

УДК 004.94

*Олексюк О.С., магістрант**Марчук Г.В., ст. викладач**Бродський Ю.Б., к.т.н., доцент**Державний університет «Житомирська політехніка»*

АНАЛІЗ ГІБРИДНОГО АЛГОРИТМУ ПЛАНУВАННЯ ТРАЄКТОРІЇ ЛЕТАЛЬНОГО АПАРАТА

Планування траєкторії - ключове завдання автоматизованого керування літальними апаратами. Воно передбачає пошук оптимального маршруту, що забезпечує досягнення мети з урахуванням динамічних обмежень (швидкість, прискорення, кути крену). Актуальність проблеми полягає в необхідності створення ефективних алгоритмів, здатних будувати траєкторію в режимі реального часу, враховуючи як динаміку самого літального апарату, так і навколишнє середовище [1]. Дослідження зосереджено на аналізі та математичному обґрунтуванні гібридного алгоритму планування траєкторії, що поєднує кінодинамічний підхід з критеріями енергетичної ефективності та мінімізації стохастичного ризику.

Основна увага зосереджена на дослідженні гібридного алгоритму планування траєкторії, який поєднує кінодинамічний підхід із критеріями енергоефективності та мінімізації стохастичних ризиків. Метод об'єднує аналітичні моделі руху з евристичними алгоритмами для пошуку оптимальної траєкторії з урахуванням динаміки літака та зовнішньої невизначеності. Такий підхід забезпечує адаптивність системи до змінних умов середовища, зокрема поривів вітру, турбулентності, падіння уламків чи рухомих перешкод.

Керування рухом літального апарату формально описується диференціальним рівнянням:

$$\dot{x} = f(x, u, t), \quad (1)$$

де x - вектор стану, що включає просторову позицію та кути орієнтації, а керуючі дії u , які формують траєкторію $x(t)$, визначаються тягою та аеродинамічними кутами.

Задача планування траєкторії полягає у визначенні оптимальної траєкторії $x(t)$ у тривимірному просторі, який проходить через область F (вільну від перешкод), тобто $x(t) \in F$, і з'єднує початковий x_0 та кінцевий x_f стани.

Оптимізація прогнозованої траєкторії здійснюється за кількома критеріями. Загальна цільова функція (J_{total}) мінімізує енергоспоживання (J_{energy}), мінімізує ризик зіткнення (J_{risk}) та враховує час польоту (J_{time}):

$$J_{total} = \lambda_1 J_{energy} + \lambda_2 J_{risk} + \lambda_3 J_{time}, \quad (2)$$

де вагові коефіцієнти λ_i визначають пріоритет кожного критерію.

Алгоритми планування траєкторії поділяються на два класи. Перший - дискретні методи (алгоритми Дейкстри та A^*), що будують шлях за графовими моделями та ефективні у статичних середовищах, але не враховують фізичні обмеження руху (наприклад, динаміку швидкості та прискорення). Другий клас - кінодинамічні алгоритми (RRT, RRT*), що забезпечують реалістичне моделювання, оскільки враховують динаміку об'єкта. В умовах невизначеності планування потребує мінімізації ризику, що гарантує стійкість шляху. Також важливо враховувати аеродинамічні характеристики летального апарату, що підвищить точність моделювання польоту [2].

В результаті аналізу встановлено, що поєднання евристичних методів із кінодинамічним плануванням дає змогу будувати траєкторії з урахуванням динаміки руху літального апарату. Ці алгоритми забезпечують мінімізацію енерговитрат та зменшення ризику зіткнення шляхом оптимізації траєкторії з урахуванням стохастичних відхилень і завдяки такому поєднанню формуються надійні та стабільні траєкторії, що знижують енергоспоживання та підвищують ефективність автономного керування літальними апаратами. Цей підхід також придатний для симуляції польотів у віртуальному середовищі, де важливими є фізична правдоподібність руху та обчислювальна ефективність алгоритму.

Теоретична та практична цінність роботи з погляду авторів полягає в сприянні розвитку напрямку кінодинамічного планування, що враховує невизначеність і аеродинамічні чинники. Крім того, результати дослідження можуть бути інтегровані в системи автономного пілотування та симуляційні платформи для підвищення фізичної достовірності моделювання руху літальних апаратів у складних умовах. Надалі передбачено удосконалити способи з метою інтеграції методів нейронних мереж для прогнозування траєкторії, що дозволить адаптувати алгоритм до різних типів літаків.

Список використаної літератури:

1. Poissant, D. A., Desbiens, A. L., Ferland, F., & Petit, L. (2025). ARENA: Adaptive Risk-aware and Energy-efficient NAVigation for Multi-Objective 3D Infrastructure Inspection with a UAV. *arXiv preprint arXiv:2502.19401*.
2. Airlangga, G., Bata, J., Adi Nugroho, O. I., Sugianto, L. F., Saputro, P. H., & Makin, S. J. (2025). Enhanced Advanced Multi-Objective Path Planning (EAMOPP) for UAV Navigation in Complex Dynamic 3D Environments. *International Journal of Robotics & Control Systems*, 5(2).