

**В. А. Голембо, Р. Г. Мельніков**  
Національний університет “Львівська політехніка”,  
кафедра електронних обчислювальних машин

## **ОРГАНІЗАЦІЯ РОБОТИ ГРУПИ БЕЗПІЛОТНИХ ЛІТАЛЬНИХ АПАРАТІВ**

© Голембо В.А., Мельніков Р. Г., 2018

Наведено базові теорії та алгоритми, за допомогою яких досягають спільних узгоджених дій групи об'єктів. Для дослідження сумісної роботи групи безпілотних літальних апаратів (БПЛА), яка здатна до самоорганізації, застосовано теорію ройового інтелекту. Розглянуто метод організації взаємодії групи БПЛА в навколишньому середовищі поділом групи на локальні підгрупи. Запропоновано алгоритм уникнення можливих зіткнень сусідніх БПЛА завдяки перерахунку траєкторії польоту.

**Ключові слова:** безпілотні літальні апарати, самоорганізація, ройовий інтелект, взаємодія групи, уникнення зіткнень.

**V. Golembo, R. Melnikov**  
Lviv Polytechnic National University,  
Computer Engineering Department

## **ORGANIZATION OF WORK FOR A GROUP OF DRONES**

© Golembo V., Melnikov R., 2018

Presented the basic theories and algorithms with the help of which common coordinated actions of a group of objects are achieved. To research the joint work of a group of drones (UAVs) capable of self-organization, using the theory of swarm intelligence. The method of organizing the interaction of a group of UAVs in the environment, by dividing the group into local subgroups, is considered. The proposed algorithm to prevent possible collisions of neighboring UAVs by recalculating the flight trajectory.

**Keywords:** drone, self-organization, swarm intelligence, group interaction, collision avoidance.

### **Вступ**

З кожним роком безпілотні літальні апарати (БПЛА) все більше застосовують для виконання великої кількості різноманітних завдань, таких як моніторинг місцевості, кліматичний контроль, складання цифрових карт, здійснення розвідки, ураження повітряних та наземних цілей супротивника та ін. Це зумовлено зменшенням габаритів технічних пристроїв, підвищенням продуктивності обчислювальних засобів, удосконаленням систем супутникової навігації та технологій машинного зору. Ефективність використання БПЛА зумовлена відсутністю людського фактору та, відповідно, загрози життю пілота. Узагальнену класифікацію БПЛА наведено в [1].

Сьогодні для виконання поставлених завдань використовують лише поодинокі БПЛА. Використання поодиноких БПЛА в багатьох випадках не забезпечує високої ефективності виконання поставленого завдання та можливості виконувати складні завдання, які потребують великих запасів енергоресурсів, необхідності встановлення бортового обладнання різного типу та ін.

Одним з основних методів підвищення ефективності, особливо під час виконання складних завдань, є застосування групи БПЛА, яка здатна до самоорганізації. Самоорганізація – це процес впорядкування (спосіб збільшення порядку) за простором, часом і за параметром встановленням взаємозв'язку та взаємодії первинно неупорядкованої підмножини сутностей з метою створення:

- системи, функціональні можливості якої вищі за суму можливостей окремих сутностей, що входять до її складу;
- системи, яка здатна адаптуватися до впливів зовнішнього середовища шляхом, змінюючи свої функції та структуру, завдяки чому досягають нового, якісно вищого рівня виконання системою, що самоорганізовується, поставлених перед нею завдань у сфері практичної діяльності [2]. Необхідно зауважити, що самоорганізація як процес і як результат не можна розглядати як властивість будь-якої централізованої системи. Самоорганізації досягають за відсутності будь-яких механізмів централізованого керування.

Використання групи БПЛА порівняно з поодинокими БПЛА має такі переваги, як можливість встановлення на окремі БПЛА бортового обладнання різного типу, охоплення групою БПЛА більшої площі, спроможність групи виконувати завдання у разі виходу з ладу частини БПЛА та ін.

Проте із використанням групи БПЛА, яка здатна до самоорганізації, виникають проблеми організації взаємодії БПЛА, пов'язані з необхідністю передавати інформацію на великі відстані та обробляти великі обсяги інформації. З використанням взаємодіючої групи БПЛА також виникає проблема зіткнень, яка може призвести до виходу з ладу певної кількості БПЛА, що ускладнює виконання поставленого завдання.

У роботах [3–6] розглянуто деякі важливі проблеми самоорганізації автономних розподілених систем, включно з питанням інформаційної взаємодії в групах наземних роботів. Проте застосування самоорганізованих груп БПЛА у найближчому майбутньому стане реальністю, а організація взаємодії в таких групах має свої суттєві особливості, досі не досліджувані. Вирішення двох вищевказаних проблем, з якими стикаються у разі створення взаємодіючої групи БПЛА, розглянуто у цій статті.

### **Самоорганізація групи БПЛА**

Ефективність використання групи БПЛА ґрунтується на гіпотезі про простоту поведінки, згідно з якою будь-яка достатньо складна поведінка складається з сукупності простих поведінкових актів (їх сумісна реалізація та найпростіша взаємодія призводять у результаті до складних поведінкових процесів), та гіпотезі про перевагу колективної поведінки над індивідуальними діями, згідно з якою дії колективу сутностей не є лише сумою індивідуальних дій, а утворюють нову якість [7].

Для дослідження шляхів реалізації сумісної роботи групи БПЛА можна застосувати:

1. Теорію ройового інтелекту.
2. Теорію мультиагентних систем.
3. Теорію колективної поведінки.
4. Теорію групової робототехніки.
5. Теорію децентралізованих систем.

Аналіз наведених вище теорій з метою оцінювання придатності кожної з них для вирішення проблеми реалізації сумісної роботи групи БПЛА може бути предметом окремого дослідження.

Для дослідження шляхів реалізації сумісної роботи групи БПЛА будемо використовувати теорію ройового інтелекту. Вибір цього підходу зумовлений схожістю елементів рою (малогабаритних БПЛА) і середовища (повітря), в якому ці об'єкти функціонують. Теорія ройового інтелекту передбачає, що взаємодія між БПЛА буде локальною. Згідно з теорією ройового інтелекту, роєм називається тільки та група, яка складається з достатньо великої кількості БПЛА  $A_i(1,2,\dots,N)$ .

Для забезпечення спільних узгоджених дій групи БПЛА використовують базові алгоритми самоорганізації [8]:

1. Алгоритм самовиявлення рою БПЛА.

2. Алгоритм самоіменування рою БПЛА.
3. Алгоритм самоузгодження рою БПЛА.
4. Алгоритм самовпорядкування рою БПЛА в просторі.
5. Алгоритм самосинхронізації рою БПЛА в часі.
6. Алгоритм самоорганізації рою БПЛА за параметром.

Алгоритм самовиявлення рою передбачає отримання БПЛА інформації про інші БПЛА, які знаходяться в зоні видимості засобів зв'язку цього БПЛА. Метою використання алгоритму самовиявлення є формування "зв'язного" рою, зміст інформації самовиявлення визначає розробник у межах інформаційного взаємодії БПЛА.

Алгоритм самоіменування рою передбачає породження для кожного БПЛА групи унікального імені, тобто перехід від набору невизначених імен до набору гарантовано різних імен, з урахуванням можливої динамічної зміни чисельності рою. Залежно від завдання, яке виконує рій БПЛА, породження набору унікальних імен може відбуватись як після запуску рою БПЛА, так і бути наперед заданим.

Алгоритм самоузгодження рою передбачає погодження деякої однакової величини усіма БПЛА рою, тобто перехід від набору можливо різних величин до набору однакових величин для всіх БПЛА.

Алгоритм самовпорядкування в просторі рою передбачає здатність рою цілеспрямовано управляти розміщенням та переміщенням БПЛА у просторі, з урахуванням можливих змін чисельності рою. Алгоритм самовпорядкування використовують для впорядкованого розміщення рою БПЛА в просторі, побудови різного роду геометричних формацій, уникнення зіткнень з іншими БПЛА рою, колективного оминання перешкод.

Алгоритм самосинхронізації рою передбачає синхронізацію дій БПЛА у фізичному або логічному часі за умов відсутності "зовнішнього годинника" (тобто єдиного центра, який забезпечує "примусову" синхронізацію), локальної обмеженої взаємодії між БПЛА та змінних невідомих наперед затримок під час обміну синхронізуючими сигналами.

Алгоритм самоорганізації рою за параметром передбачає узгодження дій рою БПЛА на основі інформації, отриманої від бортових приладів.

Використання алгоритмів самоорганізації дає змогу групі БПЛА здійснювати спільні узгоджені дії. Для організації взаємодії між БПЛА запропоновано метод, використання якого дозволить вирішити проблеми, пов'язані з необхідністю передавати інформацію на великі відстані та обробляти великі обсяги інформації.

### **Організація взаємодії БПЛА**

Взаємодія групи БПЛА полягає в передаванні певної інформації до БПЛА, які входять до складу рою. Інформація, яку передають БПЛА, містить інформацію про стан навколишнього середовища, напрям руху, висоту польоту, стан виконання завдання та ін.

За використання теорії ройового інтелекту взаємодія відбувається лише між БПЛА, які знаходяться в зоні дії комунікаційного обладнання інших БПЛА, тобто є сусідніми.

Інформаційний обмін між БПЛА залежно від їх розташування поділяє рій на локальні підгрупи, між якими відбувається обмін інформацією [9]. Принцип здійснення інформаційного обміну між локальними підгрупами наведено на рис. 1.

Обсяг інформації, який передається між БПЛА, що знаходяться в одній локальній підгрупі, визначають за формулою:

$$I_{\text{л}}^* = N_{\text{л}}^* * M, \quad (1)$$

де  $N_{\text{л}}^*$  – кількість БПЛА локальної підгрупи,  $M$  – обсяг інформації яка передається між БПЛА. За формулою (1) загальна кількість БПЛА рою не впливає на обсяг інформації, який передається між локальними підгрупами.

Обсяг інформації, який передається між локальними підгрупами, визначають за формулою:

$$I_{\text{гп}} = N * M, \quad (2)$$

де  $N$  – кількість локальних підгруп рою.

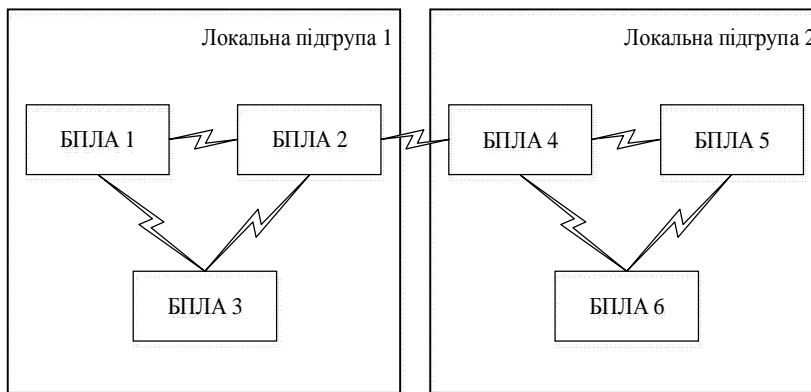


Рис. 1. Інформаційний обмін між локальними підгрупами

Організація взаємодії лише між сусідніми БПЛА дозволяє уникнути передавання інформації на великі відстані, що дає змогу зменшити габарити, масу та енергозатрати бортових приладів. Але особливістю організації взаємодії ройового типу є те, що інформація, яка доступна одному БПЛА, може бути необхідна БПЛА, який знаходиться за межами зони здійснення взаємодії. В такому випадку, передавання інформації відбувається через БПЛА, які є сусідніми відносно БПЛА, який передає та приймає інформацію. Інформаційний обмін між БПЛА, які не є сусідніми, наведено на рис. 2.

Для того, щоб БПЛА 4 отримав необхідну йому інформацію від БПЛА 1, необхідно здійснити передавання інформації між БПЛА1 → БПЛА2 → БПЛА3 → БПЛА4.

Оскільки обмін інформацією відбувається між усіма БПЛА, що знаходяться в зоні здійснення взаємодії, можливі колізії, спричинені одночасним передаванням інформації між БПЛА. Для уникнення колізій запропоновано передавати інформацію з певною періодичністю  $P$ . Час передавання інформації між БПЛА з певною періодичністю визначають за формулою:

$$T = P * Q, \quad (3)$$

де  $P$  – проміжок часу за який передають інформацію;  $Q$  – кількість необхідних передач між БПЛА.

Оскільки використання рою БПЛА передбачає обмін інформацією між сусідніми БПЛА, наведемо вектори інформації, яку необхідно передавати сусіднім БПЛА для виконання поставленого завдання [10].

Припустимо, що в навколишньому середовищі  $U$  виконує завдання рій, який складається з  $N$  БПЛА. Оскільки завдання  $Z$  виконує рій БПЛА, для більш гнучкого та ефективного виконання завдання доцільно розподілити завдання на підзадачі  $z_n^i$ . Розподіл завдання на підзадачі дозволяє БПЛА рою виконувати окремі елементи поставленого завдання.

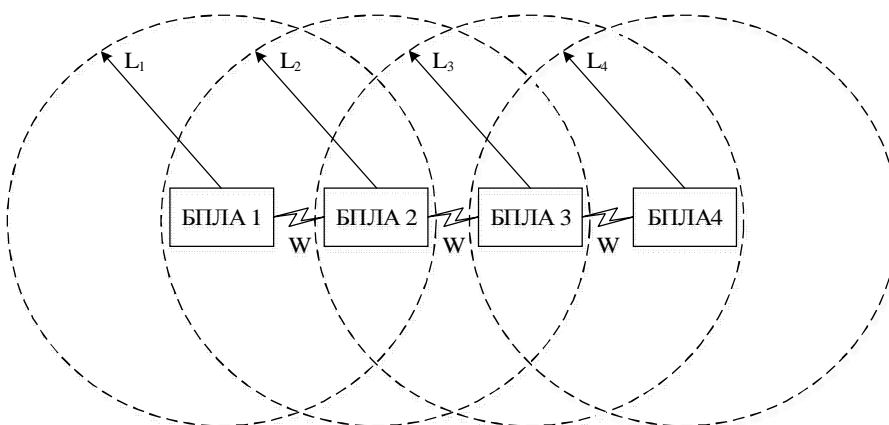


Рис. 2. Інформаційний обмін між БПЛА, які не є сусідніми:

$W$  – інформація, яка передається між БПЛА;

$L$  – зона, в якій здійснюється обмін інформацією

Під навколишнім середовищем будемо розуміти універсальні природні фізичні явища та ресурси, які не мають чітких меж. До природних фізичних явищ та ресурсів зараховують електромагнітні випромінювання, силу та напрям вітру, атмосферний тиск, рівень вологості повітря, температуру повітря та інші. БПЛА, які виконують поставлене завдання  $Z$  у середовищі  $U$ , повинні враховувати вплив навколишнього середовища на БПЛА та корегувати свій курс. Стан навколишнього середовища в певний момент часу  $t$  описується вектор-функцією:

$$\mathbf{U}(t) = \langle \mathbf{e}_1, \mathbf{e}_2, \dots, \mathbf{e}_n \rangle, \quad (4)$$

де  $\mathbf{e}_n (n = \overline{1, n})$  – параметр, який описує стан природного фізичного явища або ресурсу.

Стан кожного БПЛА рою  $A_i$  в певний момент часу  $t$  описується вектор-функцією:

$$\mathbf{A}_i(t) = \langle \mathbf{a}_1^i, \mathbf{a}_2^i, \dots, \mathbf{a}_n^i \rangle, \quad (5)$$

де  $\mathbf{a}_n^i (n = \overline{1, n})$  – параметр який описує поточний стан БПЛА, наприклад, напрям та швидкість руху, положення БПЛА в просторі, положення БПЛА відносно свого центру мас, прискорення БПЛА, положення бортових пристроїв.

Для управління БПЛА із сукупності наперед заданих команд  $K_i$  формують команду управління  $\mathbf{k}_g^i$  тобто  $\mathbf{k}_g^i \in K_i (g = \overline{1, G})$ . За використання рою БПЛА формування команди управління рухом БПЛА залежить також від команд управління рухом сусідніх відносно БПЛА, які описуються вектор-функцією:

$$\mathbf{k}_g^i = f(\mathbf{d}_n^i, \mathbf{k}_g^1, \mathbf{k}_g^2, \dots, \mathbf{k}_g^{i-1}, \mathbf{k}_g^{i+1}, \dots, \mathbf{k}_g^i, \mathbf{U}), \quad (6)$$

де  $\mathbf{d}_n^i$  – команда обрана підсистемою управління рухом БПЛА для виконання поставленого завдання.

Вибирають команду  $\mathbf{d}_n^i$  управління рухом БПЛА, із наперед заданої сукупності команд  $\mathbf{D}_j$ . Інформацію про сформовані команди управління рухом сусідніх БПЛА описують вектор-функцією:

$$\mathbf{d}_n^i = f(\mathbf{p}_q^i, \mathbf{d}_n^1, \mathbf{d}_n^2, \dots, \mathbf{d}_n^{i-1}, \mathbf{d}_n^{i+1}, \mathbf{d}_n^i, \mathbf{A}_i, \mathbf{U}), \quad (7)$$

де  $\mathbf{p}_q^i (q = \overline{1, q})$  – ціль, обрана БПЛА серед множини цілей.

Вибір цілі  $\mathbf{p}_q^i$  здійснюється на основі підзадачі  $\mathbf{z}_n^i$ , яка обрана БПЛА для виконання поставленого завдання  $Z$ . На вибір цілі рою БПЛА впливає вибір цілей іншими БПЛА, які входять до складу рою. Цілі, обрані сусідніми БПЛА, описуються вектор-функцією:

$$\mathbf{p}_n^i = f(\mathbf{z}_n^i, \mathbf{p}_n^1, \mathbf{p}_n^2, \dots, \mathbf{p}_n^{i-1}, \mathbf{p}_n^{i+1}, \dots, \mathbf{p}_n^i, \mathbf{A}_i, \mathbf{U}). \quad (8)$$

Формується підзадача  $\mathbf{z}_n^i$  на основі поставленого перед роєм БПЛА завдання  $Z$ , стану навколишнього середовища  $U$  та стану БПЛА  $A_i$ .

Можливість розподілу складного завдання на простіші підзадачі, окрім більш гнучкого та ефективного виконання, також зменшує вимоги до енергоресурсів та бортового обладнання БПЛА.

### Уникнення зіткнення БПЛА

Оскільки при виконанні поставленого завдання чисельність рою може сягати декількох десятків БПЛА, можуть виникнути проблеми, пов'язані з їх зіткненнями. Зіткнення БПЛА може призвести до їх виходу з ладу. Імовірність зіткнень збільшується під час запуску БПЛА, коли до здійснення процедури самоорганізації рою розташування БПЛА може бути хаотичним.

Для уникнення можливих зіткнень БПЛА доцільною є координація дій рою БПЛА. Проте координація дій усього рою може потребувати високої пропускної здатності каналів зв'язку та передавання інформації на великі відстані, що призводить до підвищення вимог до бортового обладнання БПЛА. Для уникнення проблем, пов'язаних з організацією координації усього рою, доцільно організувати координацію рою не загалом, а лише локально між сусідніми БПЛА.

Для вирішення проблеми зіткнень рою, який складається з великої кількості БПЛА, запропоновано використати алгоритм уникнення зіткнень, який передбачає, що під час виконання поставленого завдання група БПЛА розосереджується по певній площі [11].

Обмін інформацією між БПЛА відбувається в зоні здійснення взаємодії  $L$ , яка визначається технічними характеристиками прийомо-передавача, розташованого на борту БПЛА. Передбачено, що інформацію про координати розташування, висоту польоту, швидкість польоту та інше БПЛА отримують за допомогою системи супутникової навігації GPS. Відповідно усі БПЛА, які знаходяться в зоні взаємодії певного БПЛА, отримують від цього БПЛА перераховану вище інформацію. За допомогою отриманої інформації сусідні БПЛА визначають відстань та напрям руху до БПЛА, який передав сигнал. У випадку, якщо сусідні БПЛА знаходяться в зоні загрози зіткнення  $\mathbf{1}$ , формується команда перерахунку траєкторії слідування для уникнення можливих зіткнень [12]. Перерахунок траєкторії польоту БПЛА на основі алгоритму уникнення зіткнення наведено на рис.3.

Як видно з рис. 3, зона загрози зіткнення  $\mathbf{1}_2$  БПЛА  $a_2$  перетнула зону  $\mathbf{1}_4$  БПЛА  $a_4$ , тим самим викликавши ситуацію можливості зіткнення. Для уникнення зіткнення БПЛА  $a_2$  здійснює перерахунок початкової траєкторії слідування  $m_2, x_2$  на нову траєкторію  $m_2', x_2'$  та швидкості руху, що дозволить уникнути зіткнення. З вищесказаного випливає, що на БПЛА  $a_2$  начебто впливає сила відштовхування від БПЛА, які викликають загрозу можливого зіткнення.

Математичну модель відштовхування запропонованого алгоритму уникнення зіткнень наведено за допомогою функції:

$$F_y = \begin{cases} \frac{P_i}{\ell^2}, & \text{якщо } \ell < \ell_d, \\ 0, & \text{якщо } \ell = \ell_d, \end{cases}$$

де  $\mathbf{1}$  – мінімальна дозволена відстань між БПЛА;  $\mathbf{1}_d$  – відстань до БПЛА, який передав сигнал.

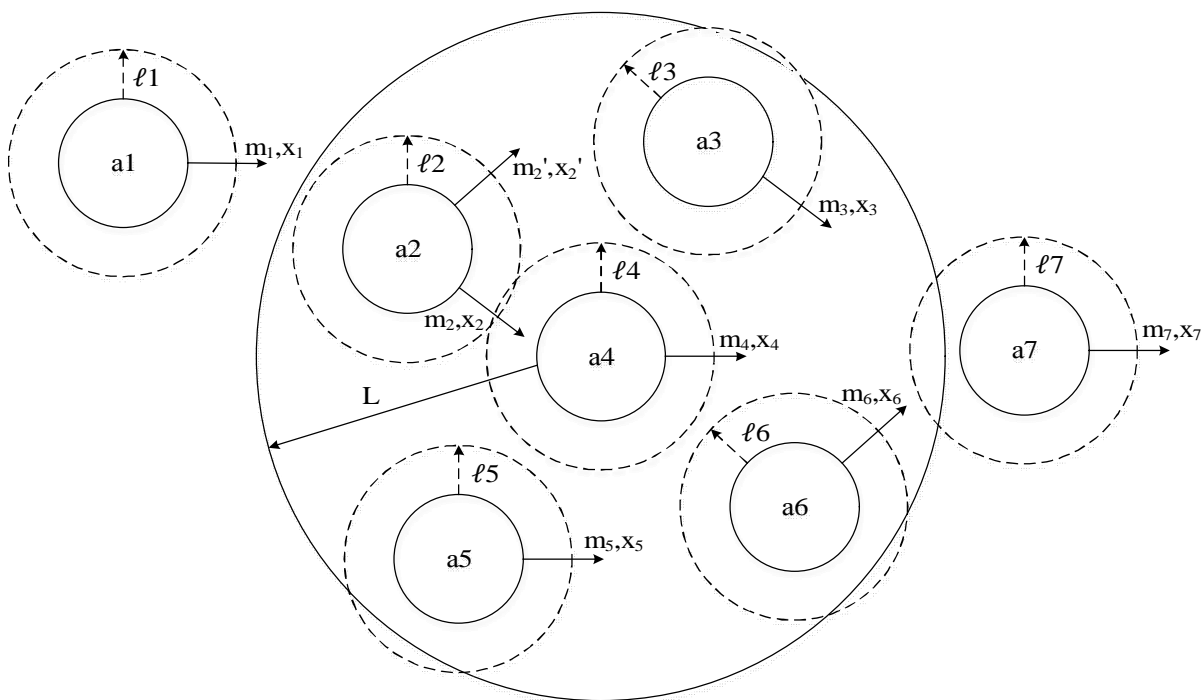


Рис. 3. Приклад перерахунку траєкторії БПЛА за алгоритмом уникнення зіткнення

Схему алгоритму уникнення зіткнень БПЛА рою наведено на рис. 4. На початку роботи алгоритму відбувається встановлення радіозв'язку між БПЛА рою, який призначений для інформаційного обміну. Після встановлення радіозв'язку отримують координаційну інформацію від сусідніх БПЛА. Після отримання інформації від сусідніх БПЛА розраховують відстань до БПЛА, який відправив інформацію. Якщо відстань до БПЛА, який відправив інформацію, є меншою за дозволена, то відбувається перерахунок траєкторії польоту та її зміна для уникнення зіткнення.

Якщо відстань до БПЛА, який відправив інформацію, є більшою за дозволу, то траєкторія польоту не змінюється. Після цього перевіряють виконання поставленого завдання. Якщо поставлене завдання не виконане, то відбувається отримання нової інформації, від сусідніх БПЛА. Якщо поставлене завдання виконане, то відбувається перехід до виконання наступного наперед заданого завдання, або повернення рою БПЛА до точки запуску.

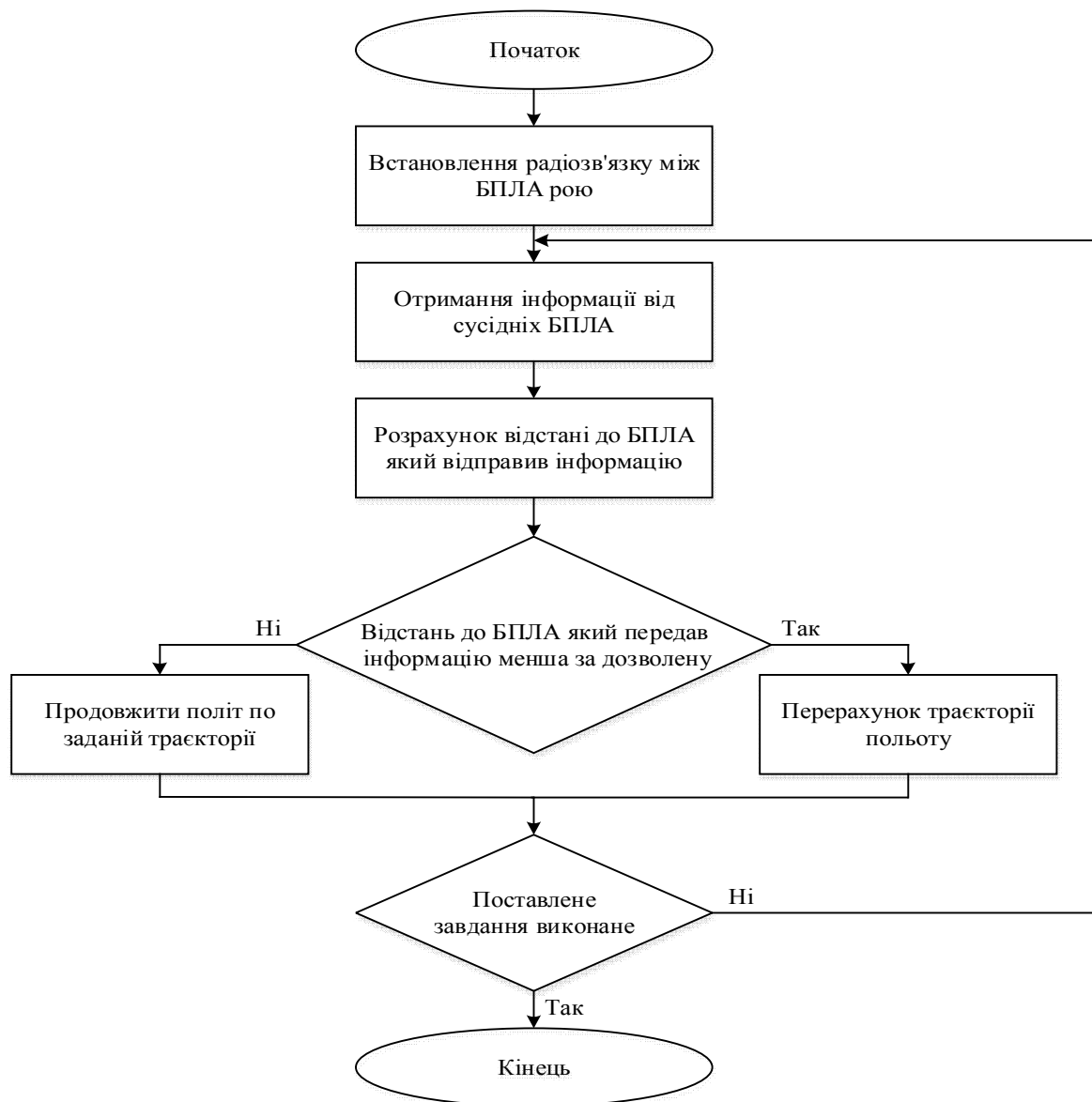


Рис.4. Схема алгоритму уникнення зіткнень рою БПЛА

Перевагою використання такого алгоритму уникнення зіткнень є те, що БПЛА виконує дії лише відносно сусідніх БПЛА, залежно від їх стану та розташування, а не відносно всього рою.

### Висновки

У статті наведено перспективність застосування групи БПЛА, яка здатна до самоорганізації, що значно підвищує ефективність використання БПЛА порівняно з використанням поодиноких БПЛА. Здійснено огляд базових алгоритмів самоорганізації, застосування яких дозволяє забезпечити виконання спільних узгоджених дій роєм БПЛА. Організують взаємодію та поведінкові процеси за теорією ройового інтелекту, що дають змогу вирішити проблеми, пов'язані з переда-

ванням інформації на великі відстані та обробкою великих обсягів інформації. Запропоновано використати алгоритм уникнення зіткнень, який дасть змогу попередити зіткнення між БПЛА до здійснення самоорганізації рою, коли розташування БПЛА може бути хаотичним.

1. A. Korchenko, O. Ilyash *Generalized classifications of unmanned air vehicles* // *Scientific Works of Kharkiv National Air Force University*, No. 4, 2012. – P. 27–36. 2. A. Botchkaryov, V. Golemo *Autonomous distributed system with elements of self-organization: problems and directions for development* // *Lviv Polytechnic National University Press*, No. 745. 2012. – P.26–32. 3. I. Kalyaev, A. Gaiduk, S. Kapustian *Collective control models and algorithms in groups of robots* М. : FIZMATLIT, 2009, – 280 P. 4. *Intelligent embedded systems and multi-agent control*. [Electronic resource]. – Access mode: <http://roboschool.org/docs/robo15/Materials/Day-4/Day-4-intelligent-embedded-systems-and-multiagent-control.pdf>. 5. I. Kalyaev, A. Gaiduk, S. Kapustian *Distributed planning systems for actions teams of robots*. М. : Janus-K, 2002. 292 P. 6. *Implementation of the local voting algorithm for multi-agent control under stochastic uncertainties*. [Electronic resource]. – Access mode: [http://www.math.spbu.ru/user/gran/students/presentation\\_Ekaterina\\_Khrabrykh.pdf](http://www.math.spbu.ru/user/gran/students/presentation_Ekaterina_Khrabrykh.pdf). 7. *Hypothesis of simplicity*. [Electronic resource]. – Access mode: <http://studopedia.org/3-67094.html>. 8. A. Botchkaryov, V. Golemo *Self-organization of autonomous distributed systems in the tasks of decision-making in understanding conditions* // *Lviv Polytechnic National University Press*, No. 688. 2010. – P. 23–30. 9. D. Ivanov *Information Exchange in a Large Group Robots* // *National academy of Ukraine/Artificial Intelligence*, No. 4. 2010. – P. 513–521. 10. S. Kapustian *Multi-level organization of collective interaction in groups of intelligent robots* // *News of the Southern Federal Universit/Technical science*, No. 9. 2004. – P. 149–158. 11. S. Kapustian, Bondarev Y. *Methods of organizing local coordination of actions in large groups of microrobots* // *News of the Southern Federal Universit/Technical science*, No. 9. 2004. – P. 158–167. 12. V. Erofeeva, Y. Ivanskiy, V. Kiyayev *Swarm control of dynamic objects based on multi-agent technologies*// *Computer tools in education*, No. 6. 2105. – P. 34–42.