

DOI 10.36074/grail-of-science.18.07.2025.061

ОСОБЛИВОСТІ ЗАСТОСУВАННЯ МЕТОДУ D2-C2 ДЛЯ ПІДВИЩЕННЯ БЕЗПЕКИ ПОЛЬОТІВ ГРУПИ БЕЗПІЛОТНИХ ЛІТАЛЬНИХ АПАРАТІВ У МІСЬКИЙ ЗАБУДОВІ

НАУКОВО-ДОСЛІДНА ГРУПА:

Коломійцев Олексій Володимирович

д-р техн. наук, професор, Заслужений винахідник України,
професор кафедри

Національний технічний університет «Харківський політехнічний
інститут», Україна

Рудаков Ігор Сергійович

аспірант кафедри

Національний технічний університет «Харківський політехнічний
інститут», Україна

Дмітрієв Олег Миколайович

д-р техн. наук, професор,
провідний науковий співробітник

Державний науково-дослідний інститут випробувань і сертифікації
озброєння та військової техніки», Україна

Власов Андрій Володимирович

канд. техн. наук, ст. досл.,
начальник науково-дослідного відділу

Навчально-науковий випробувальний полігон
високотехнологічного озброєння та військової техніки», Україна

Панченко Володимир Іванович

старший викладач кафедри

Національний технічний університет «Харківський політехнічний
інститут», Україна

Поринос Євген Олександрович


начальник науково-дослідного відділу

Навчально-науковий випробувальний полігон


високотехнологічного озброєння та військової техніки, Україна

Фесюн Олександр Володимирович 

начальник науково-дослідної лабораторії
Навчально-науковий випробувальний полігон
високотехнологічного озброєння та військової техніки, Україна

Іваненко Віталій Олександрович 


старший науковий співробітник – старший інженер-випробувач
Навчально-науковий випробувальний полігон
високотехнологічного озброєння та військової техніки, Україна

Романович Микола Іванович 

старший викладач кафедри
Українська державна льотна академія, Україна

Шеремет Ігор Андрійович 

науковий співробітник – інженер-випробувач
Навчально-науковий випробувальний полігон
високотехнологічного озброєння та військової техніки, Україна

Галінський Дмитро Олександрович 

аспірант кафедри
Українська державна льотна академія, Україна

Анотація. В статті розкрито особливості застосування методу D2-C2 для підвищення безпеки польотів групи безпілотних літальних апаратів (дронів) у міській забудові. Метод поєднує підхід до розділення повітряного простору на основі щільності польоту дронів з використанням динамічних сегментів та високошвидкісних коридорів, а також визначає правила польоту (гео-векторингу) для забезпечення безпечного розділення дронів у міських та приміських умовах. Запропоновано два основних перспективних напрями щодо удосконалення методу D2-C2 – це використання нейронних мереж типу LSTM для прогнозування та планування траєкторій польоту групи дронів з урахуванням ризиків, а також методів навчання з підкріпленням для автоматичного коригування маршруту польоту групи дронів з метою уникнення перешкод.

Ключові слова: безпілотний літальний апарат, група дронів, машинне навчання, нейронна мережа, глибокого навчання, алгоритм, безпека польоту, метод модель, сегмент, коридор.

Вступ. Dynamic Density Corridor Concept (D2-C2) – це новітній гібридний метод управління рухом безпілотних літальних апаратів (БПЛА) в умовах високої щільності трафіку, розроблений в межах проекту SESAR USEPE (U-space Separation in Europe). Така концепція поєднує підхід до розділення повітряного простору на основі щільності руху БПЛА (дронів) з використанням динамічних сегментів та високошвидкісних коридорів, а також визначає правила руху (гео-векторингу) для забезпечення безпечного розділення дронів у міських та приміських умовах.

Метою методу D2-C2 – є забезпечення стратегічного та тактичного розведення великої кількості дронів на малих висотах, запобігаючи їх

зіткненням між собою, з будівлями та пілотованими літаками, через створення динамічно змінюваних “коридорів безпеки” у повітряному просторі. Разом з тим, метод D2-C2 має обмеження, зокрема, залежність від поточних даних без використання передбачувальних моделей.

Таким чином, врахування особливостей застосування методу D2-C2 для підвищення безпеки польотів групи БПЛА у міський забудові є актуальним науковим завданням.

Основна частина. Концепція методу D2-C2 ґрунтується на декількох ключових елементах, які разом забезпечують гнучку та безпечну організацію повітряного руху дронів в умовах змінної інтенсивності. До основних елементів методу D2-C2 можливо віднести наступні:

- динамічні сегменти повітряного простору;
- високошвидкісні коридори;
- правила гео-векторингу (Geo-vectoring syntax);
- щільнісно-орієнтоване розділення (density-based separation).

Повітряний простір розділяється на сегменти (локальні об’єми), межі та конфігурація яких динамічно змінюються залежно від щільності трафіку та потреб операцій. Ідея полягає в тому, що при зростанні кількості дронів у певному районі або сегменті – цей сегмент може автоматично подрібнюватися або змінювати форму, аби розподілити дрони по кількох менших сегментах тим самим – зменшити локальну щільність. Аналогічним сином, при зниженні трафіку, сегменти можуть об’єднуватися. Така гнучка реконфігурація забезпечує адаптацію структури повітряного простору до поточної обстановки. Наприклад, у районах з особливо високою інтенсивністю польотів БПЛА можуть застосовуватися багатопарові сегменти (декілька рівнів висот), щоб розвести дрони по різних ешелонах висоти. При цьому, враховуються технічні характеристики БПЛА – більш швидкі (важкі) дрони потребують більших дистанцій для розділення. Тому, їх можуть розмішувати у окремих сегментах (шарах), відповідно до їх продуктивності (маневреності, швидкості тощо).

Метод D2-C2 вводить поняття спеціальних коридорів у повітряному просторі – динамічних повітряних трас, що призначені для руху потоків дронів з вищою швидкістю (високошвидкісні коридори). Коридори формуються таким чином, щоб усі дрони в межах коридору летіли у одному напрямку (маючи спільний курс). Завдяки вирівнюванню напрямків руху БПЛА значно зменшується кількість потенційних конфліктів між дронами, оскільки відсутні перетинання траєкторій під гострими кутами.

Коридори дозволяють дронам долати великі відстані через міський простір з мінімальними затримками, подібно до швидкісних магістралей для наземних транспортних засобів. У межах коридору можуть діяти обмеження на мінімальні та максимальні швидкості, щоб підтримувати однорідність потоку та забезпечувати безпечні інтервали між бортами.

Такі коридори можуть пролягати, наприклад, над основними транспортними артеріями міста або іншим чином враховувати планування вулиць, щоб мінімізувати ризики при вимушених посадках або відхиленнях від запланованої траєкторії польоту (з огляду на наявну під ними інфраструктуру).

Високошвидкісний коридор зображено схематично на рис. 1, де динамічні сегменти (клітинки повітряного простору) перебудовуються при зміні щільності трафіку, а вздовж основних напрямків утворено високошвидкісні коридори, де дрони рухаються в одному напрямку із заданою швидкістю.

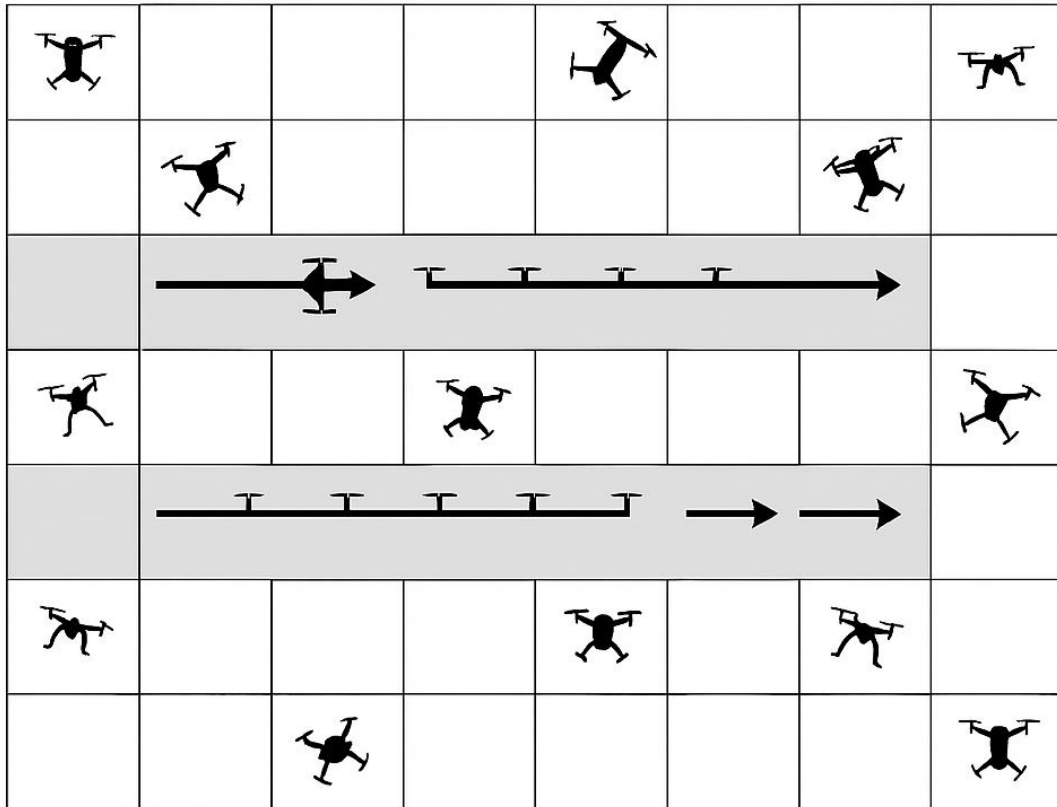


Рис. 1. Схематичне зображення концепції D2-C2

Для забезпечення упорядкованого руху БПЛА метод D2-C2 використовує заздалегідь визначені правила для напрямків та швидкостей польоту дронів в межах сегментів та коридорів. По суті, це стандартизовані інструкції (обмеження), яких мають дотримуватися дрони: наприклад, фіксовані курси руху вздовж коридору (північ-південь, схід-захід тощо), допустимі діапазони швидкостей, правила зміни ешелону (набір висоти або зниження) при вході/виході з сегмента.

Гео-векторинг (Geo-vectoring syntax) визначає єдину синтаксу команд для БПЛА, щоб ті автоматично прямували у потрібному напрямку та профілю швидкостей, перебуваючи у певному повітряному коридорі. Такий підхід схожий на "правила дорожнього руху" для повітряних коридорів: дрони, що рухаються в одному коридорі, дотримуються однакових правил маневрування, що робить їх поведінку більш передбачуваною для системи управління. У результаті – знижується ймовірність конфліктних ситуацій, адже кожен дрон знає очікувану поведінку інших у тому ж сегменті або коридорі.

В основі методу D2-C2 закладено принцип розділення трафіку залежно від динамічної щільності дронів у просторі (щільнісно-орієнтоване розділення – density-based separation). Динамічна щільність – це змінний параметр, який

характеризує навантаження на повітряний простір. Формально, її можливо визначити як кількість БПЛА N , що одночасно перебувають у певному об'ємі або районі площі A :

$$\rho = \frac{N}{A}; \quad (1)$$

де ρ – щільність трафіку (наприклад, число БПЛА (дронів) на 1 км²).

Значення ρ змінюється у часі: вдень у місті вона може бути високою, а вночі або в передмістях – значно нижчою. У межах концепції методу D2-C2 запроваджуються граничні значення (пороги) щільності ρ_{max} для кожного сегмента. За умови, якщо поточна щільність у сегменті $\rho(t)$ перевищує допустимий поріг ρ_{max} , то система U-space (USSP, провайдер сервісів управління БПЛА) перебудовує структуру повітряного простору, ділить цей сегмент на менші, або створює паралельний маршрут/коридор, щоб розвести потік дронів. Такий підхід запобігає перевантаженню окремих повітряних відсіків. За результатами проєкту USEPE розроблено єдиний підхід до вимірювання щільності трафіку дронів – запропоновано спільний метричний показник для порівняння різних сценаріїв за інтенсивністю руху.

Наприклад, низькою може вважатися щільність на рівні $\sim 0,1$ одночасних польотів БПЛА на км², середньою ~ 1 політ на км², а високою – до 9–10 польотів на км². Така метризація дозволяє чітко визначити, у яких випадках слід задіяти механізми D2-C2 для розвантаження простору.

Перелічені елементи методу D2-C2 узагальнено наведені у табл. 1.

Комплексне використання динамічних сегментів, коридорів та правил гео-векторингу, орієнтованих на контроль щільності, дозволяє досягти високого рівня безпеки. Зокрема, мінімізується кількість конфліктних ситуацій (потенційних точок зближення дронів), підвищується пропускна спроможність повітряного простору та гнучкість управління.

Таблиця 1

Основні елементи методу D2-C2

Елемент концепції D2-C2	Зміст та функція
Динамічні сегменти	Гнучкі об'єми повітряного простору, що перебудовуються у реальному часі залежно від локальної щільності трафіку та технічних характеристик дронів. Забезпечують адаптивне розділення простору під поточний попит
Високошвидкісні коридори	Спеціальні траєкторні канали для швидкого транзиту дронів в одному напрямку. Знижують кількість конфліктів зіткнення шляхом вирівнювання курсів польоту та підвищують пропускну спроможність, дозволяючи більші швидкості
Правила гео-векторингу	Стандартизовані правила польоту (курсу, швидкості та ешелону) для дронів. Забезпечують уніфіковану поведінку дронів в сегментах/коридорах, що спрощує управління ними та попереджає хаотичні маневри
Щільнісне розділення	Принцип обмеження кількості одночасних БПЛА в одному об'ємі – вводяться пороги щільності. При перевищенні порогу простір додатково сегментується або змінюються правила польоту, щоб гарантувати безпечну дистанцію між усіма дронами

Концепція методу D2-C2 охоплює як стратегічний рівень планування (попереднє розподілення маршрутів та сегментів перед вильотом дронів), так й тактичний рівень (динамічне коригування під час виконання польотів). Таким чином, метод D2-C2 забезпечує багаторівневий підхід до розділення БПЛА – від довгострокового планування повітряних магістралей до оперативного розв'язання конфліктів у реальному масштабі часу.

Для формального опису концепції D2-C2 необхідно визначити математичні моделі, які описують параметри динамічного коридору безпеки та правила його трансформації. Метод D2-C2 включає наступні основні рівні:

- 1) модель щільності та сегментації;
- 2) геометрія та кінематика коридору;
- 3) модель правил та конфліктів.

Модель щільності та сегментації. Ключовою змінною є $\rho(t)$ – щільність дронів у просторі, яка є функцією координат та часу. Повітряний простір міста можливо представити як множину сегментів S_i (динамічно змінних областей). Для кожного сегмента визначено граничне значення щільності $\rho_{max}^{(i)}$.

За умови, якщо на час t у сегменті S_i знаходиться $N_i(t)$ дронів, а площа цього сегмента (горизонтальна проекція) дорівнює A_i , то щільність можливо визначити за наступною формулою:

$$\rho_i = \frac{N_i(t)}{A_i} \quad (2)$$

Критерієм стабільності сегмента є нерівність:

$$\rho_i < \rho_{max}^{(i)} \quad (3)$$

За умови, якщо ж виконується умова:

$$\rho_i \leq \rho_{max}, \quad (4)$$

то активується правило реконфігурації, згідно з яким: сегмент S_i ділиться на підсегменти, або розширюється вертикально (шляхом введення декількох шарів висоти), такий підхід триває до тих пір, поки для кожного нового сегмента умова:

$$\rho_j(t) \leq \rho_{max}^{(j)}$$

не буде виконана.

Наприклад, якщо у сегменті площею 1 км^2 одночасно летять 10 дронів ($N_i = 10$), тоді:

$$\rho_i = \frac{10}{1} = 10 \text{ дронів/км}^2. \quad (5)$$

При пороговому значенні $\rho_{max} = 5$ дронів/км², такий сегмент має бути розбитий щонайменше на 2 сегменти (шари), щоб знизити локальну щільність приблизно до 5 дронів/км² у кожному.

Тому, математична модель сегментації зводиться до підтримання нерівностей:

$$\rho_j(t) \leq \rho_{max}^{(j)}, \quad (6)$$

для усіх активних сегментів S_j у просторі у кожен момент часу t .

Модель тісно пов'язана з теорією масового обслуговування та розподілених систем: сегменти можливо розглядати як незалежні "черги" або канали, що не повинні переповнюватися. Деякі дослідження пропонують кількісно пов'язати ризик зіткнення з показником щільності. Зокрема, ймовірність випадкового зближення двох дронів можливо наближено оцінити як функцію квадрату локальної інтенсивності потоків:

$$P_{\text{експеримента}} \propto p^2. \quad (7)$$

Тому, обмеження щільності у методі D2-C2 є обґрунтованим з погляду ймовірності відсутності конфліктів:

- при лінійному зростанні p ;
- ризик колізій зростає швидше (наближено пропорційно p^2).

Таким чином, необхідно вживати випереджувальні заходи щодо зниження щільності та зменшення ризиків зіткнення групи БПЛА у повітряному просторі.

Геометрія та кінематика коридору. Динамічний коридор безпеки у методі D2-C2 – це виділена просторово-часова область (трасса) для групи дронів, що прямують в одному напрямку.

Геометрично, коридор можливо змоделювати як довгастий прямокутний паралелепіпед (або циліндр) у просторі:

- довжина коридору (L) визначається відстанню між початковою та кінцевою точками маршруту;
- ширина коридору (W) – допустимим бічним відхиленням дронів від осі маршруту;
- висота коридору (H) – діапазоном висот, відведеним під даний коридор.

Коридор рухається разом з потоками дронів у часі (тобто його можливо розглядати як область у просторі-часі). Безпеку коридору можливо визначити мінімальними дистанціями між дронами всередині нього. За умови, якщо усі дрони летять з подібною швидкістю (v) вздовж коридору, то ключовим параметром стає часовий інтервал (Δt_{sep}) між послідовними апаратами. Інтервал обирається таким, щоб гарантувати безпечну відстань.

Мінімальна дистанція D_{min} між двома дронами на одній траєкторії може бути наближено виражена наступним чином:

$$D_{min} = v \cdot \Delta t_{sep} + \frac{v^2}{2a_{max}} \quad (8)$$

де v – швидкість польоту дрона, Δt_{sep} – часовий інтервал між послідовними дронами, a_{max} – максимальне негативне прискорення (гальмування) дрона.

Перша складова (8) ($v \cdot \Delta t_{sep}$) відповідає відстані, що пройдена першим дроном за час на реакцію між ними, а друга ($\frac{v^2}{2a_{max}}$) – запас дистанції на випадок екстреного гальмування. Формула (8) аналогічна розрахункам безпечної дистанції між транспортними засобами на шосе.

У математичній моделі коридору мінімальний інтервал Δt_{sep} визначається нормативами безпеки (з урахуванням часу реакції систем автоматичного ухилення, точності навігації тощо).

За умови, коли відома довжина коридору L , то можливо, також, оцінити пропускну здатність: скільки дронів може одночасно перебувати у коридорі.

За умови, якщо усі дрони рівномірно розподілені у коридорі, то максимальну кількість одночасних дронів можливо визначити наступним чином:

$$N_{\text{corr}} \approx \frac{L}{D_{\text{min}}}. \quad (9)$$

Модель правил та конфліктів. Правила гео-векторингу можливо формалізувати як обмеження на кінематичні параметри траєкторій. Для кожного сегмента (коридору) вводяться допустимі діапазони параметрів:

- курс: ψ належить інтервалу $[\psi_{\text{min}}, \psi_{\text{max}}]$;
- швидкість: v належить інтервалу $[v_{\text{min}}, v_{\text{max}}]$;
- висота: h належить інтервалу $[h_{\text{min}}, h_{\text{max}}]$.

Також, визначаються маневри розв'язання конфліктів. Наприклад, якщо два дрони наближаються на відстань меншу за поріг D_{max} , система може знизити швидкість одному з них або перевести дрон на сусідній ешелон висоти.

Таке завдання можливо виразити як оптимальне керування або пошук траєкторії, що мінімізує ризик зіткнення. Ризик часто визначають через мінімальне зближення між дронами.

За умови, якщо траєкторії двох дронів i та j задано функціями положення $r_i(t)$ та $r_j(t)$, то умову відсутності зіткнення можливо записати наступним чином:

$$|r_i(t) - r_j(t)| > D_{\text{safe}}, \quad \forall t, \quad (10)$$

де D_{safe} – безпечна дистанція між дронами.

У методі D2-C2 конфлікти мінімізуються завдяки вирівнюванню курсів (для дронів у коридорі) та підтриманню достатніх інтервалів між БПЛА. Для потенційних точок перетину маршрутів (наприклад, при переході дрона з одного сегмента у інший) вводяться правила пріоритету, які аналогічні правилам руху транспортним засобам на перехрестях. Математично такі перетини маршрутів можливо аналізувати через теорію графів, де сегменти утворюють вузли графа, коридори утворюють ребра графа. Завдання – унеможливити перебування двох дронів у одній вершині або на одному ребрі одночасно (тобто, уникнути конфлікту на стику маршрутів). Такий підхід досягається через стратегічне планування таймінгу. Кожному польоту призначається час входу у потенційно конфліктний відрізок, щоб розвести дрони за часом.

Таким чином, математична модель D2-C2 охоплює наступне.

1. Умови динамічної рівноваги сегментів за щільністю:

$$\rho \leq \rho_{\text{max}}, \quad (11)$$

щільність дронів у просторі не повинна перевищувати порогове значення.

2. Геометричні параметри коридорів та кінематичні інтервали для безпечного руху:

$$v_{\text{min}} \leq v \leq v_{\text{max}}, \psi_{\text{min}} \leq \psi \leq \psi_{\text{max}}, h_{\text{min}} \leq h \leq h_{\text{max}}, \quad (12)$$

усі дрони повинні дотримуватися встановлених меж швидкості, курсу та висоти.

3. Правила та обмеження для безконфліктного руху дронів відповідно до (12). Тобто, жоден дрон не повинен опинитися ближче за допустиму дистанцію до іншого.

Дана модель реалізована у вигляді алгоритмів у спеціалізованих симуляторах (наприклад, модулі для відкритої платформи BlueSky, розроблені у USEPE), де перевірялася коректність концепції D2-C2 на різних сценаріях. Валідовані результати підтвердили, що запропонований підхід забезпечує вищий рівень безпеки та ефективності порівняно з традиційними методами розділення (наприклад, статичними коридорами або встановленими дистанціями), особливо в умовах густозабудованих міських територій.

Для покращення ефективності управління польотами групи БПЛА можуть бути впроваджені наступні пропозиції щодо удосконалення методу D2-C2:

1. Використання методів машинного навчання для прогнозування щільності руху БПЛА – застосування алгоритмів глибокого навчання (RNN, LSTM та CNN) для аналізу історичних даних та передбачення змін у щільності повітряного руху групи БПЛА (аналіз та прогнозування часових змін щільності), що дозволить адаптувати коридори на випередження.

2. Алгоритмічне коригування маршруту польоту БПЛА на основі Reinforcement Learning (RL) – використання підходів щодо навчання з підкріпленням для знаходження оптимальних траєкторій польоту групи БПЛА в умовах змінної щільності повітряного руху.

3. Динамічне врахування метеорологічних умов – інтеграція даних про погодні умови для гнучкої адаптації коридорів та вибору безпечних маршрутів.

4. Оптимізація розподілу коридорів безпечного прольоту БПЛА – застосування генетичних алгоритмів та евристичних методів для знаходження оптимальних конфігурацій повітряного простору з урахуванням обмежень.

Висновки. Таким чином, концепція методу D2-C2 є інноваційною, але вона може бути підсилена сучасними методами штучного інтелекту, що покращать її адаптивність та надійність.

Запропоновано два основних перспективних напрями щодо удосконалення методу D2-C2 – це використання нейронних мереж типу LSTM для прогнозування та планування траєкторій групи БПЛА з урахуванням ризиків, а також методів навчання з підкріпленням (RL) для автоматичного коригування маршруту групи БПЛА з метою уникнення перешкод.

Список використаних джерел:

- [1] Коломійцев О.В., Комаров В.О., Катунін А.М., Рудаков І.С., Балабуха О.С., Качуровський Г.М., Ковтунов А.Л., Жирна О.В., Косенко Г.П., Максимов М.О. Особливості застосування безпілотних літальних апаратів коптерного типу. *Theoretical and empirical scientific research: concept and trends: Collection of scientific papers «ΛΟΓΟΣ» with Proceedings of the VII International Scientific and Practical Conference, Oxford, August 16, 2024.* Oxford-Vinnytsia: P.C. Publishing House & UKRLOGOS Group LLC, 2024. С. 188-198. DOI 10.36074/logos-16.08.2024.
- [2] Коломійцев О.В., Дмитрієв О.М., Комаров В.О., Катунін А.М., Рудаков І.С., Помогаєв І.В., Барвінок Р.Д., Стригун В.В., Телевна Т.П., Братко В.В. Особливості застосування нейронної мережі у системі керування групою безпілотних літальних апаратів. *ГРААЛЬ НАУКИ: міжнар. наук. журнал.* – Вінниця: ГО «Європейська наукова платформа»; НУ «Інститут науково-технічної інтеграції та співпраці», 2024. – No 43. – С. 322-334. DOI 10.36074/grail-of-science.06.09.2024.

- [3] Коломійцев О.В., Комаров В.О., Катунін А.М., Колодій О.П., Помогаєв І.В., Сапон В.І., Кравченко В.Л., Рудаков І.С., Бесова А.О., Мосійчук А.М. Пропозиції щодо розробки програмного забезпечення для виявлення людей на цифрових аерофотознімках та потоковому відео комп'ютерного зору безпілотного літального апарату. *ГРААЛЬ НАУКИ: міжнар. наук. журнал*. – Вінниця: ГО «Європейська наукова платформа»; НУ «Інститут науково-технічної інтеграції та співпраці», 2024. – No 45. – С. 411-420. DOI 10.36074/grail-of-science.01.11.2024.
- [4] Коломійцев О.В., Комаров В.О., Катунін А.М., Рудаков І.С., Любченко О.В., Слободенюк Ю.В., Косташук М.М., Хома В.В., Богдан С.І., Шендрік В.І. Особливості керування польотами безпілотних літальних апаратів в умовах міської забудови на основі технологій машинного та глибокого навчання. *ГРААЛЬ НАУКИ: міжнар. наук. журнал*. – Вінниця: ГО «Європейська наукова платформа»; НУ «Інститут науково-технічної інтеграції та співпраці», 2024. – No 46. – С. 677-686. DOI 10.36074/grail-of-science.29.11.2024.
- [5] Коломійцев О., Комаров В., Філіппенков О. Проведення дефектоскопічного контролю високорозташованих конструкцій планера літального апарату за допомогою безпілотного літального апарату. // *Міжнародна науково-практична конференція «Creation of new ideas of learning in modern conditions»*, 25 вересня 2023, Бордо, Франція. 277-283. URL: <https://eu-conf.com/events/creation-of-new-ideas-of-learning-in-modern-conditions/>.
- [6] Рисований, О., Коломійцев, О., Альошин, Г., Дмитрієв, О., Дранко, А., Третьак, В., Крук, Б., Старцев, В., Калачова, В., & Пустоваров, В. (2023). Метод підвищення ефективності управління безпілотним літальним апаратом на основі використання нелінійного псевдовипадкового генератора. *Scientific Collection «InterConf»*, (149), 282-290. Retrieved from <https://archive.interconf.center/index.php/conference-proceeding/article/view/2928>.
- [7] Рисований О.М., Коломійцев О.В., Дмитрієв О.М., Голубничий Д.Ю., Невиніцин А.М., Третьак В.Ф., Крук Б.М., Романюк А.О., Собора А.І., Старцев В.В., Калачова В.В., Пустоваров В.В. (2023). Метод підвищення ефективності управління безпілотним літальним апаратом у залежності від особливостей матриці зв'язків при використанні нелінійного псевдовипадкового генератора. // *International Scientific and Practical Conference. Science and education in progress*. Held on June 16-18, 2023 in Dublin, Ireland. P. 344-352.
- [8] Fedorchenko, V., Yeroshenko, O., Shmatko, O., Kolomiitsev, O., & Omarov, M. (2024). Password hashing methods and algorithms on the .net platform. *Advanced Information Systems*, 8(4), 82-92. <https://doi.org/10.20998/2522-9052.2024.4.11>.
- [9] Shmatko, O., Kolomiitsev, O., Reкова, N., Kuchuk, N., & Matvieiev, O. (2023). Designing and evaluating dl-model for vulnerability detection in smart contracts. *Advanced Information Systems*, 7(4), 41-51. DOI 10.20998/2522-9052.2023.4.05.
- [10] Shmatko, O., Kolomiitsev, O., Fedorchenko, V., Mykhailenko, I., & Tretiak, V. (2023). Integrating analytical statistical models, sequential pattern mining, and fuzzy set theory for advanced mobile app reliability assessment. *Innovative technologies and scientific solutions for industries*, (4(26)), 78-86. DOI 10.30837/ITSSI.2023.26.078.
- [11] Kolomiitsev O., Osieivskyi S., Tretiak V., Zakharchenko I., Rybalchenko A. Heiko H. Models and algorithms for determining the probability of occurrence of a critical combination of events for three-element minimum sections in intelligent decision support systems. *2023 IEEE KhPI Week on Advanced Technology*. October 2-6, 2023 in Kharkiv, Ukraine – P. 483-486.
- [12] Коломійцев О.В., Рудаков І.С., Філіппенков О.В., Павлій В.О., Катунін А.М., Коваль В.В., Згода Г.І., Кібальник В.М., Пальчиков В.В., Белоус М.В., Павлій Л.В. Особливості застосування технології машинного навчання для підвищення безпеки польотів

групи безпілотних літальних апаратів у міській забудові. *ГРААЛЬ НАУКИ: міжнар. наук. журнал.* – Вінниця :ГО «Європейська наукова платформа»; НУ «Інститут науково-технічної інтеграції та співпраці», 2025. – No 50. – С. 537-550. DOI 10.36074/grail-of-science.21.03.2025.

- [13] Коломійцев О.В., Рудаков І.С., Дмитрієв О.М., Комаров В.О., Катунін А.М., Руснак В.М., Пустоваров В.В., Дегтярьов А.В., Сапон В.І., Шеремет І.А., Галінський Д.О. Аналіз наукових досліджень у галузі безпеки польотів групи безпілотних літальних апаратів у міській забудові. *ГРААЛЬ НАУКИ : міжнар. наук. журнал.* – Вінниця : ГО «Європейська наукова платформа»; НУ «Інститут науково-технічної інтеграції та співпраці», 2025. – No 51. – С. 569-582. DOI 10.36074/grail-of-science.18.04.2025.

PECULIARITIES OF APPLYING THE D2-C2 METHOD TO IMPROVE THE SAFETY OF A GROUP OF UNMANNED AERIAL VEHICLES IN URBAN AREAS

SCIENTIFIC RESEARCH GROUP:

Oleksii Kolomiitsev

Doctor of Technical Sciences, Professor, Honored Inventor of Ukraine,
Professor of the Department
National Technical University «Kharkiv Polytechnic Institute», Ukraine

Ihor Rudakov

Postgraduate
National Technical University «Kharkiv Polytechnic Institute», Ukraine

Oleh Dmitriiev

Doctor of Technical Sciences, Professor,
Leading Researcher
Scientific Research Institute of Armament and Military Equipment Testing and Certification, Ukraine

Andrii Vlasov

PhD, Senior Research,
Head of the Scientific Research Department
Training and Research Testing Ground of High-Tech Armament and Military Equipment, Ukraine

Volodymyr Panchenko

Senior Lecturer
National Technical University «Kharkiv Polytechnic Institute», Ukraine

Yevhen Porynos

Head of the Scientific Research Department
Training and Research Testing Ground of High-Tech Armament and Military Equipment, Ukraine

Oleksandr Fesiun

Head of the Scientific Research Laboratory
Training and Research Testing Ground of High-Tech Armament and Military Equipment, Ukraine

Vitalii Ivanenko

Senior Researcher – Senior Test Engineer
Training and Research Testing Ground of High-Tech Armament and Military Equipment, Ukraine

Mykola Romanovych

Scientist of the Research Department
Ukrainian State Flight Academy, Ukraine

Igor Sheremet

Researcher – Test Engineer
Training and Research Testing Ground of High-Tech Armament and Military Equipment, Ukraine



Dmytro Galinskyi
Senior Researcher
Ukrainian State Flight Academy, Ukraine

Summary. *The article reveals the peculiarities of applying the D2-C2 method to improve the safety of flights of a group of unmanned aerial vehicles (drones) in urban areas. The method combines an approach to airspace separation based on the density of drone flight using dynamic segments and high-speed corridors, and also defines flight rules (geo-vectoring) to ensure safe separation of drones in urban and suburban environments. Two main promising areas for improving the D2-C2 method are proposed: the use of LSTM neural networks for predicting and planning flight paths of a group of drones, taking into account risks, as well as reinforcement learning methods for automatically adjusting the flight route of a group of drones to avoid obstacles.*

Keywords: *unmanned aerial vehicle, group of drones, machine learning, neural network, deep learning, algorithm, flight safety, method model, segment, corridor.*