

$$|f_{\xi\eta}(\omega)|^2 \leq f_{\xi}(\omega) f_{\eta}(\omega),$$

то для функції (1) завжди виконується умова: $0 \leq \gamma_{\xi\eta}(\omega) \leq 1$. Для незалежних сигналів $\gamma_{\xi\eta}(\omega) = 0$ для всіх $\omega \in R$. Якщо сигнали $\xi(t)$ і $\eta(t)$ є результатом лінійних перетворень одного й того ж процесу, то $\gamma_{\xi\eta}(\omega) = 1$. Якщо функція когерентності менша від одиниці, то це є показником того, що має місце одна з трьох ситуацій: на один з сигналів впливає зовнішній шум, один з сигналів зазнав нелінійних перетворень, один з досліджуваних сигналів зазнав впливу інших. При аналізі лінійних систем функція когерентності дає можливість виділити ту частину випадкового сигналу $\eta(t)$, яка на частоті ω визначається процесом $\xi(t)$. З другого боку, різниця $1 - \gamma_{\xi\eta}(\omega)$ характеризує ту частину, яка не корелює з $\xi(t)$.

Також для визначення технічного стану механізмів циклічної дії використовують функцію когерентності, яка характеризує взаємозв'язок окремих модулюючих процесів $\xi_k(t)$ і $\eta_l(t)$. Цю функцію когерентності визначають на основі їх авто- і взаємоспектральних густин, а саме

$$\gamma_{kl}^{(\xi\eta)}(\omega) = \frac{|f_{kl}^{(\xi\eta)}(\omega)|}{\left[f_{kk}^{(\xi)}(\omega) f_{ll}^{(\eta)}(\omega) \right]^{\frac{1}{2}}} \quad (2)$$

і називають покомпонентною, а різницю між номерами стаціонарних компонентів k і l – її порядком. У [3, 4] показано, що функції (1) і (2) не змінюються при лінійних перетвореннях, а також показано доцільність їх використання при розв'язанні задач вібродіагностики.

Література

1. Яворський І. М. Математичні моделі та аналіз стохастичних коливань / І. М. Яворський – Львів : ФМІ НАН України, 2013. – 804 с.
2. Яворський І. М. Визначення покомпонентної функції когерентності взаємозв'язаних періодично нестаціонарних випадкових сигналів / І. М. Яворський, Р. М. Юзефович, І. Й. Мацько, П. О. Семенов // Відбір і обробка інформації. – 2016. – № 44 (120). – С. 17–28.
3. І. Яворський. Функція когерентності взаємопов'язаних періодично нестаціонарних випадкових процесів / І. Яворський, Р. Юзефович, І. Мацько, З. Закжевський // Вісті вузів. Радіоелектроніка. – 2016. – 59 (3). – С. 40–51.
4. І. Яворський. Покомпонентна функція когерентності взаємопов'язаних періодично нестаціонарних випадкових процесів / І. Яворський, Р. Юзефович, І. Мацько, З. Закжевські // Вісті вузів. Радіоелектроніка. – 2017. – 60 (1). – С. 37–49.

УДК 004.75:681.5.015:629.735

І.С. Дідич, доктор філософії; Б.М. Зозуляк; А.А. Микитишин

Тернопільський національний технічний університет імені Івана Пулюя, Україна

РОЗПОДІЛЕНІ СИСТЕМИ КЕРУВАННЯ РУХОМ БЕЗПІЛОТНИКІВ У СКЛАДНИХ МІСЬКИХ УМОВАХ

Анотація. У роботі розглядаються питання застосування розподілених систем керування безпілотними літальними апаратами (БПЛА) в умовах складної міської забудови. Проаналізовано особливості взаємодії безпілотників у розподілених мережах, запропоновано модель керування, що забезпечує автономність прийняття рішень та ефективне уникнення перешкод. Наведено переваги розподілених алгоритмів перед централізованими, зокрема в

умовах насиченого повітряного простору. Обґрунтовано доцільність використання технологій штучного інтелекту для покращення безпеки та ефективності руху БПЛА.

Ключові слова: БПЛА, розподілене керування, автономність, міське середовище, алгоритми уникнення перешкод.

I. Didych, Ph.D.; B. Zozuliak; A. Mykytyshyn

Ternopil Ivan Puluj National Technical University, Ukraine

DISTRIBUTED DRONE TRAFFIC CONTROL SYSTEMS IN COMPLEX URBAN ENVIRONMENTS

Abstract. *The paper deals with the application of distributed control systems for unmanned aerial vehicles (UAVs) in complex urban environments. The peculiarities of interaction between drones in distributed networks are analysed, and a control model is proposed that ensures autonomous decision-making and effective obstacle avoidance. The advantages of distributed algorithms over centralised ones, in particular in conditions of saturated airspace, are presented. The expediency of using artificial intelligence technologies to improve the safety and efficiency of UAVs is substantiated.*

Keywords: *drones, distributed control, autonomy, urban environment, obstacle avoidance algorithms.*

Безпілотні літальні апарати активно інтегруються в різноманітні аспекти сучасного міського життя, включаючи моніторинг, логістику та аварійно-рятувальні операції. Проте, керування рухом БПЛА у міському середовищі характеризується високою складністю через динамічність перешкод, щільність забудови та значну кількість потенційних конфліктів між різними об'єктами руху [1]. Традиційні централізовані системи керування, незважаючи на їх високу організованість, демонструють недостатню гнучкість і низьку адаптивність до швидких змін міського середовища [2].

Використання розподілених систем керування рухом дозволяє значно підвищити оперативність і надійність функціонування БПЛА. Такі системи базуються на принципі децентралізованого прийняття рішень, де кожен апарат діє як автономний вузол мережі, здатний обмінюватися інформацією з іншими вузлами в режимі реального часу [3]. Це дозволяє зменшити затримки в управлінні та підвищити стійкість системи до локальних відмов.

Одним з ефективних підходів у побудові таких систем є застосування алгоритмів кооперативного уникнення перешкод, які передбачають не тільки індивідуальні дії апаратів, але й узгоджені колективні маневри. Дослідження показують, що використання подібних алгоритмів може суттєво знизити ризики зіткнень у щільно заповнених міських просторах [4].

Для посилення автономності і точності роботи БПЛА у складних умовах активно застосовують штучний інтелект, зокрема машинне навчання та методи глибинного навчання. Такі технології дозволяють безпілотникам оперативно аналізувати навколишнє середовище, класифікувати перешкоди, передбачати поведінку інших учасників руху та адаптивно змінювати траєкторію руху [5]. Завдяки цьому система стає значно більш гнучкою та здатною до самонавчання в реальному часі.

Таким чином, застосування розподілених систем керування рухом є перспективним рішенням для покращення ефективності, безпеки та автономності БПЛА в складних умовах сучасного міста.

Джерела та література

1. G. Foderaro, S. Ferrari, T.A. Wettergren, "Distributed Optimal Control for Multi-Agent Trajectory Optimization", IEEE Transactions on Automatic Control, vol. 63, no. 7, pp. 2264–2275, 2018.

2. H. Menouar, I. Guvenc, K. Akkaya, "UAV-Enabled Intelligent Transportation Systems for the Smart City: Applications and Challenges", IEEE Communications Magazine, vol. 55, no. 3, pp. 22–28, 2017.
3. L. Ruan, J. Wang, W. Ren, "Distributed Control of Multi-Agent Systems: Theory and Applications", IEEE Transactions on Industrial Informatics, vol. 15, no. 6, pp. 3180–3191, 2019.
4. S. Chung, A. Paranjape, P. Dames, S. Shen, V. Kumar, "A Survey on Aerial Swarm Robotics", IEEE Transactions on Robotics, vol. 34, no. 4, pp. 837–855, 2018.
5. F. Zhu, Z. Deng, J. Wang, X. Wu, H. Wang, "A Deep Reinforcement Learning Approach for UAV Path Planning in Complex Urban Environments", Sensors, vol. 20, no. 15, article 4195, 2020.

УДК 004.89:681.518.5

В.В. Левицький, канд. техн. наук, доц.; А.М. Блавицький; Р.О. Ніколайчук
Тернопільський національний технічний університет імені Івана Пулюя, Україна

ІНТЕЛЕКТУАЛЬНІ МЕТОДИ ДІАГНОСТИКИ ПРОМИСЛОВОГО ОБЛАДНАННЯ У КОМП'ЮТЕРНО-ІНТЕГРОВАНІХ СИСТЕМАХ

***Анотація.** В цій тезі досліджено сучасні інтелектуальні методи діагностики промислового обладнання, які використовуються в комп'ютерно-інтегрованих системах. Розглянуто методи штучного інтелекту, зокрема нейронні мережі, нечітку логіку та машинне навчання, що дозволяють ефективно виявляти та прогнозувати можливі відмови обладнання. Запропоновано структуру інтелектуальної діагностичної системи, що інтегрується в автоматизовані виробничі процеси. Визначено перспективи розвитку таких систем та окреслено подальші напрямки досліджень у цій сфері.*

***Ключові слова:** комп'ютерно-інтегровані системи, штучні нейронні мережі, прогнозування відмов.*

V. Levytskyi, Ph.D.; A. Blavitskyi; R. Nikolaichuk
Ternopil Ivan Puluj National Technical University, Ukraine

INTELLIGENT METHODS OF DIAGNOSTICS OF INDUSTRIAL EQUIPMENT IN COMPUTER-INTEGRATED SYSTEMS

***Abstract.** This paper investigates modern intelligent methods of industrial equipment diagnostics used in computer-integrated systems. Artificial intelligence methods, such as neural networks, fuzzy logic and machine learning, are considered, which allow to effectively detect and predict possible equipment failures. The structure of an intelligent diagnostic system that integrates into automated production processes is proposed. Prospects for the development of such systems are identified and further research directions in this area are outlined.*

***Keywords:** computer-integrated systems, artificial neural networks, failure prediction.*

У сучасних умовах ефективність функціонування промислових підприємств значною мірою залежить від безперебійної роботи технологічного обладнання. Виникнення навіть незначних збоїв у роботі обладнання може призводити до суттєвих втрат і зниження конкурентоспроможності виробництва. Саме тому актуальними є завдання своєчасної діагностики та прогнозування технічного стану обладнання, що дозволяють запобігати аварійним ситуаціям та оптимізувати планові ремонтні заходи [1]. Впровадження комп'ютерно-інтегрованих систем відкриває нові можливості для діагностики обладнання з використанням інтелектуальних методів. Серед найбільш поширених методів інтелектуальної діагностики слід виділити штучні нейронні мережі, нечітку логіку та алгоритми машинного