

**Геннадій Павлович Болотов¹, Анатолій Леонідович Приступа²,
Сергій Анатолійович Степенко³, Владислав Русланович Пархоμεць⁴**

¹доктор технічних наук, професор, професор кафедри технології зварювання та будівництва
Національний університет «Чернігівська політехніка» (Чернігів, Україна)
E-mail: bolotovgp@stu.cn.ua. ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-0305-2917>
ResearcherID: H-5304-2014. SCOPUS Author ID: 6506157907

²кандидат технічних наук, доцент,
завідувач кафедри електричної інженерії та інформаційно-вимірювальних технологій
Національний університет «Чернігівська політехніка» (Чернігів, Україна)
E-mail: anatoliy.prystupa@stu.cn.ua. ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-9412-2698>
ResearcherID: F-5507-2014. SCOPUS Author ID: 57190807222

³ кандидат технічних наук, доцент, провідний науковий співробітник,
доцент кафедри електричної інженерії та інформаційно-вимірювальних технологій
Національний університет «Чернігівська політехніка» (Чернігів, Україна)
E-mail: serhii.stepenko@stu.cn.ua. ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-7702-6776>
ResearcherID: F-1018-2014. SCOPUS Author ID: 55570068000

⁴лаборант кафедри електроніки, автоматики, робототехніки та мехатроніки
Національний університет «Чернігівська політехніка» (м. Чернігів, Україна)
E-mail: vlad.parkhom.ts@gmail.com

ОБҐРУНТУВАННЯ ТИПУ МУЛЬТИКОПТЕРНОГО ДРОНУ ДЛЯ ВИКОРИСТАННЯ У СКЛАДІ МУЛЬТИАГЕНТНИХ СИСТЕМ

Стаття має оглядовий характер, та містить коротку характеристику автономних та FPV дронів на прикладі найбільш поширених варіантів, які зараз використовуються у Російсько-Українській війні. На основі проведеного аналізу відзначено особливості кожного типу дронів, що дозволяє аргументовано обрати варіант дрона, який найбільше підходить для перехоплення ворожих безпілотних літальних апаратів у складі мультиагентної системи.

Ключові слова: безпілотний літальний апарат; технічні характеристики; система енергозабезпечення; акумуляторна батарея.

Рис.: 3. Бібл.: 17.

Актуальність теми дослідження. Тема цієї статі нині є дуже актуальною, бо зараз Україна перебуває у стані війни з Росією, і безпілотні літальні апарати (БПЛА), які часто називають дронами, набули вагомого значення під час виконання різних польових та розвідувальних завдань, адже вони дають змогу, безпечно, зібрати потрібні дані чи вразити певну ціль.

Постановка проблеми. З метою вибору оптимального типу, конструкції та параметрів дрона для використання в мультиагентних системах як дрона-детектора та дрона-перехоплювача ворожого БПЛА важливим завданням є проведення критичного огляду БПЛА різного призначення, аналіз їх технічних характеристик та визначення особливостей. Це полегшить та пришвидшить процес розробки нових безпілотних апаратів, чи методів боротьби проти них, а також дасть краще розуміння принципів роботи різних, у тому числі й ворожих, дронів, їхніх призначень та параметрів.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Попередні спроби систематизувати інформацію в основному мали загальний характер [1-2]. Також із підвищенням популярності саме FPV дронів, багато джерел висвітлюють саме цей тип БПЛА. Вони намагаються простою для розуміння мовою, без детальних поглиблень у тему, розповісти про різні аспекти будовання та керування дронами. Також є спроби поглибитись у комунікаційну частину БПЛА, а саме радіозв'язок [3-4], де вже більш детально описуються різні способи зв'язку між оператором та дроном, їхні переваги та недоліки.

Мета статті. Метою цієї статті є огляд та аналіз параметрів існуючих дронів різного призначення з метою обрання оптимального варіанту БПЛА для використання в мультиагентній системі перехоплення ворожих дронів типу Shahed, розгляд характеристик як конкретних серійних зразків, так і дронів власної розробки.

Виклад основного матеріалу. До початку розробки нових дронів, чи методу боротьби проти них, потрібно провести аналіз вже ухвалених рішень та детально розібратися у їх можливостях. Для цього розглянемо й дослідимо структуру безпосередньо безпілотного апарату та дізнаємось його характеристики.

Почнемо із серії автономних БПЛА Shahed, а саме, моделі Shahed 131 та Shahed 136 (рис. 1), оскільки вони частіше атакують інфраструктурні та військові об’єкти в глибині нашої країни й захист саме від них є найбільш актуальною проблемою.



Рис. 1. Зовнішній вигляд:
а – Shahed 131; б – Shahed 136 [7]

Shahed 131.

Це дрон, який створений для односторонньої атаки супротивника, та не передбачає повернення назад. Основні характеристики [5-7]:

- Довжина: 2,6 м
- Розмах крил: 2,2 м
- Приблизна маса: 135 кг (разом з паливом)
- Вага боєголовки: 15 кг
- Розташування заряду: у носовій частині
- Максимальний запас ходу: 900 км
- Двигун: внутрішнього згорання роторно-поршневий
- Акумулятор: Літій-іонна батарея 25,9 В 17000 мА·год
- Наведення: Інерційне та GPS
- Запуск: зі спеціальної платформи
- Присутня система ATOL (automatic take-off and landing)
- Модифікований GNSS трансивер
- Присутній блок вимірювання інерції

Детальніше розглянемо такі компоненти, як блок керування польотом, модифікований GNSS трансивер, система ATOL та блок вимірювання інерції.

Блок керування польотом (FCU – fly control unit). Це головна частина БПЛА, яка контролює процес польоту безпілотника. Він може підключати лінію прямої видимості (LOS), радіо Iridium SATCOM, можливо самонаведення та попередньо запрограмовані траєкторії польоту.

Модифікований GNSS трансивер. Це частина дрона, що відповідає за зв'язок, та дає можливість дрона визначити свої координати у просторі. Сама модифікація трансивера полягає в заміні чорних GNSS антен на білі, які дають можливість працювати у повітряному просторі, де заборонено GNSS.

Система ATOL. Ця система встановлюється між GNSS та FCU. Вона додає функціоналу для БПЛА. Ця система має індикацію чотирьох режимів, такі як:

- PGNSS – про цей режим немає інформації у відкритих джерелах.
- DGNS – це режим, де за допомогою мережі наземних опорних станцій можна підвищити точність визначення позиції БПЛА та допомогти зберегти траєкторію польоту за допомогою GPS координат у зоні де GPS заборонено.
- SGNSS – покращує точність, чутливість вимірів, а також забезпечує нову категорію вимірювань – кут приймання. Завдяки розрізненню напрямків прийняття сигналу можна ідентифікувати, чи ігнорувати джерело сигналу, а також знайти джерело спуфінгу GNSS.
- HDG – це режим утримання напрямку дрона. Він дозволяє при втраті GNSS сигналу продовжити політ до відновлення зв'язку. Це може бути причиною чому даний тип БПЛА наближається до цілі, але не може на 100% влучити у бажану точку. Коли увімкнено даний режим дрон перемикається з GNSS на дані з блоку вимірювання інерції для продовження польоту, у цей час навколишній вітер відхиляє його, бо FCU не може правильно скоригувати траєкторію, що призводить до неточних влучань. Приблизна похибка 5 % від відстані до цілі коли увімкнули HDG режим.

Блок вимірювання інерції. Це цифровий комп'ютер повітряних мас, який використовує як статичні датчики, так і трубки Піто, що дозволяє оцінити швидкість літального апарату, його висоту та тенденцію зміни висоти. Його дані використовуються як вхідні у режимі HDG.

Більш детальна інформація щодо цього типу БПЛА представлена в [5].

Shahed 136.

Це дрон, на основі якого було створено Shahed 131. Їх головні відмінності між собою – це більший розмір, більша вага та більша бойова частина у першого, яка може нести заряд до 50 кг, що у декілька разів більше, ніж у другого. Також на цьому дроні стоїть звичайний поршневий двигун внутрішнього згорання, коли в Shahed 131 встановлено роторний.

Основні характеристики цього БПЛА [7; 8]:

- Довжина: 3,5 м
- Розмах крил: 2,5 м
- Приблизна маса: 200 кг (разом з паливом)
- Вага боеголовки: 50 кг
- Розташування заряду: в носовій частині
- Максимальний запас ходу: 2000 км
- Швидкість: 185 км/год
- Двигун: внутрішнього згорання поршневий
- Наведення: Інерційне
- Запуск: зі спеціальної платформи

Ця версія хоч і має більшу бойову частину, натомість немає точних систем наведення на ціль, що призводить до суттєвих похибок при влучанні у ціль. Також за даними джерела [8] реальний запас ходу у Shahed 136 може бути значно менший від заявленого, адже для подолання такої відстані з тим двигуном, що встановлено, потрібно витратити більше палива, ніж вага усього БПЛА, тому реальний запас ходу оцінюють у декілька сотень кілометрів.

Підсумовуючи усе вищезазначене, можна зауважити, що використання дронів типу Shahed 136 та Shahed 131 є доцільним при використанні ройового стилю, коли одночасно запускають багато одиниць, намагаючись зменшити вплив якості збірки їх кількістю, з розрахунком на те, що якась частина зможе долетіти до цілі, та у сукупності зможе покращити середній відсоток влучань. Для підвищення ефективності траєкторії дронів у рою задають різними, що ускладнює роботу мобільних груп щодо їх виявлення та знешкодження.

FPV дрони.

Цей клас БПЛА відрізняється від автономних Shahed наявністю камери на борту, що дозволяє керувати ним у режимі реального часу, меншими розмірами, вантажопідйомністю та бойовою частиною, а також меншим запасом ходу. Проте ціна таких моделей значно нижча. Це дозволяє створювати такий тип БПЛА, як дрони-камікадзе або дрони для скиду, які можуть дуже точно влучати в ціль за рахунок постійного відеозв'язку з оператором.

Попри невелику ціну та малі габарити, ці безпілотні апарати, в парі з вправним оператором, здатні знищувати важку техніку та влучати у важкодоступні місця. Відмінність у використанні даного типу БПЛА полягає в тому, що дрон-камікадзе доставляє боєприпас до повного влучання в ціль, що призводить до його самознищення, а скидний – може скинути бойовий заряд, повернутися та перезарядитися для наступної атаки.

Оскільки такі дрони знаходяться доволі близько до цілі, є ймовірність, що їх можуть збити або перехопити. Тому обладнання на такі апарати ставлять якісне, але не дуже дороге, що дозволяє також використовувати ройовий стиль із меншими витратами. Одним із представників таких дронів є FPV Revenge, розроблений та виготовлений українською компанією Drone Ukraine.

FPV Revenge 3.

Це багатофункціональний дрон, який можна використовувати як розвідувальний, для скидання бойових зарядів, чи як дрон-камікадзе. Обладнаний вбудованою камерою, має потужний відеопередавач та двигуни, що дозволяють виконувати багато різних маневрів та наздоганяти ціль, отримуючи команди від оператора у реальному часі. Також має можливість працювати без GPS.

Основні характеристики[11-13]:

- Розмір рами: 10", або 25,4 см
- Номінальна/максимальна вантажопідйомність: 2,5/3,5 кг
- Час роботи без навантаження (БН)/з(ЗН): до 55 хв/до 12 хв
- Максимальна дальність польоту БН/ЗН: 25 км/10 км
- Максимальна швидкість: 110 км/год, або 30,5 м/с
- Максимальна висота підйому: до 2 км
- Частота роботи: 5,8 ГГц чи 1,3 ГГц
- Потужність приймача: 500 мВт
- Потужність відеоканалу: 1600 мВт
- Навігація: GPS 9 покоління
- Камера: 1200 TVL 8 М
- Запуск: із землі.

З особливостей у цього дрону є можливість використання виносної антени до 30 м для додаткового захисту оператора від методів радіопеленгації, коли завдяки сигналу, що видає оператор з пульта керування, можна визначити джерело. Також цей дрон має функцію повернення, яка дозволяє отримати ще один шанс на повторне використання цього БПЛА.

Існує широке коло задач, коли потрібно мати безпілотний апарат, який не буде постійно знаходитися у зоні ризику, матиме краще обладнання, використовуватиметься для тривалих та далеких польотів та отримання якіснішої картинки при розвідці. Тобто, такий БПЛА, головна задача якого, це тривале та ефективне здійснення розвідки з більшою

кількістю можливостей та функцій. На такі дрони цілком виправдано встановлювати дороге та високоточне обладнання, додавати різний функціонал, який зможе покращити роботу оператора. У них висока якість збірки та електронного обладнання, що дозволяє збільшити радіус дії, запас ходу, якість відео, час роботи, зменшити вагу та багато іншого. Гарним представником цього класу є квадрокоптер Mavic 3.

Mavic 3.

Розвідувальний дрон різного призначення, виготовляється китайською компанією DJI, обладнаний двома камерами: Сенсор CMOS 4/3" від Hasselblad, який може забезпечити високу роздільну здатність, динамічний діапазон, а також ефективно подолання шумів в умовах низького освітлення, та модуль з датчиком CMOS 1/2" і телеоб'єктивом, з більшою фокусною відстанню, ніж перший сенсор.

Основні характеристики Mavic 3:

- Вага: 895г (дрон – 559,5 г, батарея – 335,5 г)
- Габарити (Д/Ш/В):
 - у складеному стані: 221/96,3/90,3 мм
 - у розкладеному стані: 347,5/283/107,7 мм
- Передача сигналу:
 - Технологія: O3+(OcuSync 3 Plus)
 - Якість перегляду в реальному часі: пульт ДУ(1080p/30fps, 1080p/60fps)
 - Максимальна дальність: 15 км (FCC), 8 км при (CE)
 - Затримка: 130 мс
 - Максимальний бітрейт завантаження: SDR(5.5 МБ/с), Wi-Fi 6(80 МБ/с)
- Політ:
 - Максимальна висота над рівнем моря: 6 км
 - Максимальний час польоту: 46 хв (без вітру)
 - Максимальний час зависання: 40 хв (без вітру)
 - Максимальна дальність польоту: 30 км
 - Максимальна швидкість:
- підйому: 8 м/с
- спуску: 6 м/с
- польоту (на рівні моря, без вітру): 21 м/с
 - Максимальна швидкість вітру: 12 м/с
- Сенсори:
 - Hasselblad:
 - CMOS: 4/3", 20 Мп
 - Апертура: f/2.8-f/11
 - Кут огляду (FOV): 84°
 - Телекамера:
 - CMOS: 1/2", 12 Мп
 - Апертура: f/4.4
 - Кут огляду (FOV): 15°
- Кріплення камери:
- Стабілізація: трьох осьова моторизована
- Діапазон кутових коливань: $\pm 0,007^\circ$
- Вбудована пам'ять: 8 ГБ
- Акумулятор:
 - Ємність: 5000 мА·год
 - Напруга: 15,4 В

- Тип батареї: Літій-іонний 4S
- Вага: 335,5 г
- Запуск: із землі.

Також дана модель має всеспрямовану систему бінокулярного зору, доповнену інфрачервоним датчиком у нижній частині, що дозволяє визначати та оминати перешкоди під час польоту, а також будувати оптимальний шлях повернення у точку злету при команді, чи при втраті зв'язку з оператором. Ця система дозволяє уникнути багатьох випадків, коли дрон влітає в перешкоду та виходить з ладу, а також це дозволяє оператору зосередитися на тому, що він бачить [9; 10].

Підбиваючи підсумки, можна сказати, що даний БПЛА найкраще підходить для розвідки, як на відкритій місцевості, завдяки алгоритмам опору вітру, так і в міській місцевості, де є багато перешкод у вигляді стовпів, будинків тощо. А система автоматичного повернення на місце зльоту дозволяє збільшити шанс того, що при втраті зв'язку з дроном він може вціліти, та продовжити виконання своєї задачі. З мінусів це відсутність виваженої антени, що наражає оператора на додаткову небезпеку.

Також недоліком серійних квадрокоптерів можна вважати неможливість або суттєву складність їх використання в автоматичних або напіваавтоматичних системах перехоплення ворожих дронів. Оскільки для цього необхідно інтегрувати в них додаткові системи виявлення, розпізнавання та перехоплення ворожого беспілотного літального апарату. Для цієї мети доцільніше використовувати апарати власної розробки. Так, на кафедрі електроніки автоматики, робототехніки та мехатроніки (ЕАРМ) НУ «Чернігівська політехніка» у межах виконання низки науково-дослідних робіт було розроблено декілька моделей квадрокоптерів (рис. 2), які за основними технічними характеристиками: вантажопідйомність, енергозабезпеченість, час польоту та інші не поступаються серійним БПЛА, які були розглянуті вище [14].



Рис. 2. Квадрокоптери, що розроблено на кафедрі ЕАРМ

а) б)

Джерело: розроблено авторами.

У них легко можна інтегрувати додаткові як програмні, так і апаратні модулі, які необхідні для виявлення та перехоплення ворожих дронів, адаптивні алгоритми керування на основі методів штучного інтелекту. Для пришвидшення їх масового виробництва на перших етапах можна скористатися готовими платформами від китайських виробників (рис. 3), які доступні для придбання.



Рис. 3. Готова платформа для квадрокоптера

Джерело: розроблено авторами.

Зазвичай як основне джерело енергії невеликих дронів мультикоптерного типу застосовується акумуляторна батарея з декількох літій-іонних чи літій-полімерних акумуляторів [14]. Нині ці типи акумуляторів мають найкращу інтегральну характеристику за параметрами питома енергоємність та вартість. Причому літій-іонні акумулятори дещо випереджають за питомою енергоємністю літій-полімерні акумулятори. Один елемент таких акумуляторів має номінальну напругу від 3,6 до 3,7 В. У робочому циклі напруга на них змінюється від 2,8 до 4,2 В. Для дронів невеликої загальної маси (одиниці кілограм) зазвичай використовуються акумуляторні збірки з послідовним з'єднанням по 3-5 елементів, тобто схемою від 3s до 5s з загальною номінальною напругою від 10,8 до 18,5 В. У більшості випадків вистачає по одному високострумівому елементу і паралельне включення не використовується або використовується невелика кількість паралельно з'єднаних акумуляторів (у більшості випадків 2-3). Таким чином, загальна схема таких акумуляторних батарей буде від 3s1p (три послідовно з'єднані елементи) до 5s3p (п'ять послідовно з'єднаних елементи та 3 паралельно). Спроба використати для легкого дрона велику батарею, зазвичай, не приводить до збільшення тривалості польоту чи вантажопідйомності, а навпаки, ці показники можуть навіть зменшитись, оскільки основну вагу дрона буде складати акумуляторна батарея. У більш потужних мультикоптерах, загальною масою десятки - сотні кілограм використовуються акумуляторні батареї з більш високою напругою (до 60 В і більше), що дозволяє зменшити значення максимального струму (до десятків ампер), забезпечивши при цьому миттєву потужність споживання двигунами таких дронів тисячі ват. У таких дронах використовують схеми з'єднання елементів батарей 15s6p і більші. Їхня ємність може бути від одиниць до десятків А·год. Для швидкої зарядки таких батарей треба забезпечити протікання великих струмів через зарядні кола, що створює серйозні виклики для розробників зарядних станцій, особливо при бездротовій зарядці, так як це призводить до збільшення маси зарядного пристрою на борту дрона. Бездротові зарядки є сенс використовувати, коли не потрібно дуже швидко заряджати БПЛА або при незначній ємності їх акумуляторних батарей. Для зменшення маси бортового безпроводного зарядного пристрою можна виготовляти приймальні котушки електромагнітної енергії не з міді, а зі спеціальних сплавів легких металів, що дасть вигоду по масі, проте призведе до збільшення габаритів котушки. [16-17].

При перетворенні енергії для живлення внутрішніх вузлів дрона слід застосовувати перспективні перетворювачі електричної енергії з використанням інтелектуальних методів керування [15] та з високою робочою частотою, що може сягати десятків мегагерц. Це стає можливим при використанні як силових елементів перетворювача новітніх високочастотних арсенід галієвих (GaN) транзисторів. Їхнім недоліком можна вважати значно більшу

ціну в порівнянні з поширеними і вже традиційними кремнієвими транзисторами. Підвищення робочої частоти перетворювачів дозволяє зменшити також масу та габарити силових дроселів, трансформаторів та конденсаторів, що використовуються в перетворювачах. А використання GaN транзисторів дозволяє відмовитись від масивної системи охолодження.

Висновки. Проаналізувавши декілька типів БПЛА можна зробити висновок, що для виконання задач по виявленню та знешкодженню низькошвидкісної літальної цілі в межах функціонування мультиагентної системи захисту об'єктів критичної інфраструктури, найбільш підходить саме FPV дрон. Недоліки даного типу БПЛА, пов'язані з невеликим запасом ходу та часом роботи можуть бути частково компенсовані використанням інтелектуальних алгоритмів керування електродвигунами та по черговою зміною елементів мультиагентної системи "під час чергування". Це стає можливим з використання польотних контролерів з відкритим кодом. Другий суттєвий недолік таких дронів полягає у необхідності знаходження оператора поблизу цілі, що створює певну затримку, пов'язану з людським фактором. Тому в контексті цього БПЛА, які є елементами мультиагентної системи, повинні використовувати розвинену інформаційно-вимірвальну систему, яка на основі інформації від різних датчиків, використовуючи інтелектуальні алгоритми, на основі методів штучного інтелекту, вироблятиме автоматичне рішення щодо ідентифікації цілі, визначення траєкторії руху, перехоплення та знешкодження ближчим до цілі дроном. На це і будуть спрямовані подальші дослідження в рамках НДР 0123U101819 "Мультиагентна система захисту об'єктів критичної інфраструктури на основі рою мультикоптерних дронів".

Список використаних джерел

1. First-person view (FPV) дрони [Електронний ресурс] // People's Project.com. – Режим доступу: <https://www.peoplesproject.com/first-person-view-droni>.
2. MAJ Andrew William Sanders. Drone Swarms. US Army. School of Advanced Military Studies United States Army Command and General Staff College Fort Leavenworth, Kansas, 2017. – 47 p.
3. Що таке FPV і в чому різниця 2.4 ГГц та 5.8 ГГц аналог або Wi-Fi? [Електронний ресурс] // MARODER. – Режим доступу: <https://maroder.com.ua/uk/obzor/chto-takoe-fpv-i-v-chem-raznitsa>.
4. A Review of Counter-UAS Technologies for Cooperative Defensive Teams of Drones. Drones / Vittorio Ugo Castrillo, Angelo Manco, Domenico Pascarella and Gabriella Gigante. – 2022. – № 6 – P. 65.
5. Shahed на нашу голову – детальний технічний звіт про безпілотник іранського виробництва [Електронний ресурс] // ІТС.ua. – Режим доступу: <https://itc.ua/ua/novini/shahed-na-nashu-golovu-detalnij-tehnicnij-zvit-pro-bezpilotnik-iranskogo-virobnitstva>.
6. Менша версія, але так само вбивча: що відомо про дрони-камікадзе Shahed-131 [Електронний ресурс] // Вікна. – Режим доступу: <https://vikna.tv/dlia-tebe/bezpeka/bezpilotnyk-shahed-131-harakterystyky-ta-yak-praczuuye>.
7. Россия массированно атаковала Украину «шахедами»: в чем разница между дронами Shahed 136 и Shahed 131 [Електронний ресурс] // New Voice. – Режим доступу: <https://nv.ua/ukraine/events/shahedy-shahed-136-i-131-v-chem-raznica-harakteristiki-nedostatki-i-infografika-novosti-ukrainy-50327025.html>.
8. Чим відрізняється shahed-131 від shahed-136 [Електронний ресурс] // Nizhyn NEWS. – Режим доступу: <https://nizhyn.in.ua/chim-vidriznyayetsya-shahed-131-vid-shahed-136-4.html>.
9. Обзор основных характеристик Mavic 3 i Mavic 3 Cine [Електронний ресурс] // Wazza Blog. – Режим доступу: <https://blog.wazza.com.ua/drony/obzory-i-sravneniya/obzor-osnovnyh-harakteristik-mavic-3-i-mavic-3-cine>.
10. DJI Mavic 3 [Electronic resource] // DJI Official. – Mode of access: <https://www.dji.com/global/mavic-3/specs>.
11. Квадрокоптер FPV дрон Revenge 3 (1.3 GHz, 2.5 kg, 8400 mah, 10 km) камікадзе [Електронний ресурс] // Bezpeka. club. – Режим доступу: <https://bezpeka.club/product/kvadrokofter-fpv-dron-revenge-3-1-3-ghz-2-5-kg-8400-mah-10-km-kamikadze/>.

12. Квадрокоптер FPV дрон Revenge 3 (7 km, 2 kg, 5.8 GHz) [Електронний ресурс] // Safety. – Режим доступу: <https://safety.kiev.ua/ru/kvadrokopter-fpv-dron-revenge-3-7-km-2-kg-5-8-ghz/>.
13. Квадрокоптер FPV камікадзе Revenge [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://drone.safety.kiev.ua/>.
14. Системи регулювання роботизованих комплексів: монографія / Ю. О. Денисов, В. П. Войтенко, А. С. Ревко. – Івано-Франківськ : НАІР, 2021. – 128 с.
15. Stepwise Pulse-Width Modulation in Quasi-Resonant Pulsed Converters Using Switched Capacitors / A. Revko, R. Yershov, D. Yakosenko, D. Beznosko // IEEE 38th International Conference on Electronics and Nanotechnology (ELNANO), 2018. – Pp. 711-716.
16. Design Background Considerations of the Autonomous Power Supply System for Drones / S. Stepenko, A. Prystupa, A. Revko, V. Kazymyr, A. Rohovenko and Y. Kuts // IEEE 4th KhPI Week on Advanced Technology (KhPIWeek). – Kharkiv, Ukraine, 2023. – Pp. 1-4. DOI: 10.1109/KhPIWeek61412.2023.10312889
17. Development of energy efficient power supply systems for multicopter drones / V. Kazymyr, A. Revko, A. Prystupa, S. Stepenko, A. Rogovenko // Комплексне забезпечення якості технологічних процесів та систем (КЗЯТПС – 2023) : тези доповідей XIII Міжнародної науково-практичної конференції (м. Чернігів, 25–26 травня 2023 р.) : у 2 т. Т. 2. – Чернігів : НУ «Чернігівська політехніка», 2023. – С. 215-216.

References

1. First-person view (FPV) drony. (b.d.). Peoples Project.com. <https://www.peoplesproject.com/first-person-view-droni>.
2. MAJ Andrew William Sanders. Drone Swarms. US Army. School of Advanced Military Studies United States Army Command and General Staff College Fort Leavenworth (2017).
3. Shcho take FPV i v chomu riznytsia 2.4 HHts ta 5.8 HHts analog abo Wi-Fi? [What is FPV and what is the difference between 2.4 GHz and 5.8 GHz analog or Wi-Fi?] (n.d.). *MARODER*. <https://maroder.com.ua/uk/obzor/chto-takoe-fpv-i-v-chem-raznitsa>.
4. Vittorio Ugo Castrillo, Angelo Manco, Domenico Pascarella and Gabriella Gigante. *A Review of Counter-UAS Technologies for Cooperative Defensive Teams of Drones*. *Drones* 2022, (6), 65.
5. Shahed na nashu holovu – detalnyi tekhnichniy zvit pro bezpilotnyk iranskoho vyrobnytstva [Shahed on our head - a detailed technical report on an Iranian-made drone] (n.d.). *ITC.ua*. <https://itc.ua/ua/novini/shahed-na-nashu-golovu-detalnij-tehnichnij-zvit-pro-bezpilotnik-iranskogo-virobnitstva>.
6. Mensha versia, ale tak samo vbyvcha: shcho vidomo pro drony-kamikadze Shahed-131 [A smaller version, but just as deadly: what is known about the Shahed-131 kamikaze drone] (n.d.). *Vikna*. <https://vikna.tv/dlia-tebe/bezpeka/bezpilotnyk-shahed-131-harakterystyky-ta-yak-praczuuye>.
7. Rossiia massirovano atakovala Ukrainu «shahedami»: v chem raznitca mezhdru dronami Shahed 136 i Shahed 131 [Russia massively attacked Ukraine with Shaheds: what is the difference between Shahed 136 and Shahed 131 drones] (n.d.). *New Voice*. <https://nv.ua/ukraine/events/shahedy-shahed-136-i-131-v-chem-raznica-harakteristiki-nedostatki-i-infografika-novosti-ukrainy-50327025.html>.
8. Chym vidrizniaietsia shahed-131 vid shahed-136 [What is the difference between shahed-131 and shahed-136] (n.d.). *NizhynNEWS*. <https://nizhyn.in.ua/chim-vidriznyayetsya-shahed-131-vid-shahed-136-4.html>.
9. Maksim. (2021). Obzor osnovnykh kharakteristik Mavic 3 i Mavic 3 Cine. *Wazza Blog* [Overview of the main characteristics of Mavic 3 and Mavic 3 Cine]. <https://blog.wazza.com.ua/drony/obzory-i-sravneniya/obzor-osnovnyh-harakteristik-mavic-3-i-mavic-3-cine>.
10. DJI Mavic 3 (n.d.). *DJI Official*. <https://www.dji.com/global/mavic-3/specs>.
11. Квадрокоптер FPV дрон Revenge 3 (1.3 GHz, 2.5 kg, 8400 mah, 10 km) kamikadze [Quadcopter FPV drone Revenge 3 (1.3 GHz, 2.5 kg, 8400 mah, 10 km) kamikaze] (n.d.). *Bezpeka.club*. <https://bezpeka.club/product/kvadrokopter-fpv-dron-revenge-3-1-3-ghz-2-5-kg-8400-mah-10-km-kamikadze>.

12. Kvadrokopter FPV dron Revenge 3 (7 km, 2 kg, 5.8 GHz) [Quadcopter FPV drone Revenge 3 (7 km, 2 kg, 5.8 GHz)] (n.d.). Safety. <https://safety.kiev.ua/ru/kvadrokopter-fpv-dron-revenge-3-7-km-2-kg-5-8-ghz>.
13. Kvadrokopter FPV kamikadze Revenge [Kamikaze Revenge FPV quadcopter] (n.d.). <https://drone.safety.kiev.ua>.
14. Denisov, Yu.O., Voytenko, V.P., Revko, A.S. (2021). Control systems of robotic complexes [Control systems of robotic complexes]. NAIR.
15. Revko, A., Yershov, R., Yakosenko D., Beznosko, D. (2018) Stepwise Pulse-Width Modulation in Quasi-Resonant Pulsed Converters Using Switched Capacitors. *2018 IEEE 38th International Conference on Electronics and Nanotechnology (ELNANO)* (pp. 711–716).
16. Stepenko, S., Prystupa, A., Revko, A., Kazymyr, V., Rohovenko, A. & Kuts, Y. (2023). Design Background Considerations of the Autonomous Power Supply System for Drones. *2023 IEEE 4th KhPI Week on Advanced Technology (KhPIWeek)* (pp. 1–4). DOI: 10.1109/KhPIWeek61412.2023.10312889.
17. Kazymyr, V., Revko, A., Prystupa, A., Stepenko, S., Rogovenko, A. (2023). Development of energy efficient power supply systems for multicopter drones. *Integrated Quality Assurance of Technological Processes and Systems: Proceedings of the XIII International Scientific and Practical Conference (Vol. 2, pp. 215-216)*. Chernihiv National Polytechnic University.

Отримано 05.06.2024

UDC 623.746.-519

Gennadiy Bolotov¹, Anatoliy Prystupa², Serhiy Stepenko³, Vladyslav Parkhomets⁴¹Doctor of Technical Sciences, Professor, Professor of the Department of Welding and Construction Technology
Chernihiv Polytechnic National University (Chernihiv, Ukraine)**E-mail:** bolotovgp@stu.cn.ua. **ORCID:** <https://orcid.org/0000-0003-0305-2917>**ResearcherID:** [H-5304-2014](https://orcid.org/0000-0003-0305-2917). **SCOPUS Author ID:** [6506157907](https://orcid.org/0000-0003-0305-2917)²PhD in Technical Sciences, Associate Professor,
Head of the Department of Electrical Engineering and Information and Measurement Technologies
Chernihiv Polytechnic National University (Chernihiv, Ukraine)**Email:** anatoliy.prystupa@stu.cn.ua. **ORCID:** <https://orcid.org/0000-0001-9412-2698>**ResearcherID:** [F-5507-2014](https://orcid.org/0000-0001-9412-2698). **SCOPUS Author ID:** [57190807222](https://orcid.org/0000-0001-9412-2698)³ PhD in Electrical Engineering, Associate Professor, Leading Research Scientist, Associate Professor at the Electrical Engineering, Information and Measurement Technologies Department
Chernihiv Polytechnic National University (Chernihiv, Ukraine)**E-mail:** serhii.stepenko@stu.cn.ua. **ORCID:** <https://orcid.org/0000-0001-7702-6776>**ResearcherID:** [F-1018-2014](https://orcid.org/0000-0001-7702-6776). **SCOPUS Author ID:** [55570068000](https://orcid.org/0000-0001-7702-6776)⁴Laborant of the Department of Electronics, Automation, Robotics and Mechatronics
Chernihiv Polytechnic National University (Chernihiv, Ukraine)**Email:** vlad.parkhom.ts@gmail.com

JUSTIFICATION OF TECHNICAL CHARACTERISTICS OF OBJECTS OF MULTIAGENT SYSTEMS BASED ON MULTICOPTER DRONES

In the context of the full-scale Russian invasion and active destruction of critical infrastructure facilities by missiles, guided aerial bombs and kamikaze drones, the task of reliable protection of these facilities is urgent. To solve this problem, various air defence systems, mobile rifle groups, infrastructure defences, electronic warfare systems, etc. are used. However, the high cost of building defences and missiles for air defence, the complex trajectory of enemy objects, which complicates the effective operation of mobile rifle groups, makes the solution to this problem ineffective.

To increase the efficiency of critical infrastructure protection, it is proposed to use a multi-agent system based on a swarm of multi-copter drones, which is deployed within a certain object. The agent of this system is planned to use multicopter drones that perform the functions of detecting an enemy object, recognising it, determining its trajectory and movement parameters, and then neutralising it by detonating a cumulative charge in the immediate vicinity of the enemy UAV. To do this, a multi-agent system based on intelligent algorithms must develop an automatic decision on which of the drones should move to intercept the enemy UAV and along which trajectory. In order to effectively implement this hypothesis, it is important to choose the right type of multicopter drone.

Previous attempts to systematise information have been largely general in nature. A lot of information is in the public domain.

Therefore, this work is aimed at analysing the main parameters of existing drones for various purposes in order to select the optimal UAV for use as part of a multi-agent system.

This paper reviews the parameters of the main attack drones of the Russian Federation of the Shahed type, their communication and flight control systems. The article analyses FPV drones, which are proposed to be used as a prototype for the future system. The advantages and disadvantages of different types of small UAVs are noted.

Adapted versions of the multi-copter drone design developed by scientists of the National University of Chernihiv Polytechnic are presented, which have advantages over commercial analogues in terms of load capacity, power supply, flight time, etc.

Particular attention is paid to the power supply systems for multi-rotor UAVs. The features of rechargeable batteries and current trends in the development of semiconductor energy converters used to power drones are considered.

After analysing several types of UAVs, it can be concluded that the FPV drone is the most suitable for performing tasks related to the detection and neutralisation of a low-speed aircraft target within the framework of a multi-agent system for the protection of critical infrastructure. The disadvantages of this type of UAV, associated with a small range and operating time, can be partially compensated for by using intelligent algorithms for controlling electric motors and alternately changing the elements of the multi-agent system 'on duty'. This is made possible by the use of open-source flight controllers. The second significant drawback of such drones is the need for the operator to be close to the target, which creates a certain delay associated with the human factor. Therefore, in this context, UAVs, which are elements of a multi-agent system, should use an advanced information and measurement system that, based on information from various sensors, using intelligent algorithms based on artificial intelligence methods, will make an automatic decision to identify the target, determine the trajectory, intercept and neutralise the drone closer to the target. This will be the focus of further research within the framework of R&D 0123U101819 'Multi-agent system for the protection of critical infrastructure facilities based on a swarm of multi-copter drones'.

Keywords: *Unmanned aerial vehicle; technical characteristics; power supply system; rechargeable battery.*

Fig.: 3. References: 17.