

УДК 623.746-519:[629.7.015:551.5]

**МОДЕЛЮВАННЯ ВПЛИВУ ЗОВНІШНІХ ФАКТОРІВ
НА СТАБІЛЬНІСТЬ ТА ГЕОМЕТРІЮ СВІТЛОВИХ ФІГУР
У ПОЛЬОТІ ГРУПИ БПЛА**

Прасол І.В., Хабарова В.Г.

е-mail: valeriia.kozhevnykova@nure.ua

Харківський національний університет радіоелектроніки, каф. ПЕЕА,
м. Харків, Україна

This paper explores the critical impact of environmental factors, particularly wind speed and atmospheric turbulence, on the structural integrity of drone-formed light displays in the night sky. As drones show transition from static logos to complex 3D animations, maintaining precise positioning becomes a significant engineering challenge. The research analyzes how external disturbances affect the Real-Time Kinematic (RTK) GPS accuracy and the overall visual coherence of the swarm. By comparing idealized digital trajectories with actual flight data, the study identifies the threshold of wind resistance beyond which geometric distortion occurs. Furthermore, the paper evaluates the effectiveness of automated compensation algorithms in maintaining formation stability during unpredictable weather shifts. The findings suggest that integrating real-time meteorological sensor data is essential for ensuring the safety and aesthetic quality of large-scale aerial performances. Ultimately, this work provides practical recommendations for mission planning under varying climatic conditions.

Вплив погодних умов є важливим фактором для стабільності та геометрії світлових фігур у ройових польотах БПЛА, особливо під час дрон-шоу. У таких виступах десятки або сотні дронів формують у небі складні фігури, тому кожен апарат повинен точно утримувати задану координату. Найбільш критичним фактором є вітер, який змінює траєкторію руху дрона та змушує систему керування постійно коригувати його положення.

На зображенні (рис. 1) показано порівняння ідеальної моделі світлової фігури в програмі планування польоту та її реального виконання в небі. У реальних умовах через вітер, турбулентність і похибки навігації можливі невеликі зміщення дронів, що може призводити до деформації геометрії фігури.

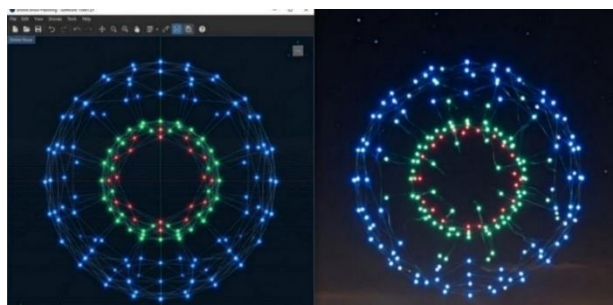


Рис. 1 – Порівняння 3D-моделі
світлової фігури та реального положення дронів у небі

Під час світлових шоу або ройових польотів БПЛА важливо забезпечити високу точність позиціонування кожного дрона. Для цього використовуються GNSS-модулі (GPS/RTK), інерціальні модулі (IMU), барометри, магнітometri та системи стабілізації польоту, які формують єдину навігаційну систему. Проте погодні умови можуть впливати як на стабільність польоту, так і на візуальне сприйняття світлових фігур.

У таблиці 1 наведено вплив основних погодних факторів на геометрію світлових фігур та методи їх компенсації.

Таблиця 1 – Вплив погодних умов на роботу сенсорів та стабільність світлових фігур БПЛА

Погодний фактор	Вплив на зображення	Метод компенсації
Вітер (понад 5 м/с)	Викривлення ліній фігури, зміщення дронів від заданих координат.	Збільшення тяги двигунів, активна стабілізація та корекція координат за допомогою RTK.
Туман / Вологість	Розмиття світла, поява ефекту ореолу навколо світлодіодів.	Зниження інтенсивності білого кольору, використання контрастних кольорів.
Низька температура	Скорочення часу польоту через зниження ємності акумуляторів.	Попередній підігрів акумуляторів, скорочення тривалості шоу.

Вплив вітру.

Вітер є одним із головних факторів, що впливають на стабільність польоту дронів. Пориви повітря можуть відхиляти апарат від заданої точки, що призводить до викривлення світлових фігур. Для компенсації цього контролер аналізує дані з IMU та GPS/RTK і коригує роботу двигунів, що дозволяє досягти точності позиціонування на рівні кількох сантиметрів.

Вплив туману та вологості.

Туман і висока вологість впливають переважно на візуальне сприйняття світла. Світло світлодіодів розсіюється у краплях води, утворюючи ефект ореолу. Для зменшення цього ефекту знижують інтенсивність білого світла та використовують контрастні кольори.

Вплив низької температури.

Низька температура зменшує ємність літій-полімерних акумуляторів і скорочує час польоту, тому застосовують попередній підігрів батарей або зменшують тривалість шоу.

Для аналізу впливу вітру будують графік (рис. 2) залежності відхилення дрона від заданої точки від швидкості вітру: по осі X — швидкість вітру (м/с), по осі Y — відхилення від координати (см).

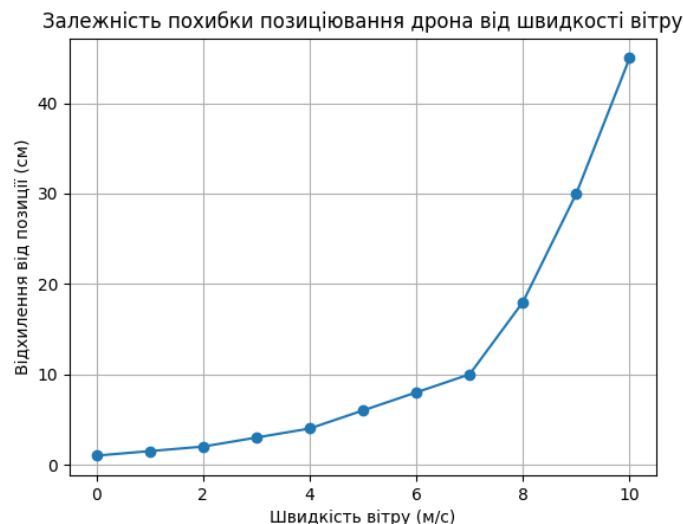


Рис. 2 – Графік залежності похибки позиціонування дрона від швидкості вітру

Можна побачити, що при швидкості приблизно 7 м/с система стабілізації дрона ефективно компенсує впливи, тому похибка невелика. Після перевищення цієї швидкості відхилення швидко зростає, оскільки автоматика вже не повністю компенсує пориви вітру.

На графіку видно, що при малому вітрі відхилення становить лише кілька сантиметрів. У діапазоні 5–7 м/с похибка поступово збільшується, але форма фігури зберігається. При більшій швидкості відхилення різко зростає, що може деформувати фігуру, тому під час дрон-шоу зазвичай встановлюють граничну швидкість вітру 6–8 м/с.

Список використаних джерел:

1. DJI. DJI Developer Documentation: Flight Control and GNSS Positioning Systems [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://developer.dji.com>
2. Federal Aviation Administration. Unmanned Aircraft Systems Weather Considerations [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://www.faa.gov>.
3. Intel. Intel Drone Light Shows: Technology and Swarm Control [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://www.intel.com>
4. Zhang C., Kovac M. Swarm Control and Formation Flight of Multiple UAVs // IEEE Robotics and Automation Letters. – 2020. – Vol. 5, № 2. – P. 1123–1130.
5. I. Prasol, O. Dovnar, O. Yeroshenko. Method of Diagnostic Parameters Analysis and Software Features // 2022 IEEE 3rd KhPI Week on Advanced Technology (KhPI Week) October 03 – 07, 2022. Conference proceedings. Pp. 716–719.