

## РОЗДІЛ II. ІНФОРМАЦІЙНО-КОМП'ЮТЕРНІ ТЕХНОЛОГІЇ

DOI: 10.25140/2411-5363-2024-2(36)-102-115

УДК 004.2

**Володимир Вікторович Казимир<sup>1</sup>, Андрій Іванович Роговенко<sup>2</sup>,  
Олексій Олександрович Карась<sup>3</sup>**

<sup>1</sup>доктор технічних наук, професор, професор кафедри інформаційних та комп'ютерних систем  
Національний університет «Чернігівська політехніка» (Чернігів, Україна)

**E-mail:** [vykazymyr@gmail.com](mailto:vykazymyr@gmail.com). **ORCID:** <https://orcid.org/0000-0001-8163-1119>. **ResearcherID:** [Q-2925-2016](https://orcid.org/Q-2925-2016)

<sup>2</sup>кандидат технічних наук, доцент кафедри інформаційних та комп'ютерних систем

Національний університет «Чернігівська політехніка» (Чернігів, Україна)

**E-mail:** [arogovenko@gmail.com](mailto:arogovenko@gmail.com). **ORCID:** <https://orcid.org/0000-0003-4594-5692>. **ResearcherID:** [G-3926-2014](https://orcid.org/G-3926-2014)

<sup>3</sup>студент магістратури

Національний університет «Чернігівська політехніка» (Чернігів, Україна)

**E-mail:** [oleksiykaras2016@gmail.com](mailto:oleksiykaras2016@gmail.com). **ORCID:** <https://orcid.org/0009-0004-8862-7234>. **ResearcherID:** [JZT-2594-2024](https://orcid.org/JZT-2594-2024)

### ПРОЄКТУВАННЯ СИСТЕМИ КЕРУВАННЯ ДРОНА У СКЛАДІ ЗАХИСНОЇ МУЛЬТИАГЕНТНОЇ СИСТЕМИ

*У статті представлено результати науково дослідження існуючих архітектур систем керування дронами. Наведені приклади застосування цих архітектур у реальних пристроях. Виділені та наведені основні структурні елементи типових систем керування. Визначено основні вимоги до систем керування дроном у мультиагентній системі. Запропоновано архітектуру системи керування дроном на базі одноплатного мікрокомп'ютера та програмного забезпечення системи керування дроном у мультиагентній системі. Проведена оцінка продуктивності системи керування дроном при виконанні задач обробки та розпізнавання аудіосигналу. Обґрунтовано подальший напрямок розвитку функціонала запропонованої архітектури системи керування дроном у складі рою.*

**Ключові слова:** мультиагентна система; рій дронів; одноплатний комп'ютер; БПЛА; польотний контролер; нейромережа.

*Рис.: 10. Бібл.: 18.*

**Актуальність теми дослідження.** Швидкі технічні розробки зробили БПЛА набагато більш доступними й широко використовуваними звичайними людьми, а також комерційними компаніями. Китай перебуває попереду в сегменті БПЛА, використовуюваному для розваг, а увагу країн Європейського Союзу направлено на створення безпілотників цивільного й урядового використання [1]. Також БПЛА стають інструментом військових дій. Згідно з інформацією із загальнодоступних джерел Сполучені Штати й Ізраїль домінують у безпілотному військовому технологічному секторі [2].

Безпілотні апарати використовуються також і для терористичних атак. Останні події показали, що особливо небезпечними ці атаки є, коли тероризм набуває державного рівня і кількість безпілотних апаратів може сягати сотень. У результаті безпілотники являють серйозну загрозу для недоторканності приватного життя, а також ставлять під загрозу установи, які, попри наявність захисних споруд і інших систем безпеки, не в змозі захистити себе від вторгнення безпілотних апаратів на їхню територію.

**Постановка проблеми.** Вочевидь протистояти великій кількості безпілотних апаратів ефективніше, використовуючи не одиничні дрони, а групи дронів, що функціонують за роївими правилами [3]. Дрони в рої взаємодіють між собою, обмінюються інформацією та координують свої дії. Це дозволяє збільшити швидкість реагування на події та ефективність у порівнянні з поодинокими дронами. Але робота в групі вимагає від дрона відповідності певним вимогам, що призводить до необхідності розробки нового апаратного та програмного забезпечення. Зокрема це стосується системи керування, оскільки в одиничних дронах система керування має дуже обмежений функціонал, налаштований на автономну роботу. Тому потрібно провести аналіз найбільш розповсюджених архітектур систем керування сучасних дронів, сформулювати вимоги до системи керування дроном, що входить до складу рою дронів, та на основі цих вимог запропонувати архітектуру системи керування дроном у складі мультиагентної системи, яка являє собою рій дронів.

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** У наш час існує достатньо способів боротьби з незаконним вторгненням БПЛА на територію, що охороняється. Наприклад, компанія «Amba Defence», що розташована у Великобританії, займається виробництвом дронів, які забезпечують охорону об'єктів і територій у багатьох країнах. Американська компанія «Optellios» випускає охоронні системи з волоконно-оптичними сенсорами, завдяки яким також організовується виявлення несанкціонованого доступу на об'єкт [4].

Японська компанія «Secom» пропонує клієнтам свою систему охорони власності із залученням автономного робота-дрона, який підніметься в повітря у випадку спрацьовування штатної системи сигналізації. У цій системі єдина функція робота-дрона полягає у використанні невеликої відеокамери, дані з якої передаються на пульт охорони. У такий спосіб співробітники "Secom" можуть швидко оцінити ситуацію на місці несанкціонованого проникнення. Програмне забезпечення дозволяє роботі виявити підозрілого суб'єкта й вести за ним спостереження. У випадку виявлення підозрілого автомобіля пілотник почне спробу зафіксувати номер транспортного засобу [5].

Сторожовий дрон компанії "Aptonomy", що є перспективним американським стартапом, може бути використаний для охорони приватної території або виробничих приміщень від вторгнення [5]. Типова процедура охорони об'єктів, як правило, ведеться охоронцями, які регулярно обходять довірені території, або ж сторожовим собакам і спеціальним системам спостереження. «Aptonomy» пропонує сторожові дрони, які забезпечують більш надійну охорону з меншими витратами. Для цього сторожовий дрон, зроблений по типу октокоптера, має пробіскові маячки, два гучномовці і прожектор. Крім того, апарат оснащений відеокамерою, камерою нічного бачення й тепловізором. Дрон оснащений автоматичною системою підзарядки. Якщо під час патрулювання заряд його акумулятора знизиться до декількох відсотків, апарат повернеться на базу й самостійно під'єднається до зарядного обладнання. За допомогою спеціального пульта керування оператор може намалювати план патрулювання території й передати його сторожовим апаратам, після цього вони будуть вести охорону в автономному режимі. При виявленні порушника дрон зависне на деякій відстані від нього й попередить спалахами пробіскових маячків, одночасно апарат включити відеозапис. Якщо порушник не відреагує, дрон почне програвати через гучномовці заздалегідь записані попереджувальні фрази, включити прожектор і направити його промінь на ціль. За оцінкою «Aptonomy», цих дій буде достатньо, щоб запобігти більшості порушенням. Крім того, оператор зможе безпосередньо зв'язатися з порушником через гучномовець апарата.

Що стосується безпосередньо системи керування, то в роботі [6] запропоновано такі види різних архітектур систем керування груп БПЛА, які можна використовувати для систем захисту на основі рою дронів. Передусім пропонується централізоване управління з Лідером, який керується центральною системою (пілотом або системою на основі штучного інтелекту) з постійною підтримкою зв'язку. Основними можливостями в цій системі є постійне керування та контроль за одним БПЛА, який контролює всю групу на стаціонарному об'єкті, що може бути важливим в ситуації, коли необхідно мати особливо детальний контроль над групою. Додаткової гнучкості надає можливість міняти лідера під час виконання завдання, що надає можливість продовжувати роботу у випадку, коли лідер групи став недієздатним або коли з ним було втрачено зв'язок. Основним недоліком цього підходу є необхідність мати постійний зв'язок з центральною системою, що може бути поганим варіантом у сукупності з використанням додаткових систем захисту від дронів, які глушать зв'язок з центральною системою.

Інший підхід полягає в децентралізованому управлінні з Лідером. Ця архітектура надає можливість назначити лідера групи до того, як її буде відправлено на виконання завдання, але далі зв'язок з групою не буде продовжуватися. Лідер має ухвалювати всі рішення групи самостійно на основі інформації, що присилаються іншими дронами. При виході зі строю лідера група може автоматично вибрати нового лідера.

Ще одне рішення - колективне самоврядування з обміном інформацією (мультиагентна архітектура). Дана архітектура робить всі БПЛА рівними за значеннями та змушує їх обмінюватися інформацією між собою. Ця система є гарним варіантом для захисту стаціонарних об'єктів у випадках, коли швидкість реагування окремого дрона є важливим фактором. Якщо окремий БПЛА отримує зі своїх датчиків інформацію, на яку потрібно швидко реагувати, то дрона не потрібно відправляти інформацію лідеру групи, а потім чекати на відповідь з рішенням від нього. Замість цього дрон може відправити інформацію групі та самостійно прийняти рішення для себе та на основі цього порекомендувати іншим дронам ухвалювати відповідні рішення.

Також розглядається децентралізоване керування з розвідкою (або з прогнозуванням). Дана архітектура надає можливість вибору додаткового дрона для розвідки, який може знаходитися на більшому віддаленні від об'єкта захисту, ніж інші БПЛА, і отримувати менш точні, але з більшим радіусом покриття дані. У цьому випадку застосовується спеціальний дрон, який буде відрізнятися від інших дронів у групі більшою максимальною швидкістю горизонтального польоту та датчиками більшого радіуса покриття. При виході зі строю спеціального розвідувального дрона замінити його буде складніше, ніж у ситуації, коли для розвідки вибирається будь-який дрон з групи.

Нарешті розглядається самоорганізація без обміну інформації. Ця архітектура робить кожен БПЛА самостійним і незалежним від інших членів групи. У випадку виходу зі строю будь-якого з дронів, інші не втрачають здатності до виконання завдання. Але основною проблемою цієї системи у завданнях захисту стаціонарних об'єктів є мала ефективність групи через те, що датчики дронів не об'єднуються між собою для підвищення точності та радіусу покриття. Крім цього, при захисті об'єктів малої площі БПЛА однієї групи можуть заважати один одному.

**Виділення недосліджених частин загальної проблеми.** Не зважаючи на наявність існуючих рішень, проблема високої автономності БПЛА залишається недостатньо дослідженою. Важливим аспектом є розробка апаратної та програмної архітектури системи керування, яка забезпечить ефективне вирішення задач у складі мультиагентної системи. Додатково важливо розглянути можливості використання одноплатних мінікомп'ютерів для підвищення гнучкості системи керування за рахунок розпізнавання повітряних цілей.

**Мета дослідження.** Метою цієї статті є опис дослідження з проектування апаратної та програмної архітектури системи керування БПЛА у складі мультиагентної системи. Дослідження також спрямоване на удосконалення рішень для захисту об'єктів від різних видів повітряних цілей, що виявляються по їхнім аудіосигналам.

**Виклад основного матеріалу.** Для системи захисту від повітряних цілей, що будується на основі БПЛА, найбільшу ефективність може мати мультиагентна архітектура, адже вона дозволяє кожному дрону виконувати роботу як окремо, так і у складі групі (рою). Крім цього при виході з ладу будь-якого БПЛА, його буде легко замінити, адже вони між собою не відрізняються по функціональності. Однак основною проблемою в даній архітектурі залишається складність розробки системи рішень для всієї групи, а не тільки для кожного агента окремо.

#### ***Вибір базової архітектури.***

Базуючись на обмеженнях та вимогах до елементів мультиагентної системи слід обрати архітектуру системи керування агентів-дронів, яка б дозволила забезпечити функціонування цієї системи. Якщо орієнтуватися на безпілотні літальні апарати з електронним керуванням, то базовою схемою систем керування є схема, яка застосовувалась, наприклад, у американських одногвинтових безпілотних апаратах типу Gyrodyne QH-50 DASH [7] (рис. 2).

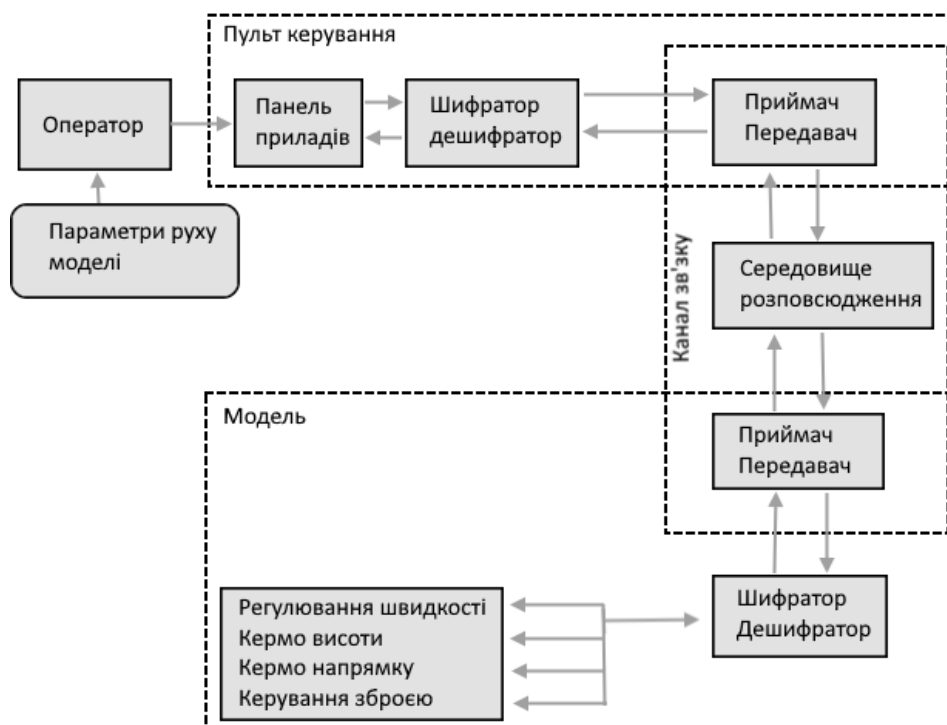


Рис. 2. Архітектура системи керування одногвинтового безпілотною апарату Gyrodyne QH-50 DASH [7]

Як видно зі схеми, ця система керування не має елементів, які б автономно ухвалювали рішення та генерували команди керування польотом. В даній системі керування передбачається наявність постійного контролю безпілотною апарату з наземного пульта керування, що практично унеможлиблює її використання в мультиагентній системі. Тож для вирішення нашої задачі слід звернути увагу на системи керування безпілотними коптерами, до складу яких входять автономні елементи керування польотом. Одним з таких варіантів є системи керування засновані на так званих польотних контролерах. Польотний контролер – це центральний модуль керування, який керує елементами безпілотною дрона під час польоту.

Одним із перших польотних контролерів був MultiWii [8]. Це відкритий проєкт на базі платформи Arduino, яка використовується як опитування сенсорів, так і для генерування сигналів керування. Фактично польотним процесором виступає плата з контактами, до яких потрібно під'єднувати сенсори та модулі зв'язку. Потужності такої платформи вистачає для обробки сигналів керування, що приходять по радіоканалу. Базовими функціями автопілота є рух по координатах, та утримання курсу. Для реалізації автопілота в систему потрібно додавати модуль GPS, а для утримання курсу модуль магнітометра. Плата базується на мікроконтролерах ATmega2560 або STM32. Архітектура системи керування на основі польотних контролерів MultiWii наведена на рис. 3.

Польотні контролери мають низьку обчислювальну потужність, і хоча вони й забезпечували певні функції керування польотом, але оператор обов'язково має контролювати рух дронів. Наприклад, при русі по координатах система керування не відпрацьовує самостійно огинання перешкод. Таким чином, використання таких систем керування в мультиагентній системі є практично неможливим.

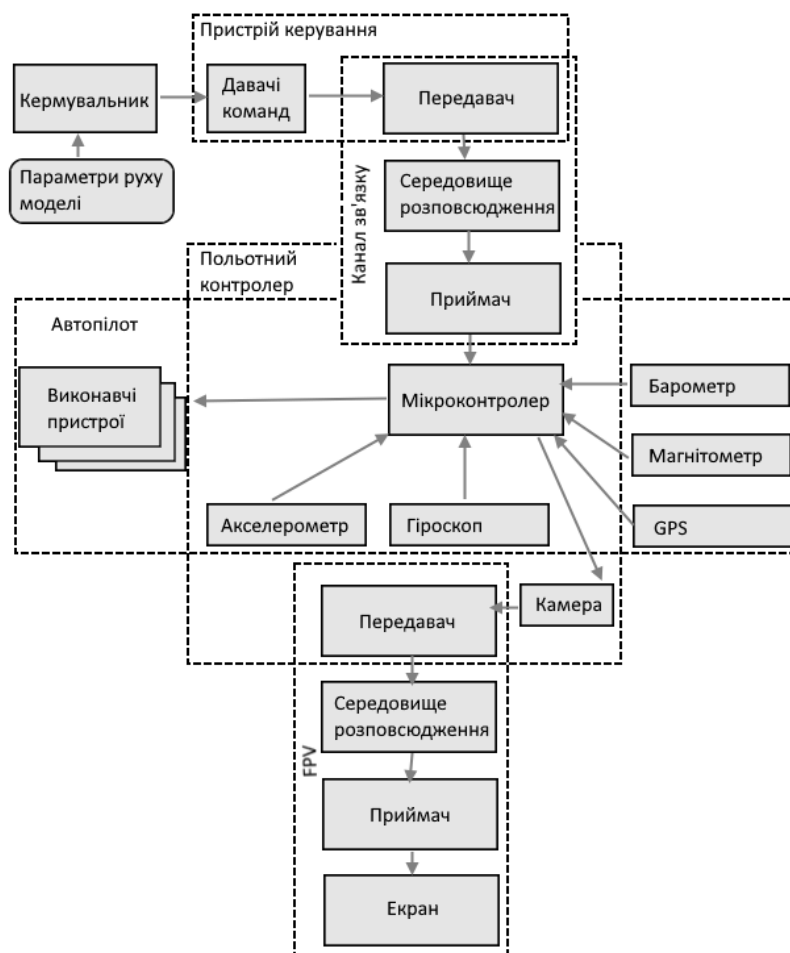


Рис. 3. Архітектура системи керування на основі польотних контролерів MultiWii [9]

Наступна система керування базується вже на спеціалізованому контролері CopterControl3D (CC3D)[10], який, на відміну від MultiWii, вже був зорієнтований на використання в мультикоптерах, та має своє програмне забезпечення для налаштування. Його архітектура подібна до архітектури, приведеної на рис. 3, але в цьому випадку мікроконтролер замінений на плату контролера CC3D[11]. Оскільки контролер базується на мікроконтролері STM32F103, то практично ніякого приросту в обчислювальній потужності не існує. Тому така схема керування знайшла широке застосування в FPV дронах, а для мультиагентної системи є зовсім не придатною.

Наступна система керування базується на спеціалізованому польотному контролері ArduPilot Mega від компанії Arduino[12]. Ця система має більш розвинений автопілот, та двосторонню систему телеметрії. Також в системі реалізовано ведення логування. Контролер програмується мовою програмування Arduino та є більш гнучко запрограмований під задачі. Він базується на мікроконтролері ATmega32U2, продуктивність якого є дуже обмеженою і не дозволяє реалізувати задачі агента мультиагентної системи. Архітектура ArduPilot Mega подібна до архітектури наведеної на рис. 2.

Нарешті, остання з найрозповсюдженіших архітектур систем керування безпілотними апаратами - польотний контролер Pixhawk[13], зовнішній вигляд якого наведено на рис. 4.



Рис. 4. Зовнішній вигляд польотного контролера PixHawk [13]

На відміну від попередньо розглянутих польотних контролерів, PixHawk має операційну систему реального часу, підтримує систему симуляції Mission Planner, має велику кількість інтерфейсів і доступний у вигляді закінченого модуля в корпусі, який з мінімальною адаптацією можна інтегрувати в проєкт. Архітектура системи керування на основі PixHawk наведена на рис. 5 [14].

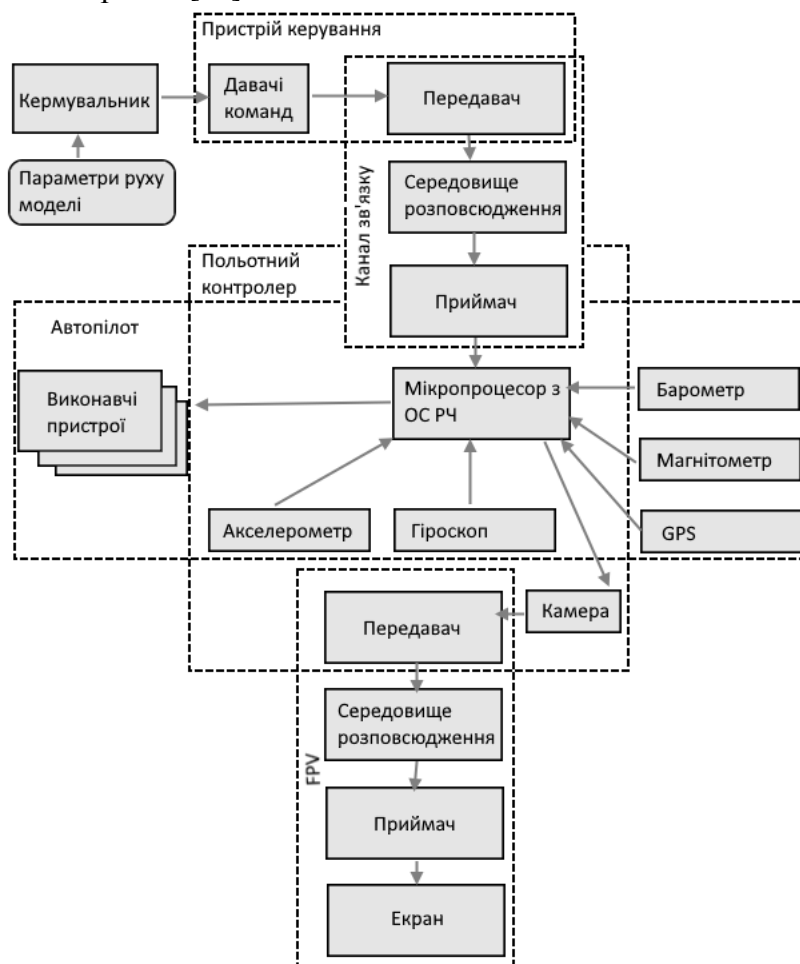


Рис. 5. Архітектура системи керування на основі польотних контролерів PixHawk [14]

На платі Pixhawk встановлено STM32F427 Cortex M4, що суттєво підіймати обчислювальну спроможність системи керування. Але при цьому дуже ускладнено застосування стороннього програмного забезпечення в складі системи, яке б вирішувало задачі інтелектуального керування польотами.

Підсумовуючи результати проведеного аналізу слід зазначити, що для забезпечення вищого ступеня автономності безпілотному апарату не вистачить одного лише польотного контролера. Щоб збільшити обчислювальну потужність системи керування дроном потрібно розробити багаторівневу апаратну архітектуру й, відповідно, багаторівневу програмну архітектуру.

#### **Проектування архітектури системи керування.**

Пропонується використовувати архітектуру, що складається із трьох рівнів. Нижчий рівень архітектури, це виконавчі пристрої та датчики, які безпосередньо взаємодіють із польотним контролером. Другий рівень архітектури базується на польотному контролері, якості якого буде використовуватись один з уже наявних. У розробці спеціалізованого польотного контролера в межах цієї задачі немає сенсу, оскільки ніяких додаткових функцій, крім вже реалізованих у контролерах, не потрібно. Такий підхід суттєво прискорить розробку всієї системи. Верхній рівень архітектури базується на одноплатному мікрокомп'ютері, програмне забезпечення якого має аналізувати інформацію від польотного контролера, звукових та оптичних сенсорів, підсистеми живлення. На основі обробки цих даних верхній рівень генерує команди для всіх елементів дрона, та підтримує обмін з іншими агентами мультиагентної системи.

Для реалізації вказаного підходу запропоновано архітектуру автономно керованого охоронного квадрокоптера, яка показана на рис. 6. Така архітектура базується на польотному контролері Pixhawk з автопілотом PX4, який забезпечує широкую номенклатуру інтерфейсів, для взаємодії з іншими елементами мультикоптера. Зокрема є інтерфейс для підключення одноплатного мінікомп'ютера, сенсорних елементів для визначення положення мультикоптера в просторі та стану батареї. Програмний інструментарій для роботи з цим польотним контролером дуже розвинутий, що дає можливість якісно налагоджувати програмне забезпечення, ще на ранніх етапах розробки.

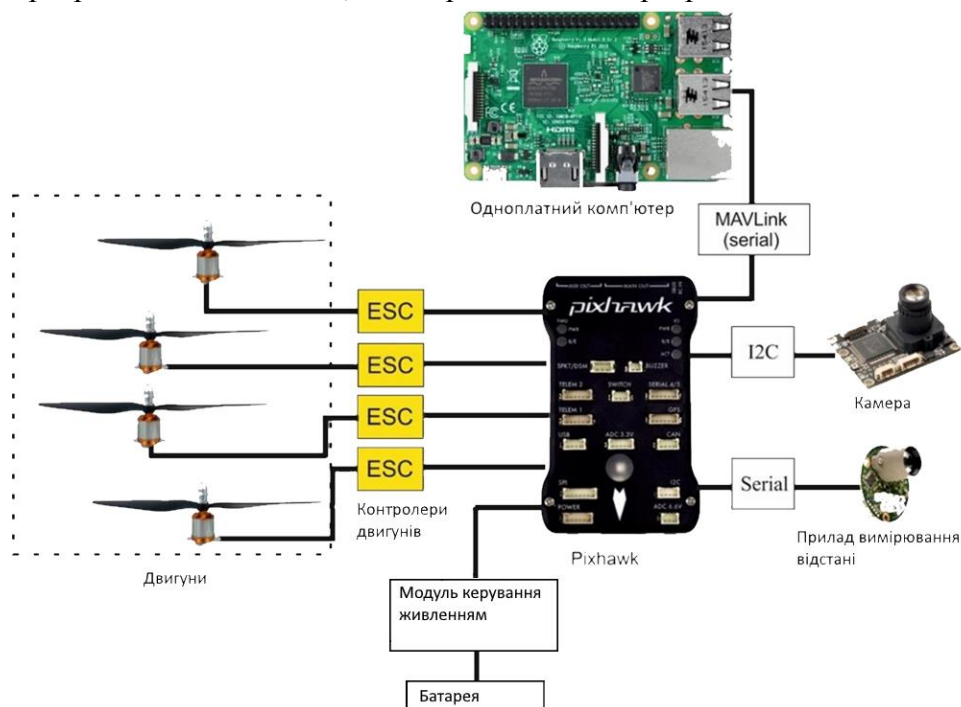


Рис. 6. Типова архітектура квадрокоптера з модулем керування на основі одноплатного комп'ютера

У цій архітектурі використання польотного контролера є типовим [14] за виключенням організації взаємодії з одноплатним мікрокомп'ютером верхнього рівня. Вибір одноплатного мікрокомп'ютера обмежується певними вимогами, основними з яких є габарити, вага, енергоспоживання, продуктивність, наявність інтерфейсів та систем зв'язку, наявність розвинутого інструментального програмного забезпечення.

В нашому випадку габарити одноплатного мікрокомп'ютера обмежуються розміром шасі мультикоптера, тобто, беручи за основу раму 450 Carbon Fiber Frame [15], це орієнтовно становить 120×120×50 мм. Вага також обмежується можливостями шасі. Таким чином, базуючись на загальній вазі коптера до 4 кг і розрахунками ваги під систему живлення, обмеження на вагу становить 350 грамів.

Інтерфейси одноплатного мінікомп'ютера мають забезпечити зв'язок із польотним контролером по протоколу MavLink [16], а також підключення камер спостереження та мікрофонів. Якщо аналогові входи будуть відсутні, то мають бути в наявності цифрові входи, до яких можна приєднати АЦП модулі. Система зв'язку має бути бездротовою, або ж мати стандартний інтерфейс для підключення модулів бездротового зв'язку.

Вимоги до програмного забезпечення мінікомп'ютера базуються на наявності засобів розробки та налагодження. У такому випадку, наявність типової операційної системи, в якій можна виконувати програмні застосунки та організувати зв'язок між ними за загальними принципами, є одною з найголовніших вимог. Це зумовлено тим, що зазвичай використання спеціалізованих платформ потребує застосування спеціалізованих засобів розробки ПЗ, що призводить до збільшення часу розробки.

Енергоспоживання має бути мінімально можливим для збільшення часу перебування в повітрі. У цьому випадку ми маємо обмеження у 20 Вт.

І нарешті, виходячи продуктивності, системи повинна забезпечувати паралельну роботу мінімум п'яти програмних підсистем: підсистема керування та прийняття рішень, підсистема обробки відео, підсистема обробки аудіо, підсистема взаємодії з польотним контролером та підсистема захищеного зв'язку. Структура програмного забезпечення системи керування дроном мультиагентної системи наведена на рис. 7.

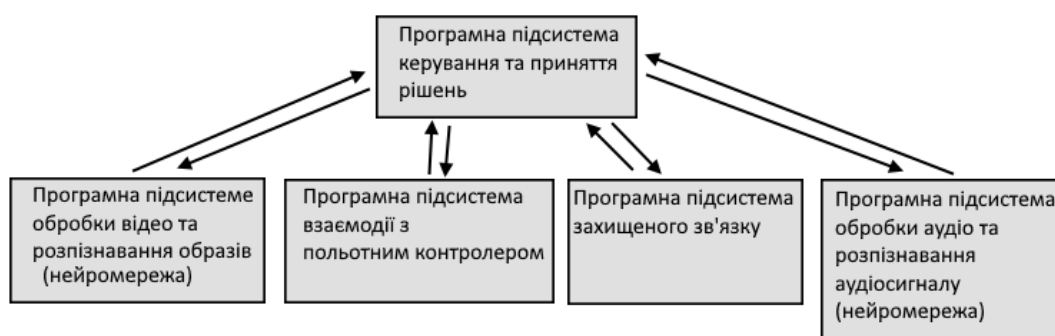


Рис. 7. Структура програмного забезпечення системи керування дроном мультиагентної системи

Орієнтуючись на наявні обмеження, було виділено дві альтернативні платформи на основі одноплатного мікрокомп'ютера, які можна застосувати як систему керування дрона мультиагентної системи.

Перший варіант – це одноплатний комп'ютер Raspberry Pi 4 Model B.[17] Дана апаратна платформа пропонується максимально з 8 Гб оперативної пам'яті. Вона базується на потужному чотириядерному 64-бітному SoC Broadcom BCM2711B0 ARM Cortex-A72 процесорі, що виконаний за 28 нм технологією та працює на частоті 1,5 ГГц. Бездротові адаптери - Wi-Fi дводіапазонний стандарту IEEE 802.11ac та Bluetooth – 5.0 BLE. Контролер Ethernet на базовому SoC підключається до зовнішнього фізичного



пристрою Broadcom через виділений канал RGMII, що дозволяє використовувати повну пропускну здатність інтерфейсу. Процесор керується оновленою версією операційної системи, що базується на Debian 10 Buster.

Raspberry Pi 4 вимагає живлення 5 В/3 А, максимальне значення вхідної напруги живлення 5,5 В а його основні характеристики включають:

- об'єм оперативної пам'яті до 8 Гб;
- 4-піновий роз'єм для підключення додаткового PoE модуля;
- два USB 3.0 роз'єми;
- два micro-HDMI роз'єми відеовиходу;
- роз'єм живлення USB-C;
- тактова частота процесора (до 1,5 ГГц);
- гігабітний Ethernet, що працює на повній швидкості інтерфейсу;
- дводіапазонний Wi-Fi модуль;
- підтримка PXE (Preboot eXecution Environment) для завантаження ОС через мережевий інтерфейс використання локальних носіїв даних;
- покращене керування температурою та живлення процесора (на базі MaxLinear MxL7704-P4);
- покращене пасивне охолодження процесора;
- зберігання операційної системи та файлів на SD-карті з можливістю її встановлення в іншій пристрій.
- сумісність: повна сумісність з більш ранніми продуктами Raspberry Pi.

Як альтернатива розглядалась платформа на базі одноплатного комп'ютера NVIDIA Jetson Nano Developer Kit.[18] Цей одноплатний комп'ютер має можливості паралельного запуску декількох нейронних мереж для забезпечення роботи додатків для класифікації зображень, виявлення об'єктів, обробки звуку. Забезпечуючи дані характеристики, дана платформа проста у використанні та має гарну енергоефективність, споживаючи не більше 5 Вт, що вкрай важливе для автономності літального апарату. Одноплатний комп'ютер підтримується пакетом NVIDIA JetPack. Програмне забезпечення пакету надає необхідний ресурс та можливості для розв'язання задач із використанням штучного інтелекту: повний робочий стіл Linux з драйверами NVIDIA, бібліотеками AI та штучного зору, програмні інтерфейси додатків (APIs), документацію та зразки коду. Пакет JetPack повністю сумісний з основною AI платформою NVIDIA для навчання та розгортання програмного забезпечення штучного інтелекту. Один і той же пакет Jetpack SDK застосований у всій лінійці продуктів NVIDIA Jetson. Це забезпечує мінімізацію зусиль для розробки та прискорює вихід кінцевого виробу.

Конструктивно комп'ютер є комбінацією процесорного модуля Jetson Nano Module та несучої плати. Головними елементами процесорного модуля є 128-ядерний графічний процесор NVIDIA з архітектурою Maxwell та чотириядерний процесор ARM Cortex-A57 з частотою 1.43 ГГц. Охолодження модуля забезпечує радіатор, що розсіює до 10 Вт при температурі навколишнього середовища 25 °С. У разі необхідності додаткового охолодження є можливість налаштування модуля для керування системним вентилятором (40 × 40 мм). Плата містить 64-бітну оперативну пам'ять максимум 8 Гб LPDDR 4 25.6 Гбіт/с та слот для microSD карти. MicroSD карта призначена для запису та встановлення образу операційної системи Linux, а також для зберігання даних. Карта повинна забезпечувати достатній обсяг пам'яті (не менш 16 Гб) та швидкість обміну даними (UHS-1). Модуль забезпечує продуктивність до 472 GFLOPS (FLoating-point Operations Per Second).

На несучій платі, де розміщені інтерфейси Gigabit Ethernet, роз'єм відеокамери MIPI CSI-2 DPHY lanes, HDMI 2.0 та eDP 1.4, 4 × USB 3.0, 1 × USB 2.0 (microUSB), GPIO, I2C, I2S, SPI, UART, має такі технічні характеристики:

- 128-ядерний графічний процесор Maxwell;
- 4-ядерний процесор ARM Cortex-A57 з частотою 1.43 ГГц;
- оперативна пам'ять 4 Гб 64 біт LPDDR4 25.6 Гбіт/с;
- зберігання даних: слот для карт microSD;
- камера: 12-канальна (3 × 4 або 4 × 2) MIPI CSI-2 DPHY 1.1 (1,5 Гбіт/с)
- можливості мережі: Gigabit Ethernet, M.2 Key E;
- дисплей: HDMI 2.0 та eDP 1.4;
- роз'єми: 4 × USB 3.0, 1 × USB 2.0 (microUSB);
- 40-піновий роз'єм, сумісний з Raspberry Pi;
- інші інтерфейси: GPIO, I2C, I2S, SPI, UART;
- габарити: 100×80×29 мм.

Таким чином, Jetson Nano Developer Kit для вирішення задач керування мультикоптером підходить краще при всіх приблизно рівних параметрах, має апаратну підтримку роботи з відео й орієнтований на використання штучного інтелекту. Перелік інтерфейсів дає можливість під'єднати як польотний контролер, так і модулі АЦП.

Базуючись на наявних інтерфейсах і структурі Jetson Nano Developer Kit, була спроектована архітектура системи керування дрона, яка наведена на рис. 8.

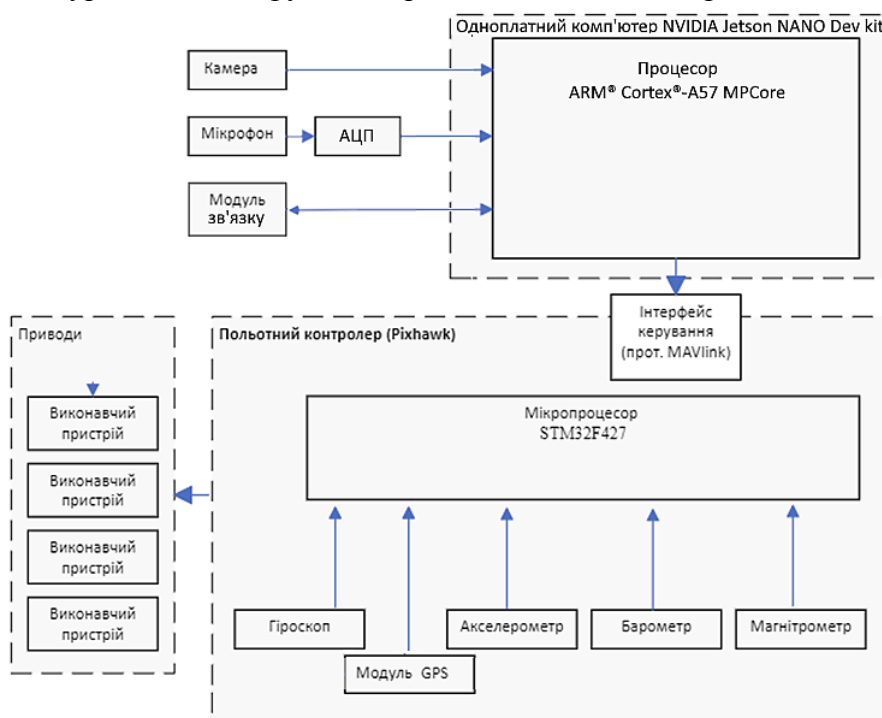


Рис. 8. Архітектура системи керування дрона у складі мультиагентної системи на основі Jetson Nano Developer Kit

**Експериментальне тестування розробленої архітектури системи керування.**

Для експериментального тестування запропонованої архітектури була розроблена модель нейронної мережі для розпізнавання БПЛА за аудіосигналом. Модель є прототипом програмної підсистеми обробки аудіо та розпізнавання аудіосигналу, представлена на рис. 9. Ця модель містить наступні шари з описом:

1. Вхідний шар (Flatten); не містить ваг або нейронів, а лише переформатовує вхідні дані.
2. Повнозв'язні (Dense) шари. Ці шари є основними будівельними блоками моделі. Модель має два Dense шари, перший з 256 нейронами і другий зі 128 нейронами, які використовують активаційну функцію ReLU, що є популярною для нелінійних перетворень.

3. Dropout шар. Використовується для регуляризації, щоб зменшити перенавчання шляхом випадкового відключення нейронів під час тренування з ймовірністю 0.5.

4. Вихідний шар (Dense) з одним нейроном, оскільки модель має задачу бінарної класифікації. Тут використовується активаційна функція sigmoid для виведення ймовірності приналежності до класу.

На рис. 7 наведено схему розробленої моделі нейронної мережі. Дані передаються у вхідний шар, який перетворює двовірну спектрограму в одномірний масив і передає його в кожен нейрон Layer 1. Наступний шар являє собою перший повнозв'язний шар з 256 нейронами й використовує активаційну функцію ReLU. Далі йде Dropout Layer 2, де половина нейронів відсіюється випадковим чином і залишається 128 нейронів, які переходять в Layer 3. Layer 3 – це другий повнозв'язний шар, що також використовує функцію активації ReLU. Останнім йде вихідний шар з сигмоїдальною функцією активації, який виводить значення від 0 до 1, де 0 – відсутність шуканого звуку на аудіозаписі, а 1 – наявність цього звуку.

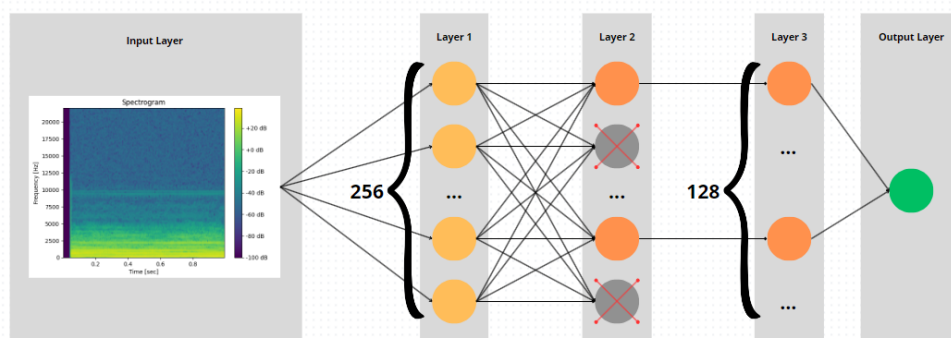


Рис. 9. Схематична модель нейронної мережі бінарної класифікації

Експериментальне дослідження наведеної моделі було проведено за допомогою обчислювальної платформи Jetson Nano Developer Kit. Важливо відзначити, що на цій платформі проводилося лише тестування готової моделі, а процес її навчання був проведений у середовищі Jupyter notebook з використанням бібліотек tensorflow. Для випробувань були використані реальні дані звуку повітряної цілі, а також інші звуки, які мали схожість з цільовим звуком. Результати тестування моделі для розпізнавання ворожих БПЛА за аудіопотоком представлені на рис. 10.

```

16/16 [=====] - 0s 6ms/step
           precision    recall  f1-score   support

    0       0.92       0.99       0.95         113
    1       1.00       0.97       0.99         382

   accuracy                   0.98         495
  macro avg       0.96       0.98       0.97         495
 weighted avg       0.98       0.98       0.98         495

[[[112  1]
 [ 10 372]]]
    
```

Рис. 10. Результати тестування моделі для розпізнавання ворожих БПЛА за аудіопотоком

Продуктивність системи керування щодо вирішення задачі розпізнавання аудіосигналів була оцінена безпосередньо на апаратній платформі Jetson Nano Developer Kit. Процес розпізнавання забирав до 10 % від загальної робочої спроможності ЦПУ та до 300 МБ оперативної пам'яті. Ці параметри були визначені як критерії продуктивності.

Наведена модель була використана тільки як приклад застосування запропонованої архітектури. Однак для використання в реальних умовах, вона може потребувати удосконалення з метою розпізнання цілей в умовах, коли мікрофон захоплює велику кількість додаткових шумів.

**Висновки.** 1. Базуючись на особливостях задач, що має вирішувати система захисту, побудована на основі БПЛА, доцільно організувати роботу цієї системи за принципами мультиагентної архітектури. Це дозволить забезпечити найбільшу автономність елементів системи – окремим дронам, та збільшить продуктивність системи із захисту об'єктів. Також ця система не має недоліку централізованої системи, та при втраті одного або кількох агентів, продовжить своє функціонування.

2. Апаратна платформа системи керування дронами має базуватися на обчислювальних елементах з потужністю достатній для організації підсистеми прийняття рішень та зв'язку, задач виявлення звукових та візуальних об'єктів. Окрім того, платформа повинна забезпечувати використання нейромереж для вирішення задач розпізнавання цілей.

3. Використання Jetson Nano Developer Kit від компанії NVIDIA як основу апаратної платформи забезпечує можливість паралельно використовувати декілька нейронних мереж, що дозволяє одночасно проводити виявлення візуальних об'єктів та обробки звуку різними додатками. При цьому дана платформа має гарну енергоефективність.

4. Пакет підтримки NVIDIA JetPack надає необхідний ресурс та можливості для рішення задач з використанням штучного інтелекту: ОС Linux з драйверами NVIDIA, бібліотеки AI та штучного зору, програмні інтерфейси додатків, документацію та зразки коду. Це значно прискорює розробку програмного забезпечення для мультиагентної системи.

5. NVIDIA Jetson Nano має інтерфейси для зв'язку з польотним контролером, відео та аудіо реєструючими пристроями, тож система керування має доступ до інформації від усіх сенсорів та до повідомлень від інших агентів мультиагентної системи.

6. Результати тестування апаратної платформи на основі одноплатного комп'ютера Jetson дозволяють зробити висновок, що апаратні можливості архітектури на основі Jetson Nano Developer Kit забезпечують реалізацію нейронні мережі для розпізнавання ворожих БПЛА за аудіосигналом. Під час тестування моделі нейронної мережі було використано тільки 10 % від обчислювальної потужності платформи. Таким чином, залишається ще достатньо обчислювальних ресурсів для вирішення задач зв'язку між агентами, забезпечення безпеки з'єднання, розпізнавання цілей за відеопотоком, навігації у просторі та інших можливих варіантів використання дронів у складі мультиагентної системи.

#### Список використаних джерел

1. . Unclassified and Secure: A Defense Industrial Base Cyber Protection Program for Unclassified Defense Networks / D. Gonzales, S. Harting, M. K. Adgie, J. Brackup, L. Polley, K. D. Stanley. – United States, 2020. – 150 p. DOI: <https://doi.org/10.7249/RR4227>.
2. Konert, A. TOWARDS AVIATION REVIVAL Military autonomous drones (UAVs) – from fantasy to reality. Legal and Ethical implications / A. Konert, T. Balcerzakb // Transportation Research Procedia 59 (2021) :10th International Conference on Air Transport – INAIR 2021. – Pp. 292–299.
3. European Global Navigation Satellite Systems (EGNSS) for drones operations // White paper. European GNSS Agency (GSA), 2023. DOI:10.2878/52219.
4. SECOM [Electronic resource] // SECOM – Mode of access: <http://www.secom.co.jp>.
5. Home [Electronic resource] // Home Security Info Watch. – Mode of access: <https://www.securityinfowatch.com>.
6. Кравчук, С. О. Підходи та стратегії щодо колективного керування роєм дронів / С. О. Кравчук, І. М. Кравчук // Перспективи телекомунікацій: збірник матеріалів Міжнародної науково-технічної конференції. – 2019. DOI: 10.31474/2415-7902-2023-2-11-16-26.
7. Gyrodyne QH-50C Drone Anti-Submarine Helicopter (DASH) [Electronic resource] // Homepage National Air and Space Museum. – Mode of access: [https://airandspace.si.edu/collection-objects/gyrodyne-qh-50c-drone-anti-submarine-helicopter-dash/nasm\\_A20090023000](https://airandspace.si.edu/collection-objects/gyrodyne-qh-50c-drone-anti-submarine-helicopter-dash/nasm_A20090023000).

8. MULTIWI. 2023 <http://www.secom.co.jp>.
9. Yen Fang Chong. MultiWii Based Quadcopter by Using Arduino Controller [Electronic resource] / Yen Fang Chong, Najib Mohammed Ahmed Al-Fadhali // *Progress in Engineering Application and Technology*. – 2023. – Vol. 4(1). – Pp. 221-229. – Mode of access: <https://publisher.uthm.edu.my/periodicals/index.php/peat/article/view/9986>.
10. Lim, Jia Tian. Development and control of mini-quadrotor / Lim Jia Tian // *DRNTU Engineering Electrical and electronic engineering Control and instrumentation* Nanyang Technological University, 2013.
11. OPWiki Documentation. Release 0.1.4. OpenPilot community [Electronic resource]. 2017. – Mode of access: <https://readthedocs.org/projects/openpilotwiki/downloads/pdf/latest>.
12. ArduPilot Documentation – ArduPilot documentation [Electronic resource] // ArduPilot - Versatile, Trusted, Open. – Mode of access: <https://ardupilot.org/ardupilot>.
13. Homepage - Pixhawk [Electronic resource] // Pixhawk. – Mode of access: <https://pixhawk.org>.
14. Yang, K. Research of Control System for Plant Protection UAV Based on Pixhawk / Kang Yang, Guang You Yang, S Isi Huang Fu // *Procedia Computer Science*. – 2020. – Vol. 166. – Pp. 371-375. DOI:10.1016/j.procs.2020.02.082.
15. Pixhawk 2.4.8 Flugs teuerung Kohle faser 450 Rahmen Kit Ardu pilot 100mw Radio Telemetry Quadcopter Blheli 20a 2212 Motor Esc - AliExpress 26 [Electronic resource] // aliexpress. – Mode of access: <https://www.aliexpress.com/item/1005006845741147.html>.
16. Introduction MAVLink Developer Guide [Electronic resource] // Choose a language MAVLink Developer Guide. – Mode of access: <https://mavlink.io/en>.
17. DATASHEET, Raspberry Pi 4 Model B, Release 1.1. [Electronic resource]. – Mode of access: <https://datasheets.raspberrypi.com/rpi4/raspberry-pi-4-datasheet.pdf>.
18. JETSON NANO DEVELOPER KIT, December 17, [Electronic resource]. – Mode of access: [https://developer.download.nvidia.com/embedded/L4T/r32-3-1\\_Release\\_v1.0/Jetson\\_Nano\\_Developer\\_Kit\\_User\\_Guide.pdf](https://developer.download.nvidia.com/embedded/L4T/r32-3-1_Release_v1.0/Jetson_Nano_Developer_Kit_User_Guide.pdf).

### References

1. Gonzales D., Harting S., Adgie M. K., Brackup J., Polley L., Stanley K. D. (2020). *Unclassified and Secure: A Defense Industrial Base Cyber Protection Program for Unclassified Defense Networks*. United States.
2. Konert A., Balcerzak T. (2021). Towards Aviation Revival. Military autonomous drones (UAVs) - from fantasy to reality. Legal and Ethical implications. *Transportation Research Procedia* 59. 10th International Conference on Air Transport – INAIR 2021 (pp. 292–299).
3. European Global Navigation Satellite Systems (EGNSS) for drones operations. White paper. European GNSS Agency (GSA). (2023). DOI:10.2878/52219.
4. SECOM. (2023). <http://www.secom.co.jp>.
5. SECURITY INFOWATCH. (2023). <http://www.securityinfowatch.com>.
6. Kravchuk, S.O., Kravchuk, I.M. (2019). Approaches and strategies for collective drone swarm management. *Collection of materials of the International Scientific and Technical Conference "PROSPECTS OF TELECOMMUNICATIONS"*. DOI: 10.31474/2415-7902-2023-2-11-16-26.
7. Gyrodyne QH-50C Drone Anti-Submarine Helicopter (DASH). (2023). [https://airandspace.si.edu/collection-objects/gyrodyne-qh-50c-drone-anti-submarine-helicopter-dash/nasm\\_A20090023000](https://airandspace.si.edu/collection-objects/gyrodyne-qh-50c-drone-anti-submarine-helicopter-dash/nasm_A20090023000).
8. MULTIWI. (2023). <http://www.secom.co.jp>.
9. Yen Fang I, Najib M. Al-Fadhali. (2023). MultiWii Based Quadcopter by Using Arduino Controller. *Progress in Engineering Application and Technology*, 4(1), 221-229. Universiti Tun Hussein Onn Malaysia Publisher's.
10. Lim, Jia Tian. (2013). Development and control of mini-quadrotor. *DRNTU Engineering Electrical and electronic engineering Control and instrumentation*. Nanyang Technological University.
11. OPWiki Documentation. Release 0.1.4. OpenPilot community. (2017). <https://readthedocs.org/projects/openpilotwiki/downloads/pdf/latest>.
12. ArduPilot Documentation. (2023). <https://ardupilot.org/ardupilot>.
13. PIXHAWK. (2023). <https://pixhawk.org>.

14. Kang Yang, Guang You Yang, S Isi Huang Fu. (2020). Research of control system for plant protection UAV based on pixhawk. *Procedia Computer Science*, 166, 371-375.

15. PIXHAWK2.4.8 Flight Control Carbon Fiber 450 Frame Kit - Ardupilot 100MW Radio Telemetry Quadcopter BLHELI 20A 2212 Motor ESC.

16. MAVLink Developer Guide. (2023). <https://mavlink.io/en>.

17. DATASHEET, Raspberry Pi 4 Model B, Release 1.1. (2019). <https://datasheets.raspberrypi.com/rpi4/raspberry-pi-4-datasheet.pdf>.

18. JETSON NANO DEVELOPER KIT. (2019). [https://developer.download.nvidia.com/embedded/L4T/r32-3-1\\_Release\\_v1.0/Jetson\\_Nano\\_Developer\\_Kit\\_User\\_Guide.pdf](https://developer.download.nvidia.com/embedded/L4T/r32-3-1_Release_v1.0/Jetson_Nano_Developer_Kit_User_Guide.pdf).

Отримано 09.05.2024

UDC 004.2

**Volodymyr Kazymyr<sup>1</sup>, Andrii Rohovenko<sup>2</sup>, Oleksii Karas<sup>3</sup>**

<sup>1</sup>Doctor of Sciences, Professor, of the Department of Information and Computer Systems  
Chernihiv Polytechnic National University (Chernihiv, Ukraine)

**E-mail:** [vkazymyr@gmail.com](mailto:vkazymyr@gmail.com). **ORCID:** <https://orcid.org/0000-0001-8163-1119>. **ResearcherID:** [Q-2925-2016](https://orcid.org/Q-2925-2016)

<sup>2</sup>PhD in Technical Sciences, associate professor of the Department of Information and Computer Systems  
Chernihiv Polytechnic National University (Chernihiv, Ukraine)

**E-mail:** [arogovenko@gmail.com](mailto:arogovenko@gmail.com). **ORCID:** <https://orcid.org/0000-0003-4594-5692>. **ResearcherID:** [G-3926-2014](https://orcid.org/G-3926-2014)

<sup>3</sup>Student of the Department of Information and Computer Systems  
Chernihiv Polytechnic National University (Chernihiv, Ukraine)

**E-mail:** [oleksiykaras2016@gmail.com](mailto:oleksiykaras2016@gmail.com). **ORCID:** <https://orcid.org/0009-0004-8862-7234>. **ResearcherID:** [JZT-2594-2024](https://orcid.org/JZT-2594-2024)

## DESIGNING A DRONE CONTROL SYSTEM AS PART OF A DEFENSIVE MULTI-AGENT SYSTEM

*Recent events have shown that attacks by UAVs become particularly dangerous when terrorism reaches a state level, and the number of drones can reach hundreds. These attacks threaten institutions that, despite having defensive structures and other security systems, are unable to defend themselves against drone incursions into their territory.*

*It is apparent that countering a large number of drones is more effective by using not individual drones but groups of drones operating according to swarm rules. However, working in a group requires drones to meet certain requirements, leading to the need for the development of new hardware and software. This particularly applies to the control system, as in individual drones, the control system has very limited functionality, tuned for autonomous operation.*

*The aim of this article is to describe research on designing the hardware and software architecture of UAV control systems as part of a multi-agent system*

*The article presents the results of the analysis of architectures of the most common unmanned drones. The main elements of the architecture are highlighted, and the suitability of each architecture for use as the control architecture of a drone in a multi-agent system is determined.*

*The results of the analysis of modern computing platforms based on single-board microcomputers for use as the basis of a drone control system in a multi-agent system are presented.*

*A hardware and software architecture for controlling a drone in a multi-agent system is proposed.*

*A developed neural network model for recognizing UAVs by audio signals is presented.*

*The results of practical studies of the operation of the neural network model for recognizing UAVs by audio signals as part of a drone control system in a multi-agent system are provided.*

*The hardware platform of the drone control system should be based on computing elements with sufficient power to organize decision-making and communication subsystems, tasks for detecting sound and visual objects. In addition, the platform should provide for the use of neural networks to solve target recognition tasks.*

*During the testing of the neural network model, only 10 % of the computing power of the platform was used. Thus, there are still enough computational resources left to solve communication tasks between agents, ensure connection security, recognize targets by video stream, navigate in space, and other possible uses of drones as part of a multi-agent system.*

**Key words:** Multi-agent system; drone swarm; single-board computer; UAV (Unmanned Aerial Vehicle); flight controller; neural network.

*Fig.: 10. References: 18.*