

Дослідження процесів керування авіаційними бойовими порядками різних структур

Леонід Артюшин ^{1 В}; Володимир Герасименко * ^{2 А}; Віктор Єрко ^{3 В};
Богдан Наусенко ^{4 В}

^А Національний університет оборони України імені Івана Черняхівського, м. Київ, Україна

^В Державний науково-дослідний інститут авіації, м. Київ, Україна

Received: October 9, 2021 | Revised: October 21, 2021 | Accepted: October 30, 2021

DOI: 10.33445/sds.2021.11.5.21

Анотація

Метою статті є підвищення ефективності застосування авіації та значне підвищення безпеки польотів. Підхід дослідження є моделювання процесів керування авіаційними бойовими порядками різними способами керування. Результати дослідження є сконцентровані на найбільш перспективних напрямках розвитку досліджуваних систем управління бойовими порядками. Теоретична цінність дослідження є підвищення ефективності застосування авіації за рахунок підвищення ефективності бойових порядків авіаційних груп. Практична цінність дослідження є підвищення безпеки польотів за рахунок підвищення ефективності взаємодії між літаками у бойовому порядку. Цінністю дослідження є проблема створення систем керування авіаційними бойовими порядками знаходиться на стадії практичної реалізації, що безумовно призведе до підвищення ефективності застосування авіації та значного підвищення безпеки польотів.

Ключові слова: міжлітакова навігація, перешиккування, бізв'язний алгоритм керування, параметри стою, "розгойдування" строю.

Постановка проблеми

Сучасні бойові порядки (БП) характеризуються різноманітністю видів і форм, застосуванням різних структур керування і варіантів інформаційного обміну між літаками, а також відмінністю типів літаків з властивими їм принципами побудови бортових обчислювальних комплексів і внутрішніми контурами керування. Крім того складність БП з великою

чисельністю ЛА обумовлюється значним зростанням (в порівнянні з одиночним польотом) інтенсивності роботи льотчика з органами керування і ймовірності прийняття ним помилкових рішень. Виконання вимог щодо безпечного маневрування літаків в строю висуває в якості першочергової задачу автоматизації процесу керування БП літаків.

Аналіз останніх досліджень та публікацій

Дослідження проводилось для бойового порядку ланки при наступних способах керування:

1) керування j -м веденим по $(j - 1)$ -му літаку, що летить попереду:

$$S_1 = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 1 \end{bmatrix};$$

¹ доктор технічних наук, професор, e-mail: artleonid2017@gmail.com, ORCID: 0000-0002-7488-7244

² * **Corresponding author:** кандидат військових наук, докторант, e-mail: gerasimenko_v_v@nuou.org.ua, ORCID: 0000-0003-2014-7408

³ кандидат технічних наук, e-mail: yerik08@meta.ua, ORCID: 0000-0002-5150-5303

⁴ e-mail: dzudo2108@ukr.net, ORCID: 0000-0002-7208-1116

2) керування j -м веденим по i -му головному літаку та $(j - 1)$ -му літаку, що летить попереду:

$$S_2 = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 1 & 0 & 0 \\ 1 & 1 & 1 & 0 \\ 1 & 0 & 1 & 1 \end{bmatrix};$$

Відомо [1], що до групового польоту висуваються дві головні вимоги:

- зберегти БП при будь-яких умовах обстановки;

- вміти чітко та швидко перешикувати БП.

Вказані вимоги є визначальними при виборі режимів польоту з метою одержання достовірних результатів моделювання [11]. Тому розглядалися наступні два режими:

- стабілізація відносних параметрів веденими літаками при маневруванні головного літака;

- раціональне перешикування авіаційного бойового порядку.

Постановка завдання

Метою статті є підвищення ефективності застосування авіації та значне підвищення безпеки польотів.

$$\ddot{\vartheta}_j^* = K^j [B_1(\lambda)(\bar{x}_{i_m j k} - \bar{x}_{i_m j}) + B_2(\lambda)\dot{\bar{x}}_{i_m j}] + K^j \sum_{\xi=1}^{m-1} \ddot{x}_{i_\xi i_{\xi+1}}^{*j} - K^j A_0(\bar{\vartheta}_j). \quad (1)$$

Рівняння (1) являє собою комбінований зв'язний алгоритм керування відносними параметрами між i_m -м попереднім та j -м веденим літаками БП [2, 3, 10]. Дійсно, для його реалізації використовується інформація, що поступає з i_m -го літака (перший доданок), i_2, \dots, i_{m-1} -х літаків (другий доданок) та з i_1 -го ведучого літака БП (третій доданок). Сума перших двох доданків закону (1) є ніщо інше, як потрібне відносне прискорення $\ddot{x}_{i_1 j}^*$. Отже формований керуючий сигнал $\dot{\vartheta}_j$ за величиною буде дорівнювати сигналу, який відповідає керуванню j -м веденим по i_1 -м ведучому літаку. Цей факт підтверджує зроблене раніше припущення про можливе відсторонення на j -м веденому літаку при його орієнтації на i_m -й попередній літак похибки витримування параметрів $\Delta \bar{x}_{i_1 j}$ відносно i_1 -го ведучого у випадку введення до алгоритму керування компенсуючого сигналу.

Структурна схема керування j -м веденим літаком БП за алгоритмами (1) приведена на рис. 1. Якщо значення наявних відносних швидкостей $\dot{\bar{x}}_{i_m j}$ та наявних параметрів

Організація керування j -м веденим літаком БП здійснюється відповідно до виразу:

відносного руху $\bar{x}_{i_m j}$ надходять з засобів міжлітакової навігації (МЛН) j -го літака у відповідні контури керування безпосередньо, тоді складники абсолютного прискорення \bar{a}_{i_1} i_1 -го ведучого літака та обчислювані на i_2, \dots, i_m -х попередніх літаків бажані відносні прискорення $\ddot{x}_{i_\xi i_{\xi+1}}^{*j}$ після передачі засобами МЛН i_1, \dots, i_m -х літаків на j -й ведений літак БП наводяться до його системи координат.

Застосування різноманітних структур авіаційних БП зумовлює різний об'єм інформації, необхідної для передачі на ведені літаки. Цю інформацію на j -й ведений літак БП передають i_1, \dots, i_m -ті літаки за допомогою засобів МЛН [4, 5]. У цій статті приводяться результати дослідження процесів керування конфігурацією авіаційного БП стосовно розробленої авторами теорії системного аналізу групового бойового застосування авіації [6, 7, 9, 10, 11]. Серед множини теоретично можливих видів конфігурацій БП та їх трансформацій були вибрані види строїв та маневри, передбачені курсами бойової підготовки.

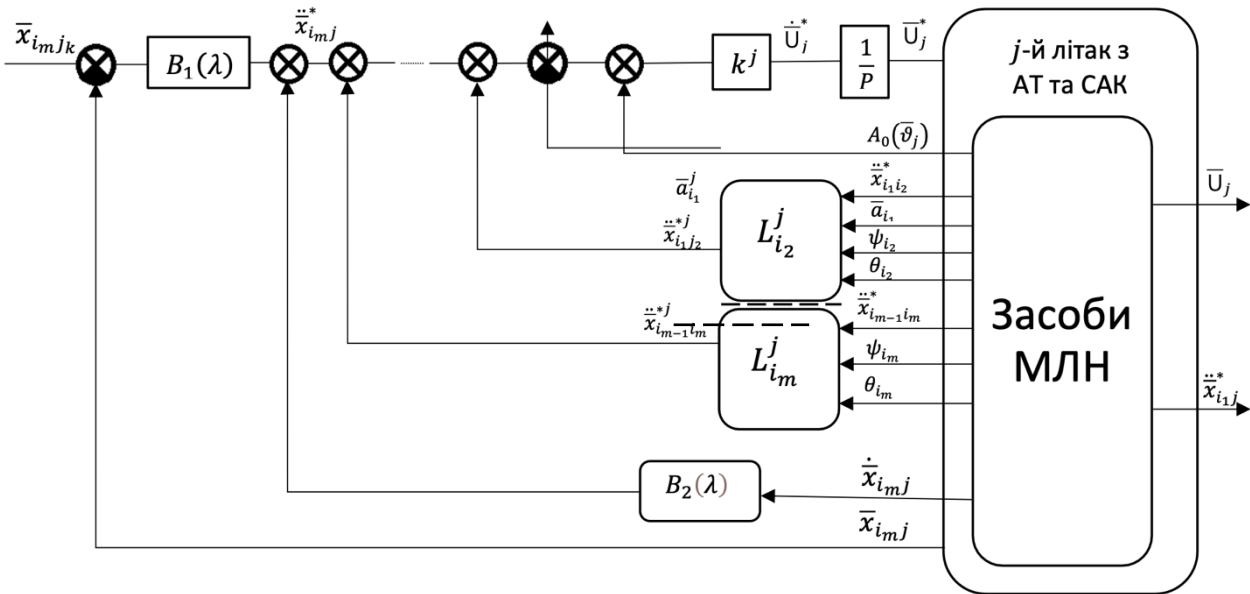


Рисунок 1 – Структурна схема керування j -м веденим літаком БП

Характеристиками якості процесів керування приймалися наступні показники [8]:

- відсутність небезпечних наближень літаків БП;
- час перехідного процесу;
- максимальна динамічна похибка (перерегулювання) керування;
- наявність та величина статичної похибки керування.

В процесі моделювання враховувались наступні фізичні обмеження:

- потрібні прискорення літаків БП;
- тяга двигунів;
- переміщення та швидкість переміщення РҚД;
- відхилення та швидкість відхилення органів керування;
- обмеження за максимально та мінімально можливими швидкостями польоту, а також по допустимим кутам атаки та ковзання.

Виклад основного матеріалу

Розглянемо перший досліджуваний режим. Для оцінювання працездатності алгоритмів керування інтервалом, дистанцією та перевищенням проводилось моделювання польоту бойового порядку при виконанні головним літаком за мінімальний

Методологія дослідження

Обчислювальні експерименти виконувались в середовищі MATLAB за допомогою розробленого пакету програм математичного моделювання процесів оптимального керування конфігурацією авіаційних БП, написаного мовою програмування MATLAB.

Основу розробленого пакету складають програми інтегрування систем нелінійних диференціальних рівнянь методом Рунге-Кутта четвертого порядку, умовної оптимізації функцій багатьох змінних методом випадкового пошуку з покоординатним самонавчанням, математичні моделі абсолютного та відносного рухів літаків у БП, синтезовані на основі алгоритмічного рішення зворотних задач динаміки керування, а також відомості про характеристики атмосфери [3, 7].

час при розгоні швидкості з $V_1 = 169,1 \text{ мс}^{-1}$ до $V_2 = 200 \text{ мс}^{-1}$ маневру "гірка" з кутом $\Theta = 20^\circ$, починаючи з 100-ї сек – відворот з креном $\gamma = 30^\circ$ праворуч на кут $\Psi = 60^\circ$ при перевантаженні $n_y = 1,5$ та радіусі відвороту $R_{z1} = 1700 \text{ м}$ (рис. 2).

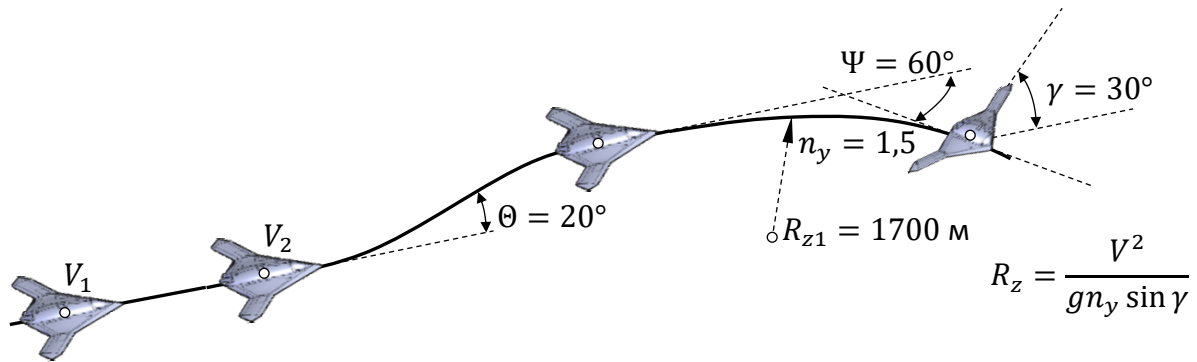


Рисунок 2 – Модель польоту головного літального апарату на першому досліджуваному режимі

Бойовий порядок – лівий пеленг літаків (рис. 3) з наступними параметрами:

$$\bar{x}_{j-1,j} = (X_{j-1,j}, Y_{j-1,j}, Z_{j-1,j}) = (216\text{м}, -30\text{м}, -125\text{м}), \quad (2)$$

$$j = 2,3,4.$$

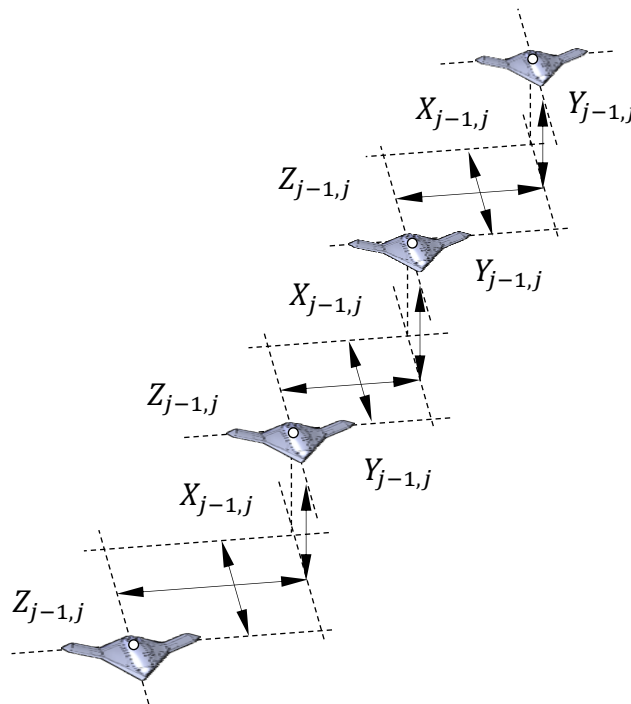
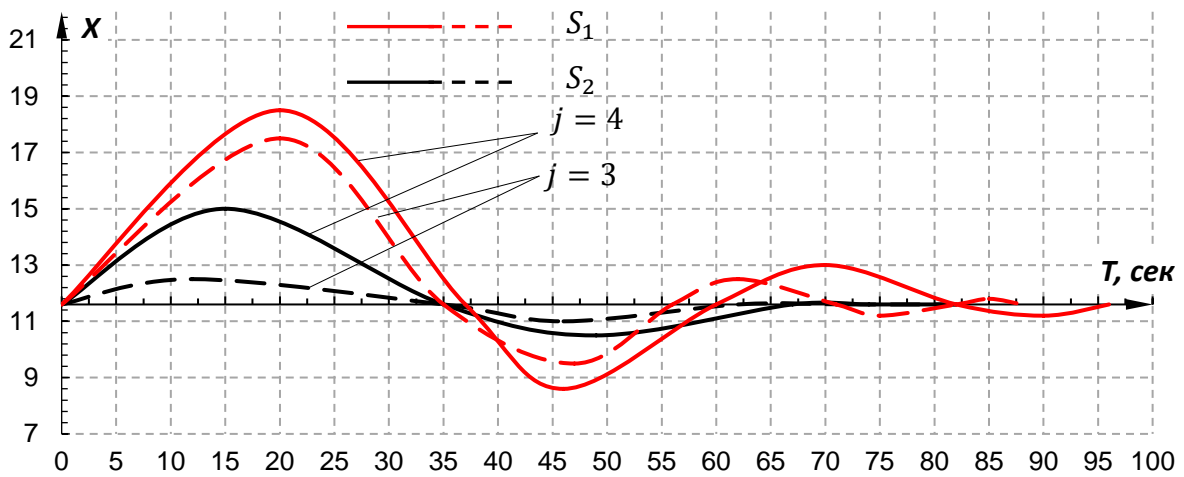


Рисунок 3 – Параметри бойового порядку літальних апаратів на першому досліджуваному режимі

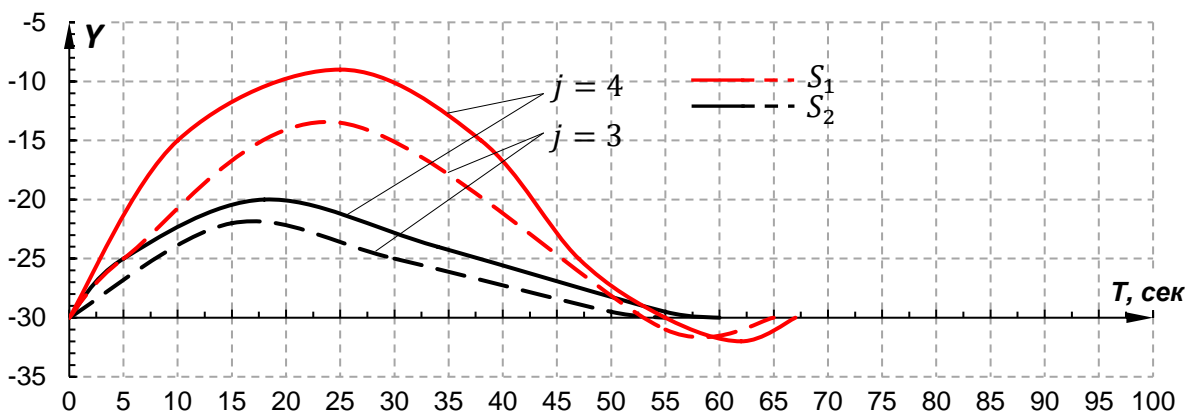
Задача ведених – зберегти задані відносні параметри бойового порядку під час маневрів головного літака.

Параметри алгоритмів керування розраховувались за методикою визначення оптимальних параметрів алгоритмів керування авіаційними бойовими порядками викладеною у [2].

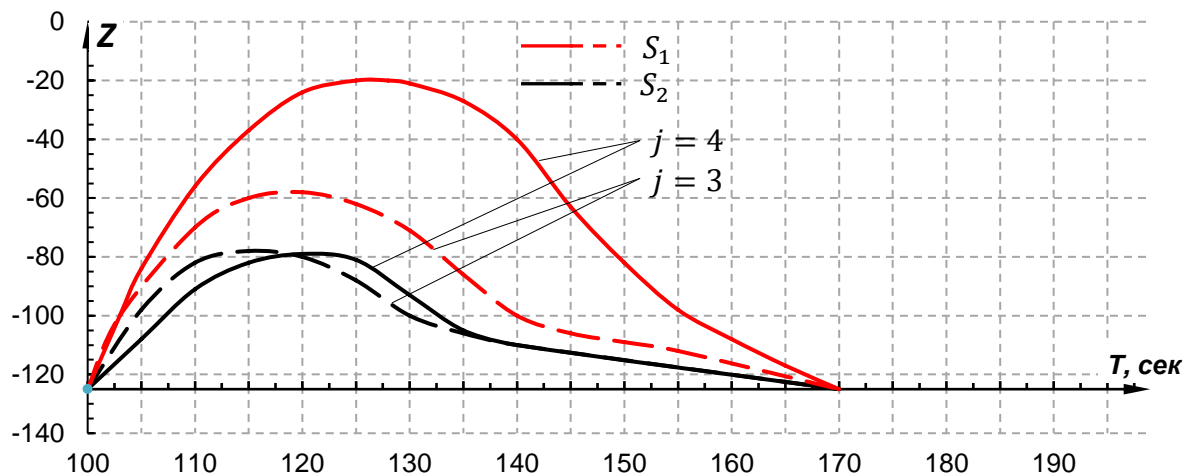
Перехідні процеси зміни відносних параметрів між другим та третім, третім та четвертим літальними апаратами бойового порядку показані на рис. 4, а на рис. 5 наведені процеси зміни прискорень третього та четвертого літальних апаратів бойового порядку.



а)



б)



в)

Рисунок 4 – Динаміка зміни величини, темпу та тривалості керуючих впливів на органи керування у продольному (X), поперечному (Y) та бічному (Z) каналах керування при груповому польоті ланки літальних апаратів при різних способах керування

На вказаних рисунках досліджувані стратегії керування бойовим порядком S_1 , та графіки наведені переривчастою лінією для суцільною – для стратегії керування S_2 .

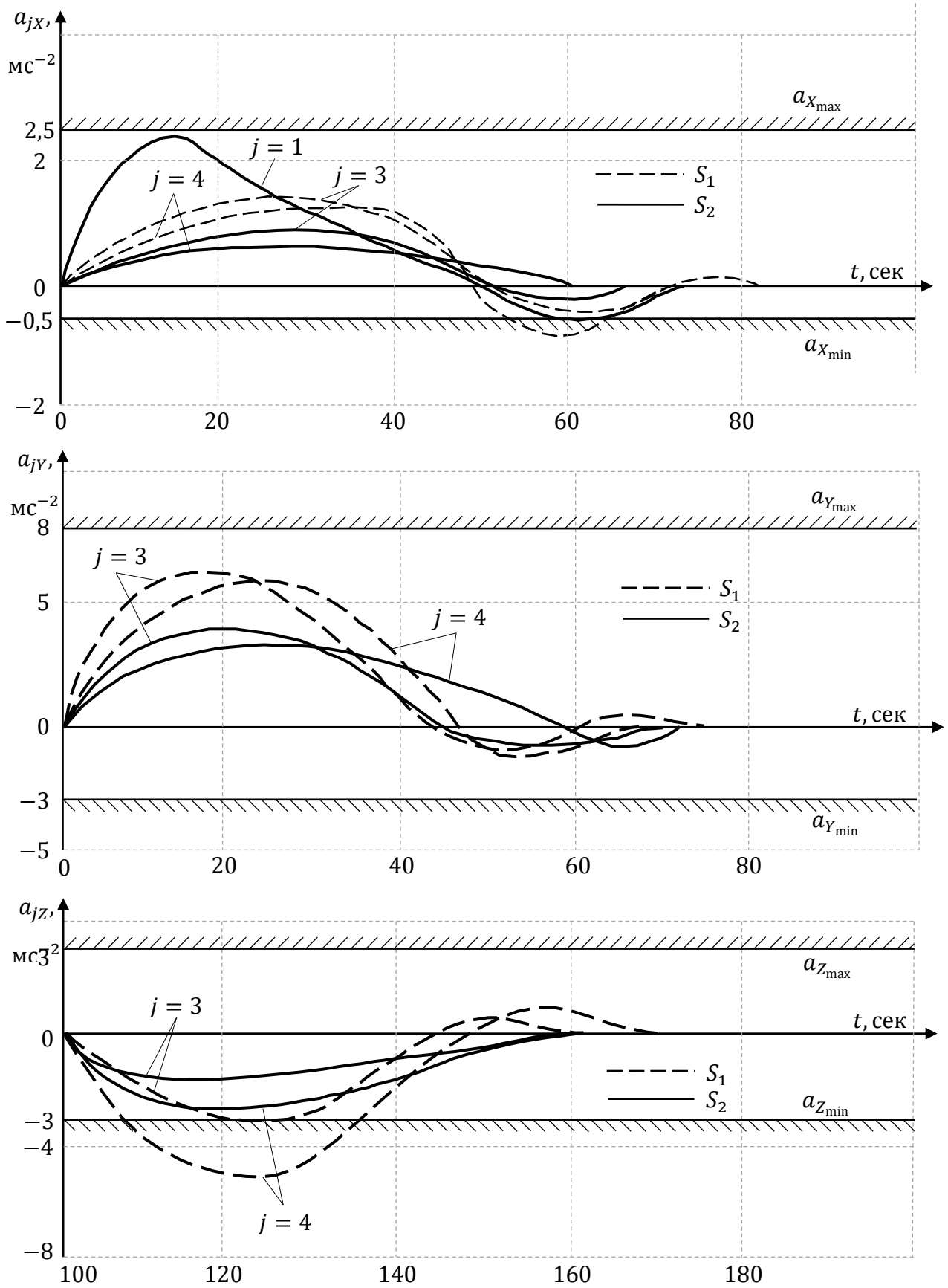


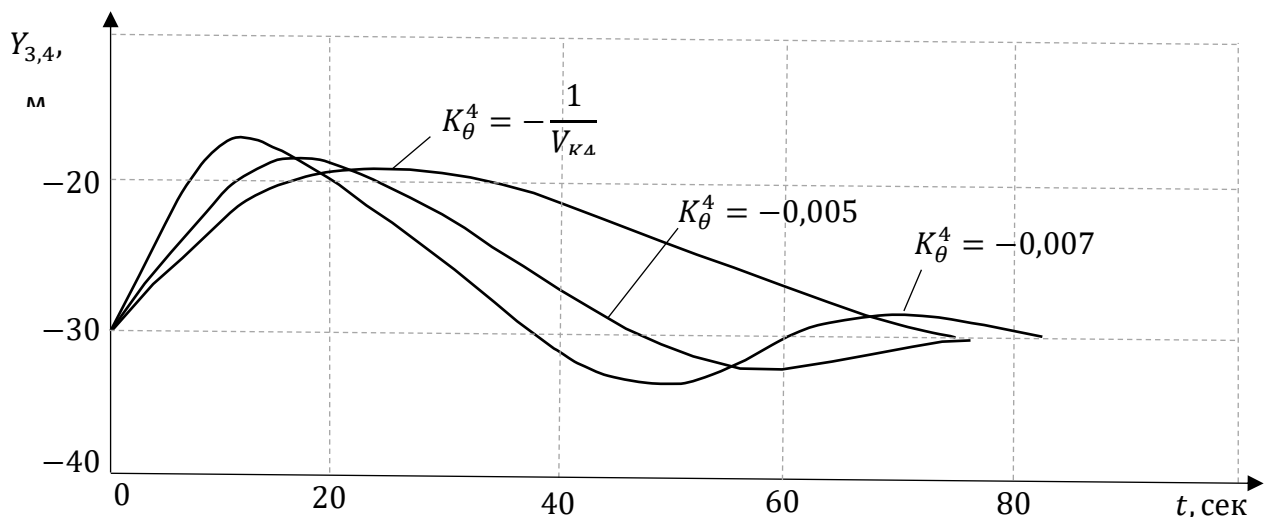
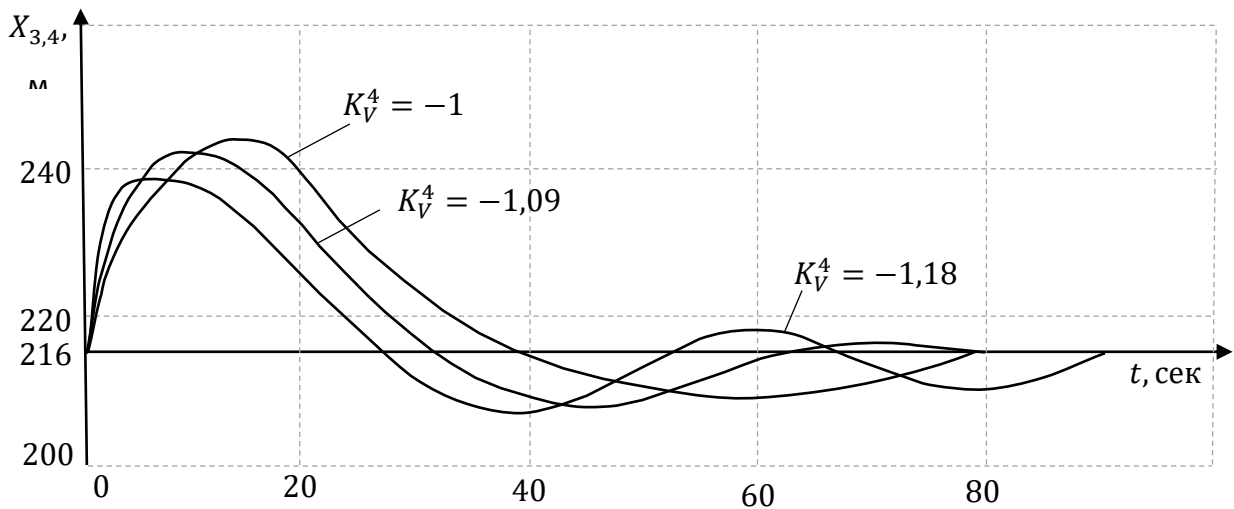
Рисунок 5 – Процеси зміни прискорень третього та четвертого літальних апаратів бойового порядку при різних способах керування

Як можна побачити на графіках, коливальні процеси встановлення третім та четвертими літальними апаратами заданих відносних параметрів максимальні для стратегії керування бойовим порядком S_1 , мінімальні – при S_2 . Максимальна динамічна помилка у крайнього літального апарату ланки при стратегії керування S_1 найбільша в каналі керування дистанцією та перевищує відповідну динамічну помилку при стратегії керування бойовим порядком S_2 на 34%. З рис. 6 видно, що фактичне повздовжнє прискорення четвертого літака при стратегії керування S_1 перевищує максимально припустиме значення.

Таким чином, для режиму стабілізації літальних апаратів бойового порядку доцільним способом керування бойовим порядком є стратегія керування S_2 , при якому керування j -м веденим літальним апаратом здійснюється на основі інформації з $(j - 1)$ -го літального апарату, що летить попереду, та

головного літального апарату бойового порядку.

Під час моделювання досліджуваного режиму було оцінено вплив абсолютних значень коефіцієнтів підсилення K^j на якість процесів керування по алгоритмах керування відносними параметрами між попереднім та веденим літаками при стратегії керування S_2 . На рис. 5 приведені перехідні процеси для замикаючого бойовий порядок літального апарату при різних значеннях коефіцієнту K^j . Як видно з графіків, збільшення коефіцієнтів підсилення вище розрахованих за наведеною у [2] методикою, викликає зменшення часу стабілізації та появу коливання, а надлишкове збільшення призводить до нестійкості керованого процесу. Це дозволяє підтвердити доцільність використання в комбінованих m -зв'язних алгоритмах керування відносними параметрами між попереднім та веденим літаками значень K^j .



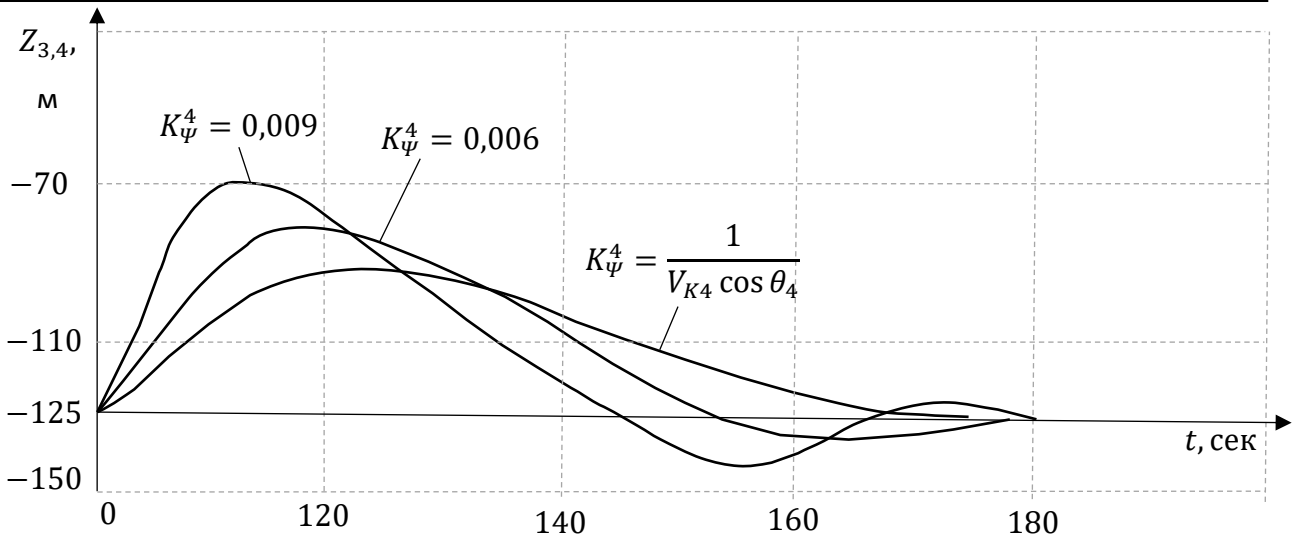


Рисунок 6 – Перехідні процеси для замикаючого бойовий порядок літального апарату при різних значеннях коефіцієнту K^j

Розглянемо другий досліджуваний режим – оптимальне перешикування із зміною форми бойового порядку з “правий” на “лівий пеленг” з одночасним змінням відносних параметрів бойового порядку:

зменшення дистанції між $(j - 1)$ -м та j -м літальними апаратами з 140 до 70 м, перевищення з 50 м до 20 м, інтервалу з 82 м до 41 м (рис. 7).

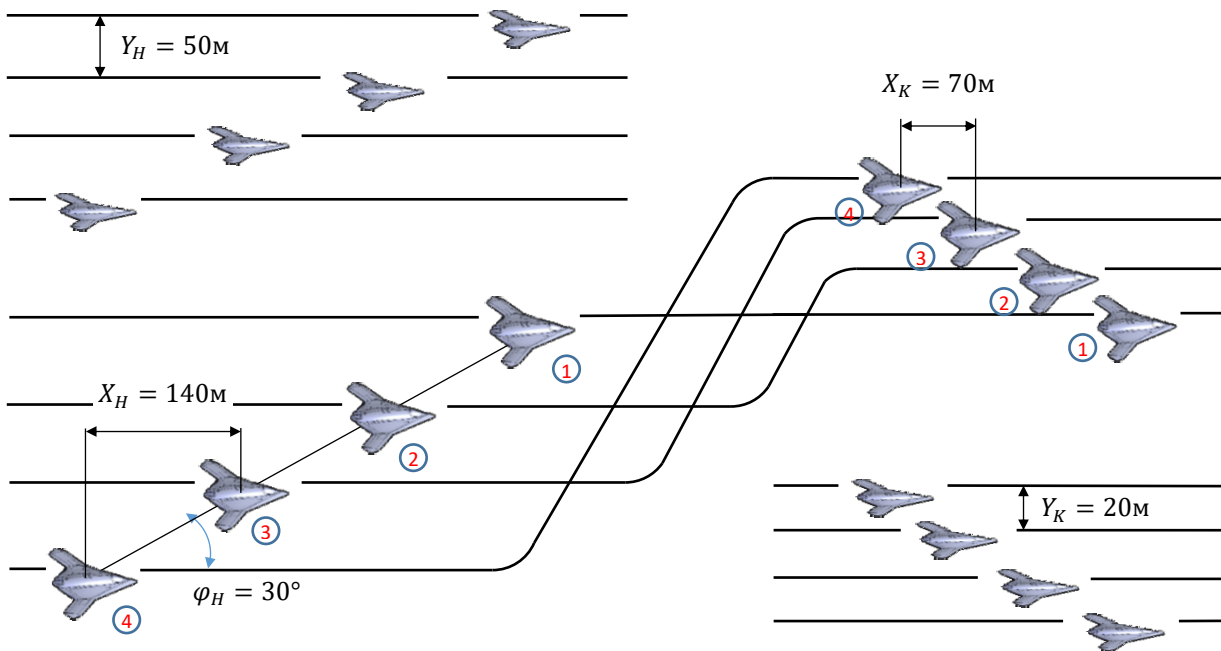


Рисунок 7 – Перешикування із зміною форми та відносних параметрів бойового порядку

Перехідні процеси зміни відносних параметрів між другим та третім, третім та четвертими літальними апаратами бойового порядку зображені на рис. 8 переривчастою лінією для стратегії керування бойовим порядком S_1 , суцільною – для стратегії керування S_2 . Як видно з графіків, при стратегії

керування S_1 максимальні динамічні помилки в каналах дистанції та інтервалу для пари літальних апаратів “третій – четвертий”, дорівнюють відповідно 30 і 32 м, та час перехідного процесу, який дорівнює 81 с, найбільші.

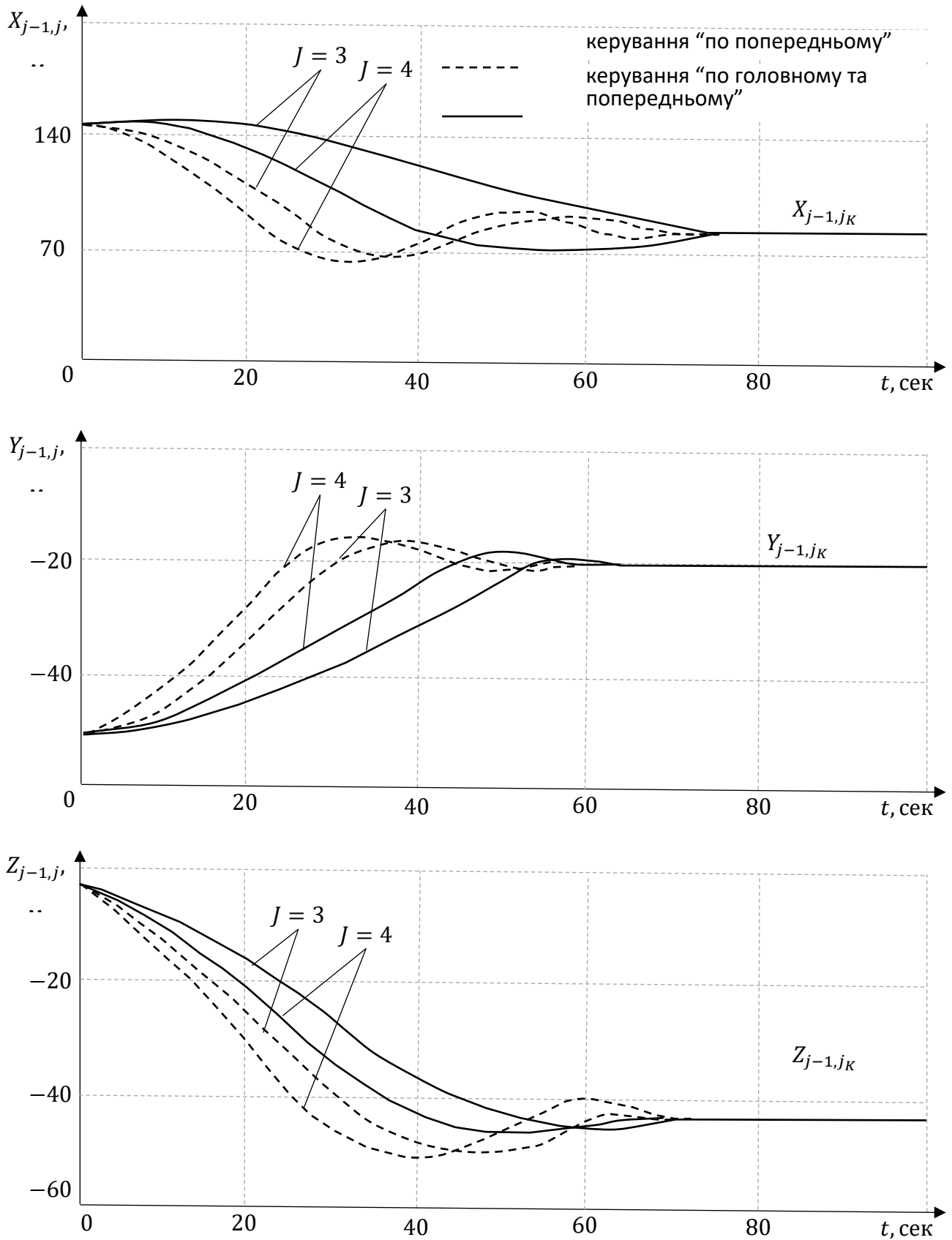


Рисунок 8 – Перехідні процеси зміни відносних параметрів між другим та третім, третім та четвертими літальними апаратами при різних способах керування бойовим порядком

На рис. 9 відображено характер зміни максимальних динамічних відносних помилок $\Delta_{\bar{x}}$ залежно від номеру j літального

апарату у досліджуваному режимі. Величини помилок визначалися за формулою:

$$\Delta_{\bar{x}} = \frac{\max|\bar{x}(t) - \bar{x}_K|}{|\bar{x}_H - \bar{x}_K|} 100\%, \quad \bar{x} = (X, Y, Z), \quad (3)$$

де \bar{x}_H , \bar{x}_K , $\bar{x}(t)$ – значення початкових, кінцевих та поточних відносних параметрів

між веденим та ведучим літальними апаратами спільного бойового порядку.

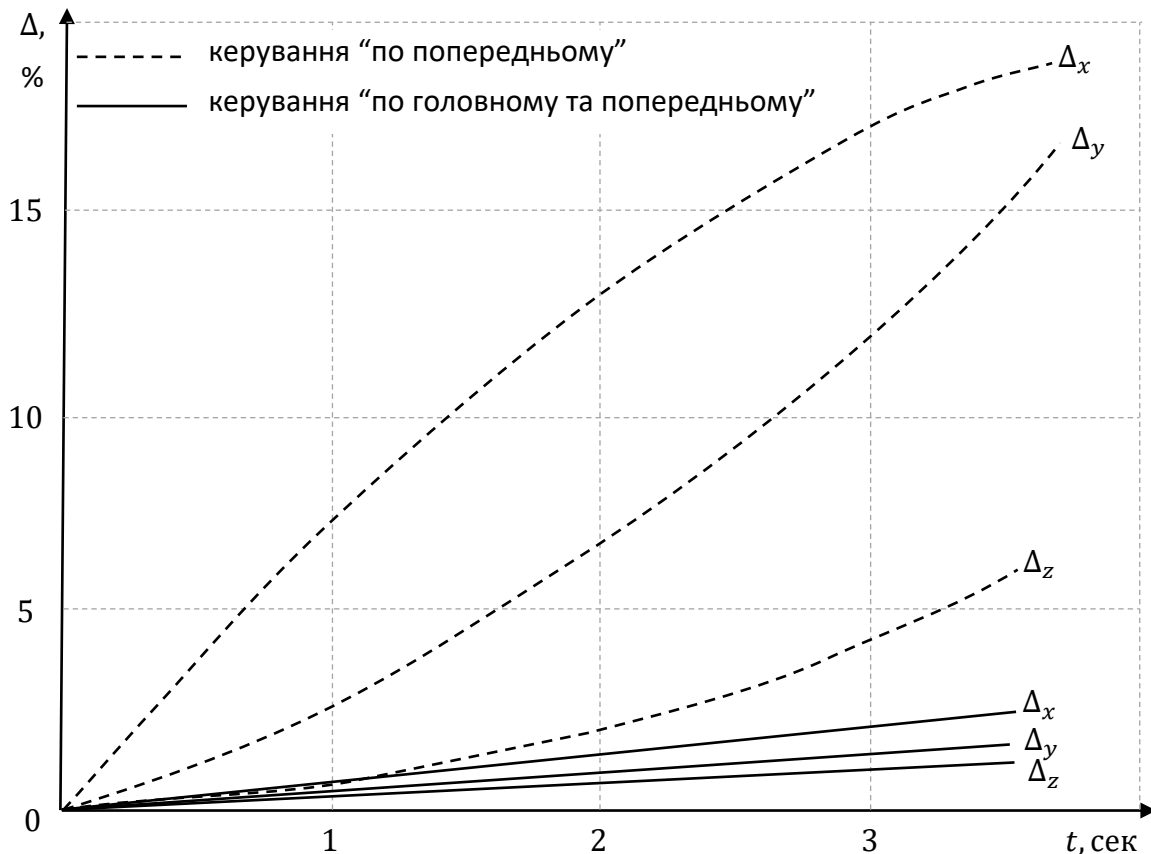


Рисунок 9 – Зміни максимальних динамічних відносних помилок $\Delta_{\bar{x}}$ залежно від місця літального апарату у бойовому порядку при різних стратегіях керування

З наведених графіків видно, що помилки для стратегії керування бойовим порядком S_1 значно переважають відповідні помилки, що мають місце при стратегії керування бойовим порядком S_2 . Це пояснюється тим, що кожен ведений літальний апарат при стратегії керування бойовим порядком S_1 ("по попередньому" літальному апарату) додає затримку у процес керування та, являючись ведучим для наступного літального апарату, що слідує за ним, обумовлює накладення своїх помилок на власні помилки літального апарату, що летить позаду. Накопичення

помилки у процесі перешикування у глибину строю призводить до явища "розгойдування" бойового порядку.

Таким чином, враховуючі особливості розглянутих структур бойового порядку, можна зробити висновок щодо доцільності побудови бізв'язних алгоритмів керування веденими літальними апаратами виходячи з наступного принципу: кожен ведений орієнтується на літальний апарат, що летить попереду, а надходження при цьому на нього додаткової інформації, щодо режиму польоту, з головного літака забезпечує

усунення явища “розгойдування” бойового порядку.

У процесі моделювання досліджуваного режиму було оцінено вплив числа N інтервалів розбиття часу керування на значення критеріїв раціональності для

стратегії керування бойовим порядком S_2 . На рис. 10 відображені відповідні залежності зміни відносних приростів часу перебудови бойового порядку (переривчаста лінія) та сумарного розходу пального (суцільна лінія) від числа N інтервалів розбиття.

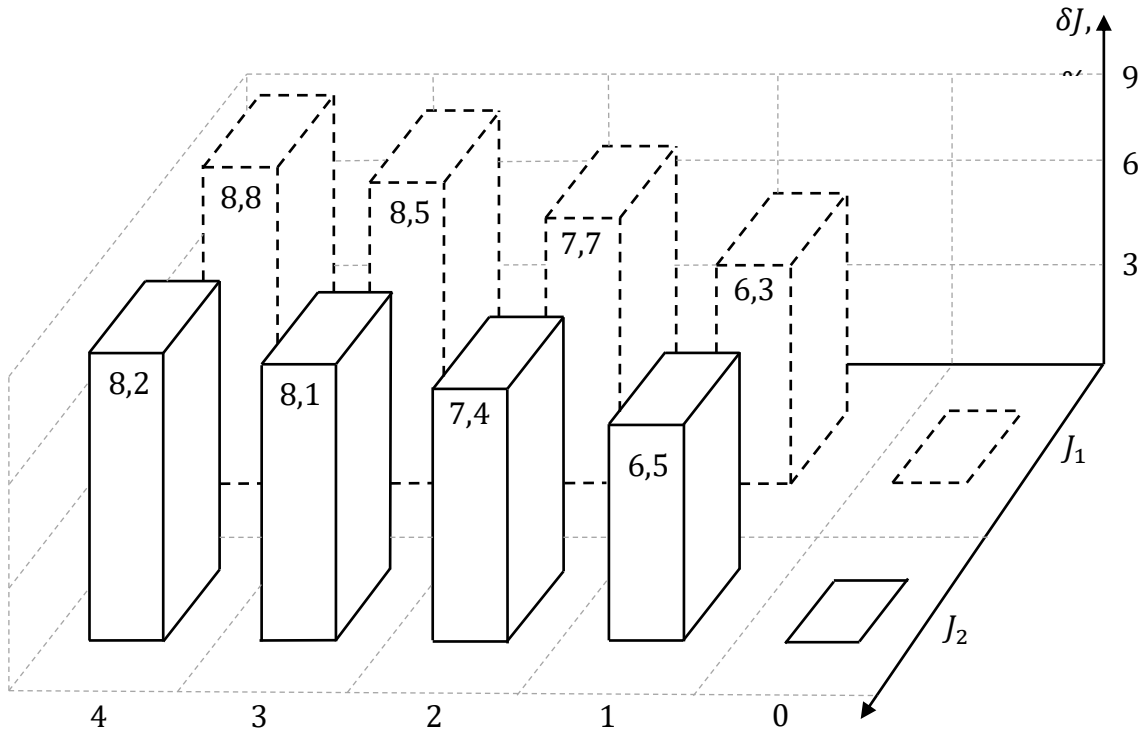


Рисунок 10 – залежності зміни відносних приростів часу перебудови бойового порядку та сумарного розходу пального від числа N інтервалів розбиття

При цьому відносні прирощення критеріїв оптимальності розраховувались за формулою:

$$\delta = \frac{J_0 - J_N}{J_0} 100\%, \quad J \in \{J_{1\Sigma}, J_{2\Sigma}\}, \quad (4)$$

де $J_{1\Sigma}$ – час перешикування бойового порядку;

$J_{2\Sigma}$ – сумарний розхід пального;

J_N – значення відповідного критерія оптимальності, розрахованого при оптимальних параметрах алгоритмів керування;

J_0 – значення критерію оптимальності, відповідного параметрам алгоритмів керування.

Наукова новизна результатів дослідження та їх практичне значення підтримані у ході дискусії між науково-педагогічним складом інституту авіації та протиповітряної оборони Національного університету оборони України імені Івана Черняхівського, серед яких:

Барабаш О.В. В.М. – доктор технічних наук, професор; Медведєв В.К. – кандидат військових наук, професор, та науковим складом Державного науково-дослідного інституту авіації, серед яких: Кононов О.А.– доктор технічних наук, доцент.

Висновки

Досліджені алгоритми забезпечують керування БП літаків, при виконанні ними маневрів, наведених у курсах бойової підготовки. Реалізація біз'язних алгоритмів

керування дозволяє мінімізувати час перешикування бойового порядку. Разом з цим вони виключають таке негативне явище як "розгойдування".

Список використаних джерел

1. Carpenter T. R. (2016). Command and Control of Joint Air Operations through Mission Command. *Air&Space Power Journal*, [Електронний ресурс]. URL : https://www.airuniversity.af.edu/Portals/10/ASPJ/journals/Volume-30_Issue-2/F-Carpenter.pdf
2. Артюшин Л. М., Чистяков В. А. (1992). Оптимальное управление на основе метода обратных задач динамики. *Кибернетика и вычислительная техника*.
3. Artyushin L.M. (1987). Problems of controlling the configuration of a mechanical system. *Soviet Applied Mechanics*. №23, P. 185–190. URL : <https://link.springer.com/article/10.1007/BF00889016>
4. Тарасов В. Г. Межсамолетная навигация. Машиностроение. М.: 1980. 185 с.
5. Артюшин Л.М., Герасименко, В.В., Коваль В.В. (2021). Метод формування спільної авіаційної групи. *Сучасні інформаційні технології у сфері безпеки та оборони*. №1(40) С. 63-68. DOI: 10.33099/2311-7249/2021-40-1-63-68
6. Артюшин, Л., Герасименко, В., & Коваль, В. (2021). Синтез раціональних структур бойових порядків спільних авіаційних груп. *Journal of Scientific Papers «Social Development and Security»*, 11(3), 209-220. DOI : 10.33445/sds.2021.11.3.20
7. Артюшин Л., Лобанов А., Герасименко В. (2021). Математична модель побудови бойового порядку спільної авіаційної групи пілотованої та безпілотної авіації – *Сучасні інформаційні технології у сфері безпеки та оборони*. 2(42). С. 23-30. URL : <https://doi.org/10.33099/2311-7249/2021-41-2-23-30>
8. Немешилов Ю. О. (2019). Моделі систем управління літальними апаратами та методи експериментальних досліджень. навч. посібник. Харків : Національний аерокосмічний університет імені М.Є. Жуковського "ХАІ".
9. Artyushin L.M. (1988). Search for optimal laws of variation of the control forces in dynamical system control problems. *Soviet Applied Mechanics*. Vol. 24, P. 295–300. URL : <https://link.springer.com/article/10.1007/BF00883849>
10. Artyushin L. M., Malysenko S. V. (1996). Features of taking the constraints on control actions into account when solving optimization problems by the inverse dynamics problems method. *Journal of automation and information science*. Vol. 28. №3-4. pp. 24-27. DOI : 10.1615/JAutomatInfScien.v28.i3-4.40
11. Артюшин Л. М., Кононов О. А., Шморгун Ю.В. (2019). Базові умови прийняття рішення щодо створення автоматизованої системи управління груповим застосуванням безпілотної літальних апаратів. *Сучасні інформаційні технології у сфері безпеки та оборони*. №2(35) С. 49-54. DOI : 10.33099/2311-7249/2019-35-2-49-54
12. Boschert S., Coughlin T., Ferraris M. and oth. (2019)/ *Symbiotic Autonomous Systems: White Paper III* (ed. by T. Cavrac), IEEE Digital Reality. [Електронний ресурс]. URL : https://digitalreality.ieee.org/images/files/pdf/1SAS_WP3_Nov2019.pdf

Исследование процессов управления авиационными боевыми порядками разных структур

Леонид Артюшин * ^{1 B}; Владимир Герасименко ^{2 A}; Виктор Ерко ^{3 B};
Богдан Наусенко ^{4 B}

¹ доктор технических наук, профессор, e-mail: artleonid2017@gmail.com, ORCID: 0000-0002-7488-7244

* **Corresponding author:** ² кандидат военных наук, докторант, e-mail: gerasimenko_v_v@nuou.org.ua, ORCID: 0000-0003-2014-7408

³ кандидат технических наук, e-mail: yerik08@meta.ua, ORCID: 0000-0002-5150-5303

⁴ e-mail: dzudo2108@ukr.net, ORCID: 0000-0002-7208-1116

^A Национальный университет обороны Украины имени Ивана Черняховского, г. Киев, Украина

^B Государственный научно-исследовательский институт авиации, г. Киев, Украина

Аннотация

Целью статьи является повышение эффективности применения авиации и повышение безопасности полетов. Подход исследования является моделирование процессов управления авиационными боевыми порядками разными способами управления. Результаты исследования сконцентрированы на наиболее перспективных направлениях развития исследуемых систем управления боевыми порядками. Теоретическая ценность исследования есть повышение эффективности применения авиации за счет повышения эффективности боевых порядков авиационных групп. Практическая ценность исследования есть повышение безопасности полетов за счет повышения эффективности взаимодействия между самолетами в боевом порядке. Ценностью исследования является проблема создания систем управления авиационными боевыми порядками на стадии практической реализации, что, безусловно, приведет к повышению эффективности применения авиации и значительному повышению безопасности полетов.

Ключевые слова: между самолётная навигация, перестроение, бессвязный алгоритм управления, параметры стоя, "раскачка" строя.

Research of the processes of managing aviation combat formations of various structures

Leonid Artyushin ^{1 B}; Volodymyr Gerasymenko * ^{2 A}; Viktor Yerko ^{3 B};
Bohdan Nausenko ^{4 B}

¹ Dr of Technical Sciences, Professor, e-mail: artleonid2017@gmail.com, ORCID: 0000-0002-7488-7244

* **Corresponding author:** ² candidate of military sciences, e-mail: gerasimenko_v_v@nuou.org.ua, ORCID: 0000-0003-2014-7408

³ candidate of military sciences, e-mail: yerik08@meta.ua, ORCID: 0000-0002-5150-5303

⁴ e-mail: dzudo2108@ukr.net, ORCID: 0000-0002-7208-1116

^A National Defence University of Ukraine named after Ivan Cherniakhivskyi, Kyiv, Ukraine

^B State Research Institute of Aviation, Kyiv, Ukraine

Abstract

The purpose of the article is to improve the efficiency of aviation and significantly increase flight safety. The approach of the study is the modeling of the processes of controlling aviation combat formations using different control methods. The results of the study are focused on the most promising areas of development of the researched combat order management systems. The theoretical value of the study is to increase the efficiency of the use of aviation due to the increase in the effectiveness of combat orders of aviation groups. The practical value of the study is to increase flight safety by increasing the effectiveness of interaction between aircraft in battle order. The value of the research is that the problem of creating control systems for

aviation combat formations is at the stage of practical implementation, which will definitely lead to an increase in the efficiency of the use of aviation and a significant increase in flight safety.

Keywords: inter-aircraft navigation, reformation, bi-connected control algorithm, formation parameters, "rocking" formation.

References

1. Carpenter T. R. (2016). Command and Control of Joint Air Operations through Mission Command. *Air&Space Power Journal*, [Online]. Available from: https://www.airuniversity.af.edu/Portals/10/ASPJ/journals/Volume-30_Issue-2/F-Carpenter.pdf
2. Artyushin L. M., Chistyakov V. A. (1992). Optimal control based on the method of inverse problems of dynamic. *Cybernetics and computing*.
3. Artyushin L.M. (1987). Problems of controlling the configuration of a mechanical system. *Soviet Applied Mechanics*. №23, P. 185–190. URL : <https://link.springer.com/article/10.1007/BF00889016>
4. Tarasov V.G. (1980). Inter-aircraft navigation. Engineering. Moscow. 1980. 185 p.
5. Artyushin L. M., Gerasimenko V. V., Koval V. V. (2021). The method of forming a joint aviation group. *Modern information technologies in the field of security and defense*, №1(40) P. 63-68. Available from : <https://doi.org/10.33099/2311-7249/2021-40-1-63-68>
6. Artyushin, L., Herasymenko, V., & Koval, V. (2021). Synthesis of rational structures of joint aviation groups combat formation. *Journal of Scientific Papers «Social Development and Security»*, 11(3), 209-220. DOI : 10.33445/sds.2021.11.3.20
7. Artyushin L., Lobanov A., Gerasimenko V. (2021). Mathematical model of building the order of battle of a joint aviation group of manned and unmanned aviation. *Modern information technologies in the field of security and defense*. 2(42). C. 23-30. Available at: <https://doi.org/10.33099/2311-7249/2021-41-2-23-30>
8. Nemesheev Y.O. (2019). Models of aircraft control systems and methods of experimental research. Kharkiv: National Aerospace University named after M.E. Zhukovsky "KhAI".
9. Artyushin L.M. (1988). Search for optimal laws of variation of the control forces in dynamical system control problems. *Soviet Applied Mechanics*. Vol. 24, P. 295–300. URL : <https://link.springer.com/article/10.1007/BF00883849>
10. Artyushin L.M., Malysenko S.V. (1996). Features of taking the constraints on control actions into account when solving optimization problems by the inverse dynamics problems method. *Journal of automation and information science*. Vol. 28. №3-4. pp. 24-27. DOI : 10.1615/JAutomatInfScien.v28.i3-4.40
11. Artyushin L.M., Gerasimenko V.V., Koval V.V. (2021). Basic conditions for decision-making regarding the creation of an automated control system for the group use of unmanned aerial vehicles. *Modern information technologies in the field of security and defense*. №2(35) C. 49-54. DOI : 10.33099/2311-7249/2019-35-2-49-54
12. Boschert S., Coughlin T., Ferraris M. and oth. (2019)/ Symbiotic Autonomous Systems: White Paper III (ed. by T. Cavrac), IEEE Digital Reality. [Online]. Available from: https://digitalreality.ieee.org/images/files/pdf/1SAS_WP3_Nov2019.pdf