

УДК 351.861

*О. О. Ковальов, к.т.н., доцент, доц. каф. (ORCID 0000-0002-4974-5201)**І. М. Неклонський, к.військ.н., викл. каф. (ORCID 0000-0002-5561-4945)**Національний університет цивільного захисту України, Харків, Україна*

МОДЕЛЮВАННЯ РУХУ БЕЗПІЛОТНОГО ЛІТАЛЬНОГО АПАРАТУ В ЗОНІ НАДЗВИЧАЙНОЇ СИТУАЦІЇ

Розкриті проблемні питання впровадження безпілотних літальних апаратів в систему оперативних дій підрозділів цивільного захисту та інтеграції їх застосування в єдину систему управління при ліквідації надзвичайної ситуації. Розроблена математична модель імітації руху безпілотних літальних апаратів в зоні надзвичайної ситуації. Використання моделі дає змогу забезпечити в процесі обміну інформацією між елементами системи автоматизованого управління логічний висновок про досягнення повітряним об'єктом потрібної точки призначення. Алгоритм моделі зводиться до аналітичного опису руху повітряного об'єкта з урахуванням можливого маневру у географічній системі координат. Робота моделі може проходити у декілька циклів з відтворенням руху повітряного об'єкта з урахуванням усіх видів маневру, при цьому кожна точка зміни руху буде вважатись проміжною поки об'єкт не досягне кінцевої точки призначення. Наведені умови, за яких вважається, що повітряний об'єкт досягнув потрібної точки призначення. Обґрунтовано, що коректне їх застосування буде тільки в межах чіткого діапазону змін розрахункових параметрів пошуково-рятувальної операції. Модель дозволяє проводити багатократні розрахунки по різноманітних варіантах набору вхідних даних, при цьому час одного циклу не перевищує декількох хвилин. Модель необхідно розглядати як окремий модуль із розрахунком на наступне її використання як окремого блока моделі оперативних дій, що ведуться всіма активними елементами, які складають систему. Запропонований підхід дає можливість на основі застосування сучасних методів моделювання удосконалити управління оперативними діями рятувальних формувань за рахунок інтегрування розробленої моделі в систему автоматизованого управління. Отримані результати можуть розглядатись як складова інформаційно-аналітичної моделі процесів підготовки й прийняття рішень.

Ключові слова: безпілотний літальний апарат, імітація руху, модель, точка призначення, координати, маневр

1. Вступ

Аналіз існуючих реалій сучасної військово-політичної та соціально-економічної обстановки в Україні свідчить про зростаючу роль безпілотних літальних апаратів (БПЛА). Компанія DJI, світовий лідер у галузі цивільних квадрокоптерів та технологій аерофотозйомки, запустила онлайн-мапу [1] для відстеження подій у всьому світі, коли БПЛА допомогли врятувати когось від небезпеки. Відповідні рятувальні операції, що відображені на мапі, наочно демонструють, як технологія БПЛА перейшла від експериментальної концепції до стандартного використання у сфері громадської безпеки. Також зростає роль інформаційних технологій. Так, компанією Orbital Critical Systems за підтримки країн Європейського Союзу (ЄС) для визначення місцезнаходження постраждалих розроблена пошуково-рятувальна система MOBNET [2]. Даний проект отримав фінансування в рамках програми дослідження та інновацій «Горизонт-2020» ЄС.

Державна служба України з надзвичайних ситуацій (ДСНС) постійно працює над удосконаленням системи безпеки населення та оперативної ліквідації наслідків надзвичайних ситуацій різного характеру. Швидкість реагування та активні дії рятувальних підрозділів безпосередньо впливають на збереження життя людей та об'єктів. Тому впровадження БПЛА та нових технологій – необхідний крок для підвищення ефективності роботи ДСНС.

З цією метою до експлуатації в системі ДСНС була допущена низка різнотипних, але не професійних за призначенням БПЛА. Більшість з них – це квадрокоптери PHANTOM або MATRICE різних модифікацій. Проведено навчання першої навчальної групи з посад зовнішніх пілотів (операторів) БПЛА територіальних органів та підрозділів центрального підпорядкування ДСНС.

Дійсно, завдяки роботі з БПЛА стало значно легше проводити розвідку пожеж у екосистемах, проводити обстеження територій та акваторій на наявність вибухонебезпечних предметів, здійснювати пошук людей, які заблукали у лісі або яких віднесло у відкрите море. Про це свідчать неодноразові доповіді відповідних органів управління ДСНС центрального і територіального підпорядкування.

Разом з тим необхідно зауважити, що активне впровадження БПЛА в оперативну діяльність рятувальних сил потребує відповідного науково-технічного супроводження. На наш погляд, потребують дослідження ряд концептуальних питань, а саме: розроблення моделі взаємодії в складі єдиної державної системи цивільного захисту або системи авіаційної безпеки [3]; потреба у розробленні та впровадженні БПЛА, у тому числі професійного (спеціалізованого) призначення, тактико-технічні вимоги до таких БПЛА і в цілому до безпілотної авіаційної системи (БАС); систематизація умов і факторів, що будуть впливати на функціонування БПЛА під час ліквідації надзвичайних ситуацій (НС); критерії вибору БПЛА для пошуково-рятувальних робіт з урахуванням специфіки відповідного виду НС; інформаційні технології та програмне забезпечення БАС тощо.

Головним проблемним питанням, яке об'єднує всі ці дослідження, є питання щодо впровадження БПЛА саме в систему оперативних дій підрозділів цивільного захисту і як інтегрувати їх застосування в єдину систему управління при ліквідації НС.

Таким чином, проблема інтегрування роботи безпілотної літальної апаратури в єдину систему управління під час ліквідації надзвичайних ситуацій є актуальною.

2. Аналіз літературних даних та постановка проблеми

Фокус сучасних досліджень, як правило, зводиться до технічних аспектів, функцій моніторингу та виявлення динамічних об'єктів.

Із напрацьованих результатів актуальними є результати щодо дослідження використання БПЛА в процесі моніторингу лісових пожеж [4, 5], досвід розроблення групи БПЛА, призначеної для виконання пошуково-розвідувальних, рятувальних (інженерних) операцій фахівцями цивільної авіації. У сфері цивільної авіації розроблені такі безпілотні авіаційні комплекси, як М-7Д Небесний патруль, Observer SM1, Spectator, Raybird-3, DS700 THOR, які можуть застосовуватись для виконання пошуково-рятувальних робіт. Також заслуговують на увагу дослідження щодо застосування БПЛА під час ліквідації наслідків аварії на АЕС Фукусіма-1 [6, 7]. Обсяг відповідних наукових досліджень дає можливість сформулювати уже напрацьовані результати в єдину систему поглядів та сформулювати визначальний задум щодо впровадження БПЛА у оперативну діяльність сил цивільного захисту. Разом з тим, процес застосування БПЛА авторами розглядається з точки зору функціональної можливості в різних умовах, при цьому не враховується можливість управління й прийняття рішення щодо застосування БПЛА в імітаційних умовах обстановки в зоні НС.

В роботі [8] вирішується проблема виявлення об'єктів, що рухаються. Представлено новий метод виявлення кількох рухомих об'єктів за допомогою БПЛА.

Для виявлення запропоновано досліджувати вектори руху об'єктів, де різниця у векторах руху є підставою щоб розрізнити статичні та динамічні об'єкти. Тобто вирішується певна геометрична задача, результатом якою дає можливість досліджувати функції технічних пристроїв (відеокамери), що установлені на БПЛА. Але рух самого повітряного об'єкту авторами не розглядається.

В роботі [9] розв'язане наукове завдання щодо розроблення інформаційної технології розширення функціональних можливостей неспеціалізованих БПЛА. Розроблена схема інформаційних потоків в рамках відповідної технології. Це дає можливість інтегрувати роботу БПЛА в систему протипожежного моніторингу та більш ефективно реагувати на виникнення осередків горіння у лісовому масиві. Разом з тим, в основі алгоритму функціонування залучених БПЛА лежить процес моніторингу центром управління активних БПЛА у зоні НС за GPS координатами дрону за допомогою GSM Internet протоколів зв'язку мобільних операторів. При цьому траєкторія руху БПЛА не моделюється, а вибирається самим оператором, зміна траєкторії руху здійснюється шляхом інформування оператора про наявність небезпечної ділянки за підсумками отриманого відеосигналу.

В роботі [10] запропонована методика формування траси польоту при проведенні розвідки й уточненні параметрів зони забруднення місцевості небезпечними хімічними речовинами одним БПЛА та при використанні групового польоту БПЛА. Траєкторія польоту представлена графічною моделлю, де рух повітряного об'єкту здійснюється паралельними галсами з міжгалсовою відстанню, яка дорівнює радіусу розвороту БПЛА. Визначена необхідна умова використання відповідної траси польоту. Для цього введено таке поняття як час циклу проведення розвідки зони НС, який не повинен перевищувати тривалість польоту БПЛА у відповідності з тактико-технічними характеристиками. Наведена комплексна функціональна схема системи БПЛА для оперативного моніторингу за зоною місцевості, де сталась НС. Тобто автори запропонували підхід до створення комплексної функціональної системи БПЛА для оперативного моніторингу окремої місцевості в зоні НС. Разом з тим, в роботі не наведений математичний опис запропонованої схеми руху БПЛА, а процес інтеграції моделі розглянутий тільки для системи моніторингу; системи управління під час НС не розглядались.

Таким чином, в процесі дослідження проблемних питань щодо впровадження застосування БПЛА в оперативну діяльність сил цивільного захисту розглядаються окремі моделі під час виконання локального завдання. Процес застосування розглядається з точки зору функціональної спроможності, тактико-технічних характеристик БПЛА або встановлених технічних пристроїв. З точки зору застосування в системі оперативних дій процес функціонування БПЛА, в першу чергу, характеризується його льотними даними – здатністю потрапити у певну точку зони НС з відповідною функцією. Проблема полягає у відсутності ефективних інструментів щодо визначення факту виконання цієї функції у заданій точці, який би дозволяв інтегрувати роботу БПЛА в систему автоматизованого управління.

Таким чином, не вирішеною частиною розглянутої проблеми є відсутність опису процесу керування безпілотним літальним апаратом в системі автоматизованого управління оперативними діями підрозділів цивільного захисту.

3. Мета та завдання дослідження

Метою роботи є моделювання руху безпілотного літального апарату в зоні надзвичайної ситуації з визначенням факту виконання своєї функції у заданій точці

ці, що дозволило б інтегрувати роботу безпілотного літального апарату в систему автоматизованого управління.

Для досягнення поставленої мети необхідно вирішити наступні завдання:

- розробити математичну модель імітації руху повітряного об'єкта в зоні надзвичайної ситуації з урахуванням можливого його маневру, використання якої дозволить зробити логічний висновок про досягнення повітряним об'єктом потрібної точки призначення в процесі обміну інформацією між елементами системи автоматизованого управління;

- формалізувати задачу підготовки й прийняття рішень щодо вибору маршруту руху безпілотного літального апарату в зоні надзвичайної ситуації.

4. Матеріали та методи дослідження

Об'єкт дослідження – процес управління оперативними діями з використанням БПЛА. Предмет дослідження – рух БПЛА в зоні НС.

Робоча гіпотеза полягає в наступному: якщо процес прийняття рішень щодо вибору маршруту руху формалізувати з використанням математичної логіки, то операції з отриманими чисельними значеннями можуть бути інтегровані в систему автоматизованого управління оперативними діями. Ефективним інструментом щодо визначення факту виконання БПЛА своєї функції у заданій точці польоту може стати математична модель імітації руху повітряного об'єкта з описом його руху як матеріальної точки у вибраній системі координат. Передбачається, що моделювання руху окремого повітряного об'єкта дозволить отримати систему рівнянь руху (відображення у часі траєкторії його руху у просторі), що задають умови, за яких буде вважатись, що повітряний об'єкт досягнув потрібної точки призначення.

Ефективність застосування БПЛА в системі оперативних дій характеризується здатністю потрапити у певну точку зони НС з відповідною функцією. Інтегрувати роботу БПЛА в систему автоматизованого управління оперативними діями можливо за рахунок введення певних інструментів щодо розпізнавання факту виконання своєї функції у заданій точці. Застосування моделі руху слід розглядати з точки зору природної (нестохастичної) невизначеності, тому формалізація вибору необхідного маршруту руху у матрицю належності дасть можливість вибрати відповідний маршрут за значеннями функції належності та показником динамічної важливості БПЛА.

Методи дослідження визначено сукупністю вирішуваних завдань і базуються на принципах управління й теорії прийняття рішень та включають: математичні методи моделювання, які використані під час розроблення моделі руху повітряного об'єкта в зоні НС та методи теорії нечітких множин і нечіткої логіки, які використані для формалізації задачі підготовки й прийняття рішень щодо вибору маршруту руху БПЛА. Для аналізу отриманих результатів застосовані програмні апарати середовищ Microsoft Office Excel, MATLAB з наступним тестуванням з використанням середовища Cuboid World.

5. Розроблення моделі імітації руху повітряного об'єкта в зоні надзвичайної ситуації

Виходячи з аналізу проведених досліджень БПЛА доцільно представляти моделлю «твердого тіла», тобто як рухомий повітряний об'єкт, у якого сукупність матеріальних точок жорстко зв'язані між собою. В такому разі траєкторію руху

об'єкта можна описувати як траєкторію руху точки – центру мас. Рух повітряного об'єкту може відбуватися рівномірно (рівно прискорено) та прямолінійно або з виконанням усіх видів маневру. При цьому положення БПЛА розглядається у географічній системі координат. У такому разі вихідними даними для створення математичної моделі руху є його траєкторія, що задана у вигляді набору точок на географічній мапі з відповідними координатами. У кожній точці траєкторії повітряний об'єкт може рухатись з певною швидкістю.

На основі цих даних необхідно побудувати математичну модель руху згідно заданої траєкторії, що задовільняє вимогам та обмеженням:

- рух БПЛА розглядається як рух матеріальної точки;
- моделювання руху забезпечується в діапазоні технічних характеристик БПЛА (тактичний радіус дії, мінімальна та максимальна висота польоту повітряного об'єкту відомі);
- моделювання руху здійснюється в межах дії відповідної системи управління у вибраній системі координат;
- визначений кодовий сигнал для визначення факту виконання своєї функції у визначеній точці траєкторії.

Модель повинна дозволяти обчислювати координати та параметри руху повітряного об'єкту у будь-який момент часу t із заданою точністю. Крім того, необхідно враховувати можливість симуляції руху [11–13].

Поставлена задача вирішена виходячи з базових наукових положень у сфері застосування повітряних сил [14, 15], моделювання дронів [16], з урахуванням ідей щодо опису кінематики руху БПЛА [17], дослідження систем відстежування повітряних об'єктів тощо [18]. Модель руху повітряного об'єкту представлена у вигляді просторово-часового профілю (рис.1), де A_0 – початкова точка; A_j, \dots, A_{j+n} – контрольні точки маршруту; A_K – кінцева точка призначення; $h_{\min} - h_{\max}$ – відповідний коридор польоту; W – шляхова швидкість; φ – заданий шляховий кут.

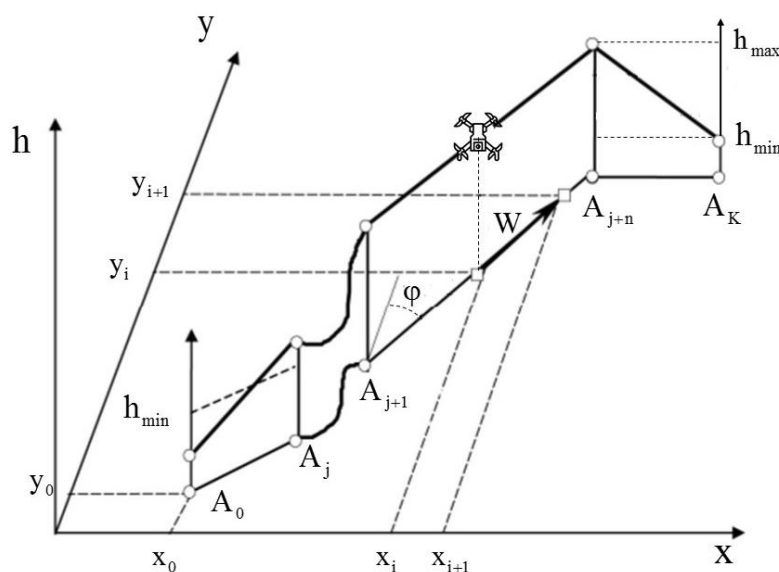


Рис. 1. Схема руху повітряного об'єкту

Моделювання здійснено за «принципом Δt ». Тобто модельний час просувається на певну величину Δt , далі визначаються зміни станів елементів та вихідних впливів системи, що сталися за цей час. Після цього модельний час знову

просувається на величину Δt і процедура повторюється. Так триває до кінця періоду моделювання T_m .

Роботу моделі доцільно розглянути в алгоритмічному вигляді (рис. 2). Опис руху повітряного об'єкта має такий вигляд:

1. Для імітації руху повітряного об'єкта будемо використовувати такі вхідні дані:

$f(t)$ – координата (довгота) повітряного об'єкта в момент часу t (географічна система координат);

$l(t)$ – координата (широта) повітряного об'єкта в момент часу t (географічна система координат);

$h(t)$ – висота повітряного об'єкта в момент часу t (м);

F – довгота точки призначення повітряного об'єкта (географічна система координат);

L – широта точки призначення повітряного об'єкта (географічна система координат);

H – висота точки призначення повітряного об'єкта, м;

$v(h)$ – швидкість повітряного об'єкта – функція висоти, м/с;

$D_{\text{такт}}$ – тактичний радіус дії повітряного об'єкта, м;

$H_{\text{min}}, H_{\text{max}}$ – мінімальна та максимальна висота польоту повітряного об'єкта, м.

2. Здійснюються проміжні розрахунки, а саме:

D – дальність по поверхні Землі між положенням повітряного об'єкта в даний час до точки призначення.

$d(t)$ – запас ходу для даного повітряного об'єкта (м).

3. Для кожного повітряного об'єкта розраховується значення дальності польоту за формулою:

$$D = \arccos(\sin(f^0) \cdot \sin(F) + \cos(f^0) \cdot \cos(F) \cdot \cos(l^0 - L)) \cdot r, \quad (1)$$

де r – значення радіуса Землі в точці з географічними координатами f^0, l^0 .

4. Перевіряється можливість руху повітряного об'єкта. Рух повітряного об'єкта можливий, якщо виконуються нерівності:

$$D \leq D_{\text{такт}}; H_{\text{min}} \leq H \leq H_{\text{max}}, \quad (2)$$

Якщо нерівність не виконується, то необхідно перейти до п. 1, де переглянути і ввести інші вхідні дані.

5. Розраховується поточне значення часу за формулою:

$$t = t_0 + \Delta t, \quad (3)$$

де Δt – часовий такт моделювання руху ПО.

6. Визначається швидкість повітряного об'єкта $v(h)$ для висоти $h(t)$.

7. Проводиться розкладення вектору швидкості $v(h)$ на складові $v_x(t), v_y(t), v_h(t)$ відповідно до курсу польоту повітряного об'єкта за значеннями поточних координат повітряного об'єкта $f(t), l(t), h(t)$ та координат точки призначення F, L, H .

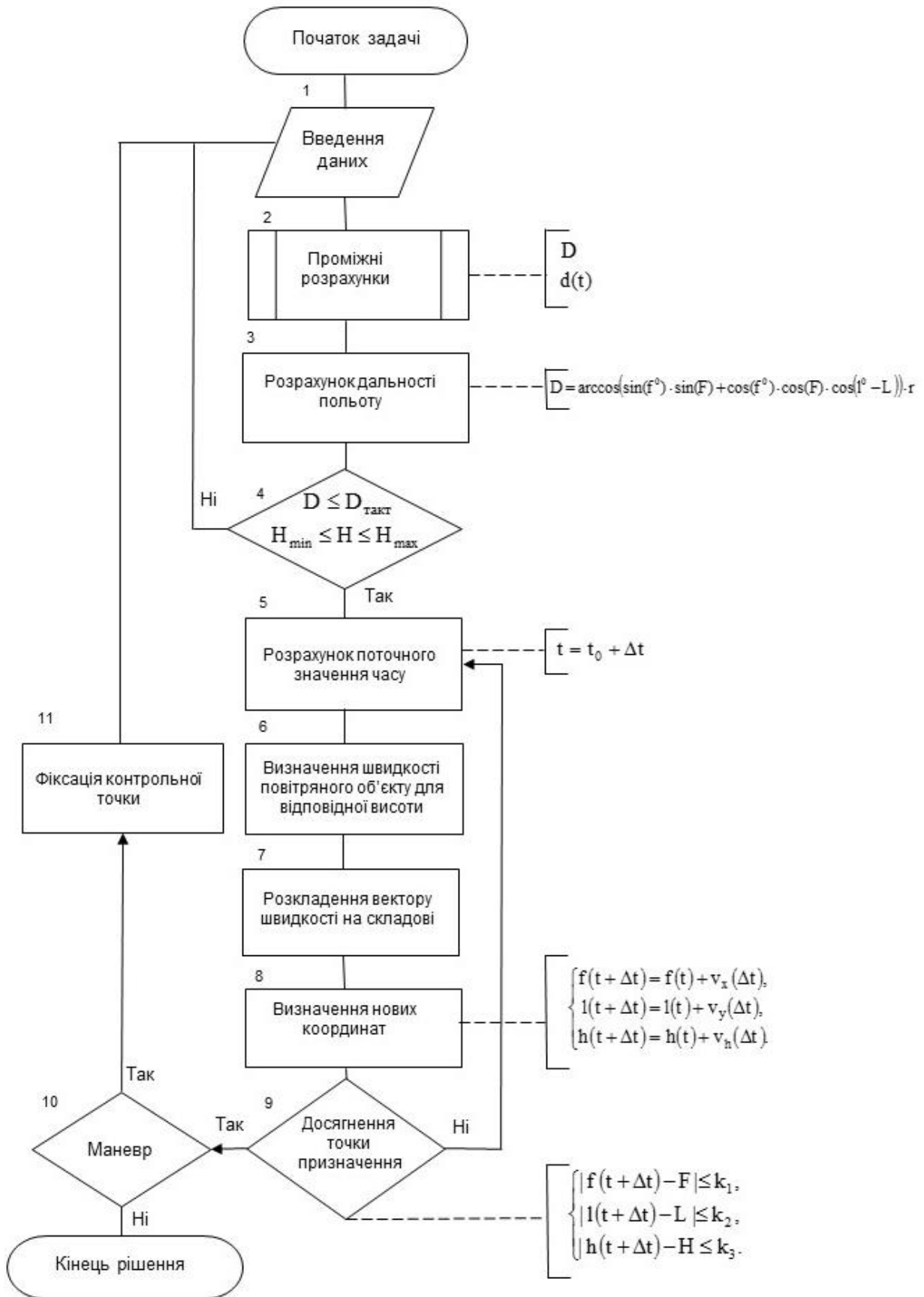


Рис. 2. Блок-схема моделі руху повітряного об'єкту

8. Розраховується приріст координат повітряного об'єкта за часовий такт Δt та нові координати повітряного об'єкта за формулою:

civil security. DOI: 10.52363/2524-0226-2023-37-23

$$\begin{cases} f(t + \Delta t) = f(t) + v_x(\Delta t), \\ l(t + \Delta t) = l(t) + v_y(\Delta t), \\ h(t + \Delta t) = h(t) + v_h(\Delta t). \end{cases} \quad (4)$$

9. Виконується перевірка досягнення повітряним об'єктом точки призначення:

$$\begin{cases} |f(t + \Delta t) - F| \leq k_1, \\ |l(t + \Delta t) - L| \leq k_2, \\ |h(t + \Delta t) - H| \leq k_3. \end{cases} \quad (5)$$

Значення констант k_1, k_2, k_3 повинні забезпечувати логічний висновок про досягнення повітряним об'єктом точки призначення та відповідати відповідному рівню передачі даних про обстановку.

При невиконанні системи (5) необхідно перейти до виконання п.5 (визначення поточного значення часу) даного алгоритму.

10. Опис руху у разі здійснення маневру. Для повітряного об'єкту, який маневрує, процес імітації маневру досягається шляхом послідовної заміни кінцевої точки призначення для повітряного об'єкту на деяку контрольну точку. Тобто повітряний об'єкт повинен послідовно проходити через певні контрольні точки до досягнення точки призначення.

11. Здійснюється фіксація контрольної точки з внесенням змін у вхідні дані.

Таким чином, робота моделі може проходити декілька циклів з відтворенням руху повітряного об'єкту з урахуванням усіх видів маневру.

У разі виконання системи (5) при тому, що маневрування не здійснюється, вважається, що повітряний об'єкт досяг точки призначення і подальше моделювання руху припиняється.

Враховуючі отримані результати моделювання вибір способу верифікації моделі здійснено з урахуванням наступних міркувань.

Відомо, що найпростішою мірою адекватності моделі може бути відхилення деякої характеристики y_o оригіналу і y_m моделі, $\Delta y = |y_o - y_m|$ або $\Delta y = \frac{|y_o - y_m|}{y_o}$.

Тоді можна вважати, що модель адекватна з системою, якщо ймовірність того, що відхилення Δy не перевищує граничної величини Δ , більшої за допустиму ймовірність P_Δ : $P(\Delta y \leq \Delta) \geq P_\Delta$. Разом з тим, практичне використання даного критерію неможливе з таких причин, що на даному етапі дослідження відсутня можливість априорного точного завдання граничних відхилень Δ та допустимих ймовірностей P_Δ .

Тому верифікацію моделі доцільно провести шляхом експертного аналізу результатів моделювання за методикою, що застосовується до так званих штабних моделей [19] з врахуванням аналізу підходів щодо встановлення значущості показників (факторів) під час експертного оцінювання [20]. Головними вимогами, які визначають придатність штабних математичних моделей до практичного застосування, є вимоги до їх достовірності та оперативності.

Достовірність результатів може оцінюватись спеціальним показником достовірності R ($R \leq 1$):

$$R = 1 - \sum_{\substack{j=1 \\ i \in q_j}} \beta_j \cdot \alpha_i, \quad (6)$$

де α_i – вага важливості i -го параметру або фактору у відносних одиницях, які враховуються в моделі; q_j – множина факторів, що враховуються в моделі j -им способом узагальнення; β_j – відносне середнє значення погрішності, яке вноситься в розрахунки внаслідок неточного (узагальненого) обліку параметрів і факторів.

Урахування факторів у моделі здійснюється різноманітними методами їх узагальнення, кожний з яких характеризується своїми методичними похибками і своїми значеннями відносної середньої похибки, що вноситься в розрахунки внаслідок неточного (узагальненого) урахування факторів. Значення цих похибок істотно залежать від способу узагальнення значущих факторів у розрахунковій задачі. У ряді науково-дослідних робіт, показано, що значення відносної похибки β_j ($j = 1, 2, 3, 4$) залежно від способу урахування факторів звичайно знаходиться в таких межах:

$\beta_1=0$ – при безпосередньому урахуванні фактору шляхом задання його поточного значення, що відповідає значенню в реальному процесі;

$\beta_2=0,45$ – при простому узагальненні (заміні сукупності різноманітних, але однорідних за фізичним змістом факторів одним фактором);

$\beta_3=0,6$ – при функціональному і концептуальному узагальненні різнорідних факторів з метою відображення їх у задачі одною представницькою величиною;

$\beta_4=1,0$ – при непрямому або неявному урахуванні факторів.

Перелік значущих факторів, що враховуються у розробленій моделі наведений у табл.1.

Табл. 1. Шкала значущих факторів і параметрів, що враховуються при моделюванні

№, з/п	Найменування фактору (параметру), що враховуються	Вага (α_i) фактору (параметру)	Спосіб урахування фактору (параметру) (β_j)	
			M1	M2
1.	Координати повітряного об'єкту в момент часу t	0,078	0	0
2.	Координати точки призначення	0,087	0,45	0,45
3.	Дальність по поверхні Землі між положенням повітряного об'єкту в даний час до точки призначення	0,063	1	0,45
4.	Запас ходу для даного повітряного об'єкта	0,073	1	0
5.	Дальність польоту повітряного об'єкту	0,095	1	0
6.	Мінімальна та максимальна висота польоту повітряного об'єкту	0,075	0,45	0,45
7.	Поточне значення часу польоту	0,092	0,45	0
8.	Швидкість польоту повітряного об'єкту для відповідної висоти	0,142	0,6	0,45
9.	Вектор швидкості	0,142	0,6	0,45
10.	Факт досягнення повітряним об'єктом точки призначення	0,153	0,45	0,6
Значення показника R			0,416	0,679

Пріоритет (значущість) факторів визначені експертним шляхом, а спосіб їх

урахування залежно від того, як це робиться у моделі. Порівнянню підлягали існуюча (графоаналітична) модель [9] (M1) та розроблена у роботі (M2). Розрахунки проведені за допомогою програми, розробленої у середовищі Microsoft Office Excel.

6. Формалізація задачі підготовки й прийняття рішень щодо вибору маршруту руху

До інформаційно-аналітичної системи забезпечення процесів управління мають входити алгоритми для вирішення завдань різного рівня управління. Тому органи управління при прийнятті рішень повинні мати можливість враховувати ці алгоритми в імітаційних умовах обстановки в зоні НС.

БПЛА можуть застосовуватись для виконання завдань розвідки або пошуку в зоні НС. Основна функція – надання інформації. Органи управління приймають рішення щодо застосування БПЛА в умовах природної невизначеності. У такому разі можна говорити про ступінь достовірності вибору напрямку руху, або ступеня належності цього напрямку до нечіткої множини можливих напрямків руху. Отже, пропонується розглядати питання прогнозу застосування моделі руху з точки зору природної (нестохастичної) невизначеності, тому такі фактори, як розподіл напрямків руху, вибір ешелонів висот групи повітряних об'єктів, розподіл їх за об'єктами ведення оперативних дій, можна аналізувати методами теорії нечітких множин.

Виходячи з теорії множин, задача розпізнавання напрямку руху формалізується таким чином:

V – множина об'єктів ведення оперативних дій, де можуть застосовуватись БПЛА (постраждалі, зони забруднення, зони руйнувань, осередки горіння і т.п.), b_i – елемент множини V , $i = [1, \dots, I]$;

R_1 – властивість елемента b_i (включення цього елемента до плану ведення оперативних дій);

D – множина БПЛА, які можуть працювати по об'єкту ведення оперативних дій, d_j – елемент множини D , $j = [1, \dots, J]$;

R_2 – властивість повітряного засобу (даний засіб може працювати по будь-якому об'єкту).

Відношення R – даний БПЛА, що діє по даному об'єкту, являтиме собою функцію $R : (V, D) \rightarrow [0, 1]$, що ставить у відповідність кожній парі елементів $(b_i, d_j) \in V \times D$ величину $\mu_R(b_i, d_j)$ – функцію належності відношення. Відношення R можна записати у вигляді матриці, в якій найменування стовпців є елементами множини V , найменування рядків – елементами множини D , елементами ж матриці є значення функції належності:

$$R = \begin{matrix} & b_1 & b_2 & \dots & b_i \\ d_1 & \mu_R(b_1, d_1) & \mu_R(b_2, d_1) & \dots & \mu_R(b_i, d_1) \\ d_2 & \mu_R(b_1, d_2) & \mu_R(b_2, d_2) & \dots & \mu_R(b_i, d_2) \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ d_j & \mu_R(b_1, d_j) & \mu_R(b_2, d_j) & \dots & \mu_R(b_i, d_j) \end{matrix} \quad (7)$$

Для отримання елементів матриці (6) доцільно провести відповідні розрахунки динамічних характеристик БПЛА. Для цього введем відповідні коефіцієнти:

$K_{\text{дал}}^{ji}$ – коефіцієнт, який враховує дальність j -го БПЛА до i -го об'єкта оперативних дій (чим ближче БПЛА до об'єкта, тим більше достовірність інформації по цьому об'єкту);

$K_{\text{пар}}^{ji}$ – коефіцієнт, який враховує параметр руху j -го БПЛА відносно i -го об'єкта оперативних дій (чим менше параметр БПЛА відносно об'єкта, тим більша достовірність інформації по цьому об'єкту).

Фізичний зміст коефіцієнтів показано на рис. 3.

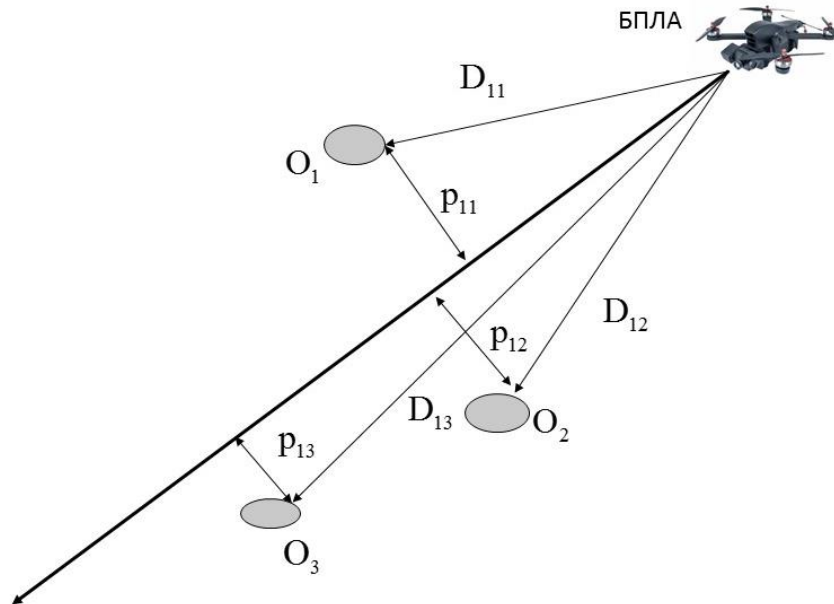


Рис. 3. Фізичний зміст коефіцієнтів $K_{\text{дал}}^{ji}$ та $K_{\text{пар}}^{ji}$

Порядок розрахунку цих коефіцієнтів:

$$S = \sum_{j=1}^J \sum_{i=1}^I D_{ji}; \quad (8)$$

$$K_{\text{дал}}^{ji} = \frac{S - D_{ji}}{S}, \quad (9)$$

де S – часткова змінна; D_{ji} – відстань між j -м БПЛА та i -м об'єктом оперативних дій поверхнею Землі (1).

$$S = \sum_{j=1}^J \sum_{i=1}^I p_{ji}; \quad (10)$$

$$K_{\text{пар}}^{ji} = \frac{S - p_{ji}}{S}, \quad (11)$$

де p_{ji} – параметр руху j -го БПЛА відносно i -го об'єкта оперативних дій.

Для розрахунку параметра руху j -го БПЛА відносно i -го об'єкта необхідно знати:

X_j^t, Y_j^t – координати j -го БПЛА у даний момент часу;

X_j^{t-1}, Y_j^{t-1} – координати j -го БПЛА у попередній момент часу;

X_i, Y_i – координати i -го об'єкта оперативних дій.

Використовуючи відомі формули геометрії рівняння прямої a , що проходить через точки (X_j^t, Y_j^t) та (X_j^{t-1}, Y_j^{t-1}) буде мати вигляд:

$$\frac{x - X_j^t}{X_j^{t-1} - X_j^t} = \frac{y - Y_j^t}{Y_j^{t-1} - Y_j^t}, \quad (12)$$

а прямої b , перпендикулярної прямій a , що проходить через (X_i, Y_i) :

$$y - Y_i = \frac{X_j^t - X_j^{t-1}}{Y_i - Y_j^{t-1}} \cdot x + \frac{(X_j^{t-1} - X_j^t) \cdot X_i}{Y_i - Y_j^{t-1}}. \quad (13)$$

Вирішуючи систему рівнянь (12, 13), знайдемо координати точки $C(X', Y')$ – перетин прямої a та b :

$$X' = \frac{\left(\frac{X_i \cdot (X_j^{t-1} - X_j^t)}{Y_j^{t-1} - Y_j^t} + Y_i + \frac{X_j^t \cdot (Y_j^{t-1} - Y_j^t)}{X_j^{t-1} - X_j^t} - Y_j^t \right) \cdot (Y_j^{t-1} - Y_j^t) \cdot (X_j^{t-1} - X_j^t)}{(Y_j^{t-1} - Y_j^t)^2 + (X_j^{t-1} - X_j^t)^2}, \quad (14)$$

$$Y' = \left(\frac{(Y_j^{t-1} - Y_j^t) \cdot X_i}{X_j^{t-1} - X_j^t} \right) + \left(\frac{(Y_j^{t-1} - Y_j^t)^2 \cdot Y_i}{(X_j^{t-1} - X_j^t)^2} \right) - \frac{\frac{(Y_j^{t-1} - Y_j^t) \cdot X_j^t}{(X_j^{t-1} - X_j^t)} + Y_j^t}{1 + (Y_j^{t-1} - Y_j^t)^2 + (X_j^{t-1} - X_j^t)^2}. \quad (15)$$

Знаючи координати об'єкта та координати БПЛА можна знайти r^{ji} як дальність між об'єктом та точкою, в яку опущений перпендикуляр з точки розташування об'єкта на пролонговану трасу БПЛА (рис. 2).

Значення функції належності (7) з урахуванням того, що коефіцієнти (9), (11), протягом усього часу ліквідації НС мають рівний ступінь важливості для розпізнавання дій БПЛА розраховується за формулою:

$$\mu_R(b_i, d_j) = K_{\text{дал}}^{ji} \cdot K_{\text{пар}}^{ji}. \quad (16)$$

Після заповнення матриці (16) можна знайти показник ефективності розпізнавання дій БПЛА – динамічної важливості БПЛА.

Динамічну важливість БПЛА визначаємо за формулою:

$$V_{d_j} = \frac{\sum_{i=1}^I \mu(b_i, d_j)}{\sum_{i=1}^I \sum_{j=1}^J \mu(b_i, d_j)}. \quad (17)$$

Таким чином, процес вибору необхідного маршруту руху БПЛА формалізовано у матрицю належності, аналіз якої дає можливість вибрати відповідний маршрут за значеннями функції належності та показника динамічної важливості БПЛА.

7. Обговорення результатів побудови моделі руху повітряного об'єкту

Отримані результати обумовлені дослідженням характеристик процесу функціонування системи управління оперативними діями з використанням БПЛА математичними методами, в ході яких проведена формалізація цього процесу, тобто побудована модель імітації руху БПЛА в зоні НС.

Згідно з призначенням модель повинна дозволяти проводити багатократні розрахунки по різноманітних варіантах набору вхідних даних, при цьому час одного прогону моделі (вимога до оперативності) не повинен перевищувати декількох хвилин. Основна перевага такого моделювання: властивість кратності моделювання. Проте, в силу наявності випадкових факторів в пошуково-рятувальних операціях, однократний прогін моделі не дозволяє одержувати статистично стійкі результати.

Разом з тим, реалізація формул (3–5) обмежується певними емпіричними даними. Так дискусійними залишаються питаннями визначення так званого часового такту руху повітряного об'єкта та значень констант k_1, k_2, k_3 . Для цього необхідно розуміти в якому діапазоні змін розрахункових параметрів пошуково-рятувальної операції має бути забезпечена можливість відповідного дослідження. Очевидним є те, що такт обміну інформацією між елементами системи управління повинен бути одного значення, тому часовий такт моделювання руху повітряного об'єкта є змінним. Щодо значень констант – $k_1 = k_2$. Так, наприклад, у сфері застосування повітряних сил і протиповітряної оборони такий діапазон складає: у просторі – 500–1000 км, у часі – не менше 30 хв; задовільна точність проведення розрахунків просторових характеристик складе 1,5–2 км, часових характеристик – 15 с.

Формалізація задачі підготовки й прийняття рішень щодо вибору маршруту руху БПЛА зведена до формування матриці належності, що дає можливість розглядати всі можливі варіанти руху. Особливість запропонованого підходу в тому, що він дає можливість проводити розіграші варіантів дій на етапах завчасної підготовки. Чим більше проведено розіграшів варіантів дій на етапах завчасної підготовки, тим вищою буде ефективність роботи органів управління з керівництва силами в зоні НС.

Введені коефіцієнти (9), (11), протягом усього часу ліквідації НС можуть мати різний ступінь важливості. Тоді під час розрахунку значення функції належності (16) необхідно ввести відповідну вагу кожного коефіцієнта. При цьому, вибір вагових коефіцієнтів має здійснюватися за умови, що їх сума дорівнює 1. Крім того, кількість коефіцієнтів для отримання елементів матриці (16) може бути збільшена, що придасть лише більшої достовірності результатам розрахунку. Але для цього потрібно досліджувати властивості конкретного типу БПЛА.

У сучасних системах підтримки прийняття рішень результати моделювання можуть бути реалізовані на високому професійно-технічному рівні в процесі застосування програмного забезпечення пакету MATLAB або Simulink, що забезпечує широкий спектр функціональних можливостей. Разом з тим, ідея використання відповідних констант k_1, k_2, k_3 в якості представницьких величин при функціональному і концептуальному узагальненні різнорідних факторів ($\beta_j = 0,6 - \text{п.10}$

табл. 1) може нести певні труднощі під час математичного опису цих показників як інтегральних.

Розвиток даного дослідження передбачає програмну реалізацію моделі з використанням блоку MATLAB UAV Guidance Model та тестування з використанням середовища Cuboid World, проведення експерименту з використанням реального зразку серії DJI MAVIC 3 та симуляції його руху за допомогою RRT та Guidance Model.

Модель необхідно розглядати як окремий модуль із розрахунком на наступне дослідження її характеристик, як окремого блока, в загальній моделі оперативних дій, що ведуться всіма активними елементами, які складають систему. Для цього необхідно напрацювати певну емпіричну базу даних.

8. Висновки

1. Розроблено модель імітації руху повітряного об'єкта в зоні надзвичайної ситуації з урахуванням можливого його маневру. Її використання дає змогу в процесі обміну інформацією між елементами системи автоматизованого управління робити логічний висновок про досягнення повітряним об'єктом потрібної точки призначення. Імітація руху повітряного об'єкта зводиться до аналітичного опису його руху з урахуванням можливого маневру у географічній системі координат. Достовірність результатів підтверджена в результаті експертної оцінки методом зважених сум. Значення інтегрального показника достовірності $R = 0,679 < 1$, що показує придатність розробленої моделі до практичного застосування. Крім того, за рахунок реалізації способу безпосереднього урахування факторів шляхом задання їх поточних значень, що відповідають значенням в реальному процесі, вдалося перевищити значення інтегрального показника достовірності моделі на 50 % ніж для відповідних аналогів.

2. Проведено формалізацію задачі підготовки й прийняття рішень щодо застосування відповідної моделі руху безпілотної літальної апарату. Процес вибору необхідного маршруту руху безпілотної літальної апарату формалізовано у матрицю належності, аналіз якої дає можливість вибрати відповідний маршрут за значеннями функції належності та показника динамічної важливості безпілотної літальної апарату. Запропонований підхід потребує програмної реалізації, що дасть можливість на основі застосування сучасних методів моделювання удосконалити управління оперативними діями рятувальних формувань за рахунок інтегрування розробленої моделі в систему автоматизованого управління. В контексті задач, що виконуються, та структури системи управління отримані результати доцільно розглядати як складову інформаційно-аналітичної моделі процесів підготовки й прийняття рішень.

Література:

1. Drone rescues mapped. URL: <https://enterprise.dji.com/drone-rescue-map>
2. MOBNET. URL: <http://mobnet-h2020.eu> (дата звернення 30.02.2023).
3. Structural and functional simulation of interaction in the field of aviation safety by using matrices / Hr. Drobakha and others. Archives of Materials Science and Engineering. 2019. Vol. 95. Issue. 2. P. 67–76. URL: <http://repositsc.nuczu.edu.ua/handle/123456789/9000>
4. Ausonio E., Bagnerini P., Ghio M. Drone Swarms in Fire Suppression Activities: A Conceptual Framework. Drones. 2021. 5(1):17. 22 p. doi: 10.3390/

drones5010017

5. Kinaneva D., Hristov G., Raychev J., Zahariev P. Early Forest Fire Detection Using Drones and Artificial Intelligence. 42nd International Convention on Information and Communication Technology, Electronics and Microelectronics (MIPRO). 2019. P. 1060–1065. doi: 10.23919/MIPRO.2019.8756696.

6. Julian Turner. The drones being developed to inspect Fukushima. NS ENERGY URL: <https://www.nsenergybusiness.com/news/fukushima-daiichi-drones/>

7. Bednář D., Otáhal P., Němeček L., Geršlová E. The analytical approach of Drone use in radiation monitoring. Radioprotection. 2021. 56(1). P. 61–67. doi: 10.1051/radiopro/2020066

8. Rahmani W, Wang W-J, Chen H-C. Real-Time Detection and Recognition of Multiple Moving Objects for Aerial Surveillance. Electronics, 2019. 8(12). 16 p. doi: 10.3390/electronics8121373

9. Гусак О. М. Інформаційна технологія раннього виявлення лісових пожеж за допомогою безпілотних літальних апаратів : дис. канд. техн. наук : 05.13.06 / ЛУБЖД. Львів, 2018. 187 с. URL: <https://sci.ldubgd.edu.ua/handle/123456789/5576>

10. Захарченко Ю. В., Іванець Г. В., Іванець М. Г., Калугін В. Д., Тютюник В. В. Формування трас польоту безпілотних літальних апаратів під час оперативного моніторингу окремої місцевості, де сталася надзвичайна екологічна ситуація. Техногенно-екологічна безпека. 2022. № 11(1/2022). С. 23–33. doi: 10.52363/2522-1892.2022.1.4

11. Mellinger D., Michael N., Kumar V. Trajectory generation and control for precise aggressive maneuvers with quadrotors. The International Journal of Robotics Research. 2012. № 31(5). P. 664–674. doi:10.1177/0278364911434236

12. Beard Randal W., Timothy W. McLain. Small Unmanned Aircraft: Theory and Practice. Princeton, N.J: Princeton University Press, 2012. 320 с. URL: <https://www.perlego.com/book/735217/small-unmanned-aircraft-theory-and-practice-pdf>

13. Hornung A., Kai M. Wurm, Bennewitz M., Stachniss C., Burgard W. Map O. An Efficient Probabilistic 3D Mapping Framework Based on Octrees. Autonomous Robots. 2013. № 3 (April 2013). P. 189–206. doi: 10.1007/s10514-012-9321-0

14. Rachmanto A., Iswanto I., Hernawati H. Simulation and modeling of aircraft movements passing through VOR. IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. 2020. 6 p. doi: 10.1088/1757-899X/830/3/032021

15. John W., Robinson C. A Generic Model of Aircraft Dynamics. FOI Swedish Defence Research Agency, 2012. 50 p. URL: <https://www.foi.se/rest-api/report/FOI-R--3185--SE>

16. Drone Simulation. Simulate drone algorithms in a virtual environment. URL: <https://www.mathworks.com/discovery/drone-simulation.html>

17. Krzysztofik I., Zbigniew K. Mathematical Model of Movement of the Observation and Tracking Head of an Unmanned Aerial Vehicle Performing Ground Target Search and Tracking. Journal of Applied Mathematics. 2014. Vol. 2014. 11 p. doi: 10.1155/2014/934250

18. Kraszewski T., Czopik G. The air object tracking in 3D space using distance measurements. In Radioelectronic Systems Conference 2019. 2020. Vol. 11442. P. 331–341. doi: 10.1117/12.2565281

19. Суконько С. М., Луньов О. Ю., Мацюк В. В. Модель визначення необхідної кількості сил і засобів для моніторингу оперативної обстановки військовими частинами Національної гвардії України під час проведення масових заходів.

Честь і закон. 2021. № 2(77). С. 58–64. URL: <http://chiz.nangu.edu.ua/article/view/237386>

20. Потеряйко С., Белікова К., Твердохліб О., Орлова Н. Економіко-математичне моделювання прогнозного оцінювання дієвості функціонування єдиної державної системи цивільного захисту. Фінансово-кредитна діяльність: проблеми теорії і практики. 2022. Т. 1. № 42. С. 293–303. doi: 10.55643/fcaptr.1.42.2022.3676

*O. Kovalev, PhD, Associate Professor, Associate Professor of the Department
I. Neklonskyi, PhD, Lecturer of the Department
National University of Civil Defence of Ukraine, Kharkiv, Ukraine*

SIMULATION OF THE MOVEMENT OF AN UNMANNED AIRCRAFT IN THE EMERGENCY ZONE

The work reveals problematic issues related to the introduction of unmanned aerial vehicles into the system of operational actions of civil defense units and the integration of their use into a single management system for liquidation of an emergency situation. A mathematical model for simulating the movement of unmanned aerial vehicles in a high-quality zone has been developed. It is supposed to be used in the process of exchanging information between the elements of the automated control system. This model makes it possible to make a logical conclusion about the achievement of the required destination point by the air object. The model description algorithm is reduced to the analytical movement of an aerial object with the corresponding possible maneuver in the geographic coordinate system. The work of the model can take place in several cycles. Reproduction of the movement of an aerial object is carried out taking into account all types of maneuver. With this, each point of movement change will be considered as an intermediate point of the object, the final destination point has not been reached. The conditions under which the air object will reach the desired destination point are given. It is substantiated that their correct application will be only within a clear section of changes in the calculation parameters of search and rescue operations. The model allows for multiple calculations based on different options for the input data set. The model can be used as a separate block of the model of operational actions, which is conducted by all active elements of the system. The proposed approach makes it possible to improve the management of operational actions of rescue formations. The obtained results can be considered as a component of the information model of preparation and decision-making processes.

Keywords: unmanned aerial vehicle, motion simulation, model, destination point, coordinates, maneuver

References

1. Drone rescues mapped. Available at: <https://enterprise.dji.com/drone-rescue-map>
2. MOBNET. Available at: <http://mobnet-h2020.eu>
3. Drobakha, H., Neklonskyi, I., Kateshchenok, A., Sobyna, V., Taraduda, D., Borysova, L., Lysachenko, I. (2019). Structural and functional simulation of interaction in the field of aviation safety by using matrices. Archives of Materials Science and Engineering, 2(95), 74–84. Available at: <http://repositsc.nuczu.edu.ua/handle/123456789/9000>
4. Ausonio, E., Bagnerini, P., Ghio, M. (2021). Drone Swarms in Fire Suppression Activities: A Conceptual Framework. Drones, 5(1), 17. doi: 10.3390/drones5010017
5. Kinaneva, D., Hristov, G., Raychev, J., Zahariev, P. (2019). Early Forest Fire Detection Using Drones and Artificial Intelligence. 42nd International Convention on Information and Communication Technology, Electronics and Microelectronics (MIPRO). IEEE. doi: 10.23919/MIPRO.2019.8756696
6. Turner, J. The drones being developed to inspect Fukushima. NS ENERGY : Available at: <https://www.nsenergybusiness.com/news/fukushima-daiichi-drones/>
7. Bednář, D., Otáhal, P., Němeček, L., Geršlová, E. (2020). The analytical approach of Drone use in radiation monitoring. Radioprotection, 56(1), 61–67. doi:

10.1051/radiopro/2020066

8. Rahmani, W., Wang, W.-J., Chen, H.-C. (2019). Real-Time Detection and Recognition of Multiple Moving Objects for Aerial Surveillance. *Electronics*, 8(12), 1373. doi: 10.3390/electronics8121373

9. Husak, O. M. (2018). Information technology for early detection of forest fires using unmanned aerial vehicles. (Diss. Ph.D.). Lviv University of Life Safety, Lviv. Available at: <https://sci.ldubgd.edu.ua/handle/123456789/5576>

10. Zakharchenko, Y. V., Ivanets, G. V., Ivanets, M. G., Kalugin, V. D., Tyutyunyk, V. V. (2022). Formation of flight paths of unmanned aerial vehicles during operational monitoring of a separate area where an emergency environmental situation occurred. *Technological and environmental safety*, (11 (1/2022)), 23–33. doi: 10.52363/2522-1892.2022.1.4

11. Mellinger, D., Michael, N., Kumar, V. (2012). Trajectory generation and control for precise aggressive maneuvers with quadrotors. *The International Journal of Robotics Research*, 31(5), 664–674. doi: 10.1177/0278364911434236

12. Beard, R. W., McLain, T. W. (2012). *Small Unmanned Aircraft: Theory and Practice*. Princeton University Press. Available at: <https://www.perlego.com/book/735217/small-unmanned-aircraft-theory-and-practice-pdf>.

13. Hornung, A., Wurm, K. M., Bennewitz, M., Stachniss, C., Burgard, W. (2013). OctoMap: an efficient probabilistic 3D mapping framework based on octrees. *Autonomous Robots*, 34(3), 189–206. doi: 10.1007/s10514-012-9321-0

14. Rachmanto, A. D., Iswanto, I., Hernawati, H. (2020). Simulation and modeling of aircraft movements passing through VOR. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 830, 032021. doi:10.1088/1757-899X/830/3/032021

15. Robinson, John W. C. (2012). *A Generic Model of Aircraft Dynamics*. FOI Swedish Defence Research Agency. Available at: <https://www.foi.se/rest-api/report/FOI-R--3185--SE>

16. Drone Simulation. Simulate drone algorithms in a virtual environment. Available at: <https://www.mathworks.com/discovery/drone-simulation.html>

17. Krzysztofik, I., Koruba, Z. (2014). Mathematical Model of Movement of the Observation and Tracking Head of an Unmanned Aerial Vehicle Performing Ground Target Search and Tracking. *Journal of Applied Mathematics*, 2014, 1–11. doi: 10.1155/2014/934250

18. Kraszewski, T., Czopik, G. (2020). The air object tracking in 3D space using distance measurements. *Radioelectronic Systems Conference 2019*. SPIE. doi: 10.1117/12.2565281

19. Sukonko, S. M., Lunyov, O. Yu., Matsyuk, V. V. (2021). Model for determining the necessary number of forces and means for monitoring the operational situation by military units of the National Guard of Ukraine during mass events. *Honor and law*, (77), 58–64. Available at: <http://chiz.nangu.edu.ua/article/view/237386>

20. Poteryaiko, S., Belikova, K., Tverdokhlib, O., Orlova, N. (2022). Economic-mathematical modeling of predictive assessment of the effectiveness of the functioning of the unified state system of civil protection. *Financial and Credit Activity Problems of Theory and Practice*, 1(42), 293–303. doi: 10.55643/fcaptp.1.42.2022.3676

Надійшла до редколегії: 13.03.2023

Прийнята до друку: 17.04.2023