Єна Максим Вікторович, аспірант

Національний аерокосмічний університет «Харківський авіаційний інститут»,

https://orcid.org/0009-0006-0664-3244

**МОДЕЛЮВАННЯ ПОВІТРЯНОГО ПРОСТОРУ З УРАХУВАННЯМ РІЗНИХ КАТЕГОРІЙ БЕЗПІЛОТНИХ ЛІТАЛЬНИХ АПАРАТІВ**

У зв’язку зі зростанням кількості безпілотних літальних апаратів (БПЛА) у повітряному просторі та диверсифікацією їх функціонального призначення, виникає необхідність розробки високоточних математичних моделей, здатних адекватно відображати динаміку руху БПЛА з урахуванням їхніх технічних характеристик, сценаріїв експлуатації та взаємодії з іншими повітряними об’єктами. Особливу складність становить необхідність забезпечення безпеки та ефективності використання повітряного простору в умовах одночасної присутності БПЛА різних типів.

Метою даної роботи є формалізація ключових параметрів моделювання повітряного простору для різних категорій БПЛА та системна класифікація обмежень, що накладаються технічними, аеродинамічними та експлуатаційними характеристиками безпілотних платформ.

**1. Ідентифікація ключових параметрів для моделювання**

При формуванні моделей повітряного простору важливо ураховувати наступні параметри, які суттєво впливають на точність і адекватність симуляцій:

* **Категорія БПЛА (за ICAO/FAA/EASA):** визначає обмеження по вазі, висоті польоту, швидкості та зоні експлуатації. Відповідно до класифікації, виділяють micro (до 250 г), small (до 25 кг), medium (до 150 кг) та large (>150 кг) БПЛА.
* **Аеродинамічні характеристи**ки: коефіцієнти підйомної сили, лобового опору, маневрові обмеження, радіус розвороту тощо, критичні для побудови траєкторного профілю. Тип рушія та енергетичні характеристики: впливають на тривалість польоту, радіус дії та можливість екстреного маневрування.
* **Точність навігаційної системи:** ступінь точності позиціювання (GNSS, RTK, SLAM тощо) визначає допустимий радіус відхилення від запланованої траєкторії.
* **Тип зв’язку (BLOS/VLOS, LTE/5G, SATCOM):** обумовлює затримку команд, наявність зон зв’язку та впливає на можливість централізованого управління.
* **Модель навколишнього середовища:** щільність забудови, орографія місцевості, наявність зон обмежень (NFZ, CTR, ADIZ), погодні умови.
* **Механізми взаємодії з UTM-системами:** стандартизовані інтерфейси обміну даними, динамічне резервування маршрутів, алгоритми уникнення конфліктів [1].

**2. Виявлення обмежень та особливостей за категоріями БПЛА**

Різні категорії БПЛА накладають суттєві обмеження на структуру повітряного простору, потребуючи диференційованого підходу до побудови моделей. Розглянемо основні з них:

**2.1. Мікро- та малі БПЛА (до 25 кг)**

* Зазвичай працюють у межах VLOS (Visual Line of Sight) до 120 м.
* Висока щільність польотів в урбанізованих зонах.
* Низька інерційність, але висока чутливість до метеоумов.
* Вимагають моделювання в умовах складного рельєфу і середовища з численними перешкодами.

**2.2. Середні БПЛА (25–150 кг)**

* Часто використовуються для розвідки, спостереження, картографування.
* Потребують частково автономного управління.
* Працюють у вертикальних шарах повітря між 150–600 м, що вимагає створення буферних зон для уникнення конфліктів із мікро-БПЛА та традиційною авіацією.

**2.3. Великі БПЛА (>150 кг)**

* Підлягають більш жорсткому регулюванню (включно з сертифікацією як пілотовані апарати).
* Використовують повітряні коридори на висотах 600–3000 м.
* Вимагають інтеграції з ATM (Air Traffic Management) системами та моделювання ризиків для населення у разі втрати керування [2].

**2.4. БПЛА зі змінною геометрією / вертикального злету**

* Потребують моделювання фаз переходу між режимами польоту (VTOL ↔ горизонтальний політ).
* Впливають на розрахунок аеродинамічної стабільності та навігаційних сценаріїв.

**Висновки**

Комплексне моделювання повітряного простору з урахуванням різних типів БПЛА вимагає міждисциплінарного підходу, що поєднує:

* **Системний аналіз повітряного середовища** — побудова багаторівневих моделей з урахуванням вертикального розподілу, динамічних зон ризику, регламентованих маршрутів.
* **Використання адаптивних алгоритмів** — динамічна маршрутизація, побудова сценаріїв реагування на надзвичайні ситуації, підтримка еволюційної реконфігурації повітряного простору.
* **Інтеграція з UTM/ATM системами** — забезпечення повної сумісності моделей із системами розподілу повітряного трафіку для запобігання конфліктів та забезпечення надійності [3].

Подальші дослідження повинні бути спрямовані на розробку математичних моделей симуляції повітряного трафіку із залученням елементів дискретно-подієвого моделювання, агентно-орієнтованих систем і методів машинного навчання для прогнозування поведінки БПЛА в умовах динамічно змінюваного середовища.

**СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ**

1. Zhao, P., Erzberger, H., & Liu, Y. (2021). Multiple-Aircraft Conflict Resolution under Uncertainties. Journal of Guidance, Control, and Dynamics, 44(11), 2031–2049. DOI: <https://doi.org/10.2514/1.G005825>
2. Qian, W., Yi, W., Yuan, S., & Guan, J. (2025). Control-Oriented Real-Time Trajectory Planning for Heterogeneous UAV Formations. Drones, 9(2), 78. DOI: <https://doi.org/10.3390/drones9020078>
3. Thipphavong, D. P., Apaza, R. D., Barmore, B. E., et al. (2018). Urban Air Mobility Airspace Integration Concepts and Considerations. NASA Technical Memorandum NASA/TM-2018-219822.  
   Онлайн доступ: <https://ntrs.nasa.gov/citations/20180005218>