

УДК 629.735.05

DOI: 10.31673/2786-8362.2026.019461

Мельник Ю.В., д.т.н.; Кривоносенко О.П., к.т.н.;
Юрченко О.М.; Бахтіяров Д.І., к.т.н.

ШЛЯХИ ПІДВИЩЕННЯ ЯКОСТІ УПРАВЛЯЮЧИХ СИСТЕМ РУХОМИХ ОБ'ЄКТІВ (БПЛА)

Melnyk Yu.V., Kryvonosenko O.P., Yurchenko O.M., Bakhtiarov D.I. **Ways to improve the quality of control systems of moving objects (UAV).** The efficiency of unmanned aerial vehicles (UAV) heavily depends on the precision of onboard measuring systems, particularly gyrostabilizers, which mitigate dynamic disturbances like angular motions and accelerations. This study addresses the challenge of improving stabilization accuracy by overcoming multidimensional cross-couplings and stochastic noise. We propose a comprehensive approach to synthesizing optimal correction systems using structural identification and advanced spectral methods. By applying a stochastic problem formulation and the separation principle, we integrate state estimation algorithms to effectively process complex signal spectral densities. The developed mathematical models and optimal control algorithms significantly reduce random fluctuations, enhancing the overall accuracy of UAV flight data processing.

Keywords: identification, dynamic characteristics, moving object, UAV, optimal structure, spectral density, accuracy, flight data processing

Мельник Ю.В., Кривоносенко О.П., Юрченко О.М., Бахтіяров Д.І. **Шляхи підвищення якості управляючих систем рухомих об'єктів (БПЛА):** Ефективність безпілотних літальних апаратів (БПЛА) значною мірою залежить від точності бортових вимірювальних систем, зокрема гіростабілізаторів, які компенсують такі динамічні збурення, як кутові рухи та прискорення. Це дослідження вирішує проблему підвищення точності стабілізації шляхом подолання багатовимірних перехресних зв'язків та стохастичного шуму. Ми пропонуємо комплексний підхід до синтезу оптимальних систем корекції з використанням структурної ідентифікації та передових спектральних методів. Застосовуючи стохастичну постановку задачі та теорему розділення, ми інтегруємо алгоритми оцінювання стану для ефективної обробки складних спектральних щільностей сигналів. Розроблені математичні моделі та алгоритми оптимального керування значно зменшують випадкові флуктуації, підвищуючи загальну точність обробки польотної інформації БПЛА.

Ключові слова: ідентифікація, динамічні характеристики, рухомий об'єкт, БПЛА, оптимальна структура, спектральна щільність, якість (точність), обробка польотної інформації

Вступ

Сучасний етап розвитку авіаційної техніки, зокрема безпілотних літальних апаратів (БПЛА), характеризується постійним зростанням вимог до ефективності та безпеки їх застосування. Політ рухомих об'єктів складної конфігурації, до яких належать сучасні безпілотні авіаційні комплекси, відбувається в умовах постійного впливу інтенсивних динамічних навантажень. Комплекси первинної інформації, що включають інерціальні модулі, астрономічні візирні та гіростабілізовані платформи (ГС), виступають головними джерелами польотних даних для формування навігаційного рішення. У таких обставинах ключовою передумовою стабільної роботи систем автоматичного управління та просторової орієнтації є висока точність, роздільна здатність і надійність бортових сенсорних датчиків. Саме достовірність телеметричної та просторової інформації, що генерується цими пристроями, формує базис для прийняття правильних керуючих впливів. Відсутність похибок у показаннях цих вимірювачів прямо впливає на загальну точність траєкторного руху БПЛА. Зокрема, використання гіростабілізаторів є технологічною необхідністю для нейтралізації кінематичних збурень. ГС фізично ізолюють чутливі елементи навігаційної бортової апаратури від паразитних кутових рухів літального апарата навколо власного центру мас, а також демпфують вплив лінійних перевантажень, гарантуючи стійкість роботи всієї пілотажно-навігаційної системи.

Аналіз останніх досліджень. У сучасній прикладній гіроскопії одним із базових підходів до мінімізації динамічних похибок гіростабілізаторів (ГС) є імплементація систем оптимальної фільтрації та корекції [1]. Цей підхід демонструє найвищу результативність як на етапі математичного та напівнатурного моделювання, так і під час штатної роботи бортового

обладнання в реальному часі. Фундаментом для побудови таких систем виступають сучасні спектральні алгоритми синтезу систем стабілізації для формування керуючих впливів. Вони дозволяють проектувати високоефективні регулятори для складних багатозв'язних динамічних систем, забезпечуючи точне виділення корисного навігаційного сигналу на тлі інтенсивних вібраційних та акустичних завад. Особливість підходу до досягнення найвищих показників якості ГС полягає в наступному. Оскільки впливи на ГС і завади інформації, що знімається з його штатних датчиків кутів, мають стохастичний характер, а точнісні вимоги до навігаційних вимірювань постійно зростають, виникає необхідність у розв'язанні задач оптимального стохастичного керування ГС як багатовимірною динамічною системою при стохастичних впливах. Для ефективного розв'язання таких задач необхідно знати динамічні характеристики збурювальних факторів, механізми їх впливу на бортові вимірювальні системи різного призначення, сучасні алгоритми аналізу точності і синтезу передавальних оптимальних функцій систем автоматичного керування. Варто відзначити, що вирішувати задачі стабілізації рухомих об'єктів при стохастичних вітрових впливах необхідно як при створенні нових, так і при удосконаленні існуючих систем вимірювань.

Метою роботи є дослідження впливу збурювальних факторів на точність функціонування гіроскопічної системи вимірювання кутового положення БПЛА та визначення ефективних методів та способів їх компенсації. Особливу увагу приділено аналізу моментів сил тертя в опорах гіроскопа, які суттєво впливають на стабільність його роботи та викликають відхилення від заданого положення.

Виклад основного матеріалу дослідження

У процесі дослідження розглядаються як систематичні, так і випадкові складові тертя. Передбачається, що вплив середніх (постійних) моментів тертя може бути зменшений шляхом введення відповідних коригуючих моментів у гіросистему. Водночас випадкові зміни тертя потребують застосування спеціальних коригувальних механізмів, здатних формувати керуючі дії для компенсації їх дестабілізуючого впливу. Одним завданням роботи є вивчення динамічних характеристик моментів тертя, що дозволяє оцінити їх вплив на похибки системи. Отримані результати мають бути використані для обґрунтування вибору оптимальної системи корекції, яка забезпечить підвищення точності та надійності роботи гіроскопічної системи в умовах дії зовнішніх і внутрішніх збурень.

У одновісному ГС зображеному на рис.1. як відомо [2], дія моментів зовнішніх сил M_B призводить до прецесії (кут β) гіроскопа навколо осі O_x , під дією гіроскопічного моменту M_G . Цей момент врівноважується моментом M_p розвантажувальним двигуном 3, який управляється на основі інформації з вимірювача 2 поточного кутового положення осей ГС. Сигнал похибки стабілізації, який вимірюється датчиком кута повороту 1 (кут α), після підсилення на підсилювачі 5 подається на корегуючий двигун 4.

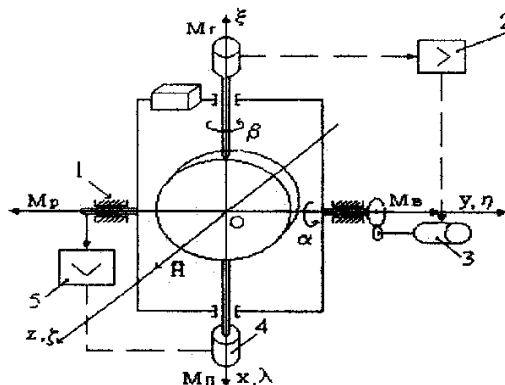


Рис.1. Схема одновісного гіростабілізатора

Розглянемо ГС як двоконтурну динамічну систему, яка має кілька входів і кілька виходів, а саме, що містить внутрішній контур, що виконує роль стабілізуючого, і зовнішній контур,

що виконує роль управляючого. Структурна схема такого ГС має вигляд, зображений на рис. 2.

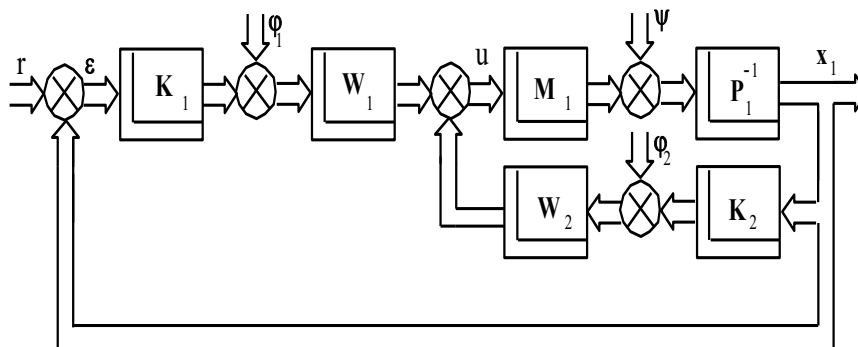


Рис. 2. Структурна схема бортового гіростабілізуючого пристрою

Рух гіроскопу описується рівнянням виду

$$P_1 x_1 = M_1 u + \psi, \quad (1)$$

де P_1 і M_1 - поліноміальні матриці розмірностей $n \times n$ і $n \times m$ відповідно, елементи яких операторні поліноми; $x_1 - n$ -мірний вектор вихідних реакцій гіросистеми; $u - m$ -мірний вектор управляючих сигналів, ψ - вектор випадкових збурень в гіросистемі.

На рис. 2 K_1 і K_2 - матриці передаточних функцій системи вимірювачів вектора x_1 і відхилення від програми, які формуються з коефіцієнтів передачі сельсинів і датчиків відхилення від вертикалі, ϕ_1 і ϕ_2 вектори завад вимірювань, а W_1 і W_2 - матриці передаточних функцій частин системи корекції, які обираються в процесі оптимального синтезу і розташовані у внутрішньому (стабілізуючому) і зовнішньому (управляючому) контурах системи корекції ГС.

Розглянемо задачу синтезу системи стабілізації при зовнішніх збуреннях ψ і управляючих впливах u , що полягає у створенні оптимальної структури системи корекції ГС з врахуванням діючих в польоті реальних збурюючих факторів.

Успішна реалізація процедури синтезу системи автоматичного керування критично залежить від наявності достовірних апріорних даних щодо динамічних характеристик об'єкта стабілізації, а також параметрів вимірювальних трактів і задаючих впливів. Не менш вагомим фактором є врахування стохастичних властивостей зовнішніх збурень, інструментальних шумів сенсорів та характеристик програмних сигналів, які безпосередньо впливають на результуючу точність комплексу. Оскільки досліджуваний об'єкт належить до класу багатовимірних систем (з множиною входів та виходів), необхідно обов'язково брати до уваги наявність крос-зв'язків: зміна керування на одному вході неминуче викликає реакцію відразу за декількома вихідними координатами.

Для вирішення задачі синтезу в таких умовах доцільно застосовувати сучасний апарат спектральних методів оптимального проєктування [1], здатний ефективно обробляти сигнали та завади складної спектральної структури. При цьому максимізація якісних показників системи досягається шляхом інтеграції принципів теореми розділення (сепарації) в рамках стохастичної постановки задачі. Комплексне поєднання цих теоретичних підходів із методами оптимального оцінювання фазового стану складних динамічних систем гарантує високоточне формування керуючих сигналів, що у підсумку суттєво підвищує загальну ефективність функціонування стабілізованої платформи.

Скористаємося відомими [1] алгоритмами синтезу динамічних систем для складання алгоритму синтезу оптимальної системи корекції ГС. Для цього перетворимо структуру двоконтурної системи стабілізації ГС до відповідної системи стабілізації с двоканальним вимірюванням, а потім зведемо її до звичайної багатомірної системи стабілізації. Для цього виконаємо структурні перетворення, аналогічне проведеним в роботі [2].

За критерій якості системи, наприклад, приймемо функціонал, який являє собою суму певним чином зважених дисперсій компонент векторів похибки стабілізації і сигналів управління, що подаються на датчики моментів і двигуни силового розвантаження.

$$e = \langle x_1' R_1 x_1 \rangle + \langle u' C u \rangle = \frac{1}{j} \int_{-j\infty}^{+j\infty} \text{tr} (S'_{x_1 x_1} R_1 + S'_{uu} C) ds, \quad (2)$$

де R і C - вагові позитивно невід'ємно-визначені симетричні матриці, в загальному випадку поліноміальні, tr - слід матриці; $S'_{x_1 x_1}$ і S'_{uu} - транспоновані матриці спектральних щільностей векторів похибки стабілізації і сигналу управління.

Задача полягає в тому, щоб вибором оптимальних структур (рис. 2) W_1 і W_2 частин системи стабілізації, розташованих у внутрішньому і зовнішньому контрах, доставити мінімум заданому функціоналу якості (1) і одночасно забезпечити стійкість замкнутої системи.

Вирішимо задачу синтезу оптимальної структури регулятора системі стабілізації по аналогії з відомим методом [2]. Результат рішення задачі являє собою умову тотожного дорівнювання нулю першої варіації функціоналу

$$\begin{aligned} e = & \frac{1}{j} \int_{-j\infty}^{+j\infty} \text{tr} \left\{ F_{u_0}^{\Psi_0} \left[M_0^* P_0^{-1} \begin{pmatrix} k_*^{-1} \\ O_n \end{pmatrix} R(k^{-1}, O_n) P_0^{-1} M_0 + \right. \right. \\ & \left. \left. + M_0 P_0^{-1} (k^{-1}, O_n) R \begin{pmatrix} k_*^{-1} \\ O_n \end{pmatrix} P_0^{-1} M_0^* \right] \times F_{u_0}^{\Psi_0} \begin{pmatrix} E_{2n} \\ P_0^* \end{pmatrix} + \right. \\ & \left. + \left[(k^{-1}, O_n) P_0^{-1} M_0 F_{u_0}^{\Psi_0} (E_{2n}, P_0) \left[S'_{\Psi_0 \xi_0} P_0^{-1} \begin{pmatrix} k_*^{-1} \\ O_n \end{pmatrix} + \right. \right. \right. \\ & \left. \left. + R(k_*^{-1}, O_n) P_0^{-1} S'_{\xi_0 \Psi_0} \right] \times \right. \\ & \left. \left. \times F_{u_0}^{\Psi_0} M P_0^{-1} \begin{pmatrix} k_*^{-1} \\ O_n \end{pmatrix} \right\} ds, \end{aligned} \quad (3)$$

де $F_{x_0}^{\Psi_0}$ і $F_{u_0}^{\Psi_0}$ – передаточні функції замкненої системи між векторами x_0 і u_0 . При врахуванні фізичної реалізованості передаточна функція замкненої системи по управлінню $F_{u_0}^{\Psi_0}$ має вигляд

$$F_{u_0}^{\Psi_0} = -\Gamma_0^{-1} (N_0 + N_+) D_0^{-1}, \quad (4)$$

де

$$\Gamma_0 = \left[M_0^* P_0^{-1} \begin{pmatrix} k_*^{-1} \\ O_n \end{pmatrix} R(k^{-1}, O_n) P_0^{-1} M_0 + C \right]^+; \quad (5)$$

$$D_0 = \left[(E_{n+v}, P_0) S'_{\xi_0 \xi_0} \begin{pmatrix} E_{n+v} \\ P_0^* \end{pmatrix} \right]^+; \quad (6)$$

$$\begin{aligned} N_0 + N_+ + N_- = & \Gamma_0^{-1} M_0^* P_0^{-1} \begin{pmatrix} k_*^{-1} \\ O_n \end{pmatrix} R(k^{-1}, O_n) P_0^{-1} \times \\ & \times (E_{n+v}, O_{n+v}) S'_{\xi_0 \xi_0} \begin{pmatrix} E_{n+v} \\ P_0^* \end{pmatrix} P_0^*. \end{aligned} \quad (7)$$

Алгоритм (4) при врахуванні виразів (3) дозволяє на основі початкової інформації задачі безпосередньо знаходити оптимальну структуру передаточної функції $F_{u_0}^{\Psi_0}$ замкненої системи стабілізації. В виразах (6) і (7) матриці Γ_0 і D_0 мають особливості тільки в лівій на півплощині (ЛНП), а матриця $(N_0 + N_+)$ - результат сепарації матриці (8), має полюси також в ЛНП.

Визначив оптимальну $F_{u_0}^{\Psi_0}$, а потім на основі рівнянь зв'язку знайдемо матриці оптимальних передаточних функцій замкненої системи корекції руху. При цьому показник якості системи досягне свого мінімального значення, яке можна буде обчислити, підставивши в вираз (2) оптимальну передаточну функцію (10) у вигляді матриці.

Отже, задача вибору оптимальної структури двоконтурної системи стабілізації руху ГС вирішена, а вирази (3), (4)-(7) становлять алгоритм пошуку оптимальної структури і коефіцієнтів системи корекції, що проектується.

Використаємо наведений алгоритм для рішення задачі синтезу оптимальної структури системи корекції одновісного ГС, зображеного на рис.2.

Нехай система диференціальних рівнянь, що описує динамічні властивості одновісного ГС і враховує тільки прецесійний рух має вигляд $-H_s\beta = k_1u_1 + M_\eta$,

$$H_s\alpha = k_2u_2 + M_\xi. \quad (8)$$

Спектральні щільності завад датчиків кутів які побудована за результатами експерименту зображені на рис.3.

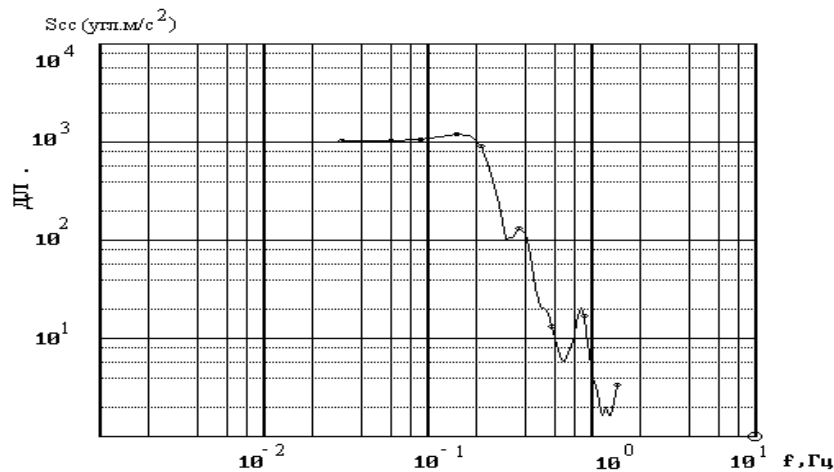


Рис.3. Спектральна щільність завад датчиків кутів

Результат апроксимації спрощеними аналітичними залежностями має вигляд:

$$S_{cc} = \left| \frac{1}{T^2 s^2 + 2\xi Ts + 1} \right| \quad (9)$$

Якщо переписати систему (8) у вигляді (1), то:

$$P_1 = \begin{bmatrix} 0 & -H_s \\ H_s & 0 \end{bmatrix}; \quad M_1 = \begin{bmatrix} k_1 \\ k_2 \end{bmatrix}; \quad (10)$$

$$\Psi = \begin{bmatrix} M_\eta \\ M_\xi \end{bmatrix}; \quad x_1 = \begin{bmatrix} \alpha \\ \beta \end{bmatrix}; \quad u = \begin{bmatrix} u_1 \\ u_2 \end{bmatrix};$$

Матриці вагових коефіцієнтів дорівнюють:

$$R = \begin{bmatrix} \mu_1 & 0 \\ 0 & \mu_2 \end{bmatrix}; \quad C = \lambda.$$

Передаточні функції датчиків кутів дорівнюють:

$$K = \begin{bmatrix} K_1 & 0 \\ 0 & K_2 \end{bmatrix}; \quad y = Kx_1.$$

Таким чином, вся початкова інформація задана, а задача зведена до синтезу системи стабілізації.

Використовуючи алгоритм (4) і виконав операцію факторизації матриці (5), (6) і сепарації (7) обчислимо передаточні функції замкненої системи по управлінню і по збуренню відповідно:

$$F_u^y = -\frac{1}{k} \frac{\begin{pmatrix} 0, \frac{bk_1\sqrt{\mu_1}}{k_2} s + 1 \end{pmatrix}}{\begin{pmatrix} \frac{\sqrt{\lambda} H k_2}{k_1\sqrt{\mu_1}} s + 1 \end{pmatrix}}$$

де

$$b = \frac{k_2 T_H}{k\sqrt{\mu_1}} = -\frac{T_H^2}{\left(\sqrt{\lambda} H + \frac{k_1}{k_2} \sqrt{\mu_1} T_H\right)};$$

$$F_y^y = \begin{bmatrix} 0 & \frac{\left(\frac{\sqrt{\lambda} H k_2}{k_1\sqrt{\mu_1}} - \frac{bk_1\sqrt{\mu_1}}{k_2}\right)}{H\left(\frac{\sqrt{\lambda} H k_1}{k_1\sqrt{\mu_1}} s + 1\right)} \\ -\frac{1}{H_s} & 0 \end{bmatrix}.$$

Матриця передаточних функцій оптимальної системи корекції дорівнює

$$W = F_u^y F^{-1}_{y^y} = \begin{bmatrix} -\frac{H_s}{k_1} \frac{\begin{pmatrix} \frac{bk_1\sqrt{\mu_1}}{k_2} s + 1 \end{pmatrix}}{\begin{pmatrix} \frac{\sqrt{\lambda} H k_2}{k_1\sqrt{\mu_1}} - \frac{bk_1\sqrt{\mu_1}}{k_2} \end{pmatrix}}, 0 \end{bmatrix}. \quad (11)$$

Мінімальне значення функціоналу якості обчислимо підставив вираз (11) в (2).

З виразу (11) бачимо, що при такому спрощеному синтезу оптимального регулятора отримаємо не просто пропорційну $W = k$ ланку, а маємо більш складний вид з диференціюванням.

Висновки

В рамках проведеного дослідження здійснено комплексний аналіз динамічних характеристик об'єкта стабілізації. Детально вивчено вплив зовнішніх збурень, у тому числі їх стохастичних та детермінованих (систематичних) складових, з урахуванням специфіки вимірювальних трактів та наявності перехресних зв'язків, притаманних багатовимірним системам. Спираючись на отримані дані, було застосовано новітні методи структурної ідентифікації у поєднанні зі спектральними алгоритмами оптимального синтезу. Це забезпечило побудову адекватних математичних моделей об'єкта та дозволило науково обґрунтувати вибір найбільш дієвих законів керування. Крім того, застосування апарату стохастичної фільтрації та методів оцінювання вектору стану дало можливість ефективно нівелювати вплив випадкових завад, що у підсумку суттєво підвищило загальну точність системи.

Список використаної літератури:

1. Блохін Л.М., Кривоносенко О.П. та ін. Статистична динаміка систем управління – Підручник для студентів ВНЗ. – К : НАУ, 2014. – 300 с.
2. Азарсков В.М., Блохін Л.М., Житецький Л.С., Методологія конструювання оптимальних систем стохастичної стабілізації. – Монографія. – К.: НАУ, 2006. – 437с
3. Синтез систем управління безпілотними літальними апаратами / В. М. Синєглазов та ін. Київ : НАУ, 2019. 320 с.

4. Луковський О.А., Морозов О.В. Моделювання та ідентифікація динамічних характеристик просторового руху БПЛА. Озброєння та військова техніка. 2021. № 1(29). С. 45–52.
5. Quan Q. Introduction to Multicopter Design and Control. Singapore : Springer, 2017. 377 p. URL: <https://doi.org/10.1007/978-981-10-3382-7>.
6. Robust Active Disturbance Rejection Control for a Two-Axis Gyrostabilized Platform / J. Li, et al. IEEE Access. 2020. Vol. 8. P. 11234–11245. URL: <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2020.2965412>.
7. Stochastic Optimal Control of UAVs in Turbulent Atmosphere / M. Smith, T. Jones. Journal of Guidance, Control, and Dynamics. 2022. Vol. 45(3). P. 560–575.
8. Adaptive filtering and stochastic identification for moving objects / A. Brown, D. White. Control Engineering Practice. 2023. Vol. 130. 105362. URL: <https://doi.org/10.1016/j.conengprac.2022.105362>.

Автори статті

Мельник Юрій – доктор технічних наук, професор, Державний університет інформаційно-комунікаційних технологій, Київ, Україна.

ORCID:0000-0002-5028-8749

Кривоносенко Олександр – кандидат технічних наук, доцент, Національний університет «Київський авіаційний інститут», Київ, Україна.

ORCID:0009-0001-0290-4092

Юрченко Олексій – асистент, Національний університет «Київський авіаційний інститут», Київ, Україна.

ORCID:0009-0007-5309-1590

Бахтіяров Денис – кандидат технічних наук, доцент, Національний університет «Київський авіаційний інститут», Київ, Україна.

ORCID:0000-0003-3298-4641

Authors of the article

Melnyk Yuriy – Doctor of Sciences (technical), Professor, State University of Information and Communication Technologies, Kyiv, Ukraine.

ORCID:0000-0002-5028-8749

Kryvonosenko Oleksandr – Candidate of Sciences (technical), Associate Professor, Kyiv Aviation Institute National University, Kyiv, Ukraine.

ORCID:0009-0001-0290-4092

Yurchenko Oleksiy – assistant, Kyiv Aviation Institute National University, Kyiv, Ukraine.

ORCID:0009-0007-5309-1590

Denys Bakhtiarov – Candidate of Sciences (technical), Associate Professor, Kyiv Aviation Institute National University, Kyiv, Ukraine.

ORCID:0000-0003-3298-4641

Надійшла до редакції: 11.03.2026

Прийнята до друку: 14.04.2026

Опубліковано: 25.05.2026

© 2026 Мельник Ю.В., Кривоносенко О.П., Юрченко О.М., Бахтіяров Д.І.

Цей матеріал ліцензовано за умовами CC BY 4.0. <https://creativecommons.org/licenses/by/4.0>