УДК 531.13 **doi: 10.20998/2078-774X.2023.04.12**

Д. М. КРИЦЬКИЙ, О. В. ПОПОВ, А. М. БИКОВ, Т. А. БИКОВА, С. А. ЯШИН

ОПИС РУХУ БЕЗПІЛОТНОГО ТРАНСПОРТУ ЛІТАКОВОГО ТИПУ

Безпілотні транспорті засоби наразі використовуються у більшості сфер нашого життя, від розважальної та навчальної до військової чи рятувальної. У кожній з цих сфер є певні вимоги та критерії до транспортного засобу, який їм необхідний, для розважальної достатньо найпростішої конструкції, що зможе літати, для наукової – це більш складні апарати, які необхідні для збору певних даних, для військових - апарати, які не тільки можуть вести спостереження та моніторинг, але й має можливість вражати необхідні цілі, для рятувальної сфери - це той вид транспорту, який буде мати змогу доставляти грузи та транспортувати людину. Враховуючи необхідність безпілотного транспорту, актуальність розробки нових та вдосконалених типів є надзвичайно високою. Предметом дослідження в статті є безпілотний транспорт літакового типу. Мета полягає в проведенні розрахунків та описі руху безпілотного транспортного засобу літакового типу, який проєктується. В роботі представлені найпоширеніші концептуальні види безпілотних літальних апаратів. Враховуючи концептуальні види за основу при проєктування розглядається саме літакоподібний тип. Запропонована та представлена система координат, для аналізу руху літального апарату (ЛА). Для складання математичних моделей руху ЛА обрано метод рівнянь лагранжа другого роду. Розглянуто та обчислено кінетичну енергію складного тіла, що здійснює складний рух, для цього обчислення проводяться в абсолютному русі, використовуючи абсолютні лінійні та кутові швидкості. Продемонстровані обрані кути, які використовуються для розрахунків. Розглянуто момент інерції щодо миттєвої осі та з їх допомогою складено рівняння кінетичної енергії обертання відносно осі. За допомогою проведених розрахунків було знайдемо межі зміни кутів. Отримані дані необхідні для подальших розрахунків, таких як: визначення фокусу літального апарата за кутом атаки, визначення похідної коефіцієнта підйомної сили фюзеляжу за кутом атаки та всі подальші розрахунки, які пов'язані з запропонованими кутами. Розглянутий підхід дозволяє здійснювати прогнозування польотного плану з урахуванням витрати енергії та дозволяє розраховувати необхідну кількість енергії для виконання поставленого завдання.

Ключові слова: Безпілотний транспорт, літальний апарат, проєктування, кінетична енергія, концептуальні види, координати.

D. KRYTSKYI, A. POPOV, A. BYKOV, T. BYKOVA, S. YASHIN

DESCRIPTION OF THE MOVEMENT OF UNMANNED AIRCRAFT-TYPE TRANSPORT

Unmanned vehicles are now used in most areas of our lives, from entertainment and education to military and rescue. Each of these areas has certain requirements and criteria for the vehicle they need: for entertainment, the simplest design that can fly is sufficient; for science, it is more complex vehicles that are needed to collect certain data; for the military, vehicles that can not only conduct surveillance and monitoring but also have the ability to hit the necessary targets; for the rescue sector, it is the type of vehicle that will be able to deliver goods and transport people. Given the need for unmanned vehicles, the relevance of developing new and improved types is extremely high. The subject of research in this article is unmanned aircraft-type transport. The purpose is to calculate and describe the movement of an unmanned aircraft-type vehicle under design. The paper presents the most common conceptual types of unmanned aerial vehicles. Taking into account the conceptual types, the airplane type is considered as the basis for design. A coordinate system for analyzing the movement of aircraft is proposed and presented. The method of Lagrange's equations of the second kind is chosen to compile mathematical models of aircraft motion. The kinetic energy of a complex body performing a complex motion is considered and calculated; for this purpose, calculations are carried out in absolute motion using absolute linear and angular velocities. The selected angles used for the calculations are demonstrated. The moment of inertia about the instantaneous axis is considered and the equation of kinetic energy of rotation about the axis is derived. The calculations were used to find the limits of angle change. The data obtained are necessary for further calculations, such as determining the focus of the aircraft by angle of attack, determining the derivative of the fuselage lift coefficient by angle of attack, and all further calculations related to the proposed angles. The considered approach makes it possible to forecast the flight plan taking into account energy consumption and allows calculating the required amount of energy to perform the task.

Key words: Unmanned vehicles, air vehicles, engineering, kinetic energy, conceptual views, coordinates.

Вступ

В даний час у сферах оборони [1], охорони правопорядку [2] та навколишнього середовища [3], боротьби з наслідками надзвичайних ситуацій, енергетики та інших існує настійна потреба в оперативному виконанні термінових авіаційних робіт. Цим службам бажано мати «під рукою і завжди напоготові» простий в експлуатації та управлінні літальний апарат, який був би здатний злітати та сідати поза аеродромами з майданчиків, які можна знайти прямо на місці виконання робіт, і точно маневрувати в обмеженому просторі, літати групою [4] – [6]. Ця потреба викликала численні та все зростаючі за кількістю спроби застосувати для практичних цілей квадрокоптери та авіамоделі, які випускаються для розважальних та спортивних цілей.

Концептуальні проекти безпілотних транспортних засобів та вимоги до них фактично є озвученими потребами ринку міської повітряної мобільності. Першою вимогою для таких літальних апаратів є вантажопідйомність розрахована на перевезення до 6 пасажирів (1200 фунтів).

Найбільш поширеними концептуальними рішеннями при проектуванні безпілотного авіаційного транспорту є три основні форми літального апарату: коптерна форма (переважно це форма квадрокоптера з прикріпленою кабіною), літакоподібні схеми, змішані схеми (рис. 1).

При цьому з огляду на таку особливість, що концептуальні літальні апарати в рамках міської повітряної мобільності використовують електродвигуни, виникає завдання опису руху літального апарату з урахуванням витрати електричної енергії.

© Д. М. Крицький, О. В. Попов, А. М. Биков, Т. А. Бикова, С. А. Яшин, 2023

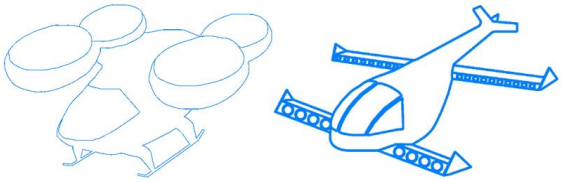

Рис. 1 – Концептуальні види безпілотних літальних апаратів

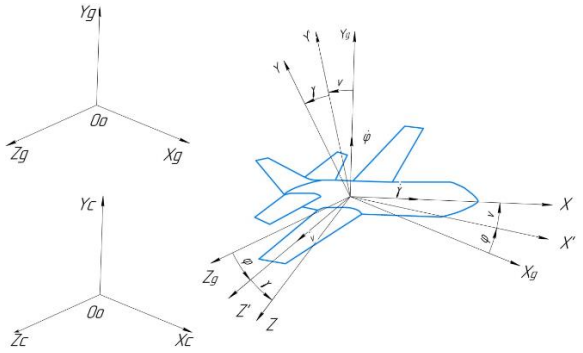

Рис. 2 – Системи координат

Мета дослідження

Розрахувати та описати рух безпілотного транспортного засобу літакового типу, що проєктується.

Основний матеріал

Системи координат, що застосовуються під час аналізу руху літального апарату (ЛА). Старт та зліт ЛА зручно розглядати у стартовій системі координат *OoXcYcZc* [7] – [9]. Стартових систем в одній задачі може бути кілька, наприклад, для запуску в політ групи ЛА.

Розташування ЛА і траєкторію його польоту при виконанні завдання зручно розглядати в земній системі координат *OgXgYgZg*, прив'язавши котру до місцевості і карти, а також забезпечивши відліком часу, отримаємо систему відліку для аналізу і планування траєкторії ЛА при виконанні ним польотного завдання.

Стартова система координат також є основою стартової системи відліку при старті та зльоті ЛА. Вимірювання навантажень, кутових швидкостей проводиться на борту ЛА у зв'язаній системі координат *OXYZ*.

Для аналізу кутового руху та кутового положення ЛА щодо нерухомого простору разом із пов'язаною системою координат *OXYZ* застосовують нормальну систему координат *OgXgYgZg*, центр якої збігається з центром зв'язаної системи координат. Положення ЛА характеризується кутами нишпорення, тангажу та крену (рис. 2).

Маневрені властивості ЛА характеризуються його здатністю змінювати вектор швидкості та положення у просторі. Для цього потрібен аналіз перевантажень по дотичній до траєкторії (прискорення та уповільнення) і по нормалі до траєкторії (викривлення траєкторії, поворот вектора швидкості). У цьому випадку аналіз проводять у системі координат, пов'язаної з дотичною та головною нормаллю до траєкторії.

Для вирішення завдання складання математичних моделей руху ЛА було обрано метод рівнянь Лагранжа другого роду. Рівняння Лагранжа другого роду або рівняння динаміки в узагальнених координатах мають наступний вигляд

$$\frac{d}{dt}\frac{\partial T}{\partial q_1^*} - \frac{\partial T}{\partial q_1^*} = Q_1, \qquad (1)$$

$$\frac{d}{dt}\frac{\partial T}{\partial q_2^*} - \frac{\partial T}{\partial q_2^*} = Q_2, \qquad (2)$$

$$\frac{d}{dt}\frac{\partial T}{\partial q_s^*} - \frac{\partial T}{\partial q_s^*} = Q_s, \qquad (3)$$

де T – кінетична енергія;

q_i^* – узагальнена координата;

Q_i – узагальнена сила.

Узагальненими координатами називаються незалежні параметри, що однозначно визначають положення точок матеріальної системи.

Узагальненими силами називаються коефіцієнти, що стоять у вираженні суми робіт активних сил за відповідних узагальнених можливих переміщень. Розмірність узагальненої сили:

$$[Q] = \frac{[A]}{[q^*]}. \qquad (4)$$

Число узагальнених сил дорівнює числу узагальнених координат, тобто числу ступенів свободи.

Повна кінетична енергія ЛА дорівнює сумі механічних кінетичних енергій поступального та обертального руху власне самого літального апарату, плюс механічні кінетичні енергії всіх рухомих частин (повітряних гвинтів з роторами електродвигунів та сервомеханізмів з електродвигунами), а також плюс сума електрокінетичних енергій в електричних ланцюгах живлення електродвигунів. Аналоги механічних та електричних величин наведені у табл. 1.

Порядок розробки рівнянь Лагранжа наступний:

1) зобразити об'єкт, що розглядається, з усіма активними силами (і реакціями неідеальних зв'язків, умовно вважаючи їх активними силами, наприклад, сили тертя);

2) вибрати систему координат, визначити число ступенів свободи матеріальної системи, що вивчається, і ввести незалежні узагальнені координати в числі, рівному числу ступенів свободи;

3) визначити узагальнені сили системи Q_i, що відповідають обраним узагальненим координатам;

4) обчислити кінетичну енергію T аналізованої матеріальної системи, висловивши енергію залежно від узагальнених координат та узагальнених швидкостей;

5) знайти приватні похідні кінетичної енергії T за узагальненими швидкостями $\dot{q}_i^*$, тобто $\frac{\partial T}{\partial \dot{q}_i^*}$, а після обчислити їх похідні за часом $\frac{d}{dT}\frac{\partial T}{\partial \dot{q}_i^*}$;

6) визначити часткові похідні кінетичної енергії T за узагальненими координатами q_i^*, тобто $\frac{\partial T}{\partial q_i^*}$;

7) за результатами, отриманими у п. *3*, *5*, та *6* скласти рівняння Лагранжа.

Таблиця 1 – Аналоги механічних та електричних величин

Механічні величини	Електричні величини
t – час	t – час
q^* – узагальнена координата	q – електричний заряд
$\dot{q}^*$ – узагальнена швидкість	$\dot{q}$ – електричний струм
m – маса, міра інертності тіла руху	L – індуктивність
I – момент інерції, міра інертності обертання	M – взаємна індуктивність
$T=\frac{1}{2}m\dot{q}^{*2}$, $T=\frac{1}{2}I\dot{q}^{*2}$ – кінетична енергія обертання	$T=\frac{1}{2}L\dot{q}^2$ – електрокінетична енергія
C – коефіцієнт пружності	$\frac{1}{C}$, де C – електрична ємність
f – коефіцієнт пружності	R – електричний активний опір
Q – узагальнена сила	E – електрорушійна сила
$\delta A = Q\delta q^*$ – елементарна робота	$A = E\delta q$ – елементарна робота
$V = mgh$ – потенційна енергія	$V=\frac{q^2}{2C}$ – потенційна енергія конденсатора

Як відомо з теоретичної механіки, кінетичною енергією системи називається скалярна величина T, що дорівнює сумі кінетичних енергій усіх точок системи:

$$T=\frac{\sum m_k V_k^2}{2}. \qquad (5)$$

Кінетична енергія є характеристикою і поступального, і обертального руху системи. Характеристиками руху системи так само є кількість руху системи $\overline{Q}$ і головний момент кількостей руху $\overline{K}_o$. У практиці складання рівнянь руху часто користуються теоремами про зміну кількості руху та зміну моменту кількостей руху. Теорема про зміну кількості руху системи в диференціальній формі показує, що похідна за часом від кількості руху системи дорівнює геометричній сумі всіх діючих на систему зовнішніх сил:

$$\frac{d\overline{Q}}{dt}=\sum \overline{F}_k^e. \qquad (6)$$

Ця теорема є однією з форм запису другого закону Ньютона.

Практична цінність такого методу складання рівнянь руху полягає в тому, що він дозволяє виключити із розгляду наперед невідомі внутрішні сили.

Теорема про зміну головного моменту кількостей руху системи показує, що похідна за часом від головного моменту кількостей руху системи щодо центру мас дорівнює сумі моментів всіх зовнішніх сил системи щодо центру мас [9]:

$$\frac{d\overline{K}_o}{dt}=\sum \overline{m}_o\left(\overline{F}_k^e\right). \qquad (7)$$

Ця теорема є однією з форм запису другого закону Ньютона для обертального руху. Практична цінність такого методу полягає в тому, що вона, аналогічно теоремі про зміну кількості руху, дозволяє при вивченні обертального руху системи виключити з розгляду наперед невідомі внутрішні сили.

Головна відмінність величини кінетичної енергії T від кількості руху $\overline{Q}$ і моменту кількостей руху $\overline{K}_o$ полягає в тому, що кінетична енергія є величиною скалярною і позитивною. Тому вона залежить від напрямів руху частин системи та не характеризує змін цих напрямків.

Вирішальним чинником, який визначив вибір методу рівнянь Лагранжа другого роду для складання математичного опису безпілотних апаратів, стала можливість розглядати динаміку безпілотного апарату з урахуванням динаміки процесів управління.

Обчислення кінетичної енергії

Кінетичну енергію потрібно обчислювати в абсолютному русі, тобто, використовуючи абсолютні лінійні та кутові швидкості. При обчисленні кінетичної енергії центру мас у поступальному русі абсолютна швидкість дорівнює сумі векторів відносної та переносної швидкостей:

$$\overline{V}_{abs}=\overline{V}_{ot}+\overline{V}_{per}. \qquad (8)$$

Квадрат абсолютної швидкості буде обчислюватися за формулою:

$$V_{abs}^2=V_{ot}^2+V_{per}^2+2V_{ot}V_{per}\cos\alpha, \qquad (9)$$

де α – кут між векторами.

Те саме стосується і складання векторів кутових швидкостей. Кінетична енергія обертального руху щодо центру мас дорівнюватиме:

$$T_v = \frac{1}{2} I_v w^2, \qquad (10)$$

де I_v – момент інерції тіла відносно миттєвої осі обертання, вздовж якої спрямований вектор $\overline{w}$ миттєвої абсолютної кутової швидкості.

У процесі обертання вектор абсолютної кутової швидкості змінює свою величину і напрямок, відповідно до зміни осі обертання і момент інерції I_v також є величиною зміною (рис. 3).

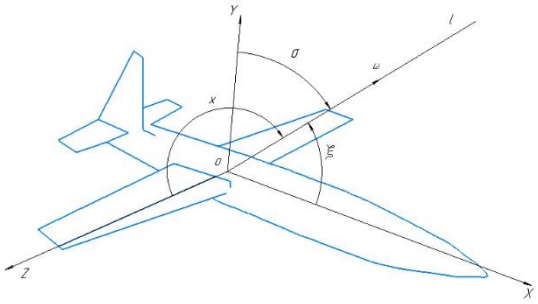

Рис. 3 – Кути, що використовуються

Проекції вектора кутової швидкості $\overline{w}$ на осі пов'язаної системи координат будуть дорівнювати:

$$w_x = w\cos\varepsilon, \qquad (11)$$

$$w_y = w\cos\sigma, \qquad (12)$$

$$w_z = w\cos x. \qquad (13)$$

Момент інерції щодо миттєвої осі:

$$I_v = I_x\cos^2\varepsilon + I_y\cos^2\sigma + I_z\cos^2 x - 2I_{xy}\cos\varepsilon\times$$
$$\times\cos\sigma - 2I_{yz}\cos x\cos\sigma - 2I_{zx}\cos\varepsilon\cos x. \qquad (14)$$

Якщо в якості осі вибрати головні центральні осі інерції, то відцентрові моменти інерції перетворюються на нуль і момент інерції I_v буде:

$$I_v = I_x\cos^2\varepsilon + I_y\cos^2\sigma + I_z\cos^2 x. \qquad (15)$$

Рівняння кінетичної енергії обертання відносно осі буде наступним:

$$T_v^o = \frac{1}{2} I_v w^{2o} = \frac{1}{2}\left(I_x w^2\cos^2\varepsilon^o + I_y w^2\cos^2\sigma^o + \right.$$
$$\left. + I_z w^2\cos^2 x^o\right) = \frac{1}{2}\left(I_x w_x^2 + I_y w_y^2 + I_z w_z^2\right). \qquad (16)$$

У зв'язку з тим, що літальні апарати здебільшого мають матеріальну симетрію щодо вертикальної поздовжньої площини, вісь OZ є головною центральною.

При цьому між центральними та будівельними осями може бути якийсь кут φ. Цей кут можна змінювати, тобто повертати осі шляхом додавання двох точкових мас.

Кутову швидкість обертання потрібно брати абсолютну, тобто її необхідно зобразити через кутові швидкості та кути, які визначають положення літального апарату щодо інерційної системи координат, тобто через кути Ейлера, а саме через кути та кутові швидкості нишпорення, тангажу та крену.

Кутові швидкості χ, ϑ і γ не утворюють прямокутного тріедра. Тому їх треба спроектувати на осі пов'язаної системи координат та отримати компоненти кутової швидкості:

$$\left.\begin{aligned} w_x &= \dot{\gamma} + \dot{\psi}\sin\vartheta \\ w_y &= \dot{\vartheta}\sin\gamma + \dot{\psi}\cos\vartheta\cos\gamma \\ w_z &= \dot{\vartheta}\cos\gamma - \dot{\psi}\cos\vartheta\sin\gamma \end{aligned}\right\}, \qquad (17)$$

$$\left.\begin{aligned} \dot{\gamma} &= w_x + tg\vartheta\left(w_z\sin\gamma - w_y\cos\gamma\right) \\ \dot{\vartheta} &= w_y\sin\gamma + w_z\cos\gamma \\ \dot{\psi} &= \left(w_y\cos\gamma - w_z\sin\gamma\right)\frac{1}{\cos\vartheta} \end{aligned}\right\}. \qquad (18)$$

Межі зміни кутів наступні:

$$-\pi < \psi \le \pi,$$
$$-\pi < \gamma \le \pi,$$
$$-\frac{\pi}{2} < \vartheta \le \frac{\pi}{2}.$$

Висновки

Розглянутий підхід дозволяє як здійснювати процес управління в реальному часі, так і здійснювати прогнозування польотного плану з урахуванням витрати енергії.

Цей підхід дозволяє розрахувати також необхідну кількість енергії для виконання поставленого завдання. Враховуючи бурхливий розвиток напряму безпілотної авіаційної техніки з використанням електричних літальних апаратів з вертикальним зльотом та посадкою, такий підхід до розрахунку руху літального апарату буде найбільш ефективним.

Результати виконаної роботи допоможуть при подальших розрахунках для проєктування безпілотного транспорту схожого типу.

Список літератури

1. Jordan J. The future of unmanned combat aerial vehicles: An analysis using the Three Horizons framework / J. Jordan // Futures. – 2021. – Vol. 134. – ISSN 0016-3287. – DOI: https://doi.org/10.1016/j.futures.2021.102848.
2. Sakiyama, M. The Balance Between Privacy and Safety in Police UAV Use: The Power of Threat and its Effect on People's Receptivity / M. Sakiyama // UNLV Theses, Dissertations, Professional Papers, and Capstones. – 2017. – No. 3166. – DOI: http://dx.doi.org/10.34917/11889745.
3. Rebolo-Ifrán, N. Drones as a Threat to Wildlife: YouTube Complements Science in Providing Evidence about Their Effect / N. Rebolo-Ifrán, M. Graña Grilli, S. Lambertucci // Environmental Conservation. – 2019. – Vol. 46, Is. 3. – P. 205-210. – DOI: https://doi.org/10.1017/S0376892919000080.

4. Bettina M. Vertical Takeoff and Landing (VTOL) Small Unmanned Aircraft Systems (sUAS) / M. Bettina // Trends in Technical & Scientific Research. – 2021. – Vol. 5, Is. 1, No paper 555651. – DOI: https://doi.org/10.19080/TTSR.2021.05.555651.
5. Pohudina, O. The Method of Flight Mission Formation for a Group Autonomous Flight of Unmanned Aerial Vehicles / O. Pohudina, A. Bykov, D. Kritskiy, M. Kovalevskyi // Integrated Computer Technologies in Mechanical Engineering: Lecture Notes in Networks and Systems book. – 2021. – Vol. 367. – P. 894–901. – Cham : Springer International Publishing. – DOI: https://doi.org/10.1007/978-3-030-94259-5_69.
6. Pohudina, O. Assessing Unmanned Traffic Bandwidth / O. Pohudina, D. Kritskiy, S. Koba, A. Pohudin ; Ed.: M. Nechyporuk, V. Pavlikov, D. Kritskiy // Integrated Computer Technologies in Mechanical Engineering. Advances in Intelligent Systems and Computing, Springer, Cham. – 2020. – Vol 1113. – P. 447–458. – DOI: https://doi.org/10.1007/978-3-030-37618-5_38.
7. Погудін, А. В. Моделювання автоматичного польоту малого безпілотного літального апарату над лінією-маркером / А. В. Погудін, О. К. Погудіна, А. М. Биков, Т. А. Пластун // Відкриті інформаційні та комп'ютерні інтегровані технології. – 2022. – No. 95. – P. 71–82. – DOI: https://doi.org/10.32620/oikit.2022.95.06.
8. Nowakowski, M. Bifurcation Flight Dynamic Analysis of a Strake-Wing Micro Aerial Vehicle / M. Nowakowski, K. Sibilski, A. Sibilska-Mroziewicz, A. Zyluk // Applied Sciences. – 2021. – Vol. 11, Is. 4. – DOI: https://doi.org/10.3390/app11041524.
9. Liu Yi Aeroservoelastic stability analysis for flexible aircraft based on a nonlinear coupled dynamic model / Yi Liu, Changchuan Xie // Chinese Journal of Aeronautics. – 2018. – Vol. 31, Is. 12. – P. 2185–2198. – ISSN 1000-9361. – DOI: https://doi.org/10.1016/j.cja.2018.08.019.
10. Kritskiy, D. Unmanned Aerial Vehicle Mass Model Peculiarities / D. Kritskiy, S. Yashin, S. Koba ; Ed.: S. Shkarlet, A. Morozov, A. Palagin // Mathematical Modeling and Simulation of Systems (MODS'2020). Selected Papers of 15th International Scienrific-practical Conference, MODS, 2020 June 29– July 01, Chernihiv, Ukraine. Advances in Intelligent Systems and Computing. – 2021. – Vol. 1265. – P. 299–308. – DOI: https://doi.org/10.1007/978-3-030-58124-4_29.

References (transliterated)

1. Jordan J. (2021), "The future of unmanned combat aerial vehicles: An analysis using the Three Horizons framework", *Futures*, vol. 134, ISSN 0016-3287, https://doi.org/10.1016/j.futures.2021.102848
2. Sakiyama, M. (2017), "The Balance Between Privacy and Safety in Police UAV Use: The Power of Threat and its Effect on People's Receptivity", *UNLV Theses, Dissertations, Professional Papers, and Capstones*, No. 3166, http://dx.doi.org/10.34917/11889745.
3. Rebolo-Ifrán, N., Graña Grilli M., Lambertucci S. (2019), "Drones as a Threat to Wildlife: YouTube Complements Science in Providing Evidence about Their Effect", *Environmental Conservation*, vol. 46, is. 3, pp. 205-210, https://doi.org/10.1017/S0376892919000080.
4. Bettina M. (2021), "Vertical Takeoff and Landing (VTOL) Small Unmanned Aircraft Systems (sUAS)", *Trends in Technical & Scientific Research*, vol. 5, is. 1, no paper 555651, https://doi.org/10.19080/TTSR.2021.05.555651.
5. Pohudina, O., Bykov A., Kritskiy D., Kovalevskyi M. (2021), "The Method of Flight Mission Formation for a Group Autonomous Flight of Unmanned Aerial Vehicles", *Integrated Computer Technologies in Mechanical Engineering: Lecture Notes in Networks and Systems book*, vol. 367, pp. 894–901, https://doi.org/10.1007/978-3-030-94259-5_69.
6. Pohudina, O., Kritskiy D., Koba S., Pohudin A. (2020), "Assessing Unmanned Traffic Bandwidth", *Integrated Computer Technologies in Mechanical Engineering. Advances in Intelligent Systems and Computing*, vol. 1113, pp. 447–458, https://doi.org/10.1007/978-3-030-37618-5_38.
7. Pohudin A., Pohudina, O., Bykov, A., Plastun T. (2022), "Simulation of the automatic flight of a small unmanned aerial vehicle over a marker line", *Open Information and Computer Integrated Technologies*, vol. 95, pp. 71–82, https://doi.org/10.32620/oikit.2022.95.06.
8. Nowakowski, M., Sibilski K., Sibilska-Mroziewicz A., Zyluk A. (2021), "Bifurcation Flight Dynamic Analysis of a Strake-Wing Micro Aerial Vehicle", *Applied Sciences*, vol. 11, is. 4, https://doi.org/10.3390/app11041524.
9. Liu Yi, Xie Changchuan (2018), "Aeroservoelastic stability analysis for flexible aircraft based on a nonlinear coupled dynamic model", *Chinese Journal of Aeronautics*, vol. 31, is. 12, p. 2185–2198, ISSN 1000-9361, https://doi.org/10.1016/j.cja.2018.08.019.
10. Kritskiy, D., Yashin S., Koba S. (2021), "Unmanned Aerial Vehicle Mass Model Peculiarities", *Mathematical Modeling and Simulation of Systems (MODS'2020). Selected Papers of 15th International Scienrific-practical Conference, MODS, 2020 June 29–July 01, Chernihiv, Ukraine. Advances in Intelligent Systems and Computing*, Vol. 1265, pp. 299–308, https://doi.org/10.1007/978-3-030-58124-4_29.

Надійшла (received) 22.10.2023

Відомості про авторів / About the Authors

Крицький Дмитро Миколайович (Krytskyi Dmytro) – кандидат технічних наук, доцент каф. інформаційних технологій проектування, декан факультету літакобудування, Національний аерокосмічний університет ім. М. Є. Жуковського «Харківський авіаційний інститут», Харків, Україна; тел. (050) 166-49-51; e-mail: d.krickiy@khai.edu, ORCID: https://orcid.org/0000-0003-4919-0194, Scopus Author ID: 57195913632,

Попов Олексій Вікторович (Popov Alexey) – аспірант каф. інформаційних технологій проектування, Національний аерокосмічний університет ім. М. Є. Жуковського «Харківський авіаційний інститут», Харків, Україна; e-mail: o.v.popov@khai.edu, ORCID: https://orcid.org/0000-0002-2526-9140

Биков Андрій Миколайович (Bykov Andriy) – асистент каф. інформаційних технологій проектування, Національний аерокосмічний університет ім. М. Є. Жуковського «Харківський авіаційний інститут», Харків, Україна; тел.(068)740-23-09; e-mail: a.bykov@khai.edu; ORCID: https://orcid.org/0000-0002-7184-4994

Бикова Тетяна Анатоліївна (Bykova Tetiana) – асистент каф. інформаційних технологій проектування, Національний аерокосмічний університет ім. М. Є. Жуковського «Харківський авіаційний інститут», Харків, Україна; тел. (098)030-21-37; e-mail: plastun.t.a@gmail.com; ORCID: https://orcid.org/0000-0003-4323-6075

Яшин Сергій Анатолійович (Yashin Sergiy) – старший науковий співробітник каф. інформаційних технологій проектування, Національний аерокосмічний університет ім. М. Є. Жуковського «Харківський авіаційний інститут», Харків, Україна; тел. (067) 575-26-47; e-mail: sergey.yashin.xai@gmail.com, ORCID: https://orcid.org/0000-0002-1680-4156, Scopus Author ID: 57219053677.