

Шовкошитний Ігор Іванович (кандидат військових наук, старший науковий співробітник)¹
*Василенко Ольга Анатоліївна*²

¹ *Національний університет оборони України, Київ, Україна*

² *Центральний науково-дослідний інститут Збройних Сил України, Київ, Україна*

ПРОБЛЕМНІ ПИТАННЯ РОЙОВОГО ЗАСТОСУВАННЯ УДАРНИХ БЕЗПІЛОТНИХ ЛІТАЛЬНИХ АПАРАТІВ

У провідних країнах світу нині спостерігається розвиток та впровадження ройових технологій застосування безпілотних роботизованих систем (у тому числі безпілотних авіаційних систем), які розглядаються як перспективний напрям досягнення військово-технічної переваги над ймовірним противником. З урахуванням цього, стаття присвячена вирішенню актуального наукового завдання, яке полягає у виокремленні проблемних питань, що можуть виникати у процесі ройового застосування групи ударних безпілотних літальних апаратів, цільовим призначенням яких є пошук та ураження наземних цілей заданого типу у визначеному районі (області простору). Під час проведення дослідження застосовано положення системного підходу, методи формальної логіки, аналізу та порівняння документів. Поєднання таких методів дало змогу системно підійти до розкриття проблемних питань ройового застосування ударних безпілотних літальних апаратів. За результатами проведеного дослідження та узагальненого аналізу публікацій з подібної тематики, а також аналізу процесів, що можуть відбуватись під час виконання завдань групою (роєм) ударних безпілотних літальних апаратів у бойових умовах, у статті наведено визначення основних термінів, які характеризують застосування рою ударних безпілотних літальних апаратів і запропоновано варіант формалізованої логіко-часової поетапної моделі застосування такого рою. Також, з урахуванням принципів ройової взаємодії у роботизованих системах, проведено поетапний опис можливих проблем ройового застосування ударних безпілотних літальних апаратів з конкретизацією низки найбільш складних часткових завдань, розв'язання яких потребуватиме гнучкого застосування сучасної методології з різних галузей знань. Наукова новизна полягає у запропонованій логіко-часовій поетапній моделі, яка узагальнює типові етапи та процеси застосування рою ударних безпілотних літальних апаратів. Практична значущість отриманих результатів дослідження для воєнно-оборонної сфери полягає в отриманому формалізованому описі послідовності етапів групового застосування ударних безпілотних літальних апаратів, а також у визначенні низки проблемних питань, розв'язання яких надалі потребуватиме впровадження існуючих або розроблення нових алгоритмів і моделей ройової поведінки складних систем на основі принципу їх самоорганізації.

Ключові слова: ударні безпілотні літальні апарати, рій, логіко-часова модель, проблеми застосування.

Вступ

Постановка проблеми. Досвід ведення бойових дій в російсько-українській війні свідчить про зростання ролі ударних безпілотних літальних апаратів (далі – БпЛА) для досягнення переваги над противником з можливістю одночасного уникнення небажаних втрат. Групове застосування таких БпЛА, особливо на початковому етапі війни, виявилось найбільш ефективним. Проте з розширенням спроможностей систем вогневої та невогневої протидії БпЛА, така ефективність значно знижується. Тобто, кількість ударних БпЛА у групі поступово втрачає значення, а центр уваги зміщується у бік галузі нових способів їх групового застосування на основі принципів ройової поведінки.

Зокрема, у провідних країнах світу нині спостерігається розвиток та впровадження ройових технологій застосування роботизованих систем, які

розглядаються як перспективний напрямок досягнення військово-технічної переваги над ймовірним противником.

Увага фахівців багатьох країн зосереджується на впровадженні у військовій сфері технологій ройового застосування засобів розвідки та ураження. Зазначене стосується, зокрема, ройового застосування ударних БпЛА, яке, на думку фахівців [1–3], сприятиме раціональному розподілу БпЛА по цілях, адаптивному реагуванню на зміну ситуації, зменшенню навантаження на оператора, а також підвищенню ефективності застосування БпЛА під час виконання ними завдань розвідки, ураження тощо.

Впровадження ройових принципів застосування безпілотних роботизованих платформ розглядається як один з основних шляхів розвитку сучасних озброєнь, а також гарантування технологічної та військово-технічної переваги над

противником. З огляду на це, в багатьох країнах проводяться інтенсивні дослідження, спрямовані на те, щоб досягти потрібного ефекту (розвідки, ураження, доставки вантажів тощо) завдяки використанню узгоджених алгоритмів дій БпЛА у групі. Для України, на території якої фактично відбувається війна нового типу з випробуванням усіх новітніх технологій (у тому числі у галузі безпілотної авіації та роботизованих комплексів), подібні питання є, безумовно, актуальними.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Проблеми розвитку та впровадження технологій ройового застосування технічних засобів різного призначення, зокрема, БпЛА, наземних роботизованих комплексів, активно досліджуються фахівцями багатьох країн (КНР, США, Ізраїль, Велика Британія, Франція, Іран, Південна Корея, Туреччина, Японія, Об'єднані Арабські Емірати тощо) [1]. У результаті узагальненого аналізу низки публікацій визначено, що інтерес до цієї тематики зумовлений: загальновідомими проблемами безпеки спільного застосування пілотованої та безпілотної авіації; прагненням раціонального використання наявних ресурсів; можливістю досягнення максимального ефекту без зайвих втрат (витрат) технічних засобів. У [2] розглянуті сучасні погляди на застосування пілотованої та безпілотної авіації в майбутніх військових конфліктах, проведено порівняння завдань, які можуть нею виконуватись. Здійснено класифікацію завдань для спільних авіаційних груп пілотованої та безпілотної авіації.

У [3; 4] проведено аналіз групового застосування БпЛА, у тому числі в спільних бойових порядках з пілотованими, окреслено особливості такого застосування та напрями досліджень, необхідних для розвитку систем автоматичного керування групами літальних апаратів.

У [5] зосереджено увагу на забезпеченні узгодженого переміщення групи літальних апаратів у просторі. Зокрема, розроблено математичну модель руху БпЛА на основі алгебри дуальних кватерніонів з урахуванням обертого та поступального руху літальних апаратів. У [6; 7] розглянуто проблеми управління групою БпЛА, акцентовано увагу на зростанні складності керування нею у процесі збільшення кількості апаратів. У [8] запропонована математична модель узгодженого руху групи БпЛА на основі методу потенціалів, у якій враховано проблемні питання сумісного безаварійного руху декількох БпЛА, уникнення фізичних перешкод на шляху руху, обходу потенційно небезпечної зони, інформаційної зв'язності окремих апаратів. Крім того, запропоновано модель процесу управління повітряним рухом на основі нейронних нечітких мереж.

У дисертаціях [9–11] розглянуті питання організації групового застосування БпЛА. У роботі [12], присвяченій проблемам застосування ройового інтелекту та побудови стійких керованих

груп роботів, автором наголошується, що більшість розробок частіше стосуються вирішення окремої вузькоспеціалізованої проблеми (зокрема знаходження найкоротшого шляху між окремими точками, пошуку ресурсів тощо). Особливо підкреслена проблематика побудови алгоритмів колективної поведінки, а також сформульовано основні вимоги до алгоритмів реалізації колективної поведінки групи роботів.

Отже, очевидно, що окремі питання ройового застосування об'єктів досліджені достатньо повно. У той же час можна стверджувати, що у жодному з наведених джерел, проблемні питання ройового застосування ударних БпЛА системно не розглядалися.

З урахуванням зазначеного, **метою статті є** визначення проблемних питань, що можуть виникати у процесі ройового застосування ударних безпілотної літальних апаратів.

Виклад основного матеріалу дослідження

Насамперед варто розглянути такі основні поняття згідно мети статті, як «рій БпЛА» та «ударні БпЛА». Поняття «рою БпЛА» вперше зустрічається у [13–15], де під роєм розумілась група щонайменше з 50 одиниць, самоорганізованих однорідних БпЛА, які виконують місію через локальну взаємодію. Проте, внаслідок еволюції теоретичних досліджень означеної галузі, це поняття трансформувалося і нині під «роєм БпЛА» слід розуміти групу БпЛА, управління якою здійснюється за допомогою штучного інтелекту із застосуванням алгоритмів самоорганізації. Під «ударними БпЛА» варто розуміти бойові БпЛА, що здатні самостійно виконувати розвідувальні й ударні завдання з метою виявлення (власними бортовими засобами розвідки) наземних і морських цілей (об'єктів) та їх подальшого ураження бортовою зброєю – інтегрованою бойовою частиною.

Аналіз досвіду теоретичних досліджень і практичних випробувань у галузі ройового застосування роботизованих систем вказує на низку можливих проблемних питань, що виникатимуть у разі впровадження ройового принципу застосування ударних БпЛА. Для розуміння змісту цих проблемних питань на рис. 1 наведена логіко-часова модель застосування рою ударних БпЛА, основною метою якого є ураження певного об'єкту (об'єктів) противника. Модель є узагальненою і відображає лише основні (типові) етапи ройового застосування ударних БпЛА.

У більшості джерел ройове застосування БпЛА розглядається на рівні опису загальної ідеї, іноді з доволі високим рівнем абстрагування без визначення конкретної мети рою, яка є визначальною. Тому, важливим питанням є визначення вихідних даних щодо принципів та логіки формування рою ударних БпЛА. Зокрема, цільовим призначенням «рою», як варіант, може бути пошук та ураження наземних цілей заданого типу у визначеному районі (області простору).

Подібна мета є певним аналогом завдання «пошуку їжі» у природному середовищі. Також принципово важливим є визначення типу рою (однорідний, різнорідний), що суттєво впливає на склад групи БпЛА (рою та суброїв).

З урахуванням принципів ройової взаємодії у роботизованих системах, у табл. 1 наведено можливі проблеми ройового застосування ударних БпЛА за етапами їх застосування, відображеними у логіко-часовій поетапній моделі на рис. 1.

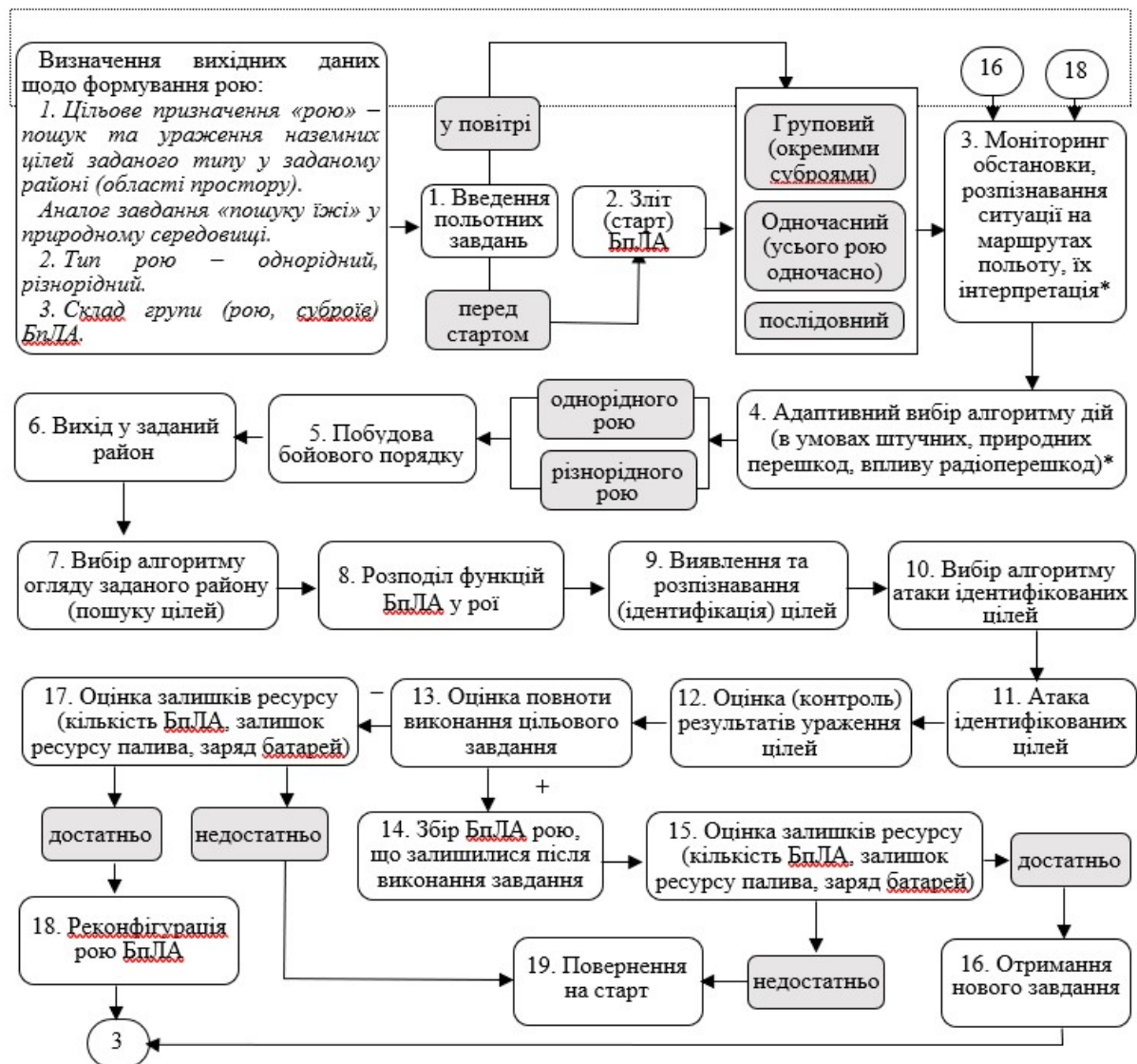


Рисунок 1 – Логіко-часова поетапна модель застосування рою ударних БпЛА (варіант)

* Заходи, що виконуються безперервно протягом усього часу від зльоту до завершення виконання цільового завдання групою (роєм) БпЛА

Таблиця 1

Можливі проблеми застосування рою ударних БпЛА за логіко-часовою поетапною моделлю

Етап	Можливі проблеми з точки зору ройового застосування ударних БпЛА
1. Введення польотних завдань	Проблеми можуть бути пов'язані з вибором способу введення польотних завдань: послідовно в усі БпЛА–агенти рою (суб'єкти, які спостерігають за своїм оточенням та впливають на нього, щоб досягти своїх цілей) або лише в окремі БпЛА–лідери рою або його суброїв; на землі перед стартом або у повітрі. В умовах нестачі ресурсу часу, можливо, виникатиме необхідність оперативного дистанційного введення польотних завдань після зльоту усього рою. Важливим, за таких умов, буде вибір концепції щодо зміни польотного завдання рою (жорстка прив'язка до заданої програми, адаптивна зміна

Інформаційно-аналітична діяльність у сфері безпеки та оборони

Етап	Можливі проблеми з точки зору ройового застосування ударних БпЛА
	програми залежно від ситуації під зовнішнім управлінням оператора чи штучного ройового інтелекту).
2. Зліт (старт) рою БпЛА	<p>Проблеми зльоту (старту) рою БпЛА є другорядними і можуть бути пов'язані лише з конструктивними особливостями пускових установок та класу ударних БпЛА.</p> <p>Для малих тактичних БпЛА з незначним часом польоту спосіб старту є більш критичним. Тому мають бути передбачені різні способи старту – груповий (окремими суброями, одночасний (усім роєм) або послідовний).</p> <p>Необхідно враховувати, що для рою малих БпЛА груповий спосіб одночасного зльоту є більш доцільним.</p>
3. Моніторинг обстановки, розпізнавання ситуації на маршрутах польоту, їх інтерпретація	<p>На цьому етапі (та протягом усіх етапів польоту) проблеми пов'язані з безпекою усього рою та його окремих агентів (аналог задачі на основі «інстинкту самозбереження» у природних системах). Задачі цього етапу мають виконуватись протягом усього часу до завершення польотного завдання із залученням усіх сенсорів (датчиків) БпЛА.</p> <p>Очевидними проблемами є вибір способів (процедур, алгоритмів): об'єднання та обробки інформації від різнорідних датчиків окремих агентів (залежно від типу рою (однорідний або різнорідний), а також цільового призначення рою алгоритми можуть мати суттєві відмінності); розпізнавання у реальному масштабі часу ситуації на маршрутах польоту в мінливих умовах зовнішнього середовища, наявності штучних чи природних перешкод, розпізнавання небезпеки навмисної протидії. Важливими, за таких умов, є розпізнавання роєм рельєфу місцевості, рослинності, об'єктів промисловості, будівель на урбанізованій території, ознак впливу індустриальних радіозавод, навмисних радіоперешкод, вогневого впливу противника тощо;</p> <p>правильної інтерпретації ситуацій, особливо в умовах їх удаваної схожості (окрема складна проблема, яка розглядається у галузі штучного інтелекту) або інтерпретації ситуацій типу «небезпека зовнішнього середовища» чи «небезпека навмисної протидії».</p>
4. Адаптивний вибір алгоритму дій (в умовах штучних, природних перешкод, впливу радіоперешкод)	<p>На цьому етапі постає проблема вибору, подолання якої залежить від повноти та точності виконання перелічених завдань попереднього етапу. Крім того, виникає необхідність створення спеціальних алгоритмів вибору варіантів дій рою БпЛА на основі адаптивних баз даних (образів) із забезпеченням гнучкого доступу до них усіх агентів рою, його окремих суброїв, БпЛА-лідерів за участю або без участі оператора рою.</p> <p>Можливі варіанти дій рою – зміна маршруту або профілю польоту, розділення або перегруповування рою для уникнення небезпечних ситуацій і зменшення ризику втрати цілісності рою та його керованості. Самі алгоритми мають враховувати типи роїв – однорідні або різнорідні, щільні зосереджені або розосереджені. Слід враховувати, що більшість алгоритмів, що засновані на вивченні колоній живих організмів і які описують лише елементи ройового інтелекту не можуть бути прямо використані під час вирішення складних комбінованих задач та отримання оптимальної для всієї колонії (рою, групи) поведінки. Наприклад, деякі відомі алгоритми ройової поведінки (мурашиний алгоритм, алгоритми колонії бджіл, штучні імунні системи [16], алгоритм зозулі [16], алгоритм світлячка [16] тощо) скоріше є лише алгоритмами оптимізації для вирішення вузькоспрямованих завдань. Отже, виникає проблема створення агентно-орієнтованих або мультиагентних систем (моделей) прийняття рішень, які у мінливому середовищі дозволятимуть швидко виконувати операції прийняття колективних рішень серед множини альтернативних на основі інформації, що циркулює у мережі (між взаємодіючими агентами рою).</p> <p>У будь-якому разі завдання вибору алгоритму дій може бути сформульоване в термінах та математичних моделях теорії прийняття рішень, теорії комбінаторної оптимізації, зокрема, теорії розкладів, а також низки інших прикладних задач. За таких умов, формалізація завдання очікувано передбачатиме велику розмірність простору варіантів рішень.</p>
5. Побудова бойового порядку	<p>Під час побудови бойового порядку потрібно також враховувати традиційні форми побудови групи безпілотних літальних апаратів (клин, ромб, пеленг, змійка, колона, фронт), а також тип рою (однорідний або різнорідний), його цільове завдання, умови обстановки та очікувану протидію. Можливі варіанти бойового порядку рою:</p> <ul style="list-style-type: none"> щільний зосереджений (проблема взаємної безпеки); розосереджений (проблема керованості та цілісності рою);

Information and analytical activities in the field of security and defense

Етап	Можливі проблеми з точки зору ройового застосування ударних БпЛА
	<p>ешелонований за дистанцією (між суброями) та висотою (проблема керованості рою, його цілісності та небезпека завчасного виявлення противником).</p> <p>У разі застосування різнорідного рою необхідно обов'язково враховувати призначення окремих БпЛА-агентів або суброїв (розвідувальні, ударні, демонстративні (відволікаючі), ретранслятори, цілевказівники, постановники радіоперешкод тощо)</p>
6. Вихід у заданий район	<p>На цьому етапі можливі варіанти – вихід у заданий район усім роєм БпЛА або частинами рою (суброями).</p> <p>Проблемним питанням є вибір алгоритму самовпорядкування в просторі рою, який передбачає здатність рою цілеспрямовано управляти взаємним безпечним розміщенням БпЛА та переміщенням його у просторі з урахуванням можливих змін чисельності рою, оминанням природних фізичних перешкод</p> <p>За таких умов необхідно вирішувати задачі діагностики (контролю) цілісності рою, за необхідності його реконфігурації з метою подальшого виконання цільового завдання у заданому районі</p>
7. Вибір алгоритму огляду заданого району (пошуку цілей)	<p>Залежно від ситуації та наявного часового ресурсу мають обиратись відповідні алгоритми огляду заданого району (послідовний, паралельний). У разі застосування різнорідного рою для моніторингу обстановки та пошуку цілей залучатимуться лише групи БпЛА з відповідними сенсорами. Для забезпечення гарантованого виявлення цілей алгоритми мають враховувати перекриття зон огляду бортових сенсорів окремих БпЛА (зазвичай на 10 – 15%)</p>
8. Розподіл завдань (функцій) БпЛА у рої	<p>Загалом розподіл завдань – є процесом комбінаторної оптимізації, який забезпечує виконання роєм визначеного завдання. У разі різнорідного рою, де є БпЛА розвідки (пошук цілей, оцінка результатів ураження), ретрансляції, цілевказання, ураження, розподіл функцій не потрібний.</p> <p>Проте, в однорідних роях виникатиме необхідність впровадження алгоритмів розподілу завдань (функцій) між окремими БпЛА-агентами або суброями, тимчасового делегування своїх функцій іншим агентам. Для реалізації таких алгоритмів необхідно забезпечувати максимальний рівень взаємодії (обміну інформацією) між агентами рою. З методичної точки зору розподіл завдань (функцій) може бути описаний різними способами – як задача побудови детермінованих евристичних моделей (алгоритмів), задача на основі положень теорії графів, теорії ігор, нечіткої логіки тощо. Проте слід враховувати, що традиційні детерміновані алгоритми через свою обчислювальну складність можуть впоратися лише з невеликими і простими завданнями. Задачі евристичного характеру можуть бути вирішені, але відповідна ефективність може бути не досягнута</p>
9. Виявлення та розпізнавання (ідентифікація) цілей заданих класів	<p>Основними проблемними питаннями на цьому етапі є:</p> <ul style="list-style-type: none"> складність реалізації алгоритмів розпізнавання виявлених цілей у розподіленій самоорганізованій динамічній системі в умовах отримання нечітких або неповних даних від бортових засобів розвідки БпЛА-агентів; необхідність використання у самоорганізованій системі прийняття рішень рою БпЛА бібліотеки образів типових цілей; підтверджена досвідом російсько-української війни складність розпізнавання на полі бою своїх об'єктів і об'єктів противника, які належать до одного класу. <p>За таких умов, з метою виявлення потенційних цілей і розпізнавання цілей заданих класів в режимі реального часу та в умовах динамічної зміни координат БпЛА-агентів, необхідно вирішувати задачі коригування курсу, швидкості й висоти польоту, взаємного положення, спрямованості сенсорів, а також взаємного обміну інформацією між усіма БпЛА у рою, обробки даних на основі ройового інтелекту</p>
10. Вибір алгоритму атаки ідентифікованих цілей 11. Атака ідентифікованих цілей	<p>Складність вибору алгоритмів атаки полягає у тому, що у них має враховуватись наявний ресурс рою (запас часу, кількість ударних БпЛА для атаки), кількість та взаємне розміщення цілей та ударних БпЛА, що є основою для розв'язання самоорганізованою системою прийняття рішень рою БпЛА задачі цілерозподілу за певним набором критеріїв (важливість (пріоритет), доступність (відстань), захищеність тощо). Водночас, алгоритми мають оперативно коригуватись у реальному масштабі часу залежно від зміни</p>

Інформаційно-аналітична діяльність у сфері безпеки та оборони

Етап	Можливі проблеми з точки зору ройового застосування ударних БпЛА
	поточної ситуації (втрат (витрати) частини БпЛА, маневру цілей, навмисної невогневої протидії тощо). Зазначене потребуватиме інтеграції програмного забезпечення усіх агентів рою БпЛА для забезпечення координації їх взаємного положення, перенацілювання та керування корисним навантаженням
12. Оцінка (контроль) результатів ураження цілей 13. Оцінка повноти виконання цільового завдання рою ударних БпЛА	Складність цих етапів полягає у тому, що у процесі контролю результатів ураження прийматиме лише частина (залишки) рою БпЛА, що може вплинути на повноту отриманої інформації і оцінку результатів. Крім того, мають бути розроблені додаткові алгоритми: реконфігурації залишків рою та їх адаптивної самоорганізації; ідентифікації ступенів ураження цілей; оцінювання повноти виконання цільового завдання рою
14. Збір БпЛА рою, що залишилися після виконання завдання	У наслідок атаки цілей первинна цілісність рою може бути порушена, адже частина БпЛА буде втрачена (витрачена). Решта БпЛА-агентів рою може опинитись поза межами взаємної радіодоступності. Отже, на цьому етапі проблемами можуть бути: оцінка взаємного положення БпЛА на основі обміну координатними даними (через будь-які доступні БпЛА-агенти); вибір потенційно безпечної області простору на основі об'єднання даних від сенсорів БпЛА
15 та 17. Оцінка залишків ресурсу (кількість БпЛА, залишок палива, заряд батарей тощо)	Виконання завдань цих (ідентичних за змістом) етапів залежатиме від результатів збору залишків рою та формуванні їх у новий рій на основі алгоритмів самоорганізації
16. Отримання нового завдання	У разі наявності режиму зовнішнього управління роєм БпЛА, завдання може бути отримано від оператора. Проте, в автономному режимі без заздалегідь визначеної програми дій мають бути передбачені алгоритми генерації нового завдання самоорганізованими залишками рою на основі прийняття рішень штучним інтелектом з урахуванням меж заданого району, потенційної доступності інших цілей та залишків оціненого ресурсу рою. У будь якому разі після отримання (генерації) нового завдання залишки рою БпЛА мають діяти за ітераційним алгоритмом, починаючи з етапу 3 (див. рис. 1)
18. Реконфігурація рою БпЛА	Реконфігурація передбачає процедури взаємного просторового розміщення елементів рою та перерозподілу функцій між окремими БпЛА. Даний етап потребуватиме впровадження адаптивних алгоритмів побудови нового рою з меншою чисельністю БпЛА-агентів з урахуванням залишків їхнього ресурсу та стану зовнішнього середовища. За таких умов, за основу можуть бути взяті принципи побудови обчислювальних систем, що передбачають декілька варіантів реконфігурації, зокрема [17]: пасивної, коли реконфігурація системи відбувається лише згідно із зовнішніми запитами з використанням зовнішнього алгоритму управління (у нашому випадку – за участі оператора); активної, коли є підсистема управління, що сама може ініціювати реконфігурацію незалежно від зовнішніх факторів або запитів. Можуть бути враховані варіанти повної та часткової реконфігурації. У перспективі доцільно розглянути більш складну інтелектуальну систему, яка буде здатною до самореконфігурації (спроможності змінювати власне апаратне забезпечення в динамічному режимі під дією внутрішніх алгоритмів управління), що забезпечить надвисоку ефективність, гнучкість та автономність реконфігурації рою
19. Повернення на старт	Даний етап є завершальним (окрім ситуації повної витрати БпЛА). Проте, для безпечного завершення польотного завдання, залишки рою БпЛА на зворотному шляху мають виконувати завдання етапів 3 та 4 (див. рис. 1), проблемні питання яких було наведено вище.

В результаті аналізу змісту етапів логіко-часової моделі ройового застосування ударних БпЛА (див. рис. 1, табл. 1) проведено узагальнення найбільш проблемних питань. Зокрема до них можна віднести:

складність та різноманітність алгоритмів ройової взаємодії БпЛА-агентів у складі рою (на усіх етапах);
необхідність адаптивного комбінування централізованого та децентралізованого способів

управління роєм на основі принципів самоорганізації;

складність організації децентралізованого (без участі оператора) інформаційного обміну між БпЛА-агентами у складних умовах обстановки;

складність вирішення завдань розпізнавання ситуацій або конкретних цілей, особливо у стані переходу рою до «самоорганізації» та зменшення або виключення ролі оператора БпЛА (вирішення цих завдань потребуватиме розроблення алгоритмів на основі поєднання положень теорій підтримки прийняття рішень, розпізнавання образів (зокрема, паттернів ситуацій і оптичних образів об'єктів), методів контурного аналізу, цифрової фільтрації зображень, методів штучних нейронних мереж, а також методів з інших галузей знань);

проблема реалізації просторово-розподіленої самоорганізованої системи на основі штучного інтелекту, а також збереження її стійкості та керованості в умовах можливої втрати (витрати) частини БпЛА-агентів та періодичної адаптивної реконфігурації рою;

проблема самої реконфігурації рою в умовах відсутності або мінімальної участі оператора, подолання якої потребуватиме вирішення завдань роз'єднання рою на кластери (суброї або окремі БпЛА-агенти), їхнього збору у нову групу (рій) та контролю його цілісності;

Список бібліографічних посилань

1. Голембо В. А., Мельников Р. Г. Організація роботи групи безпілотних літальних апаратів. Національний університет «Львівська політехніка». Львів. 2018. С. 53–63. 2. Ярошенко Я. В., Герасименко В. В., Коротін С. М., Мартинюк О. Р. Класифікація завдань спільного бойового порядку пілотованої та безпілотної авіації в операціях. *Повітряна міць України*. ІА та ППО НУОУ. 2021. № 1. С. 41–46. 3. Коваль В. В., Артюшин Л. М., Семон Б. Й., Лобанов А. А., Герасименко В. В. Підходи до формулювання стратегії управління спільними бойовими порядками пілотованої та безпілотної авіації. *Наука і оборона*. 2021. № 4. С. 34–43. 4. Артюшин Л. М., Лобанов А. А., Герасименко В. В. Математична модель побудови бойового порядку спільної авіаційної групи пілотованої та безпілотної авіації. *Сучасні інформаційні технології у сфері безпеки та оборони*. 2021. № 2 (41). С. 23–30. DOI: 10.33099/2311-7249/2021-41-2-23-30. 5. Пулеко І. В., Андреев О. В., Дубина О. Ф., Чумакевич А. С. Модель руху безпілотних літальних апаратів на основі алгебри дуальних кватерніонів. Житомирський військовий інститут імені С. П. Корольова. Житомир. *Проблеми створення, випробовування, застосування та експлуатації складних інформаційних систем*. 2022. Вип. 23. С. 52–61. 6. Мажара І. П., Тимочко О. І. Модель процесу управління повітряним рухом на основі нейронних нечітких мереж. *Наука і техніка ІС ЗС України*. 2021. № 2 (43). С. 61–65. 7. Самойленко О. В., Богославець С. О., Стешенко П. М., Наусенко Б. Ю. Особливості керування спільними бойовими порядками безпілотних і пілотованих літальних апаратів. Київ: Державний науково-дослідний інститут авіації, 2021. Вип. 17 (24). С. 45–49. 8. Мартинюк О. Р. Модель узгодженого руху групи безпілотних літальних апаратів.

передбачувана складність алгоритмів генерації завдань самоорганізованими роями з урахуванням меж заданого району, потенційної доступності цілей та залишків ресурсу рою.

Висновки й перспективи подальших досліджень

Таким чином, враховуючи зростання ролі масового застосування ударних БпЛА у сучасних війнах у статті запропонована структура логіко-часової поетапної моделі, яка є узагальненим авторським баченням процесу застосування групи (рою) ударних БпЛА. В подальшому вона може бути змінена (доповнена) з урахуванням результатів аналізу досвіду групового застосування БпЛА, уточнення цільового призначення рою та вибору конкретної базової моделі або групи моделей для опису їх ройової поведінки.

З урахуванням принципів ройової взаємодії у роботизованих системах наведено можливі проблеми ройового застосування цих БпЛА за етапами, відображеними у логіко-часовій поетапній моделі, а також проведено узагальнення найбільш проблемних питань.

Отримані результати дослідження можуть бути основою для подальшої деталізації проблемних питань кожного етапу ройового застосування БпЛА та формування логіки алгоритмів виконання часткових завдань, обрис яких викладено у даній статті.

Сучасні інформаційні технології у сфері безпеки та оборони. 2016. № 1. С. 78–81. 9. Muhammad Mubashir Iqbal, Zain Anwar Ali, Rehan Khan, Muhammad Shafiq. Motion planning of UAV Swarm: Recent Challenges and Approaches. *Aeronautics - New Advances*. 2022. 244 с. URL: <https://cutt.ly/bwvukUH7>. (дата звернення 21.09.2023). 10. Абдураїмов Т. З. Алгоритм глибинного аналізу даних для задачі класифікації на основі штучного бджолиного рою. Магістр. Дис. ... 123. Київ. НТУ України «Київський політехнічний інститут ім. Ігоря Сікорського». 2020. 107 с. 11. Бережний А. О. Методи та інформаційна технологія автоматизованого планування маршрутів польотів безпілотних літальних апаратів для підвищення ефективності пошуку об'єктів. Дис. ... канд. техн. наук. 05.13.06. Харків. ХНУПС. 2020. 192 с. 12. Сахопотинов Г. А., Сыркин И. С. Проблемы практического применения роевого интеллекта и построение устойчивых управляемых групп роботов. URL: <https://cutt.ly/0wvujXN3>. (дата звернення 20.09.2023). 13. Beni Gerardo, Jing Wang. Swarm Intelligence in Cellular Robotic Systems. *Robots and Biological Systems: Towards a New Bionics?* 1993. pp. 703-712. 14. Gerardo Beni. From Swarm Intelligence to Swarm Robotics. *Swarm Robotics*. 2005. pp. 1–9. 15. A Framework for Integrating the Development of Swarm Unmanned Aerial System Doctrine and Design. USA. URL: <https://www.sto.nato.int/publications/STO%20Meeting%20Proceedings/STO-MP-SET-222/MP-SET-222-14.pdf> (дата звернення 29.10.2022). 16. Литвин В., Угрин Д. Методи ройового інтелекту розв'язання прикладних задач в геоінформаційних системах. Національний університет «Львівська політехніка». *Інформаційні системи та мережі*. Львів. 2020. С. 87–106. 17. Клименко І. А., Рудницький М. В. Класифікація реконфігурованих обчислювальних систем. *Вісник ВІП*. Вінниця. 2014. Вип. 5. С. 120–128.

THE PROBLEMATIC ISSUES OF SWARMING USE OF STRIKING UNMANNED AERIAL VEHICLES

Shovkoshytnyi Ihor (Candidate of Military Science, Senior Research Fellow)¹
*Vasylenko Olha*²

¹ National Defense University of Ukraine, Kyiv, Ukraine

² Central Scientific and Research Institute of Armed Forces of Ukraine, Kyiv, Ukraine

Formulation of the problem in general. The leading countries of the world are currently developing and implementing swarm technologies for the use of robotic unmanned systems (including unmanned aircraft systems), which are seen as a promising way to achieve military and technical superiority over a potential enemy. In view of this, the article is devoted to solving an urgent scientific task, which is to identify the problematic issues that may arise in the swarm use of a group of striking unmanned aerial vehicles, the purpose of which is to search for and destroy ground targets of a given type in a given area (region of space).

Research methods. In conducting the research, the authors applied the provisions of the systematic approach, methods of formal logic, analysis and comparison of documents. The combination of these methods allowed for a systematic approach to the disclosure of problematic issues of swarming use of striking unmanned aerial vehicle.

Analysis of recent researches and publications. Some issues of swarming use of objects have been studied quite comprehensively. At the same time, it can be argued that none of the sources cited has systematically considered the problematic issues of swarming use of striking unmanned aerial vehicles.

Presenting the main material. As a result of the research, based on a generalized analysis of publications on similar topics, as well as the processes that may occur during the execution of tasks by a group (swarm) of striking unmanned aerial vehicles in combat conditions, the article provides definitions of the main terms characterizing the use of striking unmanned aerial vehicles, and proposes a variant of a formalized logical and temporal model of the use of such swarm. Also, taking into account the principles of swarm interaction in robotic systems, a step-by-step description of possible problems of swarm use of unmanned combat aerial vehicles is made, specifying a number of the most complex partial tasks, the solution of which will require flexible application of modern methodology from various fields of knowledge.

Elements of scientific novelty. The scientific novelty lies in the suggested logical and temporal phased model that summarizes the typical stages and processes of using a swarm of striking unmanned aerial vehicles.

Practical significance of the article. The practical relevance of the research results for the military and defense sphere lies in the formalized description of the sequence of stages of group use of striking unmanned aerial vehicles, as well as in the identification of a number of problematic issues, the solution of which will require the implementation of existing or the development of new algorithms and models of swarm behavior of complex systems based on the principle of their self-organization.

Keywords: striking unmanned aerial vehicle, swarm, logic-time model, problems of use.

References

- Holemba, V. A., Melnikov, R. H. (2018). Organization of the work of a group of unmanned aerial vehicles. Lviv Polytechnic National University. Lviv, 53–63.
- Yaroshenko, Y. V., Herasymenko, V. V., Korotin, S. M., Martyniuk, O. V., (2021). Classification of tasks of the joint combat order of manned and unmanned aircraft in operations. Air power of Ukraine. IA and air defense of the NDU, 1, 41–46.
- Koval, V. V., Artiushyn, L. M., Semon, B. Y., Lobanov, A. A., Herasymenko, V. V., (2021). Approaches to the formulation of a strategy for managing joint combat orders of manned and unmanned aircraft. Science and Defense, 4, 34–43.
- Artiushyn, L. M., Lobanov, A. A., Herasymenko, V. V., (2021). A mathematical model for constructing the combat order of a joint aviation group of manned and unmanned aircraft. Modern information technologies in the Sphere of Security and Defense, 2 (41), 23–30. DOI: 10.33099/2311-7249/2021-41-2-23-30.
- Puleko, I. V., Andriev, O. V., Dubyna, O. F., Chumakevych, A. S., (2022). Model of unmanned aerial vehicles motion based on the algebra of dual quaternions. Zhytomyr Military Institute named after S.P. Korolev. Zhytomyr. Problems of creation, testing, application and operation of complex information systems, 23, 52–61.
- Mazhara, I. P., Tymochko, O. I., (2021). Model of air traffic control process based on neural fuzzy networks. Science and Technology of the Air Force of Ukraine. Kharkiv, 2 (43), 61–65.
- Samoilenko, O. V., Bohoslavets, S. O., Steshenko, P. M., Nausenko, B. U. Peculiarities of managing joint combat orders of unmanned and manned aircraft. State Research Institute of Aviation. Kyiv, 17 (24), 45–49.
- Martyniuk, O. R., (2016). A model of coordinated movement of a group of unmanned aerial vehicles. Modern information technologies in the Sphere of Security and Defense, 1, 78–81.
- Muhammad Mubashir Iqbal, Zain Anwar Ali, Rehan Khan, Muhammad Shafiq, (2022). Motion planning of UAV Swarm: Recent Challenges and Approaches. *Aeronautics - New Advances*, 244 [online]. Available at: <https://cutt.ly/bwvukUH7>. [Accessed: 21 September 2023].
- Abduraimov, T. Z., 2020. An algorithm for deep data analysis for the classification task based on an artificial bee swarm. Master. D. Thesis. National Technical University of Ukraine «Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute».
- Berezhnyi, A. O. Methods and information technology for automated planning of flight routes of unmanned aerial vehicles to improve the efficiency of object search. Candidate of Technical Sciences Thesis. KHNUPS.
- Sakhopotynov, H. A., Syrkin, I. S. Problems of practical application of swarm intelligence and building stable controlled groups of robots. [online]. Available at: <https://cutt.ly/0wvujXN3>. [Accessed: 20 September 2023].
- Beni Gerardo, Jing Wang. Swarm Intelligence in Cellular Robotic Systems. *Robots and Biological Systems: Towards a New Bionics?* 1993. pp. 703–712.
- Gerardo Beni. From Swarm Intelligence to Swarm Robotics. *Swarm Robotics*. 2005. pp. 1–9.
- A Framework for Integrating the Development of Swarm Unmanned Aerial System Doctrine and Design. USA. Available at: <https://www.sto.nato.int/publications/STO%20Meeting%20Proceedings/STO-MP-SET-222/MP-SET-222-14.pdf> [Accessed: 29 October 2022].
- Lytvyn, V., Uhryn, D. (2014). Methods of swarm intelligence for solving applied problems in geographic information systems. Lviv Polytechnic National University. Information systems and networks. Lviv, 2020, 87–106.
- Klymenko, I. A., Rudnytskyi, M. V. Classification of reconfigurable computer systems. Bulletin of VPI. Vinnytsia, 5, 120–128.