

ІНТЕЛЕКТУАЛІЗОВАНА СИСТЕМА КЕРУВАННЯ БЕЗПІЛОТНИМИ ЛІТАЛЬНИМИ АПАРАТАМИ

В роботі представлено інтелектуалізовану систему керування безпілотними літальними апаратами. В її основі лежить застосування апарату нечіткої логіки, імплементація якої в контролер безпілотного літального апарату дозволила відстежувати та керувати траєкторію його руху. Проведені експериментальні дослідження доводять ефективність застосування апарату нечіткої логіки для керуванням дрону в умовах здійснення зовнішніх впливів.

Ключові слова: безпілотний літальний апарат, дрон, PID-контролер, система керування.

LYSENKO S., RUMIANTSEV S.
Khmelnitskiy National University

INTELLECTUALIZED CONTROL SYSTEM FOR UNMANNED AERIAL VEHICLE

The paper presents an intellectualized control system for unmanned aerial vehicles. It is based on the use of the fuzzy logic, implementation of which in the Controller of the unmanned aerial device allowed to track and control the trajectory of its movement. The experimental researches prove the efficiency of the device application of fuzzy logic for control of the drone in conditions of external influences implementation. To construct an intellectualized control system of unmanned aerial vehicles, their structure was considered. The base of the system is used for quad-unmanned aerial vehicle, which includes four screws, located symmetrically around the central building. The peculiarity of the drone is that its adjacent screws must spin the opposite one from each other. This requirement is explained by the need to prevent system rotation around its own central axis. Depending on the required trajectory, an important aspect was the ability to set different values of the power of the drone engines. Despite the fact that the simplicity of its structure are characterized, they are able to implement a large set of motion models together with a demonstration of high maneuverability. It is reached the presence of six degrees of freedom, which consist of three progressive and three rotating components to set the trajectory of a movement. In order to solve this problem it was possible to solve the apparatus of fuzzy logic as the basis of mathematical model of the system. This allowed to ensure a vague logical control of the fog, and, in turn, intellectualize the behavior of drone in the air in the conditions of external influences on the change of a predetermined trajectory of its movement. At the heart of the Intellectualized unmanned Aerial vehicle control system, two fuzzy controllers were involved in the production of control signals for the command of a UAV flight height and an angle of inclination.

Keywords: Unmanned aerial vehicle, drone, PID-controller, control system.

Вступ. Безпілотні літальні апарати (БЛА) - літальні апарати, який літають без фізичної присутності пілота на його борту – за останні десять років широко використовуються в багатьох сферах: від побутових задач до військових цілей [1]. Історично БЛА вперше був застосований для місії у військових завданнях, таких як оцінка бою та розвідка авіабази. Сьогодні використання безпілотних літальних апаратів (дронів) розширено до комерційних, наукових, сільськогосподарських та інших сфер. Дрони знайшли своє застосування в системах стеження, доставки, моніторингу сільськогосподарських угідь, оцінки збитку після стихійних лих [2], виявлення жертв [3], і аерофотографії, оскільки вони добре підходять для оснащення різних давачів на борту, є швидкими і характеризуються високою маневреністю платформи [4].

Широкий спектр застосування БЛА полягає в їх простоті побудови та маневреності.

Виходячи з того, що інтерес до БЛА характеризується постійним зростанням, сьогодні вони мають ряд суттєвих недоліків, таких як недостатньо велика вантажопідйомність і малий час польотів. Іншим аспектом, який необхідно ґрунтовно досліджувати є проблема стійкості та оптимального керування, оскільки вони нестійкі до зовнішніх впливів.

Тому актуальною задачею є розроблення інтелектуалізованої система керування безпілотними літальними апаратами, здатна адаптивно реагувати на зовнішні впливи, що здатні змінювати траєкторії руху дронів.

Пов'язані роботи. У сучасній науковій літературі присутня велика кількість наукових праць, які в тій чи іншій формі пропонують методи та засоби до вирішення вищевказаних недоліків.

Так, у [4] розглянуто алгоритм на основі клітинних автоматів для створення траєкторії руху БЛА з урахуванням ширини сліду на землі. В [5] запропонована система навігації БЛА на основі стандарту IEEE 802.15.4. В [6] запропоновано ієрархічну модель взаємодії мобільних давачів БЛА.

В [7] запропоновано математичну модель керування безпілотним літальним апаратом, що враховує дії оператора під час управління БЛА. Запропонована модель дає можливість більш глибокого, якісного та швидкого підбору належних значень параметрів руху, які необхідні для оптимальної та ефективної траєкторії руху БЛА.

У [8] запропоновано схему побудови комплексного навігаційного комплексу безпілотного літального засобу, основою якого є дві підсистеми- інерційні і повітряні. Для кожної підсистеми передбачена реалізація алгоритмів комплексної обробки навігаційної інформації від відповідних навігаційних датчиків та бортового обладнання системи глобального позиціонування на основі схеми неінваріантної компенсації. Логіка використання навігаційних вимірювань з обох підсистем відображає адаптацію навігаційного комплексу до умов польоту повітряного судна. Адаптивний навігаційний комплекс безпілотний літальний апарат

підвищує точність визначення навігаційних параметрів польоту, надійності та завадостійкості БЛА під час польоту.

В [9] розроблено систему керування траєкторією польотів дронів, яка включає в себе перевірку датчиків перед їх використанням. Експериментальні результати досліджень множини датчиків показали, що розроблена випробувальна апаратура дозволяє здійснювати калібрування мікромеханічних датчиків без необхідності виконання тестових рейсів, що знижує ризик пошкодження безпілотних літальних апаратів у разі значних похибок вимірювань.

Авторами роботи [10] запропоновано модель системи керування БЛА яка дає можливість надати інформацію для визначення об'єму, складу та виконання інтервалів використання БЛА, а також дозволяє врахувати зміну складових умов, що є в інтегрованому порядку, викликані експлуатаційним часом і терміном експлуатації (особливості експлуатації та зберігання).

Розроблені методи і даний алгоритм [11] дозволяють побудувати оптимальну траєкторію польоту БЛА над певними піками для того, щоб покрити найбільшу площу. Це мінімізує можливі ризики, пов'язані з невірним здійсненим польотом. Крім того, застосування методів мінімізує енергію і часові витрати.

У статті [12] розглянуто ортогональне проектування для вивчення чинників, що впливають на стабільність польоту БЛА. У статті [13] представлена система безпілотних літальних апаратів, та її інтеграція в IoT.

Розглянуті системи в переважній більшості вирішують завдання підвищення точності побудови траєкторії руху ПЛА, однак не мають можливостей до адаптивної корекції траєкторії, тому актуальною є задача розроблення інтелектуалізованої системи керування безпілотними літальними апаратами.

Інтелектуалізована система керування безпілотними літальними апаратами. Для побудови інтелектуалізованої системи керування безпілотними літальними апаратами розглянемо їх структуру. Зокрема, за основу системи використаємо квадрокоптер - безпілотний літальний апарат, що включає в себе чотири гвинти, розташовані симетрично навколо центрального корпусу.

Особливістю дрону є те, що його суміжні гвинти повинні обертатися протилежного один від одного. Ця вимога пояснюється необхідністю запобігання обертання системи навколо власної центральної осі. В залежності від необхідної траєкторії руху, важливим аспектом є здатність задання різних значень потужності двигунів дрону. Попри те, що ДЛА характеризуються простотою своєї структури, вони в процесі експлуатації здатні імплементувати велику множину моделей руху разом з демонстрацією високої маневреності. Це досягається наявністю шести ступенів вільності, які складаються з трьох поступальних та трьох обертових компонентів задання траєкторії руху ДЛА.

Схематичне представлення БЛА подано на рисунку 1.

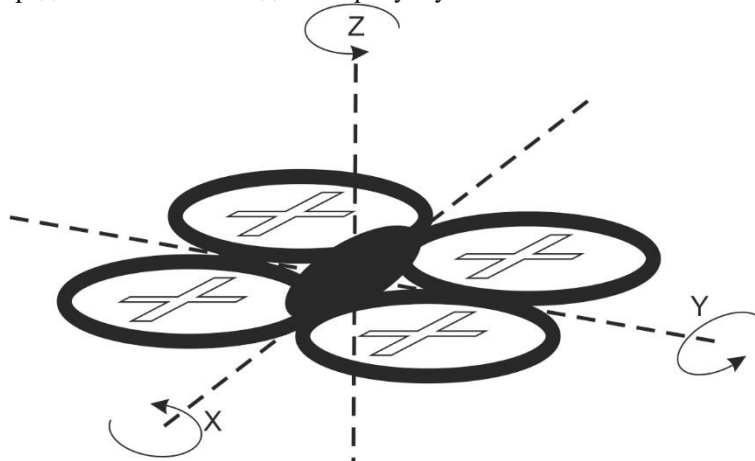


Рис. 1. Схеми БЛА

Представимо систему керування безпілотними літальними апаратами моделлю у вигляді кортежу параметрів:

$$F_{UAV} = (z, v_x, v_y, \theta, \varphi, \psi), \quad (1)$$

де z - висота від землі до БЛА в повітрі (м);

v_x - лінійна швидкість БЛА в напрямку x , (м/с);

v_y - лінійна швидкість безпілота у напрямку y , (м/с);

θ - кут нахилу БЛА по осі y , (рад);

φ - кут нахилу (крену) БЛА по осі x , (рад);

ψ - кут повороту БЛА навколо вертикальної осі z , (рад).

Розглянемо множину команд, які сприймає внутрішній контролер польотів безпілотного літального апарату. З цією метою подамо набір команди управління траєкторією руху БЛА кортежем:

$$C_{UAV} = (\xi_z, \xi_\psi, \xi_\theta, \xi_\varphi), \quad (2)$$

де ξ_z - команда задання лінійної швидкості в напрямку по осі z;
 ξ_ψ - команда задання кута повороту руху БЛА навколо вертикальної осі z;
 ξ_θ - команда задання висоти польоту БЛА по осі y;
 ξ_φ - команда задання кута нахилу (крену) БЛА по осі x.

Очевидно, що задання команд руху ξ_θ, ξ_φ реалізують поступальний рухи вздовж x- і y-напрямків відповідно. Тому для регулювання швидкостей дрона в необхідних напрямках застосуємо команд ξ_θ, ξ_φ , а для забезпечення орієнтації БЛА використовуватиметься команда ξ_ψ .

Вхідні та вихідні параметри системи керування БЛА представлено на рисунку 2.

Система керування ДЛА. Керування ДЛА є складною задачею, оскільки продуктивність контролера залежить від точності математичної моделі проєктованої системи. Відомі математичні моделі часто нехтують зовнішніми впливами, які в реальних умовах зазнає дрон в польоті (сила тяжіння, тертя повітря, сила вітру тощо).

Команди задання руху траєкторії БЛА

Множина параметрів БЛА

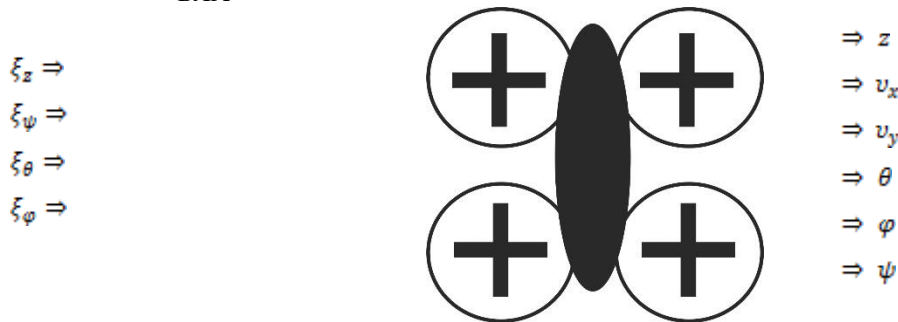


Рис. 2. Вхідні та вихідні параметри системи керування БЛА

Іншим аспектом, що суттєво впливає на зниження точності виконання заданої траєкторії, є шум при одержанні інформації з датчиків ДЛА. Це призводить до суттєвої невизначеності при практичному застосуванні дрону і необхідності адаптивної корекції траєкторії його руху.

З метою вирішення даної проблеми можливим її вирішення є застосування апарату нечіткої логіки як основи математичної моделі системи. Це дозволить забезпечити нечітке логічне керування ДЛА, і, в свою чергу інтелектуалізувати поведінку дрона в повітрі в умовах зовнішніх впливів на зміну заданої траєкторії його руху.

В основі інтелектуалізованої системи керування безпілотними літальними апаратами лежить побудова двох нечітких контролерів для продукції значень сигналів керування для:

ξ_θ - команда задання висоти польоту БЛА по осі y;
 ξ_φ - команда задання кута нахилу (крену) БЛА по осі x.

Функції належності для команд управління ξ_θ та ξ_φ подано на рисунку 3.

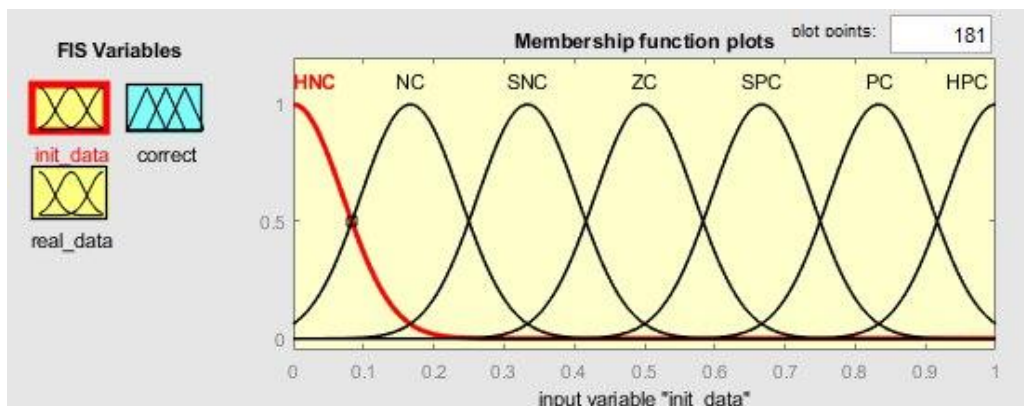


Рис. 3 Функції належності для команд управління ξ_θ та ξ_φ

У якості вхідної та вихідної лінгвістичних змінних для нечіткого керування БЛА X приймемо ім'я: «Ступінь корегування траєкторії» дрону, значення якої буде визначатися на етапі його експлуатації в умовах зовнішніх впливів. Для прийнятих лінгвістичних змінних визначимо терм-множини і функції належності. Терм-множини значень керуючого сигналу приймемо наступним чином: «High negative correction (HNC)», «Negative correction (NC)», «Slight negative correction (SNC)», «Zero correction (ZC)», «Slight positive

correction (SPC)», «Positive correction (PC)», «High positive correction (HPC)», з областю визначення [0,1].

Для генерації команд управління ξ_θ та ξ_φ відповідний нечіткий контролер має два входи, які, в свою чергу, оперують значеннями для формування траєкторії польоту в x- або y-напрямку:

- початкові значення (σ_x, σ_y) ;
- та скореговані під впливом зовнішніх чинників (σ'_x, σ'_y) .

Інтелектуалізована система керування безпілотними літальними апаратами керується множиною правил нечітких продукцій (ПНП). Кожне із правил має деяку вагу $F_i = [0,1]$, що визначає значимість правила або впевненість у ступені істинності висновку, який отримується за окремим нечітким правилом. В дослідженні було залучено двадцять п'ять правил нечітких продукцій, приклади яких подано нижче:

П.1. If (σ_x, σ_y) is HNC and (σ'_x, σ'_y) is HNC then HPC (1);

П.2. If (σ_x, σ_y) is HNC and (σ'_x, σ'_y) is NC then PC (1);

.....
 П.25. If (σ_x, σ_y) is HPC and (σ'_x, σ'_y) is HPC then HNC (1).

Дефазифікація, тобто процедура одержання чисельного значення для прийняття остаточного рішення щодо корегування траєкторії руху дрона було виконано за допомогою застосування методу центра тяжіння.

Експерименти. Для оцінки ефективності застосування апарату нечіткої логіки для побудови інтелектуалізованої системи керування безпілотними літальними апаратами було проведено ряд експериментальних досліджень. З цією метою було проаналізовано поведінку дрона без та із зовнішнім впливом (вітром) як без залучення нечіткого керування, так і з ним. Як приклад траєкторії руху було обрано прямокутник. Для здійснення експериментальних досліджень поведінки дрона без зовнішніх впливів було два PID-контролери використовувались для генерації команд управління ξ_θ та ξ_φ . Для стабілізації траєкторії сигнал контролера визначається трьома компонентами K_P , K_I , K_D – коефіцієнти підсилення пропорційної, інтегральної та диференційних складових PID контролера.

Значення параметрів для експериментів подано в таблиці 1, а траєкторія польоту дрона подана рис. 4.

Таблиця 1.

Значення параметрів PID контролера

Параметр PID контролера	Значення параметра (розрахункові)	Значення параметра (з уточненням)
K_P ,	0,41	0,56
K_I	0,06	0,02
K_D	0,07	0,12

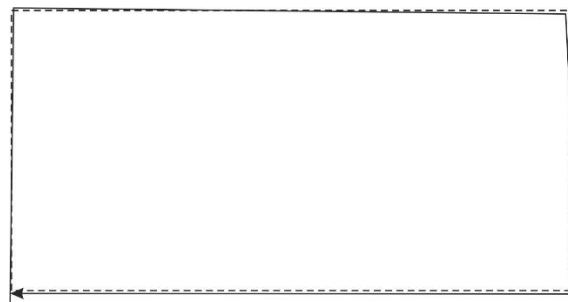


Рис. 4. Траєкторія польоту дрона без зовнішніх впливів

Модель керування дроном в середовищі Simulink Matlab [14] подано на рисунку 5.

Наступний експеримент полягав у дослідженні поведінки дрон в польоті із зовнішнім впливом вітру. Результати моделювання, отримані на основі застосування нечіткого логічного контролера, представлені на рисунку 6.

Результати експериментальних досліджень продемонстрували, що залучення нечітких контролерів дуже наближені до необхідної еталонної траєкторії руху дрона, і демонструють вищу точність у порівнянні зі стоковим PID контролером.

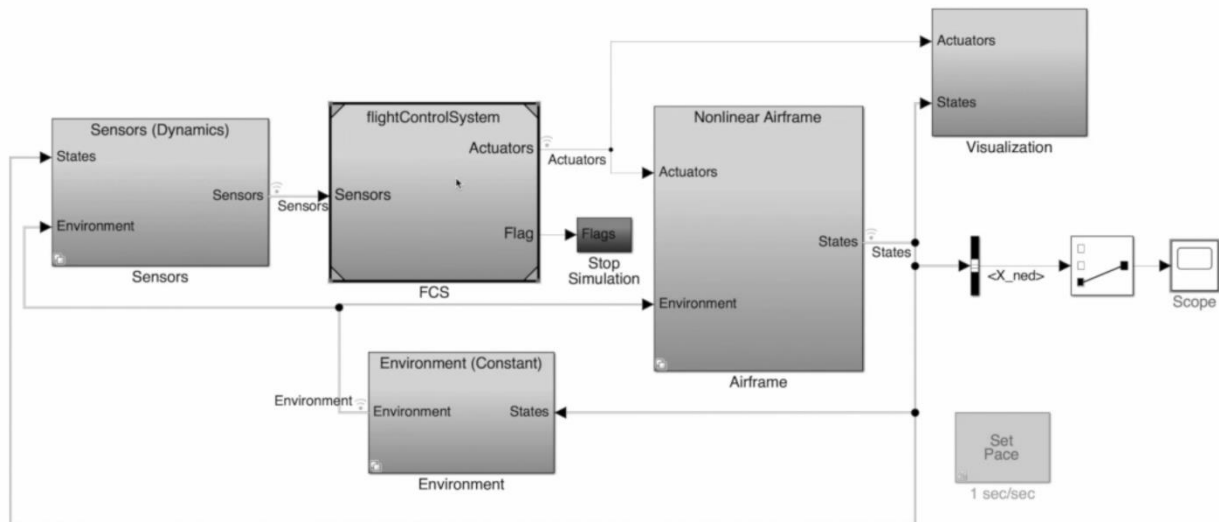


Рис. 5. Модель керування дроном в середовищі Simulink Matlab

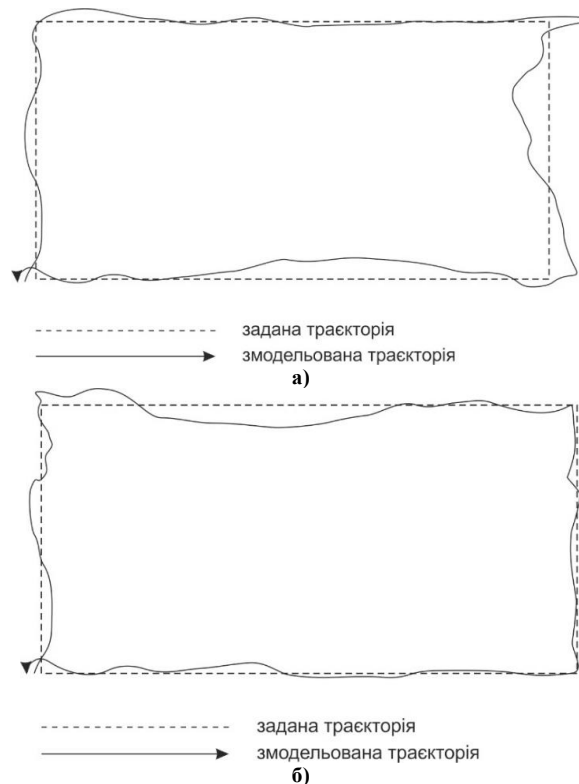


Рис. 6. Траєкторія польоту: а) без використання нечіткого контролера; б) з використанням нечіткого контролера: без з урахуванням впливу вітру

Висновки. В роботі представлена інтелектуалізована система керування безпілотними літальними апаратами. В її основі лежить застосування апарату нечіткої логіки, імплементація якої в контролер БЛА дозволила відстежувати та керувати траєкторію його руху.

Проведені експериментальні дослідження доводять ефективність застосування апарату нечіткої логіки для керуванням дрону в умовах здійснення зовнішніх впливів.

Як розвиток запропонованої інтелектуалізованої системи керування безпілотними літальними апаратами подальші наукові дослідження може бути залучення штучних нейронних мереж для підвищення точності траєкторії дронів.

Література

1. A. Prayitno, V. Indrawati, and G. Utomo, "Trajectory tracking of ar.drone quadrotor using fuzzy logic controller," TELKOMNIKA (Telecommunication Computing Electronics and Control), vol. 12, no. 4, pp. 819–828, 2014.
2. J. A. Paredes, J. González, C. Saito and A. Flores, "Multispectral imaging system with UAV integration capabilities for crop analysis," 2017 First IEEE International Symposium of Geoscience and Remote Sensing (GRSS-CHILE), Valdivia, 2017, pp. 1-4, doi: 10.1109/GRSS-CHILE.2017.7996009.222

3. A. V. Skripets, A. G. Sytnyk, A. A. Polozhevets and M. O. Onyshchuk, "Optimal aerospace monitoring by means of UAV intelligent control," 2013 IEEE 2nd International Conference Actual Problems of Unmanned Air Vehicles Developments Proceedings (APUAVD), Kiev, 2013, pp. 181-183, doi: 10.1109/APUAVD.2013.6705319.
4. Z. Song, H. Zhang, F. Liu, S. Chen and F. Zhang, "Unmanned Aerial Vehicle Coverage Path Planning Algorithm Based on Cellular Automata*," 2018 International Conference on Information Systems and Computer Aided Education (ICISCAE), Changchun, China, 2018, pp. 371-374, doi: 10.1109/ICISCAE.2018.8666895.
5. V. M. Sineglazov and E. V. Daskal, "Unmanned aerial vehicle navigation system based on IEEE 802.15.4 standard radiounits," 2017 IEEE 4th International Conference Actual Problems of Unmanned Aerial Vehicles Developments (APUAVD), Kiev, 2017, pp. 241-244, doi: 10.1109/APUAVD.2017.8308820.
6. Romanyuk, V. A., & Sova, O. Y. (2015). The hierarchical control system model of wireless sensor networks using unmanned aerial vehicles. 2015 IEEE International Conference Actual Problems of Unmanned Aerial Vehicles Developments (APUAVD). doi:10.1109/apuavd.2015.7346609
7. Kharchenko, V., Matychuk, D., & Babenko, A. (2017). Mathematical model of unmanned aerial vehicle control in manual or semiautomatic modes. 2017 IEEE 4th International Conference Actual Problems of Unmanned Aerial Vehicles Developments (APUAVD). doi:10.1109/apuavd.2017.8308771
8. Zakharin, F., & Ponomarenko, S. (2017). Unmanned aerial vehicle integrated navigation complex with adaptive tuning. 2017 IEEE 4th International Conference Actual Problems of Unmanned Aerial Vehicles Developments (APUAVD). doi:10.1109/apuavd.2017.8308768
9. Vasylenko, M. P. (2017). Testing system for unmanned aerial vehicles microelectromechanical sensors. 2017 IEEE 4th International Conference Actual Problems of Unmanned Aerial Vehicles Developments (APUAVD). doi:10.1109/apuavd.2017.8308804
10. Chepizhenko, V. I., & Tryzna, O. O. (2015). Maintenance planing optimisation of Unmanned Aerial systems. 2015 IEEE International Conference Actual Problems of Unmanned Aerial Vehicles Developments (APUAVD). doi:10.1109/apuavd.2015.7346577
11. Barabash, O., Dakhno, N., Shevchenko, H., & Sobchuk, V. (2019). Unmanned Aerial Vehicles Flight Trajectory Optimisation on the Basis of Variational Inequality Algorithm and Projection Method. 2019 IEEE 5th International Conference Actual Problems of Unmanned Aerial Vehicles Developments (APUAVD). doi:10.1109/apuavd47061.2019.8943869
12. Hu, X., & Huang, X. (2017). Orthogonal design and optimization of flight stability test for the quadrotor unmanned aerial vehicle. 2017 IEEE International Conference on Unmanned Systems (ICUS). doi:10.1109/icus.2017.8278366
13. E. Vlasceanu, D. Popescu and L. Ichim, "Ground Control Station for an Unmanned Aerial Vehicle Integrated in IoT," 2018 10th International Conference on Electronics, Computers and Artificial Intelligence (ECAI), Iasi, Romania, 2018, pp. 1-6, doi: 10.1109/ECAI.2018.8679050
14. MATLAB Simulink. URL: <https://uk.mathworks.com/help/simulink/simulink-environment.html>. (дата звернення: 31.07.2020).

Надійшла / Paper received: 06.08.2020
Надрукована / Paper Printed : 02.09.2020