

Оптимізація траєкторії польоту безпілотного літального апарату

Optimization of the Flight Path of an Unmanned Aerial Vehicle

Василь Миклуха¹, Наталія Хімчик¹
Vasyl Myklukha, Nataliia Khimchyk

¹ *Zhytomyr Military Institute named after S. P. Koroljov*
22 Prospekt Myru, Zhytomyr, 10004, Ukraine

DOI: 10.22178/pos.26-5

LCC Subject Category: QA76.75-76.765

Received 12.08.2017
Accepted 17.09.2017
Published online 24.09.2017

Corresponding Author:
Vasyl Myklukha
prof2014@i.ua

© 2017 The Authors. This article is licensed under a [Creative Commons Attribution 4.0 License](#) 

Анотація. У статті проведено характеристику особливостей оптимізації траєкторії польоту безпілотного літального апарату. У роботі здійснено аналіз складу та призначення основного обладнання і корисного навантаження безпілотного літального апарату. Зокрема, звертається увага на основні вимоги, які сьогодні ставляться до безпілотного літального апарату.

Ключові слова: безпілотний авіаційний комплекс; безпілотний літальний апарат; система автоматизованого управління; корисне навантаження; оптимізація.

Abstract. The article describes the features of optimizing the flight path of an unmanned aerial vehicle. The paper analyzes the composition and designation of main equipment and payload of unmanned aerial vehicle. In particular, attention is drawn to the basic requirements that relate to the unmanned aerial vehicle today.

Keywords: unmanned aviation complex; unmanned aerial vehicle; automated control system; payload; optimization.

ВСТУП

У даний час у світовій практиці склалася тенденція до широкого використання безпілотних літальних апаратів (БПЛА) у цивільних областях, наприклад, для вирішення завдань екологічного моніторингу, дистанційного зондування поверхні Землі, спостереження за об'єктами транспортної інфраструктури і т. п. При цьому рух безпілотних літальних апаратів може відбуватися в різноманітних складних умовах рельєфу місцевості: в міському середовищі (серед будівель), в умовах гірського рельєфу, над пустельним, лісопарковим, водним середовищем і т. д. З бурхливим розвитком безпілотних літальних апаратів, здатним рухатися в умовах складного рельєфу, завдання планування у реальному режимі часу траєкторії польоту стає все більш актуальним і привабливим [5].

Завданням планування траєкторій руху в останні десятиліття приділяється велика увага. Вона формулюється як задача пошуку

траєкторії динамічної системи, що задовольняє заданим граничним умовам, рух по якій мінімізується деяким функціоналом якості, визначає термінальний промах або характеризує інтегральний ризик.

Однак на практиці не завжди вдається формалізувати всі вимоги, що пред'являються до динаміки функціонування системи у вигляді одного функціоналу, а отримання рішення щодо вибору оптимальних траєкторій польоту безпілотних літальних апаратів вимагає громіздких обчислень [7].

Детальному аналізу, класифікації, цільовому призначенню, як у військовому, так і цивільному сегменті, сучасним розробкам, дизайну, еволюції безпілотних авіаційних систем (БАС) присвячено працю [2]. У статті [7] наведено міжнародну класифікацію безпілотних літальних апаратів, проведено аналіз безпілотних літальних апаратів іноземного виробництва (Unmanned Aerial Vehicles, UAV), зокрема при застосуванні в лісовому секторі.

Багато робіт присвячені інтелектуальному керуванню безпілотними апаратами, зокрема, використання машинного навчання широко розглянуте в працях G. Chowdhary, M. Lazar, F. Lewis, N. Nguyen.

Розвиток сучасних і перспективних технологій дозволяє сьогодні безпілотним літальним апаратам успішно виконувати функції, які у минулому виконувалися іншими силами та засобами. Результати аналізу антитерористичної операції на Сході України показують високу ефективність застосування безпілотних літальних апаратів при виконанні завдань ведення спостереження, розвідки, цілевказівки, РЕБ, коригування вогню [4].

Безпілотні засоби оснащуються ультразвуковими сенсорами, радарними датчиками, лазерними локаторами і відеокамерами. В даний час такі технології оснащення безпілотних засобів поки не широко застосовуються в Україні.

Широке застосування знайшли безпілотні літальні апарати, призначені для автоматизованого моніторингу розвідки, загального навколишнього середовища, поверхні і т. д.

Управління польотом безпілотного літального апарату здійснюється дистанційно з наземного пункту по радіоканалу або з допомогою системи автоматичного управління (САУ). При використанні системи автоматичного управління у пам'ять бортової системи вводиться маршрут польоту, наприклад, у вигляді координат проміжних пунктів або координат цілі.

Отже, для роботи в автоматичному режимі бортові обчислювачі повинні оснащуватися відповідними алгоритмами обробки і аналізу зображень для вирішення завдань стиснення відеоінформації і пошуку об'єктів.

Метою роботи є оптимізація траєкторії польоту безпілотного літального апарату.

РЕЗУЛЬТАТИ ДОСЛІДЖЕНЬ

Безпілотний літальний апарат у загальному випадку – це літальний апарат без екіпажу на борту. Спектр застосування безпілотного літального апарату досить широкий – автоматичні літаки, вертольоти і дирижаблі здатні вести екологічну розвідку, моніторинг стану атмосфери, виконувати виміри температури,

іонізуючого випромінювання, виробляти забори проб ґрунту з заражених територій і т.д. Шум від таких літальних апаратів набагато нижче, що особливо важливо при зйомці в житлових районах [6].

Нові завдання, такі як ударні, транспортні, моніторинг протяжних лінійних об'єктів (ЛЕП, залізні дороги, трубопровідні системи) вимагають істотного збільшення крейсерської швидкості польоту і злітної маси безпілотного літального апарату. Зростання крейсерської швидкості необхідне для збільшення ефективності безпілотного літального апарату як транспортної системи і зменшення часу реакції, а збільшення злітної маси є наслідком збільшення тривалості польоту і зростання номенклатури і маси корисного навантаження. Наприклад, рішення задачі надання повноцінних ударних можливостей для безпілотного літального апарату RQ-1 Predator в кінцевому підсумку вимагало збільшення швидкості польоту літального апарату в 2 рази, злітної ваги в 4 рази, потужності силової установки в 9 разів і призвело до створення нового безпілотного літального апарату MQ-9A Reaper (Predator B). Маса корисного навантаження при цьому було збільшено у 6 разів. Тривалість польоту і склад БРЕО не зазнали значних змін [2].

Зі зростанням злітної маси і швидкості польоту основні технічні переваги безпілотних літальних апаратів починають слабшати. Катапультні системи старту стають величезного розміру, різко збільшується їх складність та вимоги з технічного обслуговування.

Посадочні системи потребують виділення значних об'ємів планера і також стають надмірно складними і вимогливими до технічного обслуговування. При цьому надійність таких посадкових систем залишає бажати кращого. Складні системи м'якої посадки не забезпечують необхідного рівня збереження бортової електронної апаратури з планера безпілотного літального апарату.

Для безпілотних літальних апаратів одним з найбільш важливих показником ефективності є його розміри. Оскільки для безпілотного літального апарату важлива мобільність, використання габаритних систем навігації стає неможливим. З цією метою використовують MEMS системи. Але, не дивлячись на те, що такі системи надають достатню мобільність, вони не досить точні [8].

Безпілотні літальні апарати використовують для аерофотозйомки, тому доцільним є підвищення цієї якості. Зокрема, ми пропонуємо використовувати багатофункціональну бортову радіолокаційну систему для безпілотного літального апарату, яка допоможе покращити якість зображення простору.

Можливості радіолокаційної апаратури визначаються виділеними ресурсами маси, габаритів і споживаної потужності і зростають при переході від безпілотного літального апарату середнього класу до тяжких безпілотних літальних апаратів.

В якості основного методу огляду простору застосовується бічний огляд із синтезом апертури (РСА) за рахунок руху безпілотного літального апарату, який забезпечує найбільшу інформативність радіолокаційного зображення (РЛІ). Інші функції радіолокаційної системи реалізуються шляхом пристосування апаратури РСА до виконання додаткових завдань. Наприклад, при механічному розвороті антени за напрямом польоту можливий огляд в передній півсфері [5].

Радіолокатори, що встановлюються на безпілотному літальному апараті, можуть бути як спеціалізованими, так і універсальними. Наприклад, безпілотний літальний апарат Heron оснащений РСА для вирішення задачі моніторингу морської поверхні за допомогою локатора Elta EL/M-2022U Maritime Patrol Radar. Інші мають у своєму складі РСА EL/M-2055 SAR/MTI для спостереження суші. Технічна реалізація спеціалізованих РСА простіше. Разом з тим на ряді інших безпілотних літальних апаратів встановлюються багатофункціональні радіолокаційні комплекси, що забезпечують рішення обох задач (приклад – РСА AN/APY-8 Lynx для безпілотного літального апарату Reaper).

До сказаного необхідно додати, що цільові характеристики РСА, такі як смуга огляду, просторова роздільна здатність по дальності і за азимуту, у вирішальній мірі залежать від умов спостереження (висоти польоту, шляховий швидкості) і від якості навігаційного/мікронавігаційного забезпечення. При цьому важливо зазначити, що найвища просторова роздільна здатність досягається при польоті на малих висотах і при відносно малих дальностях до цілі.

Навпаки, широка смуга огляду при помірному просторовому вирішенні забезпечується на великих висотах і максимальних дальностях. Радіолокаторів, у яких в одному і тому ж режимі спостереження гранично висока просторова роздільна здатність поєднується з гранично широкою смугою огляду, не виявлено.

Ілюстрацією наведеного факту може служити радіолокатор з синтезованою апертурою, встановлений на безпілотний літальний апарат Predator, де заявлена просторова роздільна здатність по дальності і за азимуту, що дорівнює 1 м, забезпечується в смузі огляду шириною не більше 800–1000 м [2].

Продуктивність цифрової камери при аерофотозніманню виражається в необхідній кількості знімків на один кілометр квадратний (кв. км) території. Висока продуктивність буде у камери з меншою кількістю знімків на кв. км. Для розрахунку кількості знімків на один кв. км. необхідно обчислити оптимальну відстань між маршрутами аерофотозйомки і центрами фотографування (ц. ф.) на маршруті.

Відстань між маршрутами аерофотозйомки і ц. ф. на маршруті розраховується з урахуванням точності ГЛОНАСС/GPS навігації і особливостей пілотування безпілотного літального апарату. Параметри утримання літака на маршруті наступні:

- поперечне зміщення від осі маршруту ± 10 м;
- утримання безпілотного літального апарату на запроєктованій висоті ± 15 м;
- відстань від центру запроєктованого фотографування до точки спрацьовування затвора фотоапарата ± 5 м;
- зміна кута крену безпілотного літального апарату на маршруті між двома знімками 10° ;
- зміна кута тангажа безпілотного літального апарату на маршруті між двома знімками 6° .

Наведені параметри польоту безпілотного літального апарату були отримані в результаті безлічі пост обробки матеріалів виробничого та експериментального аерофотознімання.

Для розрахунку продуктивності фотокамер необхідно отримати максимально допустиму висоту фотографування при заданому масштабі створеного фотоплану. Зв'язок край-

нього розміру пікселя знімка з місцевістю показаний на рис. 1.

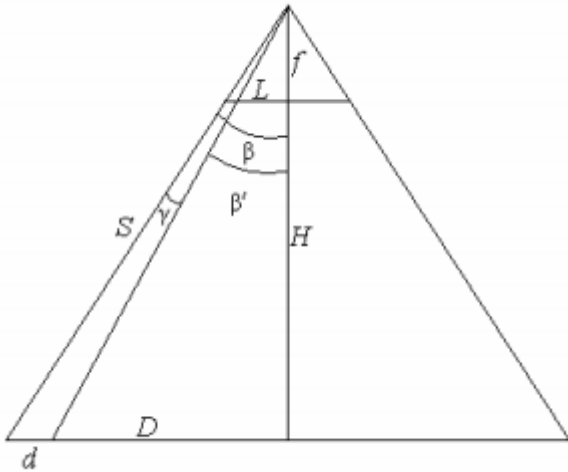


Рисунок 1 – Зв'язок розміру пікселя знімка з місцевістю

Примітки: f – фокусна відстань камери в еквіваленті для 35 мм кадру; L – довжина половини діагоналі матриці, для 35 мм кадру вона складе 21.6 мм; H – висота фотографування під час АФС; D – довжина половини діагоналі знімка на місцевості

Величина крайнього пікселів знімка на місцевості не повинна перевищувати 0,07 мм в

масштабі створюваного фото-плану [5]. Розрахунок роздільної здатності знімка слід проводити для найбільш віддалених від центру кадру. З рис. 1 слідує (1)–(2):

$$S = \frac{d * \cos(\gamma - \beta)}{\sin \lambda}, \tag{1}$$

$$H_{\max} = S * \cos \beta. \tag{2}$$

Для забезпечення суцільного покриття земної поверхні знімками необхідно врахувати максимальні відхилення безпілотного літального апарату від запроєктованого маршруту. Мінімальне значення половини ширини захвату місцевості під час аерофотозйомки з урахуванням сукупності похибок навігаційних даних і пілотування літального апарату обчислюється за формулою (3):

$$D_{\min} = (H_{\text{пол}} - 15\text{м}) * \text{tg}(b - 5^{\circ}) - 10\text{м}. \tag{3}$$

Проектування аерофотозйомки дозволяє використовувати отримані дані в навігаційній програмі (рис. 2).

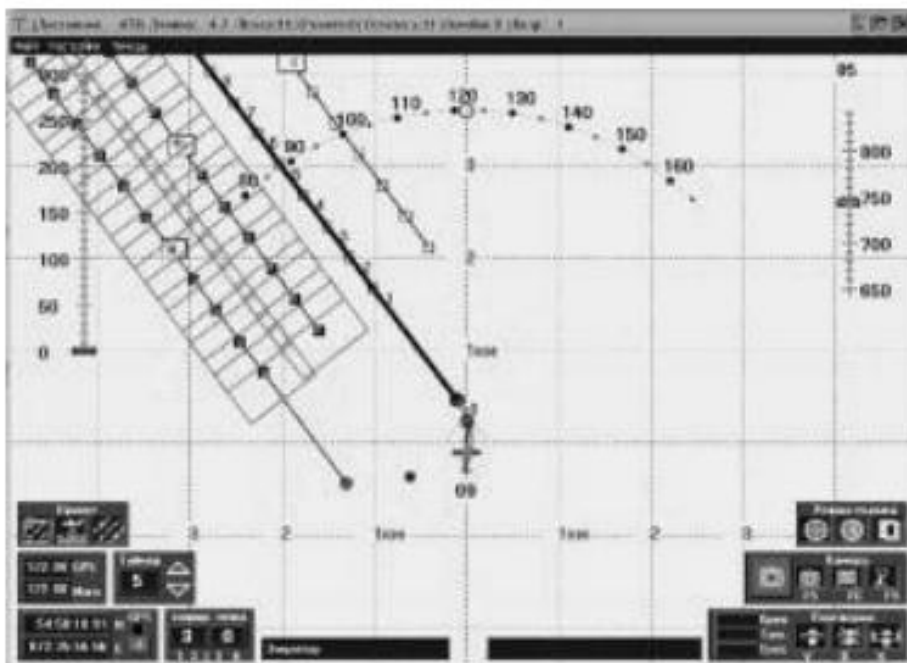


Рисунок 2 – Навігаційна програма

При управлінні безпілотним літальним апаратом за допомогою навігаційної програми, можна здійснювати політ з запроєктованими маршрутами. Виконання аерофотозйомки з запроєктованими маршрутами дозволяє застосовувати для створення ортофотопланів існуючі цифрові фотограмметричні станції (ЦФС), що істотно скорочує витрати на виконання робіт і створення спеціалізованого програмного забезпечення.

Третя задача пов'язана з оперативною оцінкою якості матеріалів аерофотознімання. Для цієї мети розроблено та впроваджено у виробництво програмне забезпечення у вигляді додатка до ГІС MapInfo.

Програма за даними, отриманими з борту літального апарату в момент фотографування, будує умовні рамки знімків (рис. 3), за якими оцінюється покриття заданої території аерофотознімками.

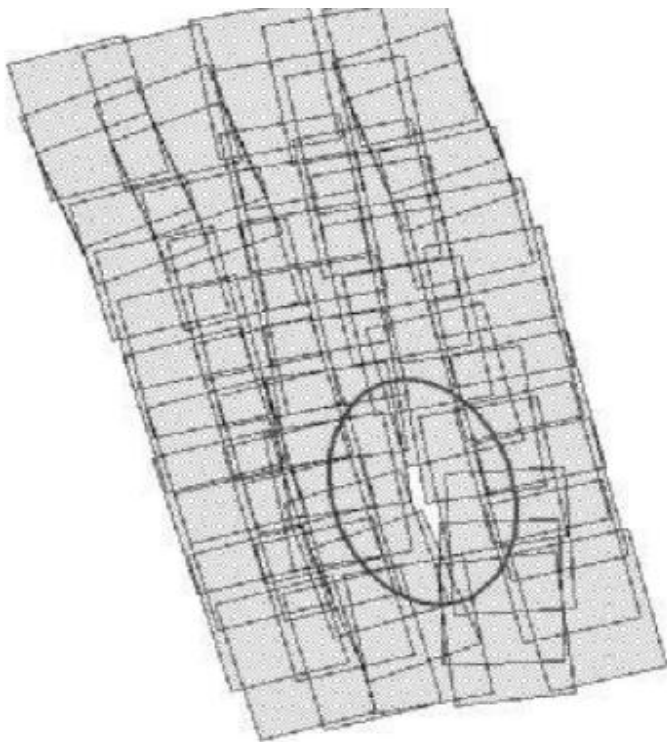


Рисунок 3 – Побудова умовних рамок знімків під час аерофотозйомки

Розроблена методика оцінки якості аерофотозйомки дозволяє використовувати безпілотні літальні надлегкі апарати як повнофункціональні комплекси. Аерофотозйомки в

реальному часі дозволяють уникнути повторних виїздів на відзняті ділянки.

Також досить важливим постає дистанційне керування безпілотним літальним апаратом. Проведений аналіз систем управління показав, що дистанційне керування включає гідності інших режимів і полягає в передачі по командній радіолінії завдань для виконавчих механізмів.

Система дистанційного керування відповідає за планування польотного завдання, формування команд управління для системи автоматичного управління при зміні маршруту польоту пілотом-оператором, налаштування параметрів системи автоматичного управління, відображення телеметричної інформації, аналіз польотних даних, а також управління корисним навантаженням безпілотного літального апарату. З боку пілота-оператора дистанційне керування зводиться до уточнення програми польоту на маршруті, видачі разових команд в районі рішення цільової задачі. Завдання формування команд при дистанційному керуванні носить логіко-аналітичний характер, вироблення єдиних правил визначення програми, параметрів польоту в умовах невизначеності є важкою задачею [6].

Таким чином, оперативна гнучкість, здатність в режимі реального часу передавати інформацію на вище стоячі рівні управління і своєчасно на будь-якому етапі польоту отримувати необхідні дані для її аналізу і прийняття рішення, що обумовлюють доцільність використання дистанційного режиму управління. Дистанційне керування оператором безпілотного літального апарату – це складна багатокритеріальна задача. Суперечливість вимог до результату прийнятих рішень, неоднозначність оцінки ситуації, помилки у виборі пріоритетів ускладнюють процес прийняття рішень

при управлінні, не дозволяють ефективно обробляти інформацію і оперативно аналізувати її для прийняття обґрунтованих рішень.

Основні завдання, які вирішуються оператором при дистанційному керуванні, носять логіко-аналітичний характер, вимагають обґрунтованих оперативних рішень на основі одержуваної фото- і відеоінформації та складаються з:

- вироблення рішення на виконання дій по пошуку об'єктів на підставі результатів аналізу подій і рівня наявних можливостей безпілотного літального апарату;
- виявлення, розпізнавання і визначення координат вибраного об'єкта;
- використання принципу вибору об'єкта за ступенем його важливості і пріоритетності;
- прийому, переробки і аналізу достовірності одержуваної інформації по радіоканалу;
- забезпечення сталого управління рухом безпілотного літального апарату за маршрутом, на якому очікується присутність вакансій оператора об'єктів;
- використання технічних можливостей бортових пристроїв і систем безпілотного літального апарату;
- управління корисним навантаженням: управління лінією видимості камери; напрямками та контролю нахилу камери по осях; захоплення моментального знімка, запам'ятовування і створення мітки на тлі карти; зміна масштабу; зміна фокусування [2].

Оператор безпілотного літального апарату в сучасних умовах ведення бойових дій виконує навігаційні, аналітичні функції, здійснює процеси розшифровки фото і відеоінформації та безпосередньо є особою, що приймає рішення.

Необхідні злагоджені і продумані дії оператора, здійснення яких можна тільки завдяки досвіду, знанням з управління безпілотним літальним апаратом і дешифрування фото і відео інформації. Основні функції спрямовані

на забезпечення виконання типових операцій оператором, а рішення логіко-аналітичних задач, пов'язаних з вибором об'єкта за ступенем її важливості, переробкою одержуваної по радіоканалу інформації, виробленням рішення на виконання дій по пошуку об'єктів з урахуванням рівня наявних можливостей безпілотного літального апарату в умовах оперативного зміни умов спостереження не вирішені і вимагають від оператора високої кваліфікації і інтуїції, оперативності прийняття рішень з управління безпілотним літальним апаратом.

Існує протиріччя між необхідністю своєчасного вироблення достатньо обґрунтованих рекомендацій щодо управління безпілотним літальним апаратом в умовах невизначеності, і обмеженими можливостями за існуючих наземних ПУ.

ВИСНОВКИ

Використання дистанційного управління при управлінні безпілотного літального апарату дозволяє своєчасно приймати обґрунтовані рішення оператором в умовах невизначеності, суперечливості вхідної інформації про об'єкти, обмежені можливості безпілотного літального апарату, складній завадовій ситуації, маневреної, вогневої, інформаційної протидії з сторони наземної цілі, значної кількості параметрів, значення багатьох з яких явно невизначені. Знання експертів дозволять сформулювати єдині правила по управлінню безпілотним літальним апаратом при вирішенні різних цільових завдань в умовах невизначеності.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ / REFERENCES

1. Andreev, K. V. (2015). *Optimal'nye traektorii bespilnogo letatel'nogo apparata pri slezhenii za podvizhnoy cel'ju s pomoshh'ju antennoj reshetki* [The optimal trajectories of an unmanned aerial vehicle while tracking a mobile target using an antenna array]. *Problemy upravlenija*, 5, 76–83 (in Russian)
[Андреев, К. В. (2015). Оптимальные траектории беспилотного летательного аппарата при слежении за подвижной целью с помощью антенной решетки. *Проблемы управления*, 5, 76–83].
2. Degtjarev, Ju. I. (1980). *Metody optimizacii* (Optimization methods). Moscow: Sovetskoe radio (in Russian)
[Дегтярев, Ю. И. (1980). *Методы оптимизации*. Москва: Советское радио].
3. Galushko, S. (2001). *Bespilotnye letatel'nye apparaty kardinal'no izmenjat oblik aviacii budushhego* [Unmanned aerial vehicles will radically change the look of the future aviation]. *Nauka i zhizn'*, 9, 18–20 (in Russian)

- [Галушко, С. (2001). Беспилотные летательные аппараты кардинально изменят облик авиации будущего. *Наука и жизнь*, 9, 18–20].
4. Kharchenko, O. V., Kuleshyn, V. V., & Kotsurenko, Yu. V. (2005). Klyasyfikatsiia ta tendentsii stvorennia bezpilotnykh litalnykh aparativ viiskovoho pryznachennia [Classification and trends of the creation of unmanned aerial vehicles for military use]. *Nauka i oborona*, 1, 57–60 (in Ukrainian)
[Харченко, О. В., Кулешин, В. В., & Коцуренко, Ю. В. (2005). Класифікація та тенденції створення безпілотних літальних апаратів військового призначення. *Наука і оборона*, 1, 57–60].
5. Kljuchka, Ju. P., Gasanov, H. Sh., & Krynskaja, N. V. (2014). *Analiz primenenija teplovizorov pri tushenii pozharov* [Analysis of applying the thermal imagers for fire extinguishing]. *Problemy pozharnoj bezopasnosti*, 36, 109–116 (in Russian)
[Ключка, Ю. П., Гасанов, Х. Ш., & Крынская, Н. В. (2014). Анализ применения тепловизоров при тушении пожаров. *Проблемы пожарной безопасности*, 36, 109–116].
6. Krasil'shnikov, M. N., & Sebrjakov, G. G. (Red.). (2005). *Upravlenie i navedenie bespilotnykh manevrennykh letatel'nykh apparatov na osnove sovremennykh informacionnykh tehnologij* [Management and guidance of unmanned aerial vehicles on the basis of modern information technologies]. Moscow: FIZMATLIT (in Russian)
[Красильщиков, М. Н., & Себряков, Г. Г. (Ред.). (2005). *Управление и наведение беспилотных маневренных летательных аппаратов на основе современных информационных технологий*. Москва: ФИЗМАТЛИТ].
7. Nikitin, S. K. (2013). *Teplovizory kak sredstvo profilaktiki pozharov* [Thermal imaging as a means of preventing fires]. *Algoritm bezopasnosti*, 5, 60–61 (in Russian)
[Никитин, С. К. (2013). Тепловизоры как средство профилактики пожаров. *Алгоритм безопасности*, 5, 60–61].
8. Sovetov, B. Ja., & Jakovlev, S. A. (1998). *Modelirovanie sistem* [Simulation of systems]. Moscow: Vysshaja shkola (in Russian)
[Советов, Б. Я., & Яковлев, С. А. (1998). *Моделирование систем*. Москва: Высшая школа].