

АНАЛІЗ МЕТОДІВ КЕРУВАННЯ БЕЗПІЛОТНИМИ ЛІТАЛЬНИМИ АПАРАТАМИ

ANALYSIS OF UNMANNED AERIAL VEHICLES CONTROL METHODS

*Микийчук М. М., д-р техн. наук., проф., Зіганишин Н. С., аспірт.,
Національний університет "Львівська політехніка", Україна;
e-mail:natalia1994128@gmail.com*

*Mykola Mykyichuk, Dr. Sc., Prof., Nataliya Zihanshyn, Ph. D. student
Lviv Polytechnic National University, Ukraine;
e-mail:natalia1994128@gmail.com*

<https://doi.org/10.23939/istcm2019.04.00>

Анотація. Розвиток технологій із виробництва БПЛА (безпілотних літальних апаратів), крім експлуатаційних, правових та комерційних рішень, потребує стандартизації методів контролю як для наземних комплексів, так і для літальних апаратів та платформ. Інтернет-гіганти Google, Facebook протягом довгого часу підтримують стартапи із розвитку безпілотних літальних апаратів для різних сфер використання – від поставки товарів (від пошти до піци) до створення літальних платформ для забезпечення інтернетом регіонів, де неможливо розташувати наземні чи надводні станції.

Збільшення кількості літальних апаратів потребує пошуку методів автономної навігації, способів утворення груп та мереж. Тому питання впровадження нових методів керування є актуальним.

Ключові слова: БПЛА; стандартизація; методи керування; аналіз надійності.

Abstract. In addition to operational, legal and commercial solutions, the development of UAV (unmanned aerial vehicle) production technologies requires the standardization of control methods for both ground-based systems of aircrafts and platforms. Internet giants such as Google and Facebook continue to support the development of drone start-ups for various fields of use, from the delivery of goods (from mail to pizza) to the creation of flying platforms to provide the Internet in regions where it is impossible to locate ground or surface stations. Increasing the number of planes requires searching for autonomous navigation methods, methods of the group. Therefore, the issue of introducing new management methods is very important.

Worldwide, robots are being built to create unmanned aerial systems as backbone elements of UAVs [1, 2, 3]. The priority is given to the information systems, the task of which is to monitor the surrounding space, the cost of which is much lower in comparison with piloted equipment.

UAVs designed for the implementation of the monitoring task, the peculiarity of which should be provided in the development of unmanned aerial systems. As a consequence, it is necessary to use specialized techniques for their creation and use for each type of UAV.

In order to implement the tasks set, it is necessary to develop the theoretical basis for the creation and use of unmanned aerial systems, which will ensure decision-making in the design and the effective use of these tasks and ensure their development. The development of such a theory is conditioned by the separation of modern unmanned aerial systems into a separate type of unmanned aerial vehicle.

The main tasks of the UAVs include monitoring of surface, atmosphere and infrastructure objects, retransmission of radio signals, delivery and delivery of orders.

One of the decisive advantages of using unmanned aerial vehicles is that they are more (than manned flying vehicles) that meet the criterion of cost-effectiveness and pose a risk to the lives of pilots. UAV-based complexes have low operating costs as compared to manned aeronautical equipment [4], due to the lack of costs for flight crew training [5]. Unmanned aerial complexes have only inherent properties, namely: use in case of impossibility of using manned aviation; lack of infrastructure, the threat of chemical, bacteriological and radioactive contamination.

Unmanned aerial vehicles, including unmanned aerial vehicles, unmanned aerial, offshore and submarine stations, have great prospects for creating a smart city or a country network.

The purpose of this work is to study the analysis of UAV control methods and their metrological support.

Key words: UAV; Standardization; Control methods; Reliability analysis.

Вступ

У всьому світі проводяться роботи щодо утворення безпілотних авіаційних комплексів як системоутворювальних елементів БПЛА [1–3]. Пріоритет залишається за інформаційними комплексами, завданням яких є моніторинг навколишнього середовища, собівартість яких істотно нижча порівняно із пілотованою технікою.

БПЛА призначені для реалізації завдань із моніторингу, особливості яких необхідно забезпечити під час розроблення безпілотних авіаційних комплексів. Внаслідок цього для кожного типу БПЛА

потрібно застосовувати спеціалізовані методики щодо їх створення й використання.

Для реалізації поставлених завдань необхідно розробити теоретичні основи створення і застосування безпілотних авіаційних комплексів, що забезпечать проектування, сталий їх розвиток та ефективне використання. Розвиток такої теорії зумовлений виділенням сучасних безпілотних авіаційних комплексів у окремий тип керованих безпілотних апаратів.

До основних завдань, що вирішують БПЛА, належать: моніторинг поверхні, атмосфери, об'єктів інфраструктури; ретрансляція радіосигналів; постачання та видавання замовлень.

Однією зі сфер застосування БПЛА вважають контроль за станом паливно-енергетичного комплексу, екологічний моніторинг та підтримку під час проведення рятувальних операцій, контроль і автентифікація порушників у разі виникнення конфліктних ситуацій, пошук і виявлення транспортних засобів, що зазнають аварій, а у сільському господарстві – спостереження за станом земельних угідь, систему зв'язку, ретрансляційні вузли та навігаційні системи.

Однією із вирішальних переваг використання безпілотної авіації є те, що вона більше, ніж пілотовані літальні апарати, відповідає критерію “вартість–ефективність” і не створює ризику для життя пілотів. Вартість експлуатації комплексу на основі БПЛА через відсутність витрат на підготовку льотного складу [5] низька порівняно із пілотованою авіаційною технікою [4]. Безпілотним авіаційним комплексам притаманні специфічні характеристики, що передбачають їх застосування, якщо неможливо використати пілотовану авіацію; відсутня інфраструктура, існує загроза хімічного, бактеріологічного і радіоактивного зараження.

Безпілотні комплекси (безпілотні літальні апарати, безпілотні наземні, морські та підводні станції) вважають перспективними для створення мереж “розумних” міст чи країни.

Недоліки

Питання навігації БПЛА є дуже важливим завданням для сучасної безпілотної авіації. Використання дієвих систем геолокації може спростити це завдання, але не може його розв'язати. Простий приклад: низький рівень сигналу від супутника через забудову у місті через важкі погодні умови чи інші завади. Потребує вирішення завдання керування групою апаратів, бо система “один пристрій – один пілот” вже давно неактуальна. Постає необхідність використання інтерфейсів спілкування “машина–машина” (m2m – machine-to-machine), способів утворення множин апаратів за такими критеріями, як належність до типу пристроїв, спільність виконання завдань, загальна авіаційна безпека. Не визначені й спосіб нагромадження даних про навколишнє середовище і алгоритм прийняття рішень.

Мета роботи

Метою роботи є аналітичне дослідження методів керування БПЛА, метрологічного забезпечення та формування рекомендацій щодо їх удосконалення у складних навігаційних умовах.

1. Оцінювання оперативності обслуговування БПЛА

Під час виконання складних завдань виникає необхідність використовувати групи дронів, для керування якими застосовують стаціонарні та мобільні пункти керування (ПК) як наземного, так і повіт-

ряного базування. Необхідно розробити методику визначення оптимальної кількості БПЛА N , якою керує один оператор. Таку систему можна подати у вигляді пункту керування з оператором, який обслуговує БПЛА, що, своєю чергою, направляють заявки на обслуговування. Отже, ми отримуємо замкнену систему масового обслуговування з пуассонівським потоком заявок (рис. 1), що відповідає процесу Маркова із безперервним часом і дискретною множиною станів.

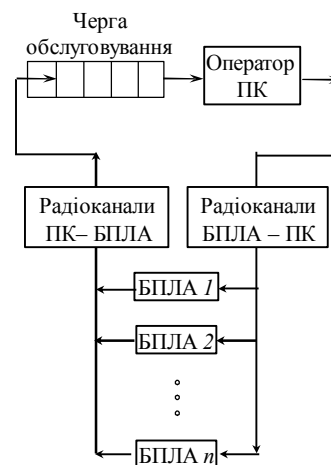


Рис. 1. Структурна схема пункту керування БПЛА

Figure 1. Structural scheme of UAV control station

На рис. 2 показано граф зв'язку станів.

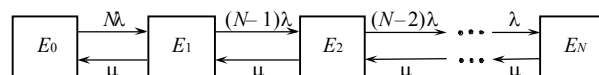


Рис. 2. Граф зв'язку станів

Figure 2. Status graph

Математична модель складається із об'єктів, БПЛА i , де $i = \overline{1, N}$, що перебувають у польоті й використовують радіоканал БПЛА–ПК для передавання запитів, із яких складається черга обслуговування, де накопичуються запити до оператора пункту керування. Оператор використовує радіоканал ПК–БПЛА для передавання повідомлень БПЛА. Отже, отримуємо множину станів від $E(0)$ до $E(j)$, в яких може перебувати система. Випадку $j=0$ відповідає відсутність запитів від БПЛА, а $j=N$ означає прихід запитів від усіх БПЛА й утворення черги з $N-1$ запитів.

Від кожного БПЛА надходить потік запитів λ , які обслуговує оператор з інтенсивністю μ . Приймемо, що вхідні запити БПЛА однотипні, й інтенсивність обслуговування не залежить від кількості заявок у черзі.

Динаміку зміни ймовірностей для графу станів (рис. 2) можна описати системою диференціальних рівнянь Колмогорова:

$$\begin{aligned} p_0 &= -N\lambda p_0(t) + N\lambda p_1(t) \\ &\dots \\ p_i &= -((N-i)\lambda + \mu)p_i(t) + (N-i+1)\lambda p_{i-1}(t) + \mu p_{i+1}(t), i = \overline{1, N} \\ &\dots \\ p_N &= -\mu p_N(t) + \lambda p_{N-1}(t) \end{aligned} \quad (1)$$

Задаємо початкові умови для моменту часу $t=0$, коли відсутні запити на обслуговування: $p_0(0)=1, p_i(0)=0, i = \overline{1, N}$.

$$\rho_0(0)=1, p_i(0)=0, i = \overline{1, N}. \quad (2)$$

Функція $p_i(t)$ описує процес редукції запитів і має задовольняти додаткову умову:

$$\sum_{i=0}^N p_i(t), t \in 0, \quad (3)$$

яка виводиться із розв'язку задачі Коші (1), (2) і вказує на те, що система може перебувати в одному зі станів $E_i, i = \overline{1, N}$ у довільний момент часу.

Система, що описується математичною моделлю (1)–(3), являє собою невстановлений режим, а випадок, коли всі похідні $p_i(t) = 0$ і $\lim_{t \rightarrow \infty} p_i(t) = p_i^*, i = \overline{0, N}$, визначає стаціонарний режим.

Виведемо математичну модель для стаціонарного режиму із рівнянь (1) та (3), виконавши заміну $p_i(t)$ на $p_i^*, i = \overline{0, N}$.

Така модель показує встановлені значення ймовірностей p_i^* у вигляді формул:

$$p_1^* = n\rho p_0^*, p_i^* = i! \rho^i p_0^*, \quad (4)$$

де $\rho = \frac{\lambda}{\mu}$ – коефіцієнт завантаження системи, а

ймовірність p_0^* описується формулою:

$$p_0^* = (1 + N\rho + N(N-1)\rho^2 + \dots + N!\rho^N)^{-1}. \quad (5)$$

Вирази (4), (5) визначають стан системи групи БПЛА, що значний час перебувають у повітрі, й система оператор ПК – БПЛА у стаціонарному режимі. Запропонована модель потребує числового розв'язання формул (1)–(3) з урахуванням статистичних значень інтенсивності μ і потоку запитів λ . Важливим є визначення часу переходу системи T до

стаціонарного режиму та його мінімізація з метою переходу до стандартного режиму (4)–(5).

Ця математична модель не передбачає наявності помилок з боку оператора відмов систем обладнання, що призводить до повторних дій зі сторони оператора. Для стаціонарного режиму можна використовувати наявні системи масового обслуговування з “помилками” та “швидким прийняттям рішення”. Нехай кожному заявці від БПЛА повністю обслуговує оператор ПК із ймовірністю $0 \leq q < 1$.

Визначимо значення ймовірності безпомилкового обслуговування БПЛА в загальному випадку, використовуючи теорему додавання ймовірностей випадкових сумісних подій

$$q = q_{\text{опер}} + q_{\text{б.р.ан}} - q_{\text{опер}} \times q_{\text{б.р.ан}}, \quad (6)$$

де $q_{\text{опер}}$ – ймовірність безпомилкового рішення оператора, $q_{\text{б.р.ан}}$ – ймовірність відсутності відмов систем обладнання під час обміну даними з БПЛА. Кожна із заявок з ймовірністю $(1-q)$, що не була оброблена, потрапляє до черги і збільшує навантаження на систему.

На рис. 3 надано граф станів для системи із “помилками”.

У разі виникнення помилок у системі інтенсивність обслуговування заявок зменшується на величину q . Для такої системи у виразах (1), (4), (5) потрібно параметр μ замінити на $q\mu$. Виникає необхідність швидше приймати рішення. Оператор ПК починає працювати на “швидке прийняття рішення”. Як наслідок, зростають інтенсивність обслуговування заявок μ і ймовірність λ виникнення помилкових рішень оператора ПК.

Прийmemo, що оператор обслуговує J БПЛА. Введемо функції інтенсивності обслуговування заявок $\mu(J)$ і ймовірність прийняття помилкового рішення $q(J)$ з урахуванням J заявок у черзі. Тоді інтенсивність обслуговування розраховуємо за формулою:

$$\bar{\mu}(J) = \mu(J)q(J), J = \overline{0, 1N-1}, \quad (7)$$

що являє собою функцію дискретного аргумента J .

Граф зв'язку станів обслуговування БПЛА в умовах “швидкого прийняття рішення” і помилкових дій оператора зображено на рис. 4.

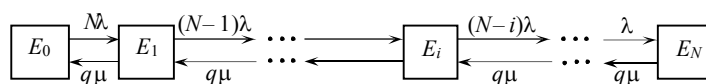


Рис. 3. Граф станів для системи з “помилками”

Figure 3. Status graph for the system with “errors”

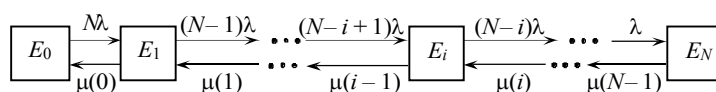


Рис. 4. Граф станів в умовах “швидкого прийняття рішення” і помилкових дій оператора

Figure 4. The graph of states in the conditions of “rush decision making” and incorrect actions of the operator

Виконаємо зміни (4), (5), ураховуючи вираз для $\bar{\rho}(J)$:

$$\bar{\rho}(J) = \frac{\lambda}{\mu(J)}, J = (\overline{0, 1N-1}),$$

в результаті чого отримуємо такі значення ймовірнісних станів стаціонарного режиму E_0, \dots, E_N

$$\bar{p}_i = \frac{N(N-1)\dots(N-i+1)\lambda^i}{\mu(J)} \bar{p}_0,$$

$$\text{де } \bar{p}_0 = \left(1 + \frac{N\lambda}{\mu(0)} + \dots + \frac{N! \lambda^N}{\mu(0)\dots\mu(N-1)} \right).$$

Функції $\mu(J)$ і $q(J)$ є монотонними із дискретним аргументом. Значення $\mu(J)$ різко зростають, а $q(J)$ спадають у разі черг на обслуговування J . За малих значень N функції можна подати лінійними залежностями.

Враховуючи результати аналізу, можна визначити такі характеристики системи оператор ПК – БПЛА для стаціонарного режиму функціонування:

– ймовірність того, що оператор ПК зайнятий обслуговуванням заявки:

$$P_{\text{зайн.}} = 1 - p_0, \quad (8)$$

– абсолютна пропускна здатність системи:

$$A = (1 - p_0)\mu, \quad (9)$$

– середня кількість БПЛА, що повинні обслуговуватись у поточний момент:

$$\bar{W} = N - \frac{1 - p_0}{\rho}, \quad (10)$$

– середня довжина черги БПЛА на обслуговування:

$$\bar{J} = N - \frac{(1 - p_0)(1 + \rho)}{\rho}, \quad (11)$$

– коефіцієнт очікування на обслуговування:

$$K = \frac{\bar{J}}{N}, \quad (12)$$

Показники ефективності (8)–(12) з урахуванням параметрів N , λ та інтенсивностей μ і $\mu(J)$, $J = (\overline{0, 1N-1})$ розраховують для двох варіантів функціонування системи, а саме для безпомилкової роботи оператора $q_{\text{опер}} = 1$ і безвідмовної роботи каналу ПК – БПЛА $q_{\text{б.р.ан}} = 1$, а також у разі виникнення помилок з боку оператора, прийняття з його боку поспішних і тому помилкових рішень, призводить до зростання черги обслуговування запитів.

За змінного значення кількості БПЛА (12) важливий розрахунок коефіцієнта K , а для виконання аналітичних розрахунків бажано використовувати фіксоване значення параметра λ і змінювати значення параметрів N і μ щодо двох режимів функціонування системи.

Висновки

Для виконання завдань із забезпечення спостереження та для ефективної координації руху транспортних засобів, підвищення рівня безпеки і стандартизації автори запропонували математичну модель

керування групою БПЛА як для систем без помилок, так і для систем з помилками (з боку оператора або/і системи керування БПЛА). Ця модель передбачає два основні режими керування групою БПЛА й дає змогу визначити основні характеристики системи ПК-БПЛА та, як наслідок, – кількість операторів для керування ними. Використання методів математичної статистики й засобів інтелектуального управління БПЛА, а саме застосування особливих видів мереж із часовою самоорганізацією, вимагає залучення спеціальних методів розрахунку чисельності персоналу та обслуговуваних авіаційних груп.

Подяка

Автори висловлюють вдячність колективу кафедри інформаційно-вимірювальних технологій Національного університету “Львівська політехніка”, Україна, за надану допомогу та всемірне сприяння у підготовці статті.

Список літератури

- [1] Г. П. Дремлюга, С. А. Есин, Ю. Л. Иванов, В. А. Ляшенко, *Беспилотные летательные аппараты: Состояние и тенденции развития*, Ю. Л. Иванов, ред. Москва, Россия: Воряг, 2004, с. 176.
- [2] USA Office of the Secretary of Defense (2005, Aug. 4). *Unmanned Aircraft Systems Roadmap 2005–2030*. [Online]. Available: https://fas.org/irp/program/collect/uav_roadmap2005.pdf
- [3] В. С. Моисеев, Д. С. Гущина, Г. В. Моисеев, А. Б. Салеев, “Беспилотные авиационные комплексы. Структура и организация функционирования”, *Известия вузов. Авиационная техника*, № 2, с. 3–7, 2006.
- [4] П. П. Афанасьев, Ю. В. Веркин, И. С. Голубев и др. *Основы устройства, проектирования, конструирования и производства летательных аппаратов (дистанционно пилотируемые летательные аппараты)*, И. С. Голубев и Ю. И. Янкевич, Ред. Москва, Россия: МАИ, 2006, с. 528.
- [5] Л. Куликов, В. Ростопчин, Н. Бондаренко “Беспилотные авиационные системы военного назначения: проблемы и перспективы развития”, *Аэрокосмическое обозрение*, № 1, с. 20–23, 2004.
- [6] Г. В. Моисеев, В. С. Моисеев, *Основы теории создания и применения имитационных беспилотных авиационных комплексов: монография*. Казань, Россия: Ред.-изд. центр, 2013.

References

- [1] G. Dremlyuga, S. Yesin, Y. Ivanov, V. Lyashenko, *Unmanned aerial vehicles: Status and development trends*, Y. Ivanov, Eds. Moscow, Russia: Varyag, 2004, p. 176.
- [2] USA Office of the Secretary of Defense (2005, Aug. 4). *Unmanned Aircraft Systems Roadmap 2005–2030*. [Online]. Available: https://fas.org/irp/program/collect/uav_roadmap2005.pdf
- [3] V. Moiseyev, D. Gushchina, G. Moiseyev, A. Salyeev, “Unmanned Aircraft Systems. The structure and organization of functioning”, *University News. Aeronautical engineering*, no. 2, pp. 3–7, 2006.
- [4] P. Afanasyev, Y. Verkin, I. Golubev et al., *Device basics, design, construction and production of aircraft (remotely piloted aircraft)* I. Golubev and Y. Yankevich, Eds. Moscow, Russia: MAI, 2006, p. 528.
- [5] L. Kulikov, V. Rostopchin, N. Bondarenko, “Military unmanned aerial systems: problems and development prospects”, *Aerospace review*, no. 1, pp. 20–23, 2004.
- [6] G. Moiseyev, V. Moiseyev, *Fundamentals of the theory of the creation and use of simulation unmanned aerial systems*. Kazan, Russia: Publishing Center, 2013.