

Довбиш І.О.

Національний технічний університет України
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

Муравйов О.В.

Національний технічний університет України
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

ЗАЛЕЖНІСТЬ АЛГОРИТМУ ВИБОРУ ЛІДЕРА РОЮ ВІД РІВНЯ АВТОНОМНОСТІ БПЛА

Застосування БпЛА значно прискорює процес виконання задач у різних сферах життєдіяльності людини, одночасно підвищуючи якість отриманого результату. Дрони дозволяють економити фінансові ресурси, зберігати життя та здоров'я людей. Наразі БпЛА використовують у найрізноманітніших галузях: військова справа, агропромисловість, цивільна авіація, інфраструктура, будівництво, медіа сфера та сфера розваг. Зважаючи на ефективність застосування БпЛА, стрімко зростають вимоги до них та складність задач, що на них покладається. Іноді поставлені завдання неможливо або надзвичайно ресурсозатратно виконати лише за допомогою одного дрона, що обумовлює необхідність використання роїв БпЛА.

Рої БпЛА можуть бути централізованими та децентралізованими. Різниця полягає у взаємодії між членами групи та задачами, що вони виконують. У централізованому рою керування здійснюється через один дрон, за яким слідує інші. У свою чергу, БпЛА децентралізованого рою самостійно приймають рішення та діють окремо задля досягнення спільної мети.

Централізовані рої дронів є найлегшими для побудови архітектури та взаємодії з оператором або наземною системою при необхідності. Керування роєм за допомогою БпЛА-лідера економить енергоресурси та зберігає цілісність групи. Також дану архітектуру можна використовувати для БпЛА різного рівня автономності. Єдиним недоліком централізованого рою є можливість втрати лідера, що призводить до втрати усього рою.

У даній статті запропоновано алгоритми вибору лідера групи БпЛА. Вони допомагають зберегти рій при втраті контакту або технічній несправності попереднього дрона-лідера, що дозволить продовжити виконання поточного завдання та зекономити ресурси. Розглянуті алгоритми для трьох різних типів взаємодії між дронами у рою, що залежать від рівня автономності, а отже, й можливостей застосування БпЛА. Запропоновані у статті алгоритми побудовані з урахуванням необхідності економії часу на прийняття рішень, забезпечення найменшої кількості переданої інформації та мінімізації процесів обробки отриманих сигналів, що дозволить також зекономити енергоресурси. Проаналізовані необхідні умови, яким має відповідати обраний БпЛА-лідер.

Ключові слова: *безпілотний літальний апарат, рій БпЛА, алгоритм вибору лідера, вибір лідера, централізований рій БпЛА.*

Постановка проблеми. Виконання деяких актуальних на сьогоднішній день завдань вимагає використання рою БпЛА, що значно пришвидшує процес досягнення поставленої мети, наприклад, дозволяє охоплювати більшу територію та переміщувати більшу кількість вантажу за певний інтервал часу.

Одним із найлегших у реалізації типів роїв БпЛА є централізований рій, що керується за допомогою дрона-лідера. Побудова такого рою є можливою для БпЛА різного рівня автономності, а також для груп дронів, що складаються з різних типів БпЛА [1, с. 200–202]. Дана архітек-

тура рою зменшує кількість енергії та часу, що витрачаються на прийняття рішень або забезпечення комунікації між наземною станцією та усім роєм. За все вищеперераховане у централізованому рою відповідає лідер.

Ключовим недоліком рою БпЛА, керування якого здійснюється за допомогою лідера, є можливість втрати дрона-лідера. Наслідком може бути втрата усього рою, що унеможливує подальше виконання завдання та призводить до великих економічних збитків. Для вирішення даної проблеми необхідно забезпечити алгоритм вибору альтернативного лідера, яким керуватимуться БпЛА

в групі, унаслідок втрати контакту з попереднім лідером. Процес вибору нового лідера також має відбуватися з мінімальними часовими витратами та шляхом передачі мінімальної кількості інформації між членами рою.

Вибір лідера рою БПЛА не може здійснюватися випадково. Надзвичайно важливим є врахування положення дрона відносно інших членів групи, їх залишкової енергії, технічного стану БПЛА.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Архітектура централізованого рою БПЛА, у якому керування здійснюється через дрона-лідера, використовується сьогодні у багатьох сферах. Подолання головної вразливості даної архітектури – можливості втрати лідера під час виконання поставленої задачі – реалізується застосуванням різних алгоритмів вибору альтернативного БПЛА-лідера за умови втрати попереднього [2, с. 16–51]. В основу даного механізму можна покласти алгоритми досягнення консенсусу у розподілених системах. У матеріалі [3, с. 93–97] викладений варіант реалізації протоколу вибору лідера у рою БПЛА на основі алгоритму Raft з урахуванням вимог, яким має задовольняти новий дрон-лідер. Застосування даного протоколу передбачає високу ймовірність правильного вибору БПЛА-лідера та збереження відповідальності за координацію дій групи дронів протягом значного періоду часу.

Алгоритм вибору лідера рою має задовольняти наступним параметрам [4, с. 9]:

- унікальність: наявність лише одного БПЛА, що вважає себе лідером;
- згода: усі члени рою знають, який саме БПЛА є лідером;
- масштабування: кількість повідомлень між членами групи при реалізації процесу вибору лідера має бути обмеженою та корегуватися відповідно до кількості БПЛА у рою.

Вказані параметри можуть гнучко застосовуватися до роїв БПЛА різних рівнів автономності.

Архітектура рою БПЛА та спосіб комунікації між його членами залежать від функціоналу окремих дронів, а отже різнитися будуть й алгоритми вибору лідера в залежності від складу групи.

Метою статті є аналіз залежності між алгоритмом вибору лідера у рою та рівнем автономності БПЛА-членів групи, розробка алгоритмів, що відповідають функціональним можливостям БПЛА, та урахування можливих проблем при їх практичній реалізації.

Виклад основного матеріалу. Для реалізації об'єднання в рій БПЛА мають відповідати характеристикам дрона принаймні 2 рівня автономності

[5, с. 159]. Автоматизованими мають бути процеси зльоту, посадки та польоту по заданій траєкторії. При забезпеченні цього функціоналу стає можливою побудова рою БПЛА, у якому кожен наступний дрон слідує і повністю копіює дії попереднього. Керування такою групою здійснюється через БПЛА-лідера, що задає траєкторію руху усіх інших дронів-членів рою.

При використанні такої архітектури рою БПЛА, передача статусу лідера має відбуватися відповідно до того, як дрони були розташовані в архітектурі групи при її запуску. Тобто, відповідно до рис. 1, при втраті БПЛА-лідера його статус передається дрону під номером 2. Якщо група втрачає й БПЛА номер 2, лідерство покладається на номер 3.

Керування даним роєм здійснюється за допомогою наземної станції або оператора. Фіксування втрати БПЛА-лідера має відбуватися на землі, після чого надсилається відповідне повідомлення про отримання статусу лідера наступному БПЛА в групі.

У даному випадку немає необхідності в забезпеченні комунікації між усіма дронами рою для узгодження лідера. Також не є необхідним поширення у групі інформації про те, який дрон вважається лідером на поточний момент.

Рівень автономності БПЛА, розглянутих у попередньому прикладі, не дозволить передбачити повернення втраченого дрона в склад групи, адже на період втрати контакту із наземною станцією БПЛА повинен самостійно генерувати траєкторію польоту, розпізнавати та уникали перешкоди.

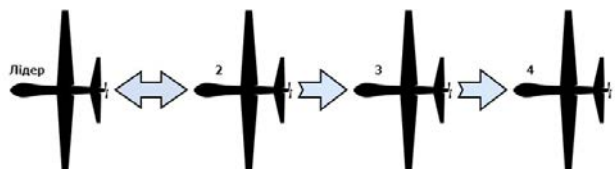


Рис. 1. Архітектура рою БПЛА з лідером, у якій кожен наступний дрон слідує за попереднім

При підвищенні рівня автономності БПЛА до третього можливо реалізувати більш складну архітектуру рою. У випадку, коли кожен дрон може самостійно розпізнавати об'єкти та будувати власну траєкторію руху, стає доступною архітектура, що представлена на рис. 2. При даній реалізації рою БПЛА-лідер підтримує зв'язок з наземною станцією, може отримувати від неї додаткові завдання та повідомлення про необхідність зміни траєкторії руху. БПЛА-послідовники зберігають зв'язок із найближчими членами рою [6, с. 38–39].

Ідеальним варіантом є знаходження лідера у центрі рою, що забезпечує його контакт з максимальною кількістю БпЛА-членів групи.

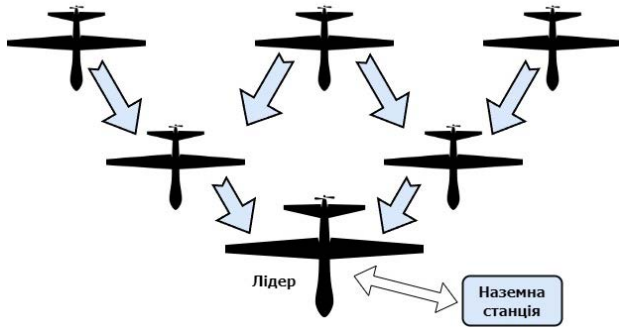


Рис. 2. Архітектура рою БпЛА з лідером, при якій дрон-лідер підтримує зв'язок з наземною станцією, а БпЛА-послідовники сліdkують за дронами, що знаходяться найближче до них

У даному випадку, при втраті БпЛА-лідера, наступного лідера обирає наземна станція, опираючись на дані, отримані від усіх членів рою. Дані можуть надходити у вигляді наступного вектору значень:

$$\bar{x}_i = (i, E, Damage, N, Type, Task), \quad (1)$$

де i – номер БпЛА, від якого отримана інформація; E – залишкова енергія дрона; $Damage$ – наявність ушкоджень; N – кількість БпЛА, що зберігають контакт з даним дроном; $Type$ – тип БпЛА, якщо у рою наявні декілька різних типів дронів [7, с. 17–19]; $Task$ – наявність ключового елементу у конструкції БпЛА, що необхідний для виконання певного завдання.

Деякі зі змінних у виразі (1) можуть встановлювати обмеження на можливість конкретного дрона бути кандидатом на отримання статусу лідера. При виконанні деяких завдань лідером може бути лише певний тип БпЛА (змінна $Type$) або БпЛА повинен мати спеціальне корисне навантаження (змінна $Task$). Також лідером не може стати ушкоджений дрон (змінна $Damage$), при умові, що у рою залишилися неушкоджені, адже пріоритетним є вибір лідера, який зможе зберігати даний статус триваліший час, що зекономить енергоресурси, які витрачаються на вибір БпЛА-лідера.

Статус лідера повинен отримати той БпЛА, що відповідає вищезазначеним вимогам та має найвищі значення параметрів E та N . Таким чином, обраний дрон зберігатиме зв'язок з найбільшою можливою кількістю дронів та зможе перебувати у статусі лідера тривалий час. Визначення може відбуватися шляхом сумування даних параметрів, помножених на відповідні коефіцієнти k_E та k_N , які можуть варіюватися залежно від умов завдання.

$$Value = k_E \cdot E + k_N \cdot N \quad (2)$$

Якщо декілька БпЛА в групі мають однакове значення $Value$, розраховане на основі рівняння (2), перевага надаватиметься тому дрону, що має більше значення N . Якщо декілька БпЛА мають ідентичні значення E та N , перевага надається дрону з меншим номером i .

Після аналізу ситуації, що склалася у рою, та вибору лідера кожен БпЛА має отримати інформацію про свій статус. У результаті лише один дрон має вважати себе лідером, а інші – послідовниками.

У відповідній рис. 2 архітектурі рою алгоритм вибору лідера групи передбачає обмін інформацією між кожним БпЛА-членом рою та керуючою системою. Час витрачається лише на передачу інформації та аналіз отриманих даних системою. При цьому не відбувається обробка інформації безпосередньо на борту БпЛА та не забезпечується обмін інформацією між дронами для реалізації процесу вибору лідера рою.

За умови відновлення контакту з втраченим дроном-лідером, він позбавляється свого колишнього статусу та стає БпЛА-послідовником у рою. Повідомлення про наявність нового лідера приходить від наземної станції, з якою втрачений БпЛА встановлює зв'язок.

Архітектура рою дронів, що передбачає наявність лідера, може бути ефективно застосована також для групи БпЛА 4 рівня автономності [5, с. 160–161]. Ці дрони здатні самостійно шукати способи виконання поставлених завдань, розпізнавати та уникати перешкоди. Комунікація у рою таких БпЛА відбувається безпосередньо між членами групи без втручання людини та наземної системи. Використання архітектури рою дронів з лідером може оптимізувати виконання завдань, адже прийняття значної частини рішень відбуватиметься на борту одного дрона.

Вибір БпЛА-лідера у такому рою може відбуватися шляхом голосування. Дрони у групі сліdkують і зберігають зв'язок лише з найближчими дронами, тому найпершими втрату лідера зафіксують ті БпЛА, що знаходилися на найменшій до нього відстані [8, с. 92]. Кожен дрон, що фіксує втрату лідера, стає кандидатом на отримання цього статусу і надсилає сигнал про втрату і свою кандидатуру іншим (етап 1). Ті БпЛА, що отримали таке повідомлення, мають проголосувати за кандидата, від якого отримали сигнал про втрату, найшвидше. Кожен БпЛА має лише один голос, кандидати голосують за себе. Для реалізації алгоритму необхідно передбачити можливість

передачі інформації між усіма дронами рою на період голосування. Найбільшу кількість голосів отримує той БпЛА, від якого швидше надходить інформація, а отже, робота у рою при його лідерстві матиме менше затримок.

Голосування має тривати обмежений час. На борту кожного БпЛА таймер має відраховувати час від моменту надходження інформації про втрату лідера групи. Переривання спрацює найшвидше на борту того дрона-кандидата, який першим зафіксував втрату лідера. Після проведення голосування потрібно порівняти кількість отриманих голосів (етап 2). Для цього кожен дрон-кандидат передає до інших членів рою вектор значень своїх параметрів відповідно до рівняння (1), а також дані про кількість отриманих ним голосів. Передача даного масиву даних також є свідченням для кожного БпЛА у групі про початок підведення підсумків голосування. На борту кожного дрона рою виконується порівняння отриманих векторів

з параметрами від кандидатів і фіксування кандидата з найбільшою кількістю голосів, якого надалі БпЛА вважатиме лідером. Після порівняння отриманих декількох векторів даних кожен БпЛА передає іншим членам групи інформацію про того дрона, якого сам вважає лідером у даний момент.

Якщо дрон-кандидат отримує інформацію про те, що інший кандидат у групі отримав більшу кількість голосів, він втрачає статус кандидата та починає вважати лідером рою БпЛА з більшою кількістю набраних голосів. Аналогічна ситуація відбувається у випадку, якщо дрон-кандидат отримує вектор даних з ідентичною своїй кількістю голосів, але меншим унікальним номером. Якщо БпЛА-кандидат отримує від іншого дрона вектор значень зі своїм унікальним номером, він не втрачає статус кандидата.

На процес порівняння отриманих голосів також виділяється обмежений час. Далі необхідно узгодити лідера та впевнитися у тому, що лідером себе

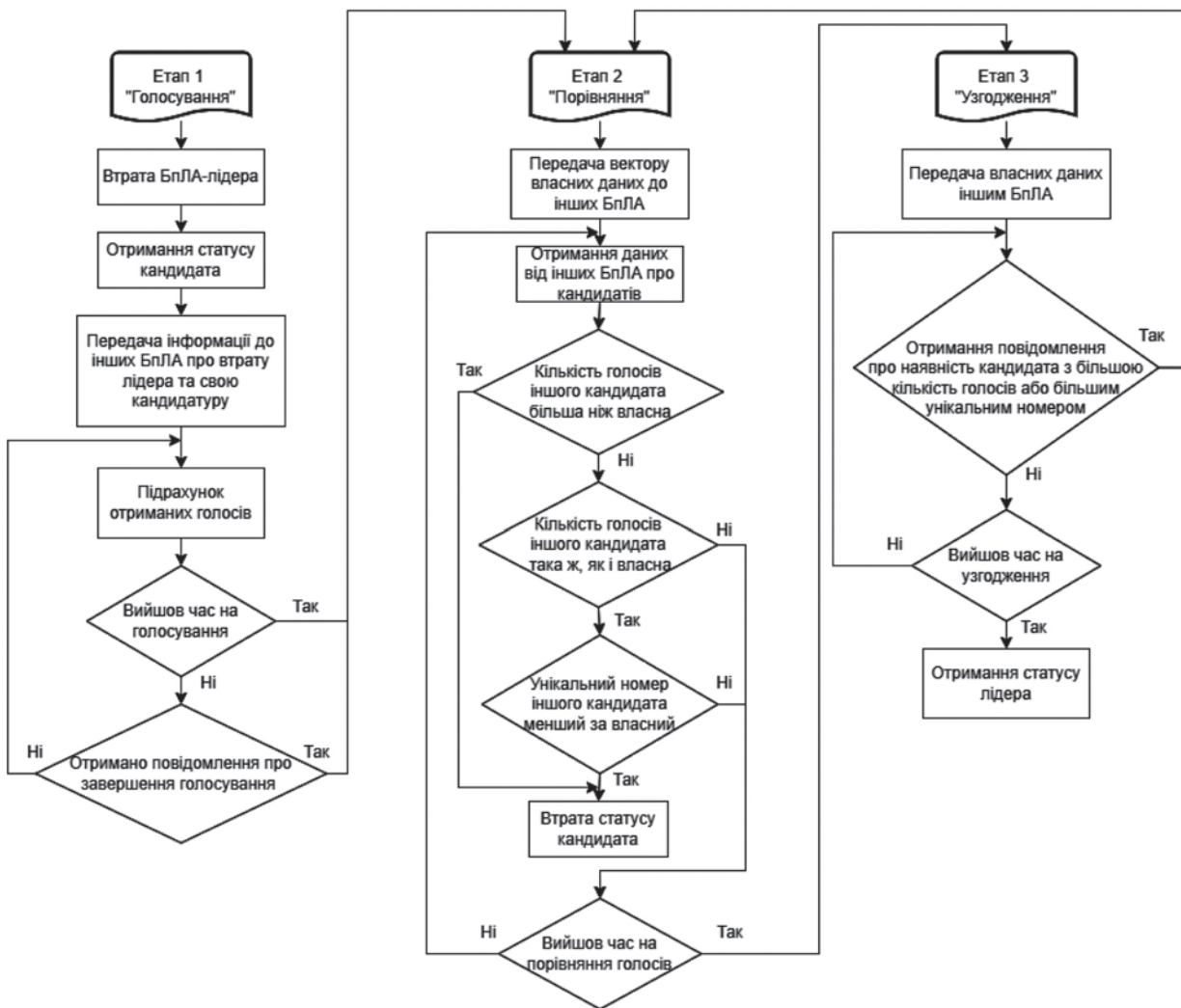


Рис. 3. Алгоритм дій для БпЛА, що є кандидатом в лідери рою з дронів 4 рівня автономності

вважає лише один БпЛА (етап 3). Для цього єдиний дрон-кандидат, що має залишитися після 2 етапу, ще раз надсилає вектор значень, у якому міститься унікальний номер, кількість голосів та статус лідера. Якщо інші БпЛА вже вважають його лідером групи внаслідок процесу порівняння результатів, відповідь від них не передбачена. Якщо ж один із дронів має інформацію про іншого кандидата з більшою кількістю набраних голосів або з такою ж кількістю голосів, але меншим унікальним номе-

ром, він надсилає сигнал про необхідність повторного проведення порівняння результатів голосування. Дана ситуація свідчатиме про те, що після 2 етапу залишилося декілька кандидатів.

Алгоритми дій для дрона-кандидата та члена рою, що не має такого статусу під час процесу вибору лідера, представлені відповідно на рисунках 3 та 4. Запропоновані алгоритми розроблені з урахуванням необхідності економії енергії кожного БпЛА та витраченого на голосування часу.

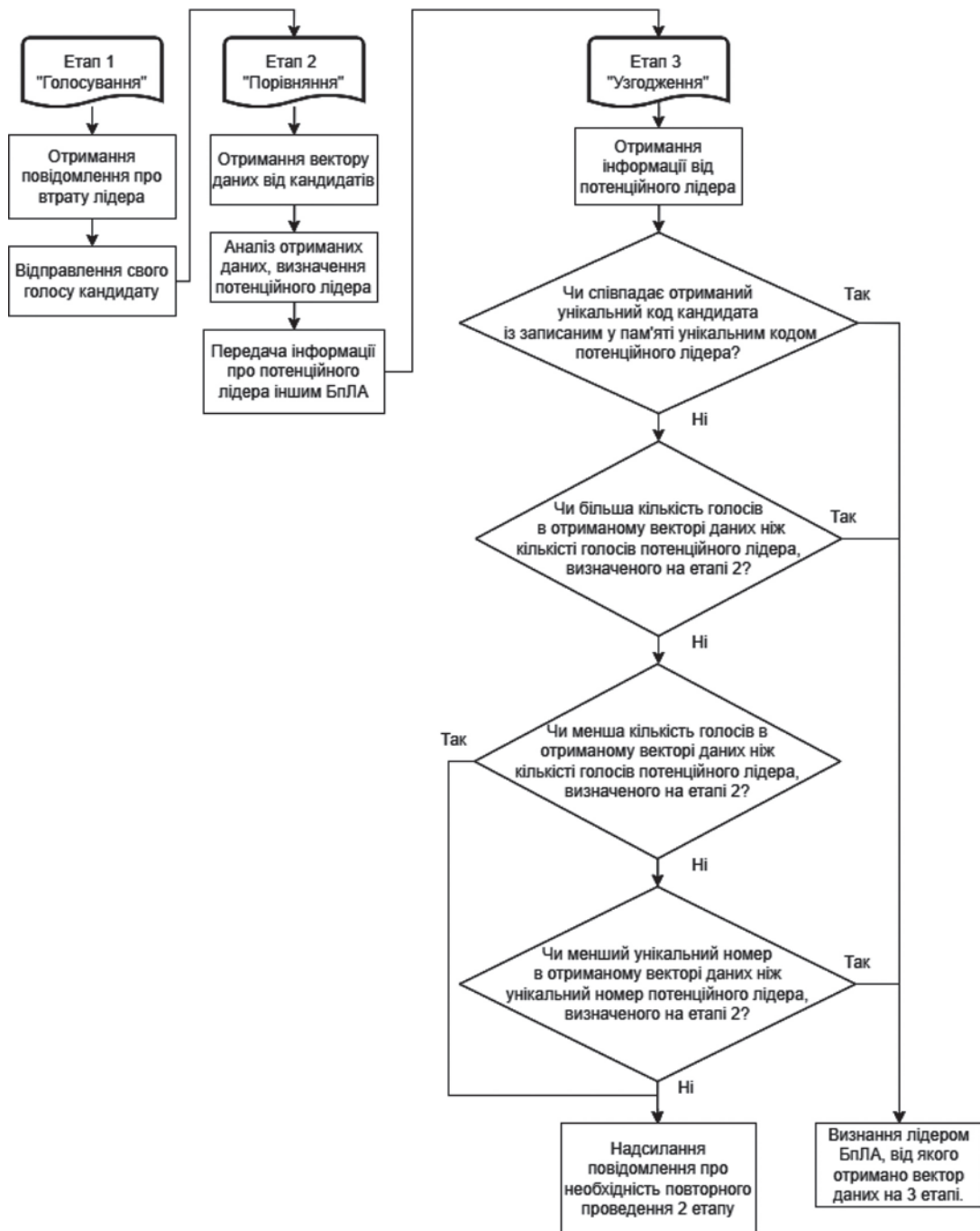


Рис. 4. Алгоритм дій для БпЛА, який не отримав статус кандидата в лідери рою, що складається з дронів 4 рівня автономності

Асимптотична складність наведених алгоритмів $O(n^2)$, де n – кількість БПЛА у рою, обумовлена передачею інформації від кожного кандидата всім членам групи про втрату лідера, про свою кандидатуру на місце лідера та етапом порівняння кількості голосів, де кожен БПЛА має приймати дані, аналізувати та передавати їх іншим дронам [9, с. 60]. Дану складність необхідно враховувати при розрахунку часу на проведення кожного етапу процесу вибору БПЛА-лідера у рою.

Висновки. Для уникнення ризику втрати централізованого рою необхідно передбачити алгоритм вибору дрона-лідера. Структура та складність даного алгоритму залежать насамперед від архітектури рою та рівня автономності використаних БПЛА.

Для рою БПЛА, у якому кожен наступний дрон слідує за попереднім та повністю копіює його дії, достатньою є передача статусу лідера між БПЛА відповідно до порядкового номера дрона в архітектурі рою.

Рій з БПЛА 3 рівня автономності дозволяє реалізувати вибір лідера за допомогою наземної станції, яка аналізує такі показники кожного дрона, як залишкова енергія, наявність ушкоджень, кількість БПЛА, з якими даний дрон підтримує зв'язок, тип БПЛА та наявність у нього ключового елементу конструкції, необхідного для виконання конкретного завдання.

Для БПЛА 4 рівня автономності, що можуть комунікувати між собою у рою, вибір лідера відбувається шляхом голосування. Запропонований алгоритм включає три етапи: голосування, порівняння та узгодження, на кожен з яких виділяється певна кількість часу.

Список літератури:

1. Муравйов О.В., Довбиш І.О., Галаган Р.М., Богдан Г.А., Момот А.С. Перспективи розвитку технологій та підвищення рівня автономності БПЛА. *Вчені записки ТНУ імені В.І. Вернадського. Серія: технічні науки*. 2023. Том. 34 (73). №2. С. 199–205.
2. Campobasso M.J., Leader-Follower Trajectory Generation and Tracking for Quadrotor Swarms. 2017. *Master's theses for the degree of master in science in engineering physics*. Embry-Riddle Aeronautical University.
3. Gupta I., van Renesse R., Birman K.P. A Probabilistically Correct Leader Election Protocol for Large Groups. Presented at *14th International Conference on Distributed Computing*. 2000. pp. 89–103.
4. Zuo Y., Yao W., Chang Q., Zhu X., Gui J., Qin J. Voting-Based Scheme for Leader Election in Lead-Follow UAV Swarm with Constrained Communication. *Electronics*. 2022. Vol. 11. № 14: 2143.
5. Довбиш І.О., Муравйов О.В. Залежність архітектури рою від рівня автономності БПЛА. *XVI Всеукраїнська науково-практична конференція студентів, аспірантів та молодих вчених «Погляд у майбутнє приладобудування»*, м. Київ, збірник праць конференції. 2023. С. 158–161.
6. Авілов А.І., Ткачук С.С. Ієрархічна модель взаємодії оператора з “роєм” безпілотних літальних апаратів. *Збірник наукових праць Харківського національного університету Повітряних Сил*. 2023. № 1(75). С. 37–40.
7. Довбиш І.О., Муравйов О.В., Галаган Р.М., Богдан Г.А., Момот А.С. Силові установки та джерела енергії сучасних БПЛА. *Вчені записки ТНУ імені В.І. Вернадського. Серія: технічні науки*. 2023. Том. 34(73). № 5. С. 16–21.
8. Лупандін В.А., Мегельбей Г.В., Мацько О.Й., Куртсеїтов Т.Л., Міроненко П.О. Основні тенденції створення та застосування груп безпілотних літальних апаратів. *Наука і техніка Повітряних Сил Збройних Сил України*. 2019. № 2(35). С. 88–96.
9. Шинкренко В.І. Особливості практичного застосування показників обчислювальної складності алгоритмів. *Проблеми програмування*. 2008. № 2–3. Спеціальний випуск. С. 57–63.

Dovbysh I.O., Muraviov O.V. THE SWARM LEADER ELECTION ALGORITHM DEPENDENCE OF THE UAVS AUTONOMY LEVEL

The use of UAVs significantly speeds up the process of performing tasks in various spheres of human activity. At the same time they increase the quality of the obtained result. Drones also allow to save financial resources, preserve people's lives and health. Currently, UAVs are used in a wide variety of fields: military industry, agricultural industry, civil aviation, infrastructure and construction, media and entertainment. Taking into consideration the efficiency of the UAVs use, the requirements for them and the complexity of the tasks they face are rapidly growing. Sometimes the assigned tasks can not be performed by only one drone, which is why swarms of UAVs are used.

UAVs swarms can be centralized or decentralized. The difference lies in the interaction between group members and the tasks they perform. In a centralized swarm control is exercised by one drone, which is followed by others. Conversely, the UAVs of the decentralized swarm independently make decisions and act separately to achieve a common aim.

Centralized swarms of drones are the easiest to architect and interface with an operator or ground system. Swarm control by a UAV-leader saves energy and preserves the integrity of the swarm. Also the architecture of this swarm can be used for UAVs of different autonomy levels. The only disadvantage of a centralized UAVs swarm is the possibility to lose the leader, which leads to the loss of the entire swarm.

Algorithms for the UAVs swarm leader selection are proposed in this article. They will help to preserve the swarm in case of contact loss or technical malfunction of the previous leader drone, which will allow continuing the current task and saving considerable amount of financial resources. Algorithms for three different types of interaction between drones in a swarm are reviewed. They depend on the level of autonomy and the capabilities of the UAVs of the swarm members as well. The discussed algorithms are built taking into account the need to save time for decision-making, ensuring the smallest amount of transmitted information and minimizing the processes of processing received signals, what will also save energy resources.

Key words: *unmanned aerial vehicle, UAVs swarm, leader selection algorithm, leader selection, centralized UAVs swarm.*