УДК 629.5

АНАЛІЗ СКЛАДНИХ СИСТЕМ КЕРУВАННЯ РУХОМ АПАРАТУ НА ПОВІТРЯНІЙ ПОДУШЦІ

Іванов О.О.

Харківський національний автомобільно-дорожній університет, Харків

У статті розглядаються складні системи керування рухом апарату на повітряній подушці, їх структура, принципи функціонування та сучасні методи стабілізації і навігації. Особлива увага приділяється інтеграції сенсорних систем (GPS, INS, LIDAR) та адаптивних алгоритмів керування, що дозволяють забезпечити стійкість руху апарата на різних типах поверхні [1, 2]. Проаналізовано проблеми нестійкості при впливі зовнішніх факторів, затримок у системах управління та похибок датчиків [3]. Розглядаються перспективи розвитку інтелектуальних систем керування, включаючи нейромережеві алгоритми, системи автономного планування маршруту та оптимізації енергоспоживання [4, 5]. Результати дослідження можуть бути застосовані у транспортній, рятувальній та військовій сферах для підвищення ефективності та безпеки апаратів на повітряній подушці.

Актуальність. Апарати на повітряній подушці мають унікальну здатність пересуватися по різних типах поверхні — вода, лід, болото, суша, що робить їх універсальними для рятувальних, транспортних, військових та дослідницьких задач. Однак управління таким апаратом є складним завданням, оскільки він характеризується:

- високою нестійкістю при впливі зовнішніх факторів (вітер, хвилі);
- underactuated-структурою (обмежена кількість керованих входів);
- потребою інтеграції сенсорних даних для точного позиціонування.

Зростаюча автоматизація та розвиток безпілотних технологій підвищують вимоги до точності, безпеки та автономності таких апаратів. Тому дослідження складних систем керування є надзвичайно актуальним [1, 3].

Вступ. Мета роботи — аналіз сучасних підходів до керування апаратом на повітряній подушці, визначення проблем і перспектив розвитку систем.

Основні складові апарату:

1. Силова установка — забезпечує рух вперед/назад та підйом;

2. Підйомна система — повітряна подушка, що підтримує апарат над поверхнею;

3. Рушійна система — вентилятори чи пропелери для маневрування;

4. Сенсорна система — GPS, INS, LIDAR, камери, гіроскопи;

5. Система керування — контролери, алгоритми стабілізації та маршрутизації.

Завдання системи керування: стабілізація апарату, слідкування за траєкторією, адаптація до змінних умов, координація роботи підсистем.

Особливості:

- нелінійність через зміни підйомної сили при нерівній поверхні;
- підвищена чутливість до зовнішніх впливів;
- застосування адаптивних контролерів для компенсації нестійкості.

Сенсорні системи.

Сучасні апарати використовують:

- GPS для глобального позиціонування;
- INS (інерційні навігаційні системи) для локальної стабілізації;
- LIDAR та камери для визначення висоти, перешкод і побудови карти середовища.

Інтеграція сенсорів (sensor fusion) дозволяє зменшити похибки та забезпечити точне керування. Дослідження показують, що поєднання GPS+INS+LIDAR забезпечує точність позиціонування до ±5 см [4].

Актуючі механізми та системи керування.

Підйомний механізм: підтримує апарат над поверхнею через повітряну подушку.

Рушійний механізм**:** забезпечує рух вперед/назад та поворот.

Контролери:

1. PID-регулятори — класичний підхід для стабілізації;

2. Адаптивні контролери — підлаштовуються під змінні умови середовища;

3. Нейронні мережі та нечіткі алгоритми — для прогнозування та автономного керування [4, 5].

Проблематика.

Основні проблеми керування:

- Нестійкість при вітрі та хвилях;
- Затримки реакції систем керування;
- Похибки сенсорів (GPS дрейф, INS накопичення помилок);
- Обмеженість керованих входів (underactuation);
- Енергоспоживання та оптимізація тяги [5].

Роль сучасних технологій (AI, ML, sensor fusion) для керування

Сучасні технології суттєво підвищують ефективність та точність систем керування апаратом на повітряній подушці.

AI та машинне навчання (ML) - дозволяють прогнозувати динаміку руху та коригувати управління в реальному часі. Використовуються для адаптивної стабілізації при зміні умов: вітер, хвилі, нерівна поверхня.

Sensor fusion (об’єднання даних сенсорів) - комбінує дані GPS, INS, LIDAR та візуальні дані для точнішого визначення положення та швидкості. Зменшує похибки окремих сенсорів і компенсує дрейф INS або тимчасові втрати GPS. Часто застосовується Extended Kalman Filter (EKF) або Particle Filter для оцінки стану апарату [2].

Перспективи розвитку:

- інтелектуалізація керування: нейронні мережі для прогнозування стану;
- автономні системи: безпілотні апарати для складних середовищ;
- оптимізація енергоспоживання: адаптивне регулювання тяги;
- кооперативні системи: управління групою апаратів (formation control) [6];

- сенсорні системи нового покоління: інтеграція GPS+INS+LIDAR+камера.

Автономні системи: координація кількох апаратів (multi-hovercraft coordination, formation control).

Розвиток автономних систем дозволяє кільком hovercraft працювати в координації, утворюючи групи (formation control).

Застосування: рятувальні операції на водоймах, перевезення вантажів, науково-дослідні місії.

Контролери використовують розподілені алгоритми прогнозування руху сусідніх апаратів та адаптивне перерозподілення тяги для збереження формації [3].

Нейромережеві підходи для прогнозування траєкторії.

AI-моделі прогнозують зміну курсу та швидкості залежно від зовнішніх умов (вітер, хвилі, перешкоди).

Дозволяють компенсувати збурення ще до того, як вони вплинуть на рух.

Використовуються рекурентні нейронні мережі (RNN, LSTM) для передбачення часових рядів руху [4].

Інтеграція з IoT та системами моніторингу.

Кожен апарат може бути підключений до хмарної платформи IoT, що дозволяє:

- відстежувати стан сенсорів та двигунів у реальному часі;
- аналізувати експлуатаційні дані для профілактичного обслуговування;
- координувати роботу кількох апаратів через мережу для колективного керування.

Застосування: «розумні» рятувальні системи, логістика, моніторинг екологічних зон.

Сучасні технології роблять системи керування hovercraft інтелектуальними, автономними та здатними до колективної роботи. AI, ML, sensor fusion, IoT та нейромережеві алгоритми дозволяють:

- підвищити точність навігації та стабільність руху;
- зменшити втручання людини;
- оптимізувати енергоспоживання;
- забезпечити взаємодію між кількома апаратами в реальному часі.

Висновки. Складні системи керування апаратом на повітряній подушці включають динамічне моделювання, сенсорне забезпечення, актуатори та алгоритмічне управління.

Основні проблеми — нестійкість, underactuation, сенсорні похибки та затримки — потребують адаптивних та інтелектуальних методів керування [1, 2, 4].

Перспективи розвитку: автономна робота, кооперація апаратів, енергоефективність, застосування у складних середовищах.

Практичне впровадження цих систем підвищує безпеку, точність та ефективність апаратів у різних сферах експлуатації.

Література:

1. H. Sira-Ramírez, C. Aguilar Ibáñez. On the Control of the Hovercraft System. *Dynamics and Control*, Vol. 10, 2000, pp. 151-163.
2. Designing a Sliding Mode Control System for a Hovercraft. IJE, 2022.
3. R. Liu et al. Modeling and experimental study of the cushion lift dynamics of a polar hovercraft. *ScienceDirect*, 2023.
4. R. Schwan et al. Identifying the non-linear dynamics of a hovercraft using an end-to-end deep learning approach. arXiv, 2024.
5. R. Yu et al. Speed Regulator-Based Path Following Control for an Underactuated Hovercraft Considering the Sideslip Phenomenon. *Journal of Marine Science and Engineering*, 2025.
6. G. Stomberg et al. Cooperative distributed model predictive control for embedded systems: Experiments with hovercraft formations. arXiv, 2024.