

2. ISA-95 Standard. Enterprise-control system integration. URL: <https://www.isa.org/standards-and-publications/isa-standards/isa-95-standard>
3. Cybersecurity and Infrastructure Security Agency. Industrial Control Systems. URL: <https://www.cisa.gov/topics/industrial-control-systems>
4. United Nations Environment Programme. The toxic legacy of the Ukraine war. URL: <https://www.unep.org/news-and-stories/press-release/un-warns-toxic-environmental-legacy-ukraine-region>
5. United Nations Economic Commission for Europe. UNECE warns of high risks of industrial accidents in wartime in Ukraine. URL: <https://unece.org/media/Environment/news/370141>
6. Siemens AG. System overview: SCADA system SIMATIC WinCC Professional. URL: <https://assets.new.siemens.com/siemens/assets/api/uuid:1f589ab9-4467-405d-b667-89a66a35e17f/df-fa-i10077-00-7600-ipdf-wincc-systemoverview-en.pdf>
7. OPC Foundation. OPC Unified Architecture specification. URL: <https://opcfoundation.org/developer-tools/specifications-unified-architecture>

УДК 004.9

Стопчак О.

Хмельницький національний університет, Україна

КІБЕРФІЗИЧНА СИСТЕМА «БЕЗПІЛОТНЕ ТАКСІ»

***Анотація.** У роботі розглянуто концепцію безпілотного таксі як складної кіберфізичної системи, де фізичні процеси руху інтегровані з цифровими алгоритмами аналізу даних у режимі реального часу. Запропоновано багаторівневу архітектуру системи, що включає рівні сенсорики (з використанням LiDAR, Radar, GNSS), сприйняття (алгоритми YOLO), локалізації, планування та керування. Описано механізм злиття даних (sensor fusion) для формування моделі середовища. Запропоноване рішення забезпечує баланс між точністю позиціонування, швидкістю та безпекою автономного руху в динамічному міському середовищі.*

***Ключові слова:** кіберфізична система, безпілотне таксі, багаторівнева архітектура, злиття даних, автономний рух.*

Stopchak O.

Khmelnyskyi National University, Ukraine

CYBER-PHYSICAL SYSTEM “UNMANNED TAXI”

***Abstract.** The paper considers the concept of an unmanned taxi as a complex cyber-physical system, where physical motion processes are integrated with digital data analysis algorithms in real time. A multi-level system architecture is proposed, including the levels of sensor technology (using LiDAR, Radar, GNSS), perception (YOLO algorithms), localization, planning, and control. A sensor fusion mechanism is described for forming an environment model. The proposed solution provides a balance between positioning accuracy, speed, and safety of autonomous movement in a dynamic urban environment.*

***Keywords:** cyber-physical system, unmanned taxi, multi-level architecture, data fusion, autonomous movement.*

Безпілотне таксі є складною кіберфізичною системою, у якій фізичні процеси руху транспортного засобу безпосередньо залежать від цифрових алгоритмів аналізу сенсорних даних [1]. Основною особливістю такої системи є необхідність забезпечення роботи в режимі реального часу за умов динамічного міського середовища [2]. На відміну від індивідуальних автономних автомобілів, концепція безпілотного таксі передбачає інтеграцію транспортного засобу з інтелектуальною інфраструктурою, диспетчерськими сервісами, хмарними

платформами та мобільними застосунками [3]. Таким чином, система безпілотного таксі є повноцінною кіберфізичною системою, що поєднує фізичні компоненти (сенсори, приводи, транспортний засіб) з програмними алгоритмами, мережевими сервісами та системами обробки даних.

Запропонована архітектура кіберфізичної системи «Безпілотне таксі» має багаторівневу структуру – рис. 1.

Сенсорний рівень. Використовуються LiDAR, Radar, відеокамери, GNSS та IMU. Дані з різномірних сенсорів надходять до модуля злиття даних (sensor fusion), що формує узгоджену модель навколишнього середовища.

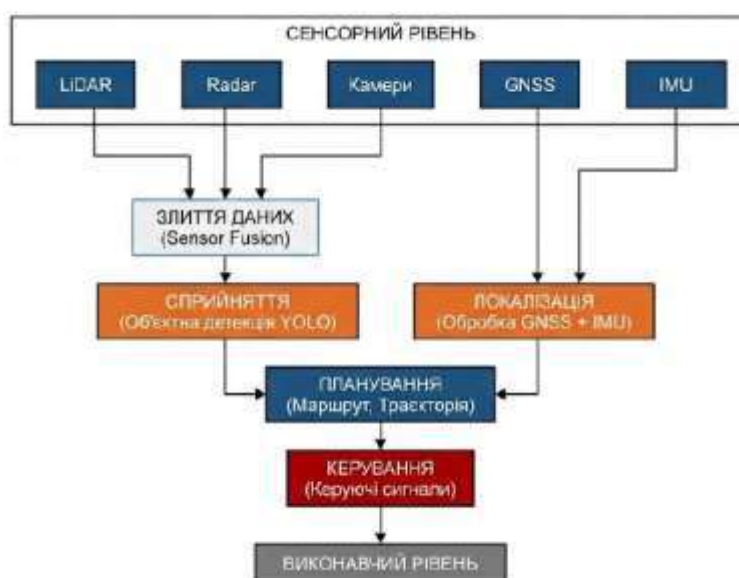


Рис. 1 – Багаторівнева архітектура кіберфізичної системи «Безпілотне таксі»

Рівень сприйняття (Perception). Реалізуються алгоритми детекції та класифікації об'єктів (зокрема на основі YOLO), розпізнавання дорожньої розмітки та світлофорів.

Рівень локалізації. Інтеграція GNSS та IMU забезпечує стабільне визначення положення транспортного засобу навіть за часткової втрати супутникового сигналу.

Рівень планування. Формується безпечна траєкторія руху з урахуванням дорожніх правил та динамічних перешкод.

Рівень керування. Контролер реального часу формує керуючі сигнали для виконавчих механізмів із забезпеченням стабільності руху.

Ключовими особливостями запропонованої архітектури є: модульність та масштабованість, розподіл задач між контуром реального часу та високопродуктивним обчислювальним модулем, резервування критичних сенсорів, підтримка fail-safe режиму, можливість оновлення програмного забезпечення. Запропонований підхід дозволяє забезпечити баланс між швидкістю, точністю позиціонування та безпечністю автономного руху.

Джерела та література

1. Choi B., Seo W., Yang J. H. HMI Interfaces of Unmanned Automated Taxi Services: What Is Essential Information?. Communications in Computer and Information Science. Cham, 2023. P. 422–430. URL: https://doi.org/10.1007/978-3-031-49215-0_50.

2. Onboard path planning for unmanned aircraft automated taxi using a virtual line-graph / S. Benders et al. AIAA SCITECH 2023 Forum, National Harbor, MD & Online. Reston, Virginia, 2023. URL: <https://doi.org/10.2514/6.2023-0396>.

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 $\mathbf{u} \in \mathbb{R}^6$: