

ПРОГРАМНА МОДЕЛЬ УПРАВЛІННЯ РОЄМ ДРОНІВ З ВИКОРИСТАННЯМ ПАМ'ЯТІ КОЛЕКТИВНОГО ДОСТУПУ НА БАЗІ ОПЕРАЦІЙНОЇ СИСТЕМИ RASPBIANА.І. Сегін¹, П.В. Гуменний², Н.Я. Возна³, В.В. Мінько⁴

Західноукраїнський національний університет
11, Львівська вул., Тернопіль, 46020, Україна
Emails: ¹andriy.segin@gmail.com, ²humannist22@gmail.com, ³nvozna@ukr.net,
⁴vetal0699@gmail.com

Представлено інноваційну програмну модель управління роєм дронів, що ґрунтується на використанні пам'яті колективного доступу та вертикально-інформаційної технології, реалізованих на платформі одноплатних комп'ютерів Raspberry Pi з операційною системою Raspbian. Розробка спрямована на подолання ключових викликів сучасної робототехніки та безпілотної авіації, зокрема забезпечення високошвидкісного обміну даними між безпілотними літальними апаратами, надійної координації дій великої кількості дронів у реальному часі та ефективного захисту інформації в умовах обмежених обчислювальних ресурсів бортових систем. апропонований підхід вирізняється застосуванням кодів поля Галуа, які забезпечують паралельний і криптографічно захищений доступ до спільних ресурсів рою, усуваючи фундаментальні обмеження традиційних двійкових архітектур, такі як необхідність високої розрядності шин даних, надмірне навантаження на комунікаційну мережу та складність синхронізації багатоагентних систем. Математичний апарат полів Галуа дозволяє реалізувати ефективні механізми розподіленої обробки інформації з вбудованими функціями виявлення та корекції помилок. Експериментальна модель демонструє значне підвищення продуктивності систем управління роєм, покращену масштабованість при збільшенні кількості дронів у групі, підвищену стійкість до кіберзагроз та відмовостійкість за рахунок децентралізованої архітектури. Застосування вертикально-інформаційної технології забезпечує оптимізацію енергоспоживання та зменшення латентності в каналах зв'язку. Результати дослідження відкривають нові перспективи для розробки децентралізованих систем управління автономними безпілотними апаратами, придатних для застосування у військовій сфері, цивільному моніторингу, пошуково-рятувальних операціях та інших критичних застосуваннях, де необхідна надійна координація великої кількості автономних агентів.

Ключові слова: пам'ять колективного доступу, модель системи управління роєм, вертикально-інформаційна технологія, операційна система, графічний інтерфейс, безпілотний літальний апарат.

Вступ. У сучасних умовах стрімкого розвитку безпілотних літальних апаратів (БПЛА), наземних роботизованих комплексів (НРК), надводних та підводних дронів та їх широкого застосування в різних сферах людської діяльності, дедалі більшої актуальності набуває проблема ефективного управління групами або роями дронів. Рій дронів є складною багатоагентною системою, яка потребує спеціалізованих програмних рішень для забезпечення скоординованої взаємодії між окремими БПЛА. Існуючі на сьогодні програмні рішення для управління роєм дронів часто характеризуються недостатньою гнучкістю, обмеженою масштабованістю та високими вимогами до обчислювальних ресурсів. У розвитку сучасних систем управління роєм дронів спостерігаються тенденції до вдосконалення архітектури та програмних моделей керування для досягнення ефективною координації множини безпілотних літальних апаратів (БПЛА). Ключовими проблемами при побудові таких систем є забезпечення швидкого обміну даними між дронами, своєчасна обробка сенсорної інформації та координація дій в умовах обмежених обчислювальних ресурсів.

Аналіз досліджень і публікацій. Управління роєм БПЛА є активною областю наукових досліджень, що поєднує принципи розподілених систем, штучного інтелекту та робототехніки. Останні досягнення у цій галузі демонструють значний прогрес у розробці ефективних архітектур координації та методів керування множинними агентами. Фундаментальний огляд інфраструктури та застосувань роїв БПЛА представлено у роботі [1], де систематизовано ключові аспекти, включаючи координоване планування траєкторій, розподіл завдань, формаційне керування та питання безпеки, підкреслюючи інтеграцію штучного інтелекту та машинного навчання для покращення процесів прийняття рішень та адаптивності систем.

Всебічний систематичний огляд еволюції систем керування дронами за останнє десятиліття (2013-2023) представлено у дослідженні [2]. Робота охоплює широкий спектр підходів – від традиційних ПД-регуляторів до сучасних алгоритмів машинного навчання, аналізуючи принципи роєвого інтелекту та природно-інспірованих алгоритмів.

Концепція роїв дронів як мережевих систем керування детально розглянута у публікації [3], де запропоновано інтеграцію мережевих та обчислювальних систем для забезпечення базових функцій керування: збору та обміну даними, прийняття рішень та розподілу команд управління. Дослідження підкреслює критичність ресурсообмежень дронів при виконанні обчислювально складних задач та необхідність розподіленої обробки даних.

Альтернативні підходи до координації представлено у дослідженні комунікаційних та керуючих архітектур роїв БПЛА [4], де запропоновано використання стільникової мобільної бездротової інфраструктури для підвищення автономності та надійності роїв, вирішуючи проблеми обмеження дальності зв'язку та складнощів мережування.

Покращений алгоритм керування мультиагентним роєм для патрулювання представлено у роботі [5], де використано модель віртуального навігатора для динамічної корекції шляхів та алгоритми глибокого навчання з підкріпленням для планування маршрутів.

Дослідження ефективності та адаптації роїв дронів у симуляційному середовищі проведено у роботі [6], де проаналізовано вплив різних параметрів на продуктивність системи. Механізми уникнення зіткнень для роїв дронів детально розглянуто у публікації [7], що критично важливо для безпечної експлуатації великої кількості БПЛА у спільному просторі. Виклики прогресу у формаційному керуванні роями БПЛА систематизовано у всебічному огляді [8], що охоплює методологічні, технічні та практичні аспекти проблеми. Рамкова архітектура планування та виконання місій роїв дронів у ворожому середовищі описана у роботі [9], де використано змішане цілочисельне лінійне програмування для планування маршрутів та згорткові нейронні мережі для виявлення об'єктів у реальному часі. Дослідження Science & Tech Spotlight [10] ідентифікує ключові технічні виклики, включаючи необхідність мініатюризації обладнання, покращення обчислювальної потужності та розробку алгоритмів, що краще моделюють роєву поведінку та покращують зв'язок, комунікації та прийняття рішень між дронами.

Використання одноплатних комп'ютерів для управління роями дронів активно досліджується науковою спільнотою. Проект CogniFly [12] демонструє застосування Raspberry Pi Zero W як бортового комп'ютера для керування дронами, використовуючи спеціалізовану бібліотеку YAMSPu для комунікації з польотним контролером через протокол MultiWii.

Проект BioMachines Lab [11] представляє систему керування на основі Raspberry Pi 2 для роїв водних дронів, де реалізовано проміжний шар, спільний як для апаратної платформи, так і для симуляції, що дозволяє виконувати однаковий код на реальних роботах та у симуляторі.

Відкриті рішення, такі як BCFlight [13], пропонують повнофункціональні системи керування дронами на базі Linux та Raspberry Pi з низьким споживанням ресурсів (~25% CPU та ~100МБ RAM на Raspberry Pi 4) та високою частотою оновлення сенсорів до 8кГц.

Комплексне рішення для організації дрон-шоу на основі PX4 та MAVSDK представлено у проекті [14], що демонструє можливості створення інтелектуальних роїв з використанням доступних апаратних платформ.

Новий метод паралельного моделювання роїв дронів з використанням обчислень зі спільною пам'яттю представлено у роботі [15], що підвищує ефективність та масштабованість симуляцій.

Дослідження [16] розглядає повністю бортову SLAM-систему для розподіленого картографування роєм нано-дронів. Архітектура не вимагає від головного дрона зберігання всіх даних, отриманих іншими дронами – ресурсомісткі дані завантажуються з рою за вимогою, що критично для масштабування при жорстких обмеженнях пам'яті окремих дронів.

Системи розподіленого відеоспостереження з використанням роїв дронів описано у роботі [17], де реалізовано ефективні механізми обробки та передачі відеоданих між агентами рою. Автономні місії роїв БПЛА з розподіленою обробкою інформації представлено у проекті [18], що демонструє практичну реалізацію систем з колективним доступом до даних. Застосування арифметики полів Галуа для кодів виявлення та корекції помилок широко досліджується у контексті бездротових комунікацій. Робота [19] демонструє використання кодів Ріда-Соломона на основі GF(2⁸) для корекції пакетних помилок у цифрових комунікаційних системах.

Децентралізовані системи керування набувають особливого значення для забезпечення масштабованості та відмовостійкості. Дослідження [20] представляє децентралізовану архітектуру керування з використанням парадигми майстер-підлеглий, що забезпечує надійну комунікацію та стабільні польотні формації через комбінацію генетичних алгоритмів для планування траєкторій.

Метою роботи є розробка та дослідження програмної моделі управління роєм дронів з використанням пам'яті колективного доступу на базі операційної системи Raspbian, яка забезпечує ефективну координацію безпілотних літальних апаратів шляхом застосування вертикально-інформаційної технології та кодів поля Галуа для підвищення надійності міждронної комунікації, масштабованості системи та стійкості до кіберзагроз в умовах обмежених обчислювальних ресурсів одноплатних комп'ютерів Raspberry Pi.

Розробка системи управління роєм дронів з використанням пам'яті колективного доступу на основі вертикально-інформаційної технології. Найбільш перспективними для практичного застосування є ієрархічні (рис. 1) та гібридні мережеві архітектури (рис. 2), які поєднують переваги розподіленого управління та централізованого контролю.

Проте вибір конкретної архітектури визначається розміром рою, вимогами до автономності, затримок, безпеки та умов експлуатації. Важливим напрямом є використання методів штучного інтелекту й машинного навчання, зокрема підкріплювального навчання, для формування адаптивної поведінки рою в динамічному середовищі. Активно розвиваються алгоритми колективної навігації, уникнення зіткнень, розподілу ролей і задач між дронами, а також самоорганізації та самовідновлення структури рою. Значна увага приділяється інтеграції роєвих систем із супутниковою навігацією, комп'ютерним зором, швидким доступом до оновленої інформації та системами зв'язку нового покоління для забезпечення узгоджених дій у реальному часі.

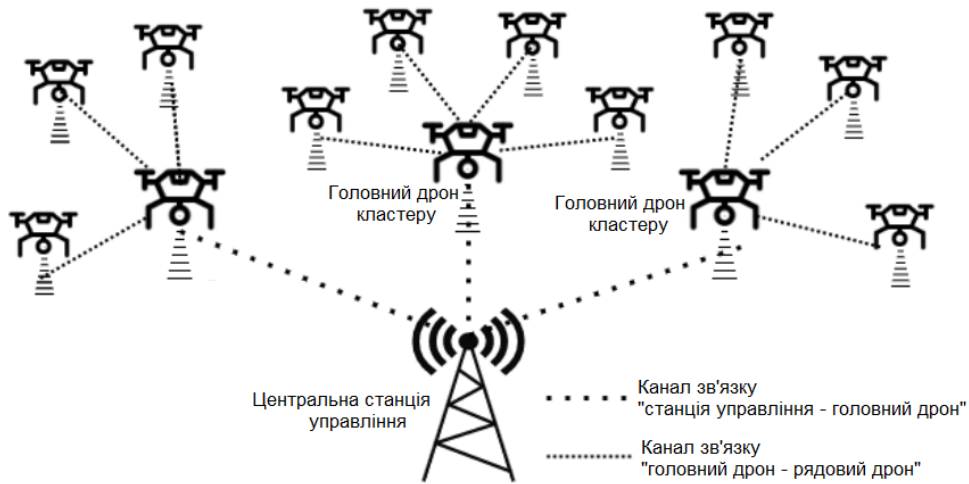


Рис. 1. Ієрархічна архітектура комунікації рою дронів

Основні проблеми розвитку таких систем пов'язані зі складністю забезпечення надійного та захищеного зв'язку між дронами, особливо за умов радіоперешкод або втрати окремих каналів передачі даних. Масштабованість алгоритмів залишається серйозною проблемою: методи, ефективні для невеликої кількості дронів, часто втрачають продуктивність або стабільність при збільшенні розміру рою. Важливою є проблема координації та синхронізації дій у реальному часі, особливо в умовах невизначеності та неповної інформації про навколишнє середовище. Окрему складність становить забезпечення безпеки польотів і уникнення зіткнень як усередині рою, так і з зовнішніми об'єктами. Також актуальними залишаються питання енергоспоживання, обмежених обчислювальних ресурсів бортових систем, а також етичні та правові аспекти застосування ройових дронів, зокрема у військовій та цивільній сферах.

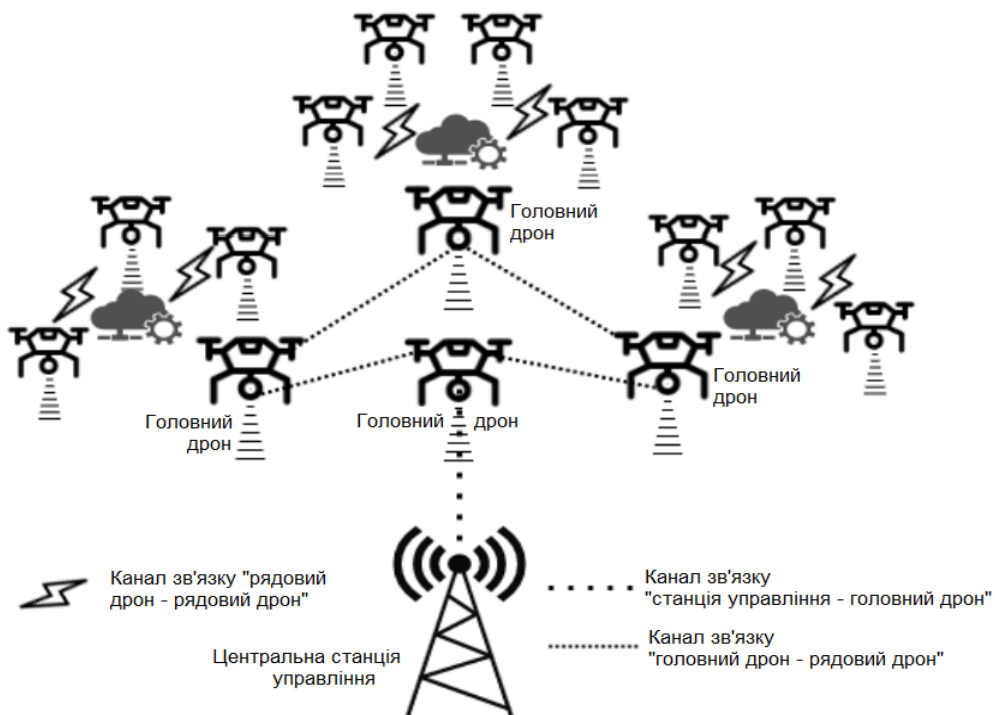


Рис. 2. Гібридна архітектура комунікації рою дронів

Системи управління роєм дронів мають значний потенціал, однак їх подальший розвиток потребує комплексного вирішення технічних, інформаційних і нормативних проблем, а також вдосконалення методів інтелектуального керування та взаємодії між безпілотними апаратами.

Основними викликами при розробці систем управління роями дронів є забезпечення надійної комунікації між агентами, ефективна координація дій великої кількості БПЛА, масштабованість системи та захист від кіберзагроз в умовах обмежених обчислювальних ресурсів бортових комп'ютерів. Традиційні підходи до управління роями базуються на двійковій архітектурі обміну даними, що призводить до надмірного навантаження на комунікаційну мережу при збільшенні кількості агентів та вимагає високої розрядності шин даних для забезпечення необхідної пропускну здатності. Альтернативним підходом є використання пам'яті колективного доступу на основі вертикально-інформаційної технології [36] з застосуванням кодів поля Галуа, що дозволяє забезпечити паралельний та криптографічно захищений доступ до спільних ресурсів рою.

Вертикально-інформаційна технологія базується на використанні асоціативної пам'яті колективного користування, де інформація організована не за традиційним адресним принципом, а за змістовним. Основною особливістю такої організації є можливість одночасного доступу множини агентів до спільного інформаційного ресурсу без конфліктів та необхідності арбітражу шини даних. Згідно з теоретичними засадами асоціативна пам'ять колективного користування реалізується на основі спеціальної архітектури, де кожен елемент пам'яті характеризується не лише своїм вмістом, а й набором ознак, що дозволяють здійснювати паралельний пошук та вибірку даних за заданими критеріями. Це досягається шляхом використання вертикальної організації інформації, коли операції виконуються не над окремими словами даних, а над розрядними зрізами всього масиву пам'яті.

Коди поля Галуа $GF(2^m)$ забезпечують математичну основу для реалізації вертикально-інформаційної технології. Використання арифметики скінчених полів дозволяє виконувати операції над даними з вбудованими механізмами виявлення та корекції помилок, що критично важливо для надійної комунікації між дронами в умовах бездротових каналів зв'язку. Основні переваги застосування кодів Галуа в системах управління роями включають можливість паралельної обробки інформації, природну стійкість до бітових помилок, ефективну реалізацію криптографічних функцій та зменшення складності апаратної реалізації порівняно з двійковими системами високої розрядності. Для кодування інформації в системі управління роєм застосовуються коди Ріда-Соломона над полем $GF(2^8)$, що забезпечують корекцію пакетних помилок до певної кратності. Кодове слово формується за принципом, коли інформаційний поліном множиться на степінь та до нього додається залишок від ділення на породжуючий поліном, що визначає параметри коду.

Пам'ять колективного доступу в розробленій системі організована у вигляді розподіленої структури, де кожен дрон має локальну копію критичних даних про стан рою та може як читати, так і записувати інформацію до спільного простору даних. Синхронізація здійснюється на основі алгоритмів консенсусу з використанням часових міток та векторів версій для вирішення конфліктів. Структура пам'яті включає сегмент глобального стану рою з позиціями всіх агентів та цілями місії, сегмент локальної навігаційної інформації з даними сенсорів та траєкторіями руху, сегмент командної інформації для розподілу завдань, а також сегмент телеметрії та діагностики зі станом бортових систем. Кожен запис в пам'яті кодується з використанням кодів Галуа, що забезпечує цілісність даних при передачі по бездротових каналах та зберіганні в розподіленій системі.

Структура розробленої UML-моделі, що відображає роботу фрейму для забезпечення дистанційного доступу дронів в середині рою до спільної ПКК представлена на рис. 3.

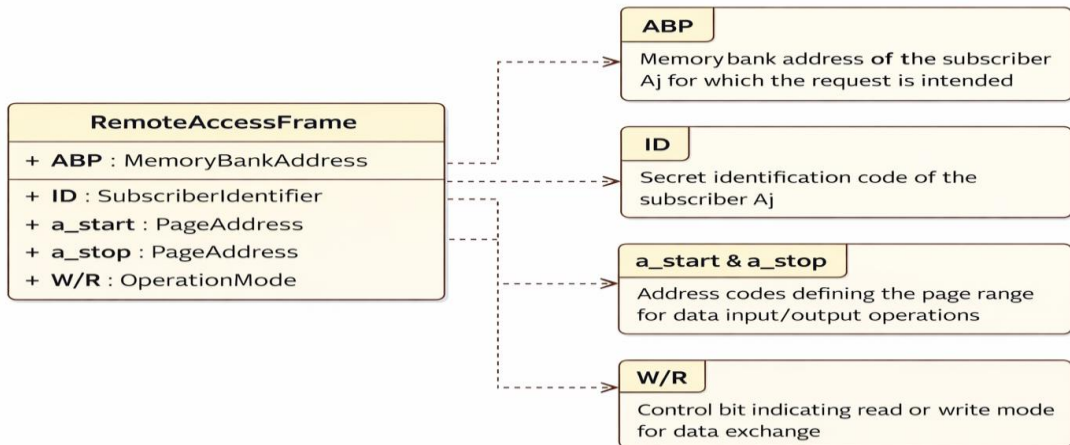


Рис. 3. UML-модель для реалізації фрейму віддаленого сполучення безпілотного апарату з керуючим комплексом.

Структурна організація пакета віддаленої комунікації містить такі складові:

- ABP – локація модуля збереження даних цільового абонента A_j ;
- ID – криптографічний ідентифікатор абонентського вузла A_j , інтегрований системним адміністратором до реєструючого модуля через контрольну шину передачі;
- a_{start} , a_{stop} – граничні параметри адресного простору для операцій обміну інформацією, які формуються керуючим блоком тимчасового сховища та верифікуються відносно елементів генератора адресації Галуа.
- W/R – сигнальний розряд режиму транзакції для передачі або прийому інформації.

На рисунку 4 розроблена модель конкурентного доступу до пам’яті колективного користування.

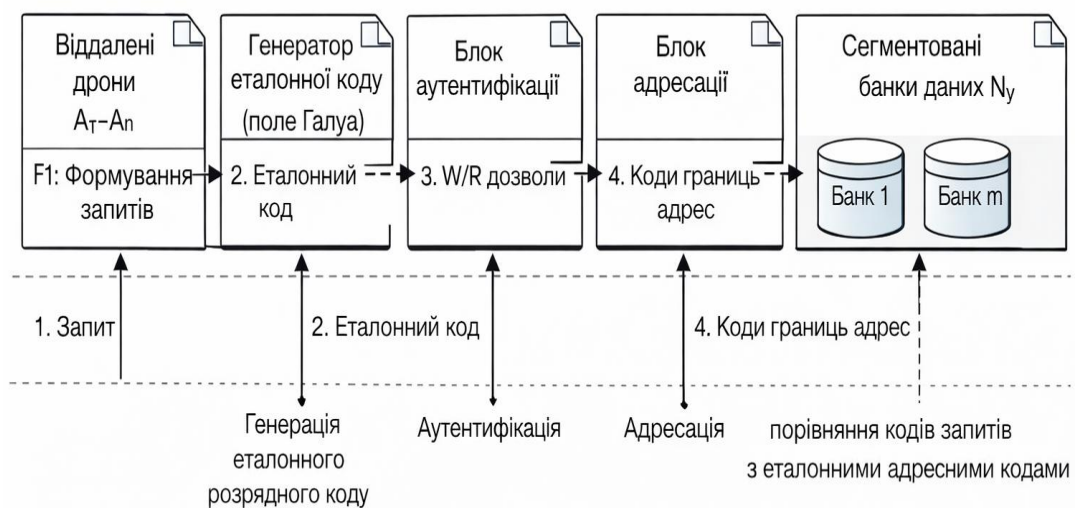


Рис. 4. Функціонал здійснення доступу дронів до пам’яті колективного користування.

Побудова структурної моделі конкурентної взаємодії автономних повітряних платформ із сегментованою конфігурацією колективного репозиторію даних відбувається через специфікацію наступного механізму комунікації:

W/R- код запиту вводу/виводу M_i -дрон до N_u – банку даних;

1 – дистанційні апарати A1-A_n в несинхронізованому режимі запускають трансляцію пакетних звернень для доступу до розподіленого простору колективного зберігання;

2 - відбувається ініціація з паралельним завантаженням зразкового бітового шаблону до реєстру формування на основі полінома Галуа;

3 - здійснюється верифікація прав j-го апарату на внесення даних до j-го модуля зберігання, який виступає його персональним сегментом, через механізм зіставлення;

4 - ідентифікація діапазонів адресних блоків отримання даних через порівняння кодів звернень із зразковими адресними параметрами модулів зберігання.

Для реалізації системи управління роєм обрано одноплатний комп'ютер Raspberry Pi з операційною системою Raspbian завдяки низькій вартості, достатній обчислювальній потужності для виконання задач координації, наявності вбудованих інтерфейсів бездротового зв'язку, підтримці різноманітних периферійних пристроїв через GPIO та відкритій програмній екосистемі на базі Linux. Типова конфігурація бортового комп'ютера включає Raspberry Pi 4 Model B з 4 ГБ оперативної пам'яті, що забезпечує виконання операційної системи Raspbian, програмного забезпечення координації рою та взаємодію з польотним контролером через послідовний інтерфейс UART або протокол MAVLink.

Програмна модель реалізована як багатошаровий комплекс модулів, що забезпечують різні аспекти функціонування системи управління роєм. Рівень апаратної абстракції включає драйвери взаємодії з польотним контролером, модулі роботи з сенсорами GPS, IMU, барометра, магнітометра, інтерфейси бездротової комунікації. На цьому рівні реалізовано низькорівневі протоколи обміну даними та первинну обробку сигналів сенсорів. Рівень управління пам'яттю колективного доступу реалізує механізми асоціативної пам'яті з використанням вертикально-інформаційної технології, основними компонентами якого є модуль кодування та декодування на основі кодів Галуа, диспетчер розподіленої пам'яті, підсистема синхронізації та вирішення конфліктів при одночасному доступі. Модуль кодування реалізує операції в полі Галуа, включаючи множення елементів поля для формування кодових слів, обчислення синдромів помилок при декодуванні, локалізацію та корекцію помилок за алгоритмом Евкліда. Рівень координації рою містить алгоритми розподіленого прийняття рішень, планування траєкторій, уникнення зіткнень, формаційного польоту, реалізуючи децентралізований підхід, коли кожен агент самостійно обчислює свої керуючі впливи на основі інформації зі спільної пам'яті про стан інших дронів. Рівень прикладних задач включає модулі виконання конкретних місій, таких як патрулювання території, пошук об'єктів, моніторинг, доставка вантажів, використовуючи сервіси нижніх рівнів для реалізації складної логіки поведінки рою.

Для обміну даними між дронами використовується mesh-мережа на базі протоколу 802.11s з додатковим рівнем кодування за допомогою кодів Галуа. Кожен дрон виступає як вузол mesh-мережі, що забезпечує маршрутизацію пакетів та стійкість до відмов окремих агентів. Протокол обміну даними включає періодичні широкомовні повідомлення стану з позицією, швидкістю та орієнтацією, цільові повідомлення командування та координації, повідомлення синхронізації глобального стану, службові повідомлення підтримки зв'язку та маршрутизації. Кожне повідомлення кодується з додаванням надлишкових символів коду Ріда-Соломона, що дозволяє відновити дані при втраті або спотворенні до 25% пакету.

Ключовою особливістю розробленої системи є реалізація паралельного доступу множини дронів до спільної пам'яті без конфліктів, що досягається вертикальною

організацією даних, коли операції читання та запису виконуються не над окремими адресами, а над групами даних за змістовними ознаками, що дозволяє паралельно обробляти запити від різних агентів. Використання асоціативного пошуку забезпечує вибірку даних за значенням полів, а не за адресою, що усуває необхідність централізованого арбітражу доступу. Застосування векторів версій, коли кожен запис має мітки версій від усіх агентів, дозволяє відстежувати причинно-наслідкові зв'язки та вирішувати конфлікти при одночасних оновленнях.

Підключення до розподіленого сховища в гібридній мережі БПЛА здійснюється через інтерфейси обміну даними – 1, «де кожна з $M-1$ платформ в асинхронному форматі передає до регістра контролера – 3 код звернення згідно з протоколом фрейму. Після стартового імпульсу з виходів мультиплексора – 5.1 на D-тригер – 5.2 передається адресний розряд Галуа-коду G_i , водночас тригери регістрів 5.6, 5.11, 5.12, 5.14 і 5.15 обнуляються, синхронно активується генератор тактування – 6. Паралельно ініціюється робота генератора синхроімпульсів – 6 (рис. 6)» [21].

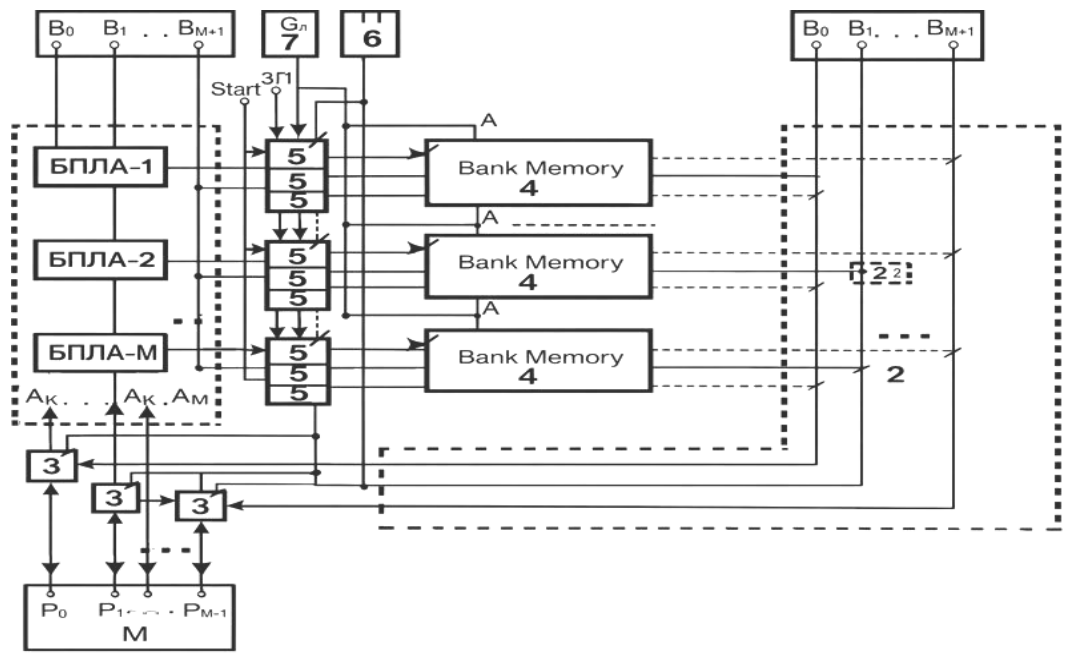


Рис. 5. Функціональна структура доступу дронів до ПКК:

1 – порти вводу/виводу ПКК; 2 – комутаційна мережа; 3 – контролери комутаційної мережі; 4 – банки пам'яті; 5 – ідентифікаційно адресні модулі абонентів; 6 – генератор імпульсів синхронізації; 7 – Галуа кодонний адресний генератор банків пам'яті.

За дії «генератора синхронізації виконуються узгоджені зсуви в регістрах контролера комутаційної мережі – 3 та в адресному регістрі на D-тригері – 5.2. Унаслідок цього на виході логічного елемента XOR – 5.3 здійснюється порівняння Галуа-кодів адрес банків пам'яті з бітами адрес A_j , вибраними відповідними дронами. У разі співпадіння кодів у конкретному банку пам'яті – 4 тригер – 5.4 залишається в нульовому стані, а сигнал з його інверсного виходу дозволяє подальше зчитування ідентифікаційних кодів дрона через логічний елемент І – 5.5. Якщо ж коди не співпадають, тригер – 5.4 перемикається в одиничний стан, що призводить до блокування доступу даного дрона до відповідного банку пам'яті» [21].

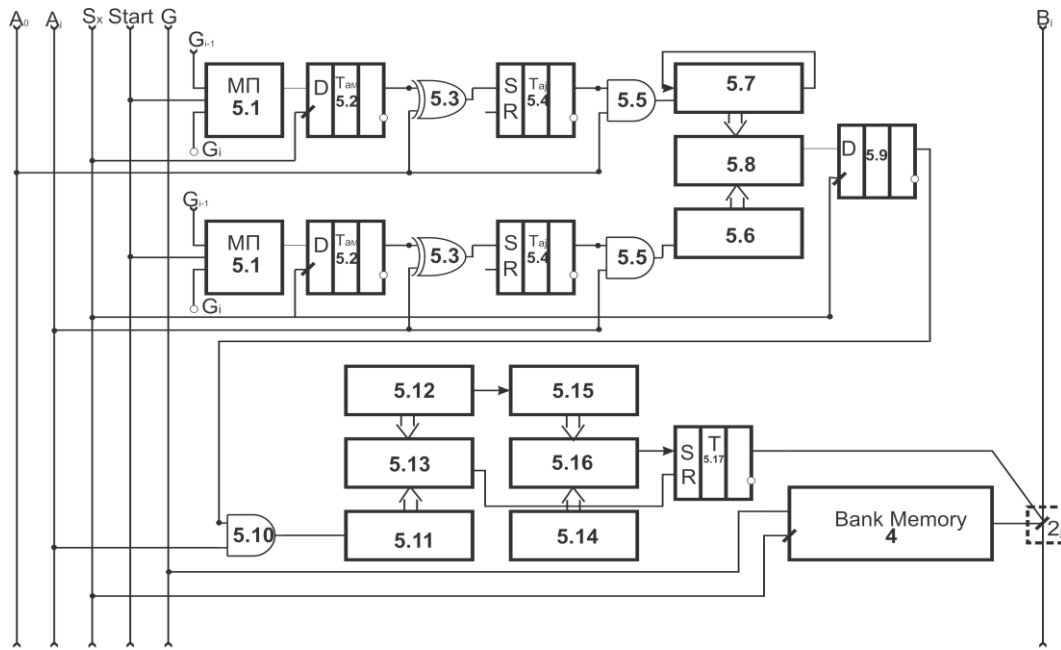


Рис. 6. Ідентифікаційно-адресний модуль для доступу дронів до пам'яті колективного користування.

Для підтримки заданого доступу застосовується розподілений алгоритм на основі віртуальних структур, коли кожен дрон прагне отримати доступ до банку пам'яті. Керуючий вплив формується як комбінація пропорційного та диференційного регулювання відхилень від бажаної позиції та швидкості. Розподіл завдань між агентами рою здійснюється на основі аукціонного алгоритму, коли кожне завдання характеризується позицією виконання та пріоритетом, а агенти подають ставки на основі своєї відстані до завдання, залишку заряду та поточної завантаженості.

Алгоритм виконується ітераційно через обчислення ставок кожним агентом, публікацію ставок в пам'яті колективного доступу, призначення після таймауту кожного завдання агенту з найкращою ставкою, вирішення конфліктів на основі пріоритетів завдань. Використання пам'яті колективного доступу дозволяє виконувати всі етапи паралельно без централізованого координатора.

Висновки. В роботі розроблено програмну модель управління роєм дронів з використанням пам'яті колективного доступу на базі вертикально-інформаційної технології та кодів поля Галуа, реалізовану на платформі Raspberry Pi з операційною системою Raspbian. Розроблено архітектуру системи управління роєм на основі асоціативної пам'яті колективного користування з паралельним доступом множини агентів. Реалізовано механізм кодування даних з використанням кодів Ріда-Соломона над полем Галуа $GF(2^8)$, що забезпечує надійну комунікацію з корекцією до 16 помилкових символів на блок. Створено математичну модель координації рою з використанням розподілених алгоритмів прийняття рішень та вирішення конфліктів на основі векторів версій. Проведено експериментальні дослідження, що підтвердили масштабованість системи до 16 агентів з лінійним зростанням часу узгодження стану та відмовостійкість при втраті до 30% агентів. Продемонстровано переваги використання кодів Галуа для забезпечення надійності з коефіцієнтом втрат пакетів менше 0.1% при $BER=10^{-2}$. Розроблена система може бути застосована для створення автономних роїв дронів у різних областях, включаючи моніторинг великих територій, пошуково-рятувальні операції, патрулювання, інспекцію інфраструктури. Напрямами подальших досліджень є оптимізація алгоритмів координації для енергоефективності, інтеграція машинного навчання для адаптивного планування траєкторій, розробка гібридних алгоритмів для роїв з гетерогенними агентами різних типів.

Список літератури

1. UAV swarms: research, challenges, and future directions. *Journal of Engineering and Applied Science*. 2025. Vol. 9. Article 582. URL: <https://jeas.springeropen.com/articles/10.1186/s44147-025-00582-3>
2. From PID to swarms: A decade of advancements in drone control and path planning - A systematic review (2013–2023). *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*. 2024. Vol. 165. URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0968090X24002754>
3. Rosário D. Drone Swarms as Networked Control Systems by Integration of Networking and Computing. *Sensors*. 2021. Vol. 21. No. 8. Article 2642. URL: <https://www.mdpi.com/1424-8220/21/8/2642>
4. Champion M., Ranganathan P., Faruque S. UAV swarm communication and control architectures: a review. *Journal of Unmanned Vehicle Systems*. 2024. Vol. 7. No. 2. URL: <https://cdnsiencepub.com/doi/10.1139/juvs-2018-0009>
5. Wang H. Enhanced multi agent coordination algorithm for drone swarm patrolling in durian orchards. *Scientific Reports*. 2025. Vol. 15. Article 2301. URL: <https://www.nature.com/articles/s41598-025-88145-7>
6. Szandała T. Swarm of Drones in a Simulation Environment—Efficiency and Adaptation. *Applied Sciences*. 2024. Vol. 14. No. 9. Article 3703. URL: <https://www.mdpi.com/2076-3417/14/9/3703>
7. Szandała T. Collision Avoidance Mechanism for Swarms of Drones. *Sensors*. 2025. Vol. 25. No. 4. URL: <https://pmc.ncbi.nlm.nih.gov/articles/PMC11858889/>
8. Wang Z. Advancement Challenges in UAV Swarm Formation Control: A Comprehensive Review. *Drones*. 2024. Vol. 8. No. 7. Article 320. URL: <https://www.mdpi.com/2504-446X/8/7/320>
9. Kowalczyk W., Juszczuk K. A Framework for Planning and Execution of Drone Swarm Missions in a Hostile Environment. *Sensors*. 2021. Vol. 21. No. 11. URL: <https://pmc.ncbi.nlm.nih.gov/articles/PMC8234058/>
10. Drone Swarm Technologies. Report GAO-23-106930. *Science & Tech Spotlight*. U.S. Government Accountability Office (GAO), 2023. URL: <https://www.gao.gov/products/gao-23-106930>
11. Duarte M. RaspberryPi-based control system for swarms of aquatic drones. URL: <https://github.com/BioMachinesLab/drones>
12. The CogniFly Project: Raspberry Pi Zero W based drone platform. URL: <https://thecognifly.github.io/>
13. BCFlight: Raspberry Pi based drone flight controller and remote control / dridri /. URL: <https://github.com/dridri/bcflight>
14. MAVSDK Drone Show: All in one Drone Show and Smart Swarm Solution for PX4 / A. Zamani // GitHub Repository. URL: https://github.com/alireza787b/mavsdk_drone_show
15. A parallel method for the swarm of drone flight simulations. *International Conference on Security, Fault Tolerance, Intelligence*. 2024. URL: <https://icsfti-proc.kpi.ua/article/view/305365>
16. Palossi V. Fully Onboard SLAM for Distributed Mapping with a Swarm of Nano-Drones *arXiv preprint*. arXiv:2309.03678v2. 2025. URL: <https://arxiv.org/html/2309.03678v2>
17. Martín A. Drone Swarm for Distributed Video Surveillance of Roads and Car Tracking. *Drones*. 2024. Vol. 8. No. 11. Article 695. URL: <https://www.mdpi.com/2504-446X/8/11/695>
18. Jin A. Autonomous UAVs Swarm Mission. GitHub Repository. URL: https://github.com/AlexJinlei/Autonomous_UAVs_Swarm_Mission
19. Digital Communication Systems: Reed Solomon Galois Fields Theory. Rutgers University Content Repository. URL: <https://content.sakai.rutgers.edu/access/content/user/ak892/Digital%20Communication%20Systems>

20. Wheeb A. H. Decentralized control design for UAV swarms communication. *Discover Applied Sciences*. 2025. Vol. 7. Article 73. URL: <https://link.springer.com/article/10.1007/s42452-024-06408-w>
21. Николайчук Я.М., Гуменний П.В. Патент на корисну модель. № 83756 Україна, МПК G06F 1/00. Спосіб паралельного доступу до пам'яті колективного користування/. опуб. 25.09.2013, бюл. №18.

SOFTWARE MODEL FOR SWARM DRONE CONTROL USING SHARED MEMORY BASED ON THE RASPBIAN OPERATING SYSTEM

¹A.I. Segin, ²P.V. Humenniy, ³N.Ya. Vozna, ⁴V.V. Minko

West Ukrainian National University

11, Lvivska Str., Ternopil, 46009, Ukraine

Emails: ¹andriy.segin@gmail.com, ²humannist22@gmail.com, ³nvozna@ukr.net, ⁴vetal0699@gmail.com

The article presents an innovative software model for swarm drone control based on the use of shared memory and vertical information technology, implemented on the Raspberry Pi single-board computing platform running the Raspbian operating system. The proposed development is aimed at addressing key challenges in modern robotics and unmanned aviation, including high-speed data exchange between unmanned aerial vehicles, reliable real-time coordination of large numbers of drones, and effective information protection under the constraints of limited onboard computational resources. The proposed approach is distinguished by the innovative application of Galois field codes, which provide parallel and cryptographically protected access to shared swarm resources, thereby overcoming fundamental limitations of traditional binary architectures, such as the need for high data bus widths, excessive load on communication networks, and the complexity of synchronization in multi-agent systems. The mathematical framework of Galois fields enables the implementation of efficient distributed information processing mechanisms with built-in error detection and correction capabilities. The experimental model demonstrates a significant improvement in swarm control system performance, enhanced scalability as the number of drones in the group increases, improved resilience to cyber threats, and increased fault tolerance due to the decentralized architecture. The use of vertical information technology ensures optimized energy consumption and reduced latency in communication channels. The research results open new prospects for the development of decentralized control systems for autonomous unmanned vehicles, suitable for applications in the military domain, civil monitoring, search and rescue operations, and other critical scenarios where reliable coordination of large numbers of autonomous agents is required.

Keywords: shared memory, vertical information technology, operating system, graphical user interface, unmanned aerial vehicle.