

## **ПРОБЛЕМИ ЗАСТОСУВАННЯ УГРУПОВАНЬ МАЛИХ БЕЗПІЛОТНИХ ЛІТАЛЬНИХ АПАРАТІВ МУЛЬТИКОПТЕРНОГО ТИПУ ДЛЯ ВИРІШЕННЯ ВІЙСЬКОВИХ ЗАВДАНЬ**

*У статті розглянуто питання застосування малих безпілотних літальних апаратів (МБПЛА) мультикоптерного типу для вирішення військових завдань. Запропоновано математичне формулювання завдання управління застосуванням групи БПЛА.*

**Постановка проблеми.** На сьогоднішній день спостерігається значне підвищення інтересу до застосування БПЛА у військовій сфері. Це відбувається на фоні їх успішного застосування у воєнних конфліктах (в Афганістані, Югославії, Чечні та ін.). До цього часу практично всі БПЛА військового призначення здебільшого належали до двох основних класів: розвідники й мішені. На сьогоднішній день з появою нових зразків сфера їх застосування значно розширилася. З'явилося безліч нових завдань для існуючих і перспективних БПЛА як військового, так і цивільного призначення.

Особливої уваги серед перспективних БПЛА заслуговує клас малих літальних апаратів типу «мультикоптер», що сьогодні стрімко розвивається. Легкі апарати цього класу вже знаходять своє застосування для вирішення традиційних завдань тактичної розвідки та спостереження за полем бою. Однак технологія розробки мультикоптерних систем та групове їх застосування дозволяє вирішувати і ряд інших військових завдань.

**Огляд останніх досліджень і публікацій.** Питанням застосування БПЛА у військових цілях присвячена велика кількість наукових праць. Так, у монографії [1] вперше з єдиних позицій викладено концептуальні напрями розвитку форм і способів застосування безпілотних засобів. У [2–10] розглянуто перспективи розвитку та можливості щодо застосування БПЛА.

**Формулювання завдання дослідження.** В останні роки спеціалістами Житомирського військового інституту імені С. П. Корольова Національного авіаційного університету (ЖВІ НАУ) у ході навчань було проведено експериментальні дослідження із застосуванням макетів малих БПЛА, які виявили низку наукових і технічних проблем. Так, наприклад, до цього часу недостатньо уваги приділялося опису схем побудови та особливостей застосування МБПЛА мультикоптерного типу. Також особливою складністю характеризується управління застосуванням груп таких БПЛА для вирішення військових завдань. На висвітлення цих питань і направлена дана робота.

**Виклад основного матеріалу.** Безпілотні авіаційні засоби здавна традиційно використовувались для забезпечення бойових дій. Однак лише порівняно недавно (починаючи з 2006 року) швидкими темпами почав розвиватися новий клас малих

літальних апаратів – мультикоптери. Типовий мультикоптер – це дистанційно-керований або автономний МБПЛА з трьома (трикоптер), чотирма (квадрокоптер), шістьма (гексокоптер) чи вісьма (октокоптер) безколекторними електродвигунами з пропелерами (рис. 1). Загальним для всіх апаратів даного класу є конструкція і принцип польоту. Центральна частина мультикоптера («фюзеляж») служить для розміщення устаткування, навантаження і батареї живлення. Радіально від центру на балках встановлюються мікроелектродвигуни з пропелерами, утворюючи зіркоподібне компонування всього апарата. Проте така симетричність припускає наявність передньої та задньої частин, щодо яких зорієнтований напрям руху.

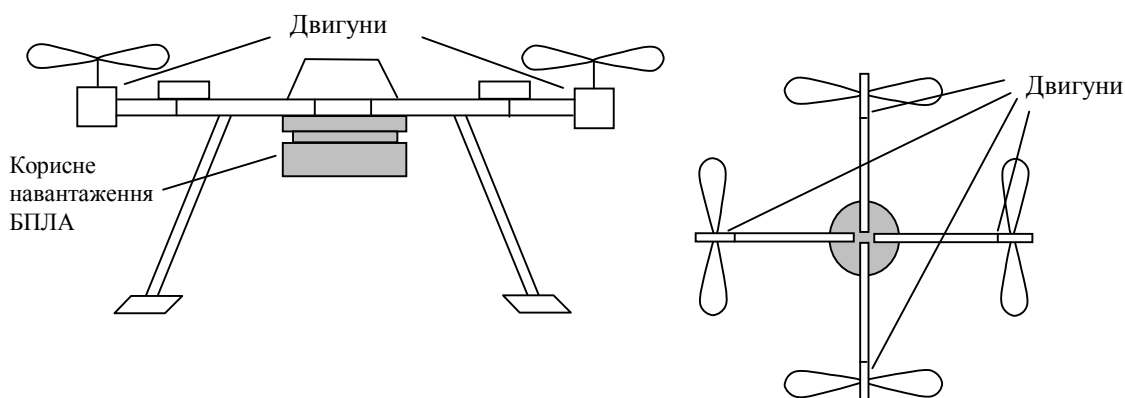


Рис. 1. Загальний вигляд мультикоптера (квадрокоптера)

У польоті мультикоптер підтримує горизонтальне положення щодо поверхні Землі, може зависати, переміщатися в сторони, вгору і вниз. За наявності відповідного устаткування є можливість здійснювати напіваавтономні й автономні польоти. Для компенсації виникаючого моменту, тобто уникнення обертання корпусу, у квадрокоптера, наприклад, передній і задній гвинти обертаються за годинниковою стрілкою, а лівий і правий – навпаки. Для початку руху квадрокоптер виводиться зі стану балансу (висіння) шляхом збільшення швидкості обертання (тяги) частини гвинтів. У результаті він нахилиється і спрямовується в потрібному напрямку. Для повороту квадрокоптера навколо своєї осі за годинниковою стрілкою передній і задній гвинти прискорюють обертання, а лівий і правий – уповільнюють, аналогічно – при повороті проти годинникової стрілки.

Основні режими польоту забезпечує автопілот чи контролер (рис. 2). Він використовує дані від декількох датчиків і стабілізує апарат у повітрі в горизонтальному положенні шляхом подачі сигналів, що керують двигунами. Автопілот працює за спеціальною програмою, обчислює швидкість для кожного гвинта, компенсує зовнішній вплив вітру. Управління апаратами здійснюється різноманітними способами: від традиційного радіоканалом (за допомогою передавача і радіоприймача) до сучасних методів, наприклад, за допомогою Wi-Fi через iPhone з використанням датчика положення. Додатково апарат може комплектуватися платою навігації, GPS-приймачем, компасом та іншим устаткуванням [11].

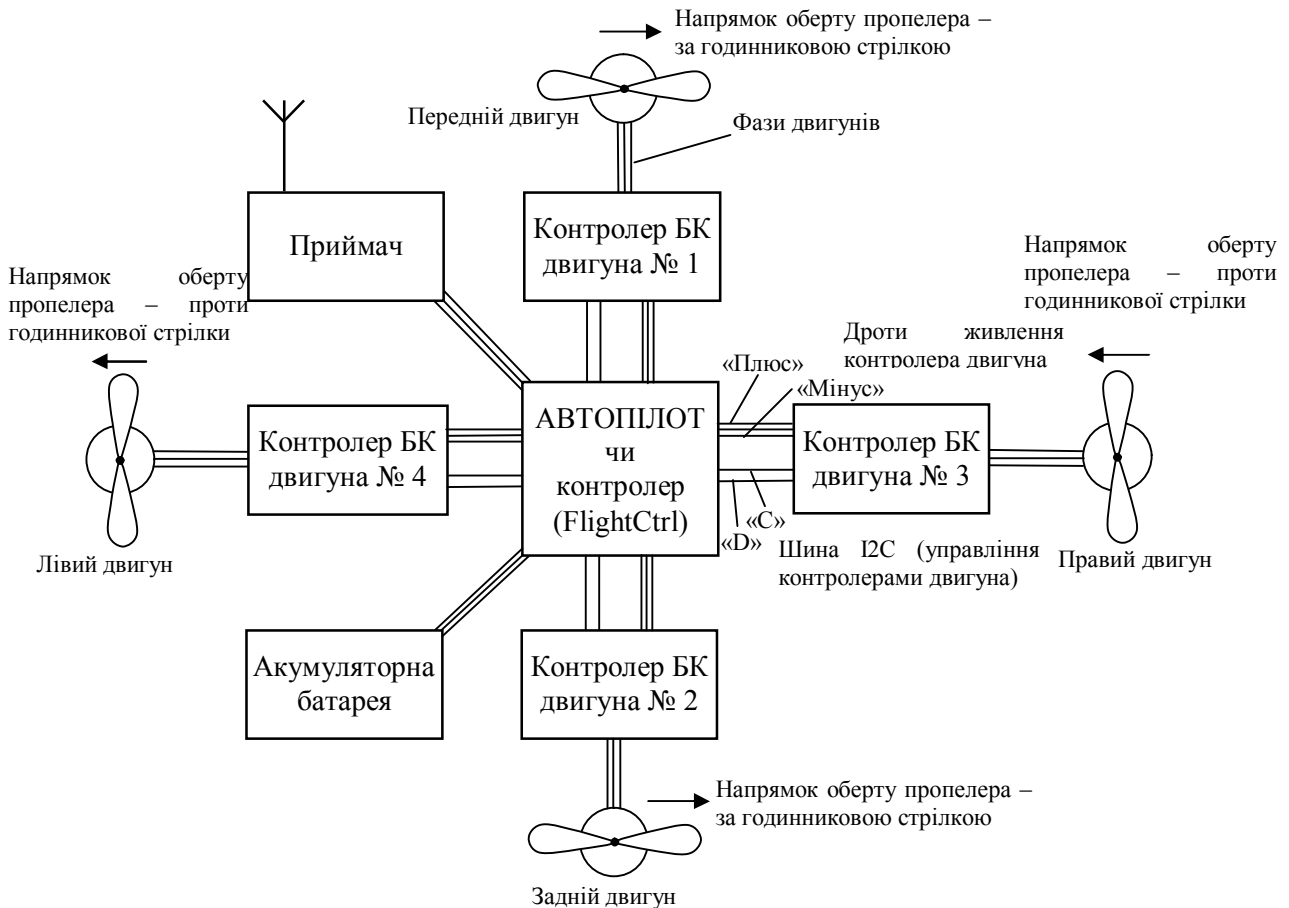


Рис. 2. Типова структурна схема мультикоптера (квадрокоптера)

Мультикоптери, на відміну від БПЛА гелікоптерного типу традиційної подовжньої схеми (несучий і рульовий гвинт) і апаратів співвісної схеми, володіють низкою переваг, таких як: простота і надійність конструкції та схеми стабілізації, мала злітна маса при істотному корисному навантаженні, компактність і маневреність. Ці переваги забезпечують і низьку серійну вартість такої техніки. Узагальнені тактико-технічні характеристики сучасних мултироторних МБПЛА наведено у таблиці 1.

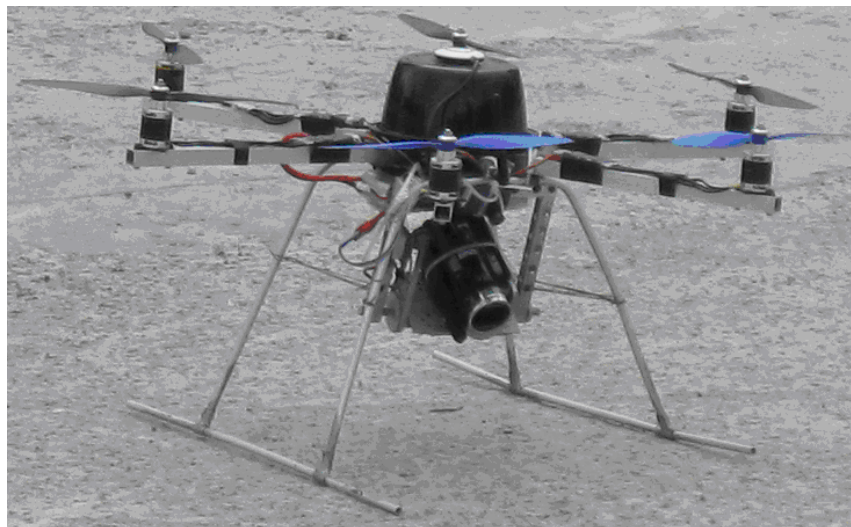
Таблиця 1

Узагальнені тактико-технічні характеристики мултироторних БПЛА

№ з. п.	Тактико-технічна характеристика	Значення
1.	Повна маса	до 10 кг
2.	Маса корисного навантаження	до 4 кг
3.	Максимальна дальність польоту	до 5 км
4.	Максимальна висота польоту	до 2 км
5.	Максимальна швидкість польоту	до 80 км/год
6.	Кількість двигунів	до 12
7.	Приблизна вартість випуску серійного зразка	до 80 тис. грн

Протягом декількох років на командно-штабних, дослідницьких, експериментальних навчаннях, міжвідомчих тренуваннях, показових батальйонних тактико-стройових

заняттях фахівцями ЖВІ НАУ ефективно застосовувалися макет комплексу оперативного управління та БПЛА вітчизняного виробництва для інформаційного забезпечення дій військ (сил). Фото макета БПЛА типу «гексокоптер» наведено на рис. 3.



*Рис. 3. Фото макета БПЛА типу «гексокоптер»*

Лише за 2013 рік у рамках таких навчань, як: дослідницьке двостороннє командно-штабне навчання «Чумацький шлях – 2013» (м. Новомосковськ, 24–26 квітня 2013 року); дослідницьке двостороннє командно-штабне навчання «Осінній циклон – 2013» (смт Старичі, вересень–жовтень 2013 року); тактичне навчання з батальйонною тактичною групою № 2 без бойових стрільб (м. Житомир, 30 жовтня – 02 листопада 2013 року); експериментальний збір з командирами військових частин (загонів, дивізіонів, батальйонів) Сухопутних військ (СВ) Збройних Сил (ЗС) України (м. Житомир, 10 жовтня 2013 року) – були відпрацьовані можливості застосування МБПЛА у складі розвідувальних підрозділів СВ ЗС України.

За результатами навчань виділено основні напрямки застосування мультикоптерних БПЛА для СВ ЗС України, а саме:

- оптико-електронна та інфрачервона розвідка;
- коректування вогню бронетанкової техніки;
- доставка корисних вантажів.

До застосувань МБПЛА (оптико-електронна та інфрачервона розвідка) традиційно висуваються високі вимоги, зокрема до льотно-технічних характеристик літальних апаратів, і сьогодні мультикоптери можуть претендувати тільки на тактичний рівень – забезпечення розвідки поля бою.

Іншим близьким за змістом завданням є застосування МБПЛА як коректувальника вогню [12] для бронетанкової техніки. При цьому один апарат призначається кожному танковому підрозділу, наприклад, танковій роті. Управління польотом такого МБПЛА та коректування вогню здійснюється з танка командира роти.

Перспективним напрямком розвитку є застосування мультикоптерних МБПЛА як засобів для доставки невеликих вантажів (боєприпасів, медикаментів, продуктів харчування тощо) [13]. Окремо можна розглядати застосування мультикоптерів для доставки засобів впливу до заданого місця або на визначені об'єкти. Такі МБПЛА можна застосовувати в системах

дистанційного мінування, радіоелектронного подавлення, доставки підірваних боєприпасів на важкодоступні об'єкти.

Поки що основною технічною проблемою застосування БПЛА мультикоптерного типу є досить малий час польоту (до 30 хв): швидко вичерпується запас електроенергії акумуляторів. Однак тактико-технічні й вартісно-економічні показники існуючих мультикоптерів свідчать про безперечну доцільність застосування таких МБПЛА для виконання тактичних завдань забезпечення бою.

Зрозуміло, що МБПЛА не може в повному обсязі виконати усі функції більш потужного БПЛА. Але ефективність малих мультикоптерних систем значно зростає при їх груповому застосуванні.

Таким чином, уже сьогодні існують усі підстави для створення нових високотехнологічних систем БПЛА, у складі яких можуть застосовуватись десятки і навіть сотні малих літальних апаратів. Саме тому великої актуальності набуває проблема групового управління МБПЛА.

Можна виділити два основні напрями щодо постановки та вирішення проблем групового управління МБПЛА [2–6, 14]: авіаційний та робототехнічний.

У рамках авіаційного більше уваги приділяється тактико-технічному обґрунтуванню видів груп [1], аеродинаміці та координації руху літальних апаратів.

У рамках робототехнічного напрямку МБПЛА розглядаються як літаючі роботи з «шістьма ступенями свободи», що здатні доставляти корисне навантаження до віддаленого чи небезпечного об'єкта та можуть виконувати різні цільові завдання, такі як: розвідка, спостереження, біохімічний сенсоринг і т. п. [14]. Це більш загальний підхід, при якому аеродинамічні властивості літальних апаратів в основному переводяться в розряд обмежень та допущень, а проблеми управління розглядаються як проблеми групового управління мобільними (літаючими) роботами.

Процес управління застосуванням МБПЛА пропонується розглядати з позицій теорії управління групою роботів. За цієї умови задача групового управління застосуванням БПЛА може бути сформульована таким чином [15, 16].

Нехай орбітальне угруповання МБПЛА  $\mathcal{R}$ , що складається з  $N$  МБПЛА  $R_j$  ( $j = \overline{1, N}$ ), функціонує в деякому середовищі  $E$ . Стан кожного МБПЛА  $R_j \in \mathcal{R}$  ( $j = \overline{1, N}$ ) у момент часу  $t$  описується векторною функцією  $\mathbf{r}_j(t) = [r_{j,1}(t), r_{j,2}(t), \dots, r_{j,h}(t)]^T$ . Стан МБПЛА характеризується: параметрами його руху, поточним значенням показників працездатності та якістю виконання завдань бортовою цільовою апаратурою. Стан угруповання МБПЛА  $\mathcal{R}$  задається вектором  $\mathcal{R}(t) = [\mathbf{r}_1(t), \mathbf{r}_2(t), \dots, \mathbf{r}_N(t)]^T$ . Стан середовища навколо  $j$ -го МБПЛА в момент часу  $t$  описується вектором  $\mathbf{e}_j = [e_{1,j}(t), e_{2,j}(t), \dots, e_{w,j}(t)]^T$ . Тоді стан середовища, у якому функціонують МБПЛА угруповання, за умови, що середовище стаціонарне, у момент часу  $t$  описується вектором  $\mathbf{e}(t) = [\mathbf{e}_1(t), \mathbf{e}_2(t), \dots, \mathbf{e}_N(t)]^m$ .

МБПЛА і середовище, взаємодіючи один з одним, утворюють систему «МБПЛА – середовище», стан якої у момент часу  $t$  описується парою  $\mathbf{s}_c = \langle \mathcal{R}, \mathbf{e} \rangle$ . Множина різних

станів системи «МБПЛА – середовище» визначається точками  $N \cdot (h + w)$ -мірного простору станів  $\{s_c\}$ . Під початковим і кінцевим (цільовим) станами системи «МБПЛА – середовище» розуміються

$$s_c^0 = \langle \mathcal{R}^0, e^0 \rangle, \quad s_c^f = \langle \mathcal{R}^f, e^f \rangle \quad (1)$$

відповідно.

Стан системи «МБПЛА – середовище»  $s_c^i = \langle \mathcal{R}^i, e^i \rangle$  у поточний момент часу називається поточним.

Кожен МБПЛА  $R_j \in \mathcal{R}$  ( $j = \overline{1, N}$ ) може виконувати дії, що описуються вектором  $a_j(t) = [a_{1,j}(t), a_{2,j}(t), \dots, a_{m,j}(t)]^T$ , причому множина дій, які може виконати МБПЛА,  $R_j \in \mathcal{R}$ , –  $\{a\}_j$ . Множина дій, що може виконати група МБПЛА, є об'єднанням множин дій окремих апаратів групи:  $\{a_c\} = \{a\}_1 \cup \{a\}_2 \cup \dots \cup \{a\}_N$ .

Дії, що виконуються групою МБПЛА у момент часу  $t$ , можуть бути зображені за допомогою вектор-функції  $a_c(t) = [a_1(t), a_2(t), \dots, a_N(t)]^m$ . Зміни стану системи «МБПЛА – середовище» описуються системою диференціальних рівнянь вигляду

$$\dot{s}_c = f_c(s_c(t), a_c(t)). \quad (2)$$

При цьому на ситуації, а також на дії групи МБПЛА можуть накладатися деякі обмеження:

$$s_c(t) \in \{s_c^p(t)\} \subset \{s_c\}, \quad a_c(t) \in \{a_c^p(t)\} \subset \{a_c\}, \quad (3)$$

де  $\{s_c^p(t)\}$  – множина допустимих станів системи «МБПЛА – середовище» у момент часу  $t$ ;

$\{a_c^p(t)\}$  – множина допустимих дій групи МБПЛА у момент часу  $t$ .

З урахуванням введених вище позначень завдання групового управління застосуванням МБПЛА полягає у визначенні на інтервалі  $[t_0, t_f]$  таких оптимальних дій  $\bar{a}_j(t)$  для кожного МБПЛА  $R_j \in \mathcal{R}$ , які переводять систему «МБПЛА – середовище» з початкового стану в кінцевий (цільовий) і при яких задовольняються система зв'язків (2), обмеження (3), а також забезпечується екстремум функціонала

$$Y_c = \int_{t_0}^{t_f} F(s_c(t), a_c(t), t) dt = \int_{t_0}^{t_f} F(r_1(t), r_2(t), \dots, r_N(t), e(t), a_1(t), a_2(t), \dots, a_N(t), t) dt, \quad (4)$$

що задає мету застосування групи МБПЛА та процесу управління й оцінює їх якість.

Спираючись на сформульовану задачу, можна виділити три класи завдань групового управління застосуванням МБПЛА для різних умов: завдання групового управління

застосуванням у стаціонарних організованих середовищах (ідеалізований варіант), завдання групового управління в динамічних недетермінованих ситуаціях і завдання групового управління в умовах протидії противника. Найбільш складними в алгоритмічному плані є завдання групового управління МБПЛА в умовах динамічних недетермінованих ситуацій, ускладнення зростає за наявності активної організованої протидії.

Для завдань групового управління МБПЛА, що функціонують в умовах динамічних недетермінованих середовищ, недостатньо організації оптимального управління. Необхідно, щоб відповідне рішення було прийнято протягом часу, за який стан  $s_c(t)$  системи «МБПЛА – середовище» істотним чином не зміниться.

**Висновки.** Таким чином, перспективним напрямком розвитку МБПЛА є застосування груп апаратів мультикоптерного типу для виконання завдань розвідки, наведення та доставки вантажів на полі бою.

Узагальнене завдання групового управління застосуванням МБПЛА пропонується розглядати з позицій теорії управління групою роботів.

У наступних роботах планується розглянути деякі сучасні підходи, що використовуються для вирішення завдання групового управління.

#### СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Радецький В. Г. Безпілотна авіація в сучасній збройній боротьбі : монографія / В. Г. Радецький, І. С. Руснак, Ю. Г. Даник. – К. : НАОУ, 2008. – 224 с.
2. Алексеев А. С. Работы в США по созданию боевых летательных аппаратов / А. С. Алексеев // Зарубежное военное обозрение. – 2001. – № 7. – С. 13–15.
3. Дистанционно пилотируемые летательные аппараты, их характеристики и особенности применения. / Л. Г. Варченко, О. П. Гудыма, Н. А. Колесник, М. Г. Русанов // Зб. наук. праць ХВУ. – Х. : ХВУ, 2001. – Вип. 7 (37). – С. 24–34.
4. Даник Ю. Г. Методологічні основи виявлення об'єктів і обробки результатів спостережень бортовими засобами безпілотних літальних апаратів / Ю. Г. Даник // Зб. наук. праць ХІ ВПС. – Х. : ХІ ВПС, 2004. – Вип. 2 (11). – С. 120–133.
5. Даник Ю. Г. Аналіз застосування і перспективи використання безпілотних літальних апаратів / Ю. Г. Даник, Я. Я. Ткаченко // Зб. наук. праць ХВУ. – Х. : ХВУ, 2001. – Вип. 4 (34). – С. 66–71.
6. Кобрусев С. Преимущества беспилотных авиационных комплексов / С. Кобрусев // Военный парад. – 2002. – № 4. – С. 20–24.
7. Стеценко О. О. Космічні системи інформаційного забезпечення безпілотних засобів різного призначення : підручник / О. О. Стеценко, Ю. Г. Даник, М. С. Пастушенко. – Х. : ХУПС, 2006. – 348 с.
8. Ростопчин В. Беспилотные авиационные системы / В. Ростопчин, С. Румянцев // Вестник воздушного флота. – 2001. – Март–апрель. – С. 44–47.
9. Общие виды и характеристики беспилотных летательных аппаратов : справ. пособ. / А. Г. Гребенников, А. К. Мялица, В. В. Парфенюк и др. – Х. : Нац. аэрокосм. ун-т «Харьков. авиац. ин-т», 2008. – 377 с.

10. International Civil Aviation Organization. CIR 328. Беспилотные авиационные системы (БАС). – ИКАО, 2011. – 128 с.
11. Микрокоптер-Мікрокоптер-Мультикоптер. Конструкция и принцип действия микрокоптера [Электронный ресурс]. – Режим доступа : <http://www.multicopter.ru>.
12. Вакал А. О. Застосування МБПЛА в інтересах забезпечення виконання завдань артилерією / А. О. Вакал // Перспективи та шляхи розвитку бойового забезпечення ракетних військ і артилерії Сухопутних військ Збройних Сил України : зб. наук. праць СумДУ. – Суми : СумДУ, 2009. – С. 21–22.
13. Пат. 75572. Україна, МПК G05B 17/00. Спосіб доставки засобів впливу до заданого місця або на визначені об'єкти / Ю. Г. Даник, І. В. Пулеко, П. В. Поздняков ; заявник і власник Ю. Г. Даник. – № 75572 ; заявл. 24.04.12 ; опубл. 10.12.12, Бюл. № 23.
14. Каляев И. А. Стайные принципы управления в группе объектов / И. А. Каляев, А. Р. Гайдук // Мехатроника, автоматизация, управление. – 2004. – № 12. – С. 29–33.
15. Гандурин В. А. Алгоритм коллективного улучшения плана в задачах распределения ресурсов многопроцессорных информационно-управляющих систем / В. А. Гандурин, С. Г. Капустян, Э. В. Мельник // Вестник компьютерных и информационных технологий. – 2007. – № 1. – С. 27–32.
16. Интеллектуальные роботы : учеб. пособ. для вузов / Е. И. Юревич, И. А. Каляев, В. М. Лохин и др. – М. : Машиностроение, 2007. – 360 с.

Подано 16.07.13

**Ю. Г. Даник, И. В. Пулеко, П. П. Топольницкий, С. В. Чуб**  
**ПРОБЛЕМЫ ПРИМЕНЕНИЯ ГРУППИРОВОК МАЛЫХ БЕСПИЛОТНЫХ**  
**ЛЕТАТЕЛЬНЫХ АППАРАТОВ МУЛЬТИКОПТЕРНОГО ТИПА ДЛЯ РЕШЕНИЯ**  
**ВОЕННЫХ ЗАДАЧ**

*В статье рассмотрены вопросы применения малых беспилотных летательных аппаратов мультикоптерного типа для решения ряда военных задач. Приведена математическая постановка задачи управления применением группы беспилотных летательных аппаратов.*

**J.G. Danik, I.V. Puleko, P.P. Topolnitsky, S.V. Chub**  
**PROBLEMS OF USE CONSTELLATIONS OF SMALL MULTICOPTER UAVs FOR**  
**SOLVING MILITARY TASKS**

*The article discusses the use of small multicopter UAVs for solving a some of military tasks. Formulated the mathematical formulation of the problem group control using unmanned aerial vehicles.*