhuk K.D., Timchenko A.A., Dolenko T.I.** (1975), Issledovanie struktury i modelirovaniye logiko-dinamicheskikh sistem [Study of the structure and modeling of logical-dynamical systems], Kyiv, Naukova dumka, 197 p.
5. **Zhuk K.D., Timchenko A.A.** (1981) Avtomatizirovannoye proektirovaniye logiko-dinamicheskikh sistem [Computer-aided design of logical-dynamic systems], Kyiv, Naukova dumka, 320 p.
6. Nakaz Ministerstva oborony Ukrainy № 2 (2015), "Pro zatverdzhennia pravyl vykonannya polotiv derzhavnoi aviatsii Ukrainy" [On approval of the rules of flights of the state aviation of Ukraine], rozdil IX, hlava 14 – Osoblyvosti vykonannya hrupovykh polotiv.
7. **Kryukov N. P., Kremen M. A.** (1983) Metod opornykh tochek [By the reference points method], Aviatsiya i kosmonavtika, № 6, p. 26–27, № 7, p. 27–28.
8. **Lebed V. H., Myrhorod Y. I., Ukrainets Y. O.** (2011), Aerohidrozodynamika [Aerogidrogasodinamika] Kharkiv, 415 p.
9. **Nemeshylov Y. O.** (2019), Modeli system upravlinnia litalnymi aparatamy ta metody eksperymentalnykh doslidzhen [Aircraft control systems models and experimental research methods], Kharkiv, 160 p.
10. **Silkov V. I.** (1984), Dinamika poleta i boevogo manevrirovaniya letatelnykh apparatov, Chast 2. Ustoychivost i upravlyaemost [Dynamics of flight and combat maneuvering of aircraft], Kyiv, 318 p.
11. **Krasovskiy A. A.** (1987), Spravochnik po teorii avtomaticheskogo upravleniya [Handbook on Automatic Control Theory], Moscow, 712 p.
12. **Krutko P. D., Popov E. P.** (1986), Sintez upravleniya skorostyu dvizheniya letatelnykh apparatov na osnove resheniya obratnoy zadachi dinamiki [Synthesis of control of the speed of movement of aircraft on the basis of solving the inverse problem of dynamics], Dokl. AN SSSR, p. 809–812.
13. **Gorbatenko S. A.** (1969) Mehanika poleta: obschie svedeniya. Uravneniya dvizheniya [Flight mechanics: general information. Equations of motion], Moscow, 500 p.
14. **Tarasov V. G.** (1980), Mezhsamoletnaya navigatsiya [Inter-site navigation], – Moscow, 184 p.
15. **Greg L. Zacharias** (2019), Autonomous Horizons: Autonomy in the Air Force – A Path to the Future, Volume 1: Human Autonomy Teaming (AF/ST TR 15-01). Air University Press.
16. **Greg L. Zacharias** (2019), Autonomous Horizons: Autonomy in the Air Force – A Path to the Future, Volume 2: Autonomous Horizons. The Way Forward. (AF/ST TR 15-02). Air University Press.