

3. State-Based Behavioral Modeling Framework for Electric Taxis: Extending from Traditional Fleets to Unmanned Fleets / Z. Lu et al. Advances in Transdisciplinary Engineering. 2026. URL: <https://doi.org/10.3233/atde251471>.

УДК 004.8:004.94:007.52:629.7.05

Танасійчук С.

Хмельницький національний університет, Україна

ВАЛІДАЦІЯ ДИНАМІЧНОЇ МОДЕЛІ БПЛА З НАДЛИШКОВОЮ АКТУАЦІЄЮ

Анотація. Розв'язано науково-технічну суперечність між потребою у прецизійному донаведенні БПЛА та обмеженістю бортових обчислювальних ресурсів. Запропоновано інтелектуально-робастну архітектуру на базі самоevolюціонуючих структур та 6DoF-моделі з горизонтальними підрулюючими пристроями (ГПП). Використання ГПП забезпечує повну декупеляцію каналів керування, що дозволяє утримувати позицію без нахилу корпусу. Встановлено, що впровадження гібридного контролера ASMC+RSEFNN у поєднанні з 6DoF-конфігурацією знижує похибку позиціонування в сталому режимі (SS-MAE) на 92,8% порівняно з класичними 4DoF-системами.

Ключові слова: 6DoF-архітектура БПЛА, горизонтальні підрулюючі пристрої (ГПП), декупеляція каналів керування, адаптивне керування зміним режимом (ASMC), рекурентна нейро-нечітка мережа (RSEFNN).

Tanasiichuk S.

Khmelnyskyi National University, Ukraine

VALIDATION OF THE DYNAMIC MODEL OF UAV WITH REDUNDANT ACTUATION

Abstract. The scientific and technical contradiction between the need for precision UAV guidance and the limited onboard computing resources has been resolved. An intelligently robust architecture based on self-evolving structures and a 6DoF model with horizontal thrusters (HST) has been proposed. The use of HST provides complete decoupling of control channels, which allows maintaining the position without tilting the hull. It has been established that the implementation of the ASMC+RSEFNN hybrid controller in combination with the 6DoF configuration reduces the steady-state positioning error (SS-MAE) by 92.8% compared to classic 4DoF systems.

Keywords: 6DoF UAV architecture, horizontal thrusters (HST), control channel decoupling, adaptive mode change control (ASMC), recurrent neural fuzzy network (RSEFNN).

Широке впровадження БПЛА в оборонну та цивільну сфери зумовлює потребу в їхньому функціонуванні як складних кіберфізичних систем, де аеродинаміка та обчислювальні процеси інтегровані в єдиний контур реального часу [1]. Проте аналіз існуючих методів керування виявив критичну проблему: класичні лінійні та робастні підходи або не забезпечують стійкості до зовнішніх збурень, або викликають небажаний ефект «деренчання», тоді як інтелектуальні стратегії на основі глибокого навчання є надто ресурсомісткими для бортових обчислювачів із жорсткими SWaP-обмеженнями [2]. Ця науково-технічна суперечність між вимогами до прецизійності донаведення в умовах зашумлених даних та обмеженістю апаратних потужностей призводить до зростання латентності та втрати робастності системи [3]. Відтак, метою дослідження є розроблення ефективної інтелектуально-робастної архітектури на базі самоevolюціонуючих структур, що дозволить забезпечити стабільність і точність позиціонування БПЛА при мінімальних витратах обчислювального ресурсу.

У даному дослідженні представлено валідацію розширеної 6DoF-моделі БПЛА, що включає горизонтальні підрулюючі пристрої (ГПП). На відміну від базової 4DoF-конфігурації, де горизонтальний рух забезпечується нахилом корпусу, ГПП генерують горизонтальну тягу безпосередньо, не потребуючи зміни кутів Ейлера. Матриця керування розширяється до $\mathbf{u} \in \mathbb{R}^6$:

$$\mathbf{u} = [F_{total}; \tau_x; \tau_y; \tau_z; F_{hpp,x}; F_{hpp,y}]^T,$$

де $F_{hpp,x}, F_{hpp,y}$ – горизонтальні складові тяги ГПП ($|F_{hpp}| \leq F_{max} = 3,5 \text{ Н}$).

Принциповою перевагою 6DoF-архітектури є *декупеляція* каналів: вертикальний (Z), горизонтальний (XY) та атитюдний канали можуть керуватися незалежно. Щоб кількісно підтвердити цю властивість, виконано порівняльний чисельний експеримент:

сценарій: БПЛА переміщується з 0 до цілі [3; 3; 2] м при синусоїдальному вітрі 3 Н (частота 0,3 Гц); тривалість 40 с, $\Delta t = 0,002 \text{ с}$;

контролер: ASMC+RSEFNN (4DoF) та ASMC+RSEFNN_6DoF (з ГПП);

метрика декупеляції: максимальні кути Ейлера $|\phi|_{max}, |\theta|_{max}, |\psi|_{max}$ протягом горизонтального маневру.

Результати наведені у Таблиці 1.

Таблиця 1 – Показники декупеляції при горизонтальному маневрі (XY-ціль: [3; 3] м, вітер 3 Н, $T=40 \text{ с}$)

| Параметр | 4DoF | 6DoF (ГПП) | Зниження |
|------------------------------|--------|-------------|--------------|
| $ \theta _{max}$ (нахил, °) | 30,90 | ≈ 0 | $\sim 100\%$ |
| $ \phi _{max}$ (крен, °) | 29,23 | ≈ 0 | $\sim 100\%$ |
| $ \psi _{max}$ (рискання, °) | 13,42 | ≈ 0 | $\sim 100\%$ |
| SS-MAE (м) | 0,1375 | 0,0099 | 13,8× |

У 4DoF-конфігурації контролер зобов'язаний нахилити корпус до $|\theta|_{max} = 30,9^\circ$ для генерації горизонтальної сили. Цей нахил є неминучим: при тязі F_{total} і кути θ горизонтальна складова $F_x = F_{total} \sin \theta$ забезпечує XY-рух. Наслідком є зв'язаність каналів: будь-яка зміна XY-цілі викликає збурення по кутових каналах і, через зворотний зв'язок, вторинні збурення у Z-каналі.

У 6DoF-конфігурації ГПП генерують $F_{hpp,x}, F_{hpp,y}$ безпосередньо, зберігаючи рівне положення корпусу ($\theta = \phi = \psi \approx 0$). Практично досягнута декупеляція є повною ($|\theta|_{max} < 0,001^\circ$), що підтверджує коректність реалізованої архітектури розподілу функцій між атитюдним контуром та ГПП.

SS-MAE – метрика якості в сталому режимі – знижується на 92,8% (0,1375 м \rightarrow 0,0099 м, покращення у 13,8 разів). Цей результат підтверджує ключову перевагу 6DoF-архітектури: саме у фазі утримання позиції при постійному збурюванні ГПП демонструють суттєву перевагу над атитюдним каналом.

Отриманий приріст точності утримання позиції у 13,8 разів обґрунтовує доцільність застосування 6DoF-архітектури в задачах прецизійного донаведення, де фаза стабілізації над ціллю є критично важливою. Максимальний кут нахилу платформи у 4DoF-конфігурації досяг $30,90^\circ$, що підтверджує принципове обмеження атитюдного каналу при компенсації постійних горизонтальних збурень – надмірний нахил корпусу є неприйнятним для задач доставки вантажів або аерофотознімання. Таким чином, збільшення обчислювального навантаження на 610 мкс WCET є прийнятною платою за якісне покращення характеристик позиціонування в сталому режимі при дії зовнішніх збурень.

З виконаних симуляцій встановлено: при горизонтальному вітрі $\leq F_{hpp,max} = 3,5 \text{ Н}$ 6DoF-архітектура забезпечує декупеляцію та на порядок кращу точність у сталому режимі (SS-MAE). При більшому вітрі обидва контролери ASMC+RSEFNN та ASMC+RSEFNN_6DoF зазнають відхилень, оскільки горизонтальна тяга вичерпана (насичення актуаторів), а компенсація зсуву забезпечується виключно зміною атитюду (4DoF-канал). Це є обґрунтованим конструктивним компромісом: збільшення $F_{hpp,max}$ вимагає більшої маси та енергії ГПП.

Отже, дослідження підтвердило, що впровадження 6DoF-архітектури з горизонтальними підрулюючими пристроями (ГПП) дозволяє досягти повної декупеляції каналів керування, забезпечуючи стабільне положення корпусу БПЛА без необхідності нахилу для компенсації зовнішніх збурень. Порівняльний аналіз показав, що використання ГПП у поєднанні з контролером ASMC+RSEFNN знижує похибку позиціонування в сталому

режимі (SS-MAE) на 92,8% – з 0,1375 м до 0,0099 м, що у 13,8 разів перевищує точність класичної 4DoF-конфігурації. Незважаючи на прогнозоване збільшення обчислювального навантаження на 610 мкс, такий підхід є оптимальним для завдань прецизійного донаведення та доставки вантажів, оскільки він усуває критичні обмеження атитюдного каналу при роботі в умовах нестационарних повітряних потоків.

Джерела та література

1. Distributed Control of Cyber Physical System on Various Domains: A Critical Review. M. Hamzah et al. Systems. 2023. Vol. 11, no. 4. P. 208. URL: <https://doi.org/10.3390/systems11040208>.

2. Rezwan S., Choi W. Artificial Intelligence Approaches for UAV Navigation: Recent Advances and Future Challenges. IEEE Access. 2022. Vol. 10. P. 26320–26339. URL: <https://doi.org/10.1109/access.2022.3157626>.

3. Research on precise route control of unmanned aerial vehicles based on physical simulation systems. Z. Xu et al. Results in Physics. 2023. P. 107200. URL: <https://doi.org/10.1016/j.rinp.2023.107200>.

УДК 331.101.262:355.01:504.05

Ханнуф К., доктор філософії

Асоціація «Українсько-французький інститут науки, інновацій та економічного розвитку», Франція

ВІДНОВЛЕННЯ ЛЮДСЬКОГО КАПІТАЛУ ПІСЛЯ ВОЄННИХ КОНФЛІКТІВ І ТЕХНОГЕННИХ КАТАСТРОФ: ВІД ВТРАТ ДО ІНСТИТУЦІЙНИХ РІШЕНЬ

Анотація. У тезах обґрунтовано, що відновлення після воєнних конфліктів і техногенних катастроф доцільно розглядати не лише як реконструкцію зруйнованих об'єктів, а як багаторівневий процес відтворення людського капіталу. Показано, що довгострокові втрати проявляються у розриві освітніх і професійних траєкторій, зниженні довіри до інституцій, послабленні соціальних зв'язків та погіршенні адаптаційного потенціалу громад. Запропоновано три рівні відновлення: індивідуальний, громадський та інституційно-міжнародний. Доведено, що стійкий результат можливий за умови координації державної політики, місцевого самоврядування, освітніх установ, науки та міжнародних партнерств.

Ключові слова: людський капітал, воєнні конфлікти, техногенні катастрофи, інституційне відновлення, освітні траєкторії, громади, міжнародне партнерство.

Hannouf K., Ph.D.

Association “Ukrainian-French Institute of Science, Innovation and Economic Development”, France

RECOVERY OF HUMAN CAPITAL AFTER MILITARY CONFLICTS AND TECHNOGENIC DISASTERS: FROM LOSSES TO INSTITUTIONAL SOLUTIONS

Abstract. The theses argue that recovery after military conflicts and technogenic disasters should be interpreted not only as reconstruction of damaged infrastructure, but also as a multilevel process of reproducing human capital. Long-term losses are manifested in broken educational and professional trajectories, declining trust in institutions, weakened social ties, and reduced adaptive capacity of communities. Three interconnected levels of recovery are identified: individual, community, and institutional-international. Sustainable results are possible only through coordinated action of public policy, local government, educational institutions, research actors, and international partnerships.

Keywords: human capital, military conflicts, technogenic disasters, institutional recovery, educational trajectories, communities, international partnership.