

УДК [358.238]:621.396.96

Лисенко О.І., д.т.н., професор¹;
 Хазанович О.І., д.т.н., професор²;
 Чеканова І.В., к.т.н., с.н.с.³;
 Андрієвський А.П., к.т.н., с.н.с.²

¹ - Інститут телекомунікаційних систем Національного технічного університету України "Київський політехнічний інститут";

² - Центральний науково-дослідний інститут Збройних Сил України;

³ - Центр воєнно-стратегічних досліджень Національного університету оборони України імені Івана Черняхівського

Визначення безпечного району розміщення, маршрутів пересування та забезпечення безперервним зв'язком пошуково-рятувальних бригад в умовах ліквідації надзвичайних ситуацій природного та техногенного характеру

Определение безопасного района размещения, маршрутов передвижения и обеспечения непрерывной связью поисково-спасательных бригад, в условиях ликвидации чрезвычайных ситуаций природного и техногенного характера

Economic researches are in relation to the removal of consequences of influence of negative factors on the personnel of base districts of placing of detachments of liquidation of consequences of failure

Резюме. В матеріалах статті розглядається способи щодо визначення безпечного району розміщення, маршрутів пересування та забезпечення безперервним зв'язком пошуково-рятувальних бригад в умовах ліквідації наслідків аварії, зниження енерговитрат польоту безпілотних літальних апаратів та забезпечення високої пропускної здатності епізодичної радіомережі.

Резюме. В матеріалах статті розглядається способи визначення безпечного району розміщення, маршрутів передвиження та забезпечення непрерывной связью поисково-спасательных бригад, в условиях ликвидации последствий аварии, снижения энергозатрат полета беспилотных летательных аппаратов и обеспечения высокой пропускной способности эпизодической радиосети.

Resume. In materials of the article examined methods in relation to determination of safe district of placing, routes of movement and providing of searching-rescue brigades continuous connection, in the conditions of liquidation of consequences of failure, decline of energovitrat of flight of bezpilotnikh aircrafts and providing of high carrying capacity of episodic radio network.

Ключові слова: безпечні райони розміщення, пошуково-рятувальні бригади, безпілотні літальні апарати, пропускна здатність епізодичної радіомережі.

Ключевые слова: безопасные районы размещения, поисково-спасательные бригады, беспилотные летательные аппараты, пропускная способность эпизодической радиосети.

Keywords: safe districts of placing, searching-rescue brigades, bezpilotni aircrafts, carrying capacity of episodic radio network.

Постановка проблеми. На початку XXI спостерігається значне зростання антропогенного навантаження на природні екосистеми, яке призводить до їх деградації, руйнування

природних ландшафтів що створює певні ризики загрози біорізноманіттю. Виконання завдань щодо ліквідації наслідків екологічного лиха з метою покращення стану навколишнього

природного середовища на сьогодні є актуальним. В умовах надзвичайних ситуацій, зокрема, техногенних аварій або катастроф, важливим завданням стало усунення впливу негативних факторів на особовий склад пошуково-рятувальних бригад за допомогою визначення положення безпечних районів щодо розміщення пошуково-рятувальних бригад, підтримання якісного зв'язку під час виконання завдань з ліквідації наслідків надзвичайних ситуацій техногенного та природного характеру з метою нормалізації обстановки на окремій території (об'єкті).

Ступень розробленості проблеми. На сьогодні положення безпечних районів розміщення (РР) пошуково-рятувальних бригад ліквідації наслідків аварії (ПРБЛНА) відносно району аварії визначається в результаті оцінки району аварії, її наслідків та можливого впливу негативних факторів на особовий склад, що перебуває в РР ПРБЛНА, майже емпірично. Універсального способу для визначення положення таких РР ПРБЛНА, з урахуванням імовірнісного характеру впливу негативних факторів на особовий склад ПРБЛНА, до останнього часу не існувало [1].

Для збору інформацію про стан та параметри функціонування мережі або її зони, застосовують один з відомих методів маршрутизації [1]. Його недоліками є: низька мобільність вузлів зв'язку пунктів управління; невиконання вимог продуктивності, надійності, забезпечення радіозв'язку між мобільними абонентами; невиконання імовірнісно-часових характеристик інформаційного обміну; низька автоматизація процесів встановлення, ведення та підтримки радіозв'язку; моральна та фізична застарілість засобів радіозв'язку.

В [2, 3, 4] розглядався спосіб визначення безпечного району розміщення та маршрутів пересування пошуково-рятувальних бригад в умовах ліквідації наслідків екологічного лиха, за яким в повітря піднімався безпілотний літальний апарат, на земній поверхні утворювалась зона радіо покриття фіксованого радіусу, забезпечувався епізодичний зв'язок між пошуково-рятувальними бригадами у радіомережі та визначались координати остаточного розміщення одного безпілотного літального апарату методом градієнтного спуску. Недоліками в даному випадку є те, що для реалізації способу застосовується розміщення лише одного безпілотного літального апарату, який не забезпечує зв'язність потрібної кількості мобільних абонентів. Цей спосіб забезпечував лише створення зони радіопокриття певної кількості мобільних абонентів, але не

забезпечував задані функціональні показники передачі даних в мережі. При великій кількості абонентів в мережі спосіб не дозволяв вирішувати задачу управління положенням безпілотного літального апарату в режимі реального часу.

Метою статті є знаходження способів щодо усунення впливу негативних факторів на особовий склад пошуково-рятувальних бригад за рахунок визначення оптимальної відстані безпечних районів розміщення пошуково-рятувальних бригад, зниження енерговитрат польоту безпілотних літальних апаратів та забезпечення високої пропускної здатності епізодичної радіомережі.

Виклад основного матеріалу. Для визначення безпечного району розміщення, маршрутів пересування та забезпечення безперервним зв'язком пошуково-рятувальних бригад в умовах ліквідації надзвичайних ситуацій природного та техногенного характеру пропонується спосіб, який передбачає вирішення задачі оптимізації щодо визначення відстані РР ПРБЛНА від району, де відбулася аварія, або її епіцентру, якщо він існує, – D , та положення такого району відносно напрямку, за яким визначається величина D , уздовж перпендикуляра до нього довжиною L . Величина L може становити, також, відстань від певного опорного напрямку, паралельного напрямку D , та розташованого від нього ліворуч або праворуч. Таким чином D та L – Декартові координати положення РР ПРБЛНА на площині.

Як цільову функцію такої задачі в найбільш загальному вигляді пропонується розглядати функцію

$$P_{DL} = P(D; L; V_1, \dots, V_k), \quad (1)$$

з обмеженнями

$$\begin{aligned} D_{\min} \leq D \leq D_{\max}, \\ L_{\min} \leq L \leq L_{\max}, \end{aligned} \quad (2)$$

де P_{DL} – визначений показник ефективності застосування ПРБЛНА як функція D, L, V_i ;

V_i – сукупність параметрів, що на відміну від D і L , не можуть бути змінені особою, яка приймає рішення (ОПР) щодо визначення положення РР ПРБЛНА, в межах поставленої задачі;

$$i = 1, 2, \dots, k;$$

k – загальна кількість параметрів V_i ;

D_{\min}, D_{\max} – найменше та найбільше допустимі значення відстані РР ПРБЛНА від району, де відбулася аварія;

L_{min} , L_{max} – найменше та найбільше допустимі значення відстані РР ПРБЛНА від певного опорного напрямку, паралельного напрямку D , та розташованого від нього ліворуч або праворуч.

Визначенню підлягають:

D_{opt} – оптимальне значення відстані РР ПРБЛНА від району, де відбулася аварія;

L_{opt} – оптимальне значення відстані РР ПРБЛНА від певного опорного напрямку, паралельного напрямку D , та розташованого від нього ліворуч або праворуч;

а також D_{min} , D_{max} , L_{min} , L_{max} .

Слід зазначити, що L та окремі з V_i також можуть розглядатися як функції D .

При такому загальному вигляді формулювання задачі її вирішення є проблематичним, тому конкретизуємо постановку задачі.

Позначимо:

P_{zn} – імовірність ураження (знищення) особового складу ПРБЛНА в РР за рахунок впливу джерела аварії;

P_o – імовірність виконання завдання ПРБЛНА, без урахування впливу джерела аварії.

Визначимо показник P_{DL} , як ймовірність виконання завдання ПРБЛНА, з урахуванням впливу джерела аварії.

Тоді цільова функція розглядуваної задачі буде мати вигляд

$$PDL = [1 - P_{zn}] P_o. \quad (3)$$

Запишемо

$$W_{zn} = 1 - P_{zn}, \quad (4)$$

де W_{zn} – ймовірність того, що особовий склад ПРБЛНА в РР не буде уражений (знищений).

Можна записати

$$P_{DL} = W_{zn} P_o. \quad (5)$$

Слід врахувати, що $P_{zn}(D, L)$; $W_{zn}(D, L)$; $P_o(D, L)$; $P_{DL}(D, L)$ – функції (поле) відповідних показників на площині D, L .

Якісне оцінювання зміни величин P_{zn} , W_{zn} , P_o , P_{DL} від D показує, що збільшення D веде до зменшення P_{zn} , P_o , але до збільшення величини W_{zn} . Це дає змогу передбачити існування максимального значення $P_{DL}(D_{opt})$.

Залежність P_{DL} від L потребує додаткового дослідження, але аналогічно слід передбачити наявність деякого максимального значення $P_{DL}(L_{opt})$. Отже, критерієм визначення оптимального рішення розглядуваної задачі буде максимальне значення P_{DL} , а саме

$$\max P_{DL} = W_{zn}(D_{opt}, L_{opt}) P_o(D_{opt}, L_{opt}), \quad (6)$$

з певними обмеженнями

$$\begin{aligned} D_{min} &\leq D \leq D_{max}, \\ L_{min} &\leq L \leq L_{max}, \\ P_{min} &\leq PDL \leq 1, \end{aligned} \quad (7)$$

де P_{min} – мінімально можливе значення ймовірності PDL .

Співвідношення (6), (7) являють собою математичну модель для обґрунтування прийняття рішення ОПР щодо визначення положення РР ПРБЛНА.

Виходячи з характеру функції (6) можна зробити висновок, що задача визначення положення РР ПРБЛНА є стохастичною задачею нелінійного програмування, і запропонувати таку послідовність її вирішення

- крок 1 – визначення $P_{zn}(D, L)$;
- крок 2 – визначення $W_{zn}(D, L)$;
- крок 3 – визначення $P_o(D, L)$;
- крок 4 – визначення $P_{DL}(D, L)$;
- крок 5 – визначення D_{opt} , L_{opt} за критерієм (6), з обмеженням (7).

Таким чином, запропонований спосіб дозволяє визначити положення РР ПРБЛНА (D_{min} , D_{max} , D_{opt} , L_{min} , L_{max} , L_{opt}) залежно від впливу джерела аварії (P_{zn}) завдяки вирішенню задачі нелінійного програмування, заданої співвідношеннями (6), (7).

Спосіб зниження енерговитрат польоту безпілотного літального апарату, реалізується так:

Під час польоту безпілотного літального апарату сигнали X про стан безпілотного літального апарату від блоку датчиків кутових швидкостей, приймача повітряного тиску, супутникового навігаційного приймача для введення в систему інформації про кутові швидкості, повітряний тиск, про географічні координати місця положення безпілотного літального апарату подаються на вхід аналого-цифрового перетворювача, виходи якого підключають на входи обчислювального модуля.

Від аналого-цифрового перетворювача перетворені сигнали $X_B(t)$ надходять до обчислювального модуля, який автоматично оцінює кутове положення безпілотного літального апарату по параметрам курсу, крену, тангажу, поточної і заданої висоти, а також швидкості, автоматично обчислює розузгодження із заданою траєкторією $E(t) = X(t) - X_M(t)$ і забезпечує автоматичне відстежування навігаційних параметрів, використовуючи вхідні дані від супутникової навігаційної системи, та корегування положення безпілотного літального апарату в повітрі.

Процес керування безпілотним літальним апаратом описується рівнянням стану [5]:

$$\begin{aligned} \dot{X} &= A(t)X(t) + B(t)U(t) + \eta(t); \\ Y &= CX(t) + \xi(t), \end{aligned} \quad (8)$$

де $X \in R^n$ – вектор стану БПЛА; $U \in R^n$ – вектор керування; Y – вектор вимірювань $A(t)$, $B(t)$ – $n \times n$ і $n \times m$ матриці параметрів БПЛА; η та ξ – вектор шумів збурень та шумів вимірювання.

Бажана динаміка польоту безпілотного літального апарату з висотною ретрансляційною аероплатформою у разі мінімізації енерговитрат керування задається за допомогою еталонної моделі:

$$\dot{X}_M = A_M X_M(t) + B_M R(t), \quad (9)$$

де $X_M \in R^n$ – вектор стану еталонної моделі, $R \in R^m$ – вектор вхідних дій, A_M , B_M , C_M і D_M – матриці відповідних розмірностей.

Обчислювальний модуль взаємодіє з квазіадаптивним регулятором автоматичного управління польотом адаптера ураховує складові турбулентного вітру, послідовність включення виконавчих засобів та обчислює оптимальну по енерговитратам траєкторію польоту, а модуль стабілізації польоту, розміщений у адаптері, обчислює траєкторію польоту навколо центру мас безпілотного літального апарату в умовах дії інтенсивних зовнішніх збурень формує ідеальні управляючі сигнали $U(t)$ і подає їх через модуль сполучення до виконавчих засобів. Наприклад, квазіадаптивний регулятор автоматичного управління польотом та модуль стабілізації польоту ураховує повздовжню складову турбулентного вітру

$$H_u(s) = \sigma_u \sqrt{\frac{2L_u}{\pi V}} \cdot \frac{1}{1 + \frac{L_u}{V} s}, \quad (10)$$

$$H_p(s) = \sigma_w \sqrt{\frac{0.8}{V}} \cdot \frac{\left(\frac{\pi}{4b}\right)^{\frac{1}{6}}}{L_w^{\frac{1}{3}} \left(1 + \left(\frac{4b}{\pi V}\right) s\right)}, \quad (11)$$

бокову складову турбулентного вітру

$$H_v(s) = \sigma_v \sqrt{\frac{L_v}{\pi V}} \cdot \frac{1 + \sqrt{3} \frac{L_v}{V} s}{\left[1 + \frac{L_v}{V} s\right]^2}, \quad (12)$$

вертикальну складову турбулентного вітру

$$H_w(s) = \sigma_w \sqrt{\frac{L_w}{\pi V}} \cdot \frac{1 + \sqrt{3} \frac{L_w}{V} s}{\left(1 + \frac{L_w}{V} s\right)^2}; \quad (13)$$

$$H_q(s) = \frac{\frac{s}{V}}{1 + \frac{4b}{\pi V} s} \cdot H_w(s). \quad (14)$$

де b – розмах крила літака; L_u , L_v , L_w – відповідні масштаби турбулентності; σ_u , σ_v , σ_w – середньоквадратичні відхилення відповідних компонентів швидкості.

Також квазіадаптивний регулятор автоматичного управління польотом та модуль стабілізації польоту ураховує послідовність включення виконавчих засобів так:

$$\begin{aligned} \dot{x}(t) &= Ax(t) + Bu(t) \\ y(t) &= Cx(t) + Du(t) \end{aligned} \quad (15)$$

де $x \in R^n$ – вектор стану, $u \in R^m$ – вхідний вектор, $y \in R^p$ – вихідний вектор, $x_0 \in R^n$ – вектор стану в момент часу $t = t_0$, а A , B , C і D – матриці відповідних розмірностей.

Квазіадаптивний регулятор автоматичного управління польотом та модуль стабілізації польоту адаптера автоматично формують ідеальні сигнали управління польотом безпілотного літального апарату з мінімальними енерговитратами за рахунок використання функцій Ляпунова та методу градієнтного спуску за умови відомих параметрів безпілотного літального апарату з висотною ретрансляційною аероплатформою. Один із ідеальних сигналів керування з мінімальними енерговитратами описується так:

$$U(t) = K^X X(t) + K^R R(t), \text{ або } U(t) = \bar{K}^R \bar{K}^X X(t) + \bar{K}^R R(t), \quad (16)$$

де $K^X, K^R, \bar{K}^X, \bar{K}^R$ – матриці ідеальних коефіцієнтів регулятора, які задовольняють рівнянням:

$$BK^X = A_M - A, \quad BK^R = B_M, \quad (17),$$

$$B_M \bar{K}^X = A_M - A, \quad B_M \bar{K}^R = B_M. \quad (18)$$

Таким чином, квазіадаптивний регулятор автоматичного управління польотом та модуль стабілізації польоту адаптеру забезпечують автоматичне формування та передавання ідеальних управляючих сигналів 14 (16) через модуль сполучення до виконавчих засобів.

Оптимальна енергозберігаюча траєкторія польоту як формалізована ціль керування розв'язується за рахунок

$$J_0(x(t_0), t_0) = \int_{t_0}^{t_f} [x(t)^T \Psi x(t) + u(t)^T \Phi u(t)] dt + x(t_f)^T \Psi_f x(t_f), \quad (20)$$

де $\Psi \in R^{n \times n}$ і $\Phi_f \in R^{n \times n}$ – симетричні невід'ємно-визначені матриці, а $\Phi \in R^{n \times n}$ – симетрична невід'ємно-визначена матриця.

Оптимальна енергозберігаюча траєкторія польоту описується (19) з урахуванням впливу чинників польоту на безпілотний літальний апарат (турбулентності вітру, кутових швидкостей, повітряного тиску, географічних координат місця положення тощо) та послідовності включення виконавчих засобів. Технічний результат досягається завдяки додатковому застосуванню квазіадаптивної системи автоматичного управління, в якій штучно обчислюється та створюється ідеальний сигнал (16) нелінійного зворотного зв'язку. Цей сигнал складається з результату множення виміряного абсолютного значення змінної, що стабілізується, на величину її відхилення від еталонного значення помноженого на нестационарний масштабований множник, за рахунок чого удається понизити енерговитрати на стабілізацію польоту безпілотного літального апарату з висотною ретрансляційною аероплатформною навколо центру мас на заданій траєкторії в умовах дії інтенсивних збурень.

Суттєвою особливістю функціонування додатково встановленого обладнання керування безпілотним літальним апаратом, наприклад, з висотною ретрансляційною аероплатформною є властивість забезпечувати нову ідеальну траєкторію польоту навколо його центру мас в умовах дії інтенсивних зовнішніх збурень та за траєкторією двох лінійних ділянок і двох розворотів навколо характерної точки із почерговим зниженням та

функціонування квазіадаптивного регулятора автоматичного управління польотом, який визначає найменшу динаміку енерговитрат безпілотного літального апарату:

$$\lim_{t \rightarrow \infty} E(t) = 0, \quad (19)$$

де $E(t) = X(t) - X_M(t)$ – похибка системи (2) і (3).

Під час функціонування квазіадаптивного регулятора автоматичного управління польотом та модуля стабілізації польоту для корегування динаміки польоту безпілотного літального апарату розв'язується задача визначення оптимального управління $u(t)$ на інтервалі $[t_0, t_f]$, так, щоб була мінімальна наступна функція вартості:

набором висоти, порівняно з чинною, та зберігати її у разі змінювання координатних і параметричних збурень в широких межах. Економія енерговитрат (20) під час польоту безпілотного літального апарату з висотною ретрансляційною аероплатформною досягається за рахунок зменшення сили лобового опору під час польоту на лінійних ділянках траєкторії і за рахунок використання потенційної енергії безпілотного літального апарату, яка у разі розвороту переходить в кінетичну, що спричиняє збільшення швидкості польоту і можливості здійснювати розворот на 180° зі зниженням та з подальшим набором висоти з найменшими витратами енергії порівняно з координованим польотом.

Відомо, що безпілотний літальний апарат, наприклад, "Альбатрос" під час польоту тривалістю $T_{\text{чинн}} = 200$ хвилин зі швидкістю 60 км/год за чинною траєкторією витрачає 2 кг палива. Реалізація способу зниження енерговитрат під час польоту безпілотного літального апарату за новою траєкторією забезпечує збільшення тривалості до 40 хвилин та становить $T_{\text{нов}} = 240$ хвилин.

Таким чином, під час польоту безпілотного літального апарату з адаптером, який містить квазіадаптивний регулятор автоматичного управління польотом та модуль стабілізації польоту, тривалістю 200 хвилин економія палива складатиме 0,4 кг, тобто зменшиться на 20% від встановленої виробником витрати палива (20). Водночас, зекономлене паливо забезпечить продовження польоту 40 хвилин за новою траєкторією, а

загальна тривалість уже становитиме 240 хвилин, тобто збільшиться на 20% від встановленої виробником тривалості $T_{чин}$ польоту. За новою траєкторією порівняно з тривалістю $T_{чин}$ польоту за координованою траєкторією:

$$T_{нов} > T_{чин} \quad (21)$$

Висновок. Запропонований спосіб дозволяє визначити положення безпечних районів розміщення, маршрутів пересування пошуково-рятувальних бригад в умовах ліквідації наслідків екологічного лиха завдяки вирішенню задачі нелінійного програмування (співвідношення 6,7), забезпечити економію (20) льотного ресурсу (ресурсів) та безперервний зв'язок (21) рятувальників в небезпечних районах.

При виконанні пересування пошуково-рятувальних бригад забезпечується висока пропускна здатність епізодичної радіомережі, яка досягається за рахунок здійснення технологічних операцій щодо визначення потрібної кількості повітряних ретрансляторів на базі безпілотних літальних апаратів та оптимального їх розміщення у повітряному просторі.

Економія льотного ресурсу досягається за рахунок зменшення сили лобового опору під час польоту на лінійних ділянках траєкторії і за рахунок використання потенційної енергії безпілотного літального апарату, яка під час розвороту переходить в кінетичну, що спричиняє збільшення швидкості польоту і можливості здійснювати розворот на 180° , на початку зі зниженням, після чого з подальшим набором висоти за умови менших витрат енергії порівняно з координованим польотом.

В подальшому пропонується на основі застосування адаптивних та оптимальних по енерговитратам засобів керування польотом ретрансляційних аероплатформ на базі

безпілотних літальних апаратів для оперативної організації зв'язку в районах зі зруйнованою або відсутньою інфраструктурою, наприклад, в зоні надзвичайної ситуації природного чи техногенного характеру для ефективного функціонування мобільних засобів зв'язку в інтересах ефективної взаємодії рятувальних загонів.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Міночкін А. І. Задачі управління топологією мережі безпілотних літальних апаратів мобільного компоненту мереж зв'язку військового призначення / А. І. Міночкін, В. А. Романюк // Збірник наукових праць ВІПІ НТУУ «КПІ». – 2005. – № 2. – С. 83–90.
2. Han Z. Optimization of MANET connectivity via smart deployment/movement of unmanned air vehicles / Z. Han, A. L. Swindlehurst, K. J. R. Liu // IEEE TRANSACTIONS ON VEHICULAR TECHNOLOGY. – 2009. – Vol.58. – №7. – P. 3533–3546.
3. Валуйський С.В. Метод підвищення продуктивності мобільних радіомереж / С.В. Валуйський // Наука і техніка повітряних сил Збройних сил України. – 2013. – №1(10). – С. 104 – 110.
4. Лисенко О.І. Методика оцінки показників функціонування епізодичних радіомереж із телекомунікаційними аероплатформами / О.І. Лисенко, С.В. Валуйський, А.В. Романюк // Науковий вісник Академії муніципального управління. Збірник наукових праць. Серія «Техніка». – 2013. – Вип.6. – С. 52-67.
5. Лисенко О. І. Розвиток методу підвищення продуктивності мобільних радіомереж на основі БПЛА / О.І. Лисенко, А.І. Семенченко, П.І. Кірчу, С.В. Валуйський // Науковий вісник Академії муніципального управління. Збірник наукових праць. Серія «Техніка». – 2013. – Вип.6. – С. 37-51.