

УДК 656.71.06

Казак В. М., д-р техн. наук,
Кравчук М. П.,
Некlesa А. О.,
Чельник А. В.,
Щербінін А. О.

ДОСЛІДЖЕННЯ ВПЛИВУ ЖИВУЧОСТІ АЕРОДРОМНОГО СВІТЛОСИГНАЛЬНОГО КОМПЛЕКСУ НА ТОЧНІСТЬ ПРИЗЕМЛЕННЯ ПОВІТРЯНОГО СУДНА

Аерокосмічний інститут Національного авіаційного університету

Розглянуто вплив живучості аеродромного світлосигнального комплексу на точність приземлення повітряного судна, а також застосований метод лінійного програмування для знаходження оптимальних умов виконання його посадки в заданій точці злітно - посадкової смуги.

Авіаційна транспортна система (АТС) являє собою сукупність елементів, що взаємодіють у процесі виконання польоту і взаємозалежних функціонально. АТС має наступні підсистеми: екіпаж, повітряне судно (ПС), система керування повітряним рухом (КПР), система забезпечення польоту. Всі ці підсистеми при їхньому аналізі можуть розглядатися і як самостійні системи, піддаватися відповідному розчленовуванню на елементи. Зокрема, так можна розглядати систему "екіпаж – повітряне судно – аеродромний світлосигнальний комплекс (АСК)", що є різновидом людино-машинних систем [2].

Світлотехнічні і радіотехнічні наземні засоби аеропортів складають систему забезпечення посадки повітряних судів (ПС) і працюють у комплексі виконуючи визначені функції на окремих етапах польоту [7].

Посадка повітряного судна – найбільше складний і відповідальний етап польоту, для виконання якого потрібні високо надійні технічні засоби і висока кваліфікація екіпажу.

Впевнену і безпечну посадку пілот виконує у тому випадку, коли він достовірно і надійно сприймає земні орієнтири і переходить до візуального польоту. Вночі й у складних метеорологічних умовах у день природні земні орієнтири не помітні. У таких умовах особливо на останніх етапах посадки (планування, ви-

рівнювання, парашутування і пробіг по злітно-посадковій смузі) значна роль приділяється світлосигнальним засобам.

За допомогою цього устаткування пілот установлює безпосередній візуальний контакт із землею й одержує відповідну інформацію про положення повітряного судна щодо злітно-посадкової смуги (ЗПС). Час, протягом якого пілот одержує світлову інформацію, залежить від посадкової швидкості ПС і метеорологічних умов. Чим вище посадкова швидкість і менше дальність видимості світлових сигналів, тим менше часу є у розпорядженні пілота для установлення візуального контакту зі світлосигнальними засобами системи посадки й прийняття рішення.

Світлотехнічні засоби посадки забезпечують не тільки безпеку, але і підвищують регулярність польотів. Тому аеропорти цивільної авіації України повинні бути оснащені сучасними засобами, у тому числі і світлотехнічними.

За допомогою аеродромних світлотехнічних засобів пілот визначає напрямок на вісь ЗПС, відстань до ЗПС, крен повітряного судна, ширину і напрямок ЗПС, точку приземлення, напрямок зльоту, а також напрямок руху після посадки. Світлосигнальне устаткування розділяється на чотири світлосигнальні системи:

– світлосигнальна система посадки ВМІ (вогні малої інтенсивності), призначена для установки на ЗПС, обладнаної

чена для установки на ЗПС, обладнаної для заходу на посадку по приладах або візуально;

– світлосигнальна система посадки I категорії ВВІ-1 (вогни високої інтенсивності I категорії), призначена для установки на ЗПС, обладнаної для точного заходу на посадку по I категорії;

– світлосигнальна система посадки II категорії ВВІ-2, призначена для установки на ЗПС, обладнаної для точного заходу на посадку по II категорії;

– світлосигнальна система посадки III категорії ВВІ-3, призначена для установки на ЗПС, обладнаної для точного заходу на посадку по III категорії.

Світлосигнальні системи ВВІ-1, ВВІ-2 і ВВІ-3 повинні задовольняти вимогам Міжнародної організації цивільної авіації (ІКАО) до систем відповідної категорії складності посадки.

Критеріями складності є два параметри: мінімальна дальність видимості на ЗПС (ДВЗ) і висота прийняття рішення H .

Дальність видимості на ЗПС – це максимальна відстань у напрямку посадки, на якому ЗПС, або установлені вогні, чи маркери, що обмежують контури ЗПС, можна бачити з положення над установленною точкою осьової лінії ЗПС із висоти, що відповідає середньому рівню очей пілота в момент приземлення (5 м).

Висота прийняття рішення – це установлена висота, на якій починають маневр відходу на друге коло, якщо до цієї висоти не встановлений надійний візуальний контакт із вогнями світлового обладнання аеродрому за курсом посадки, що дозволяє виконати безпечну посадку повітряного судна, або якщо положення повітряного судна в просторі не забезпечує успішної посадки.

Для надійного функціонування систем “скіпаж – ПС – АСК” потрібна висока живучість цієї системи. Згідно [1, 3, 4, 5], живучість – властивість об’єкта зберігати обмежену працездатність в умовах зовнішніх дій, що призводять до відмов його складових частин, а також протистояти розвитку критичних

відмов при встановленій системі технічного обслуговування (ТО) і ремонту (Р) та при будь-яких умовах експлуатації, включаючи і ті, що не передбачені документацією.

Для оцінки впливу живучості аеродромного світлосигнального комплексу на точність приземлення повітряного судна, а також знаходження оптимальних умов виконання його посадки в заданій точці ЗПС, застосуємо метод лінійного програмування.

Отже, задачу лінійного програмування процесу виконання посадки літака можна представити у вигляді системи рівнянь, яка містить $n = 9$ початкових (головних або структурних) змінних: $X_1 = X$ – відстань від точки прийняття рішення до точки доторкання ПС з ЗПС; $X_2 = Z$ – бокове відхилення повітряного судна; $X_3 = Y = H$ – висота прийняття рішення; $X_4 = \dot{X} = V_x$ – горизонтальна швидкість повітряного судна; $X_5 = \dot{H} = V_y$ – вертикальна швидкість ПС; $X_6 = \gamma$ – кут крену ПС; $X_7 = \nu$ – кут тангажу ПС, який складається з кута атаки α та кута нахилу траєкторії θ , тобто $\nu = \alpha + \theta$; $X_8 = P_2^3 (X_8 \geq 0,9)$ – ймовірність того, що на віддаленні X_1 екіпаж бачить не менше 3-ох вогнів аеродромної світлосигнальної системи посадки; $X_9 = \psi$ – кут нахилу ПС відносно середньої лінії ЗПС, а також $m = 4$ обмежень ($m_1 = 3$ обмежень типу \geq та $m_2 = 1$ обмежень типу \leq , $m_1 + m_2 = m$), запишемо наступним чином.

Система обмежень:

а) обмеження в заданих умовах

$$X_2 = \begin{cases} 0, & \text{якщо } Z = 0; \\ 0,5, & \text{якщо } 0 < Z \leq 15; \\ 1, & \text{якщо } 15 < Z \leq 30; \\ 2, & \text{якщо } 30 < Z \leq 60; \end{cases}$$

$$X_4 = \begin{cases} 0, & \text{якщо } V_{\Gamma} = 270 \text{ км/год}; \\ 0.5, & \text{якщо } 270 < V_{\Gamma} < 290; \\ 1, & \text{якщо } 290 < V_{\Gamma} < 360; \\ > 1, & \text{якщо } V_{\Gamma} < 400; \end{cases}$$

$$X_8 = \begin{cases} 0, & \text{якщо } P_L^3 > 0.9; \\ 0.5, & \text{якщо } 0.85 < P_L^3 < 0.9; \\ 1, & \text{якщо } 0.8 \leq P_L^3 < 0.85; \\ > 1, & \text{якщо } P_L^3 < 0.8; \end{cases}$$

б) обмеження типу \geq :

$$\left. \begin{aligned} a_{11}X_1 + a_{12}X_2 + a_{13}X_3 + a_{14}X_4 + a_{15}X_5 + \\ a_{16}X_6 + a_{17}X_7 + a_{18}X_8 + a_{19}X_9 \geq b_1 \\ a_{21}X_1 + a_{22}X_2 + a_{23}X_3 + a_{24}X_4 + a_{25}X_5 + \\ a_{26}X_6 + a_{27}X_7 + a_{28}X_8 + a_{29}X_9 \geq b_2 \\ a_{31}X_1 + a_{32}X_2 + a_{33}X_3 + a_{34}X_4 + a_{35}X_5 + \\ a_{36}X_6 + a_{37}X_7 + a_{38}X_8 + a_{39}X_9 \geq b_3 \end{aligned} \right\} (1)$$

Для рішення задачі ПС, підставивши в вираз (1) значення a_{ij} отримаємо:

$$\left. \begin{aligned} 2X_1 + X_2 + 3X_3 + 2X_4 + 4X_5 + \\ + X_6 + 3X_7 + 2X_8 + 4X_9 \geq 10 \\ 12X_1 + 5X_3 + 5X_4 + X_5 + 8X_6 + \\ + 7X_7 + 15X_8 + 20X_9 \geq 20 \\ 11X_2 + 8X_3 + 4X_4 + 8X_5 + \\ + X_6 + 7X_7 + 8X_8 \geq 30 \end{aligned} \right\} (2)$$

обмеження типу \leq :

$$\left. \begin{aligned} a_{41}X_1 + a_{42}X_2 + a_{43}X_3 + a_{44}X_4 + a_{45}X_5 + \\ a_{46}X_6 + a_{47}X_7 + a_{48}X_8 + a_{49}X_9 \leq b_4. \end{aligned} \right\} (3)$$

Для рішення задачі посадки, підставивши в вираз (1) значення a_{ij} отримаємо:

$$\left. \begin{aligned} X_1 + 5X_2 + 5X_3 + 5X_4 + 5X_5 + \\ + 8X_6 + 8X_7 + 4X_8 + 3X_9 \leq 18 \\ b_1, b_2, b_3, b_4 \geq 0. \end{aligned} \right\} (4)$$

Умова невід'ємності:

$$X_1, X_2, X_3, X_4, X_5, X_6, X_7, X_8, X_9 \geq 0. (5)$$

Запишемо систему рівнянь, яка описує процес пошуку оптимальної точки торкання шасі ЗПС у матрично-векторній формі, а також введемо пере позначення $n' = n + t + t_1 = 9 + 3 + 4 = 16$ та введемо позначення:

$$A = \begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} & \dots & a_{19} & a_{110} & a_{111} & \dots & a_{116} \\ a_{21} & a_{22} & \dots & a_{29} & a_{210} & a_{211} & \dots & a_{216} \\ a_{31} & a_{32} & \dots & a_{39} & a_{310} & a_{311} & \dots & a_{316} \\ a_{41} & a_{42} & \dots & a_{49} & a_{410} & a_{411} & \dots & a_{416} \end{bmatrix}; (6)$$

Підібравши і підставивши значення кожного a_{ij} у вираз (6) отримаємо розрахункову матрицю:

$$A = \begin{bmatrix} 2 & 1 & 3 & 2 & 4 & 1 & 3 & 2 & 4 & -1 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 12 & 0 & 5 & 5 & 1 & 8 & 7 & 15 & 20 & 0 & -1 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 11 & 8 & 4 & 8 & 1 & 7 & 8 & 0 & 0 & 0 & -1 & 0 & 0 & 0 & 1 \\ 1 & 5 & 5 & 5 & 5 & 8 & 8 & 4 & 3 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} (7)$$

Для виразу (1) також складемо матрицю стовпчик значень:

$$b = \begin{bmatrix} b_1 \\ b_2 \\ b_3 \\ b_4 \end{bmatrix}; (8)$$

Визначивши з урахуванням (7) значення b_i , отримаємо:

$$b = \begin{bmatrix} 10 \\ 20 \\ 30 \\ 18 \end{bmatrix}; (9)$$

$$c = [c_1, c_2, \dots, c_9] = [5 \ 4 \ 9 \ 5 \ 9 \ 2 \ 7 \ 6 \ 7]$$

$$X = (X_1, X_2, \dots, X_{16}).$$

Запишемо задачу оптимізації наступними вимогами:

$$\left. \begin{aligned} AX = b, \\ X \geq 0, \end{aligned} \right\} (10)$$

$$Z = cX \rightarrow \min. (11)$$

Розіб'ємо матрицю коефіцієнтів A (6) на $n' = 16$ векторів довжиною $m = 4$, а також введемо вектор A_0 , який дорівнює вектору сталих b :

$$A_1 = \begin{bmatrix} a_{11} \\ a_{21} \\ a_{31} \\ a_{41} \end{bmatrix}, \quad A_2 = \begin{bmatrix} a_{12} \\ a_{22} \\ a_{32} \\ a_{42} \end{bmatrix}, \quad A_3 = \begin{bmatrix} a_{13} \\ a_{23} \\ a_{33} \\ a_{43} \end{bmatrix},$$

$$\begin{aligned}
 \mathbf{A}_4 &= \begin{bmatrix} a_{14} \\ a_{24} \\ a_{34} \\ a_{44} \end{bmatrix}, \quad \mathbf{A}_5 = \begin{bmatrix} a_{15} \\ a_{25} \\ a_{35} \\ a_{45} \end{bmatrix}, \quad \mathbf{A}_6 = \begin{bmatrix} a_{16} \\ a_{26} \\ a_{36} \\ a_{46} \end{bmatrix}, \\
 \mathbf{A}_7 &= \begin{bmatrix} a_{17} \\ a_{27} \\ a_{37} \\ a_{47} \end{bmatrix}, \quad \mathbf{A}_8 = \begin{bmatrix} a_{18} \\ a_{28} \\ a_{38} \\ a_{48} \end{bmatrix}, \quad \mathbf{A}_9 = \begin{bmatrix} a_{19} \\ a_{29} \\ a_{39} \\ a_{49} \end{bmatrix}, \\
 \mathbf{A}_{10} &= \begin{bmatrix} a_{110} \\ a_{210} \\ a_{310} \\ a_{410} \end{bmatrix}, \quad \mathbf{A}_{11} = \begin{bmatrix} a_{111} \\ a_{211} \\ a_{311} \\ a_{411} \end{bmatrix}, \quad \mathbf{A}_{12} = \begin{bmatrix} a_{112} \\ a_{212} \\ a_{312} \\ a_{412} \end{bmatrix}, \\
 \mathbf{A}_{13} &= \begin{bmatrix} a_{113} \\ a_{213} \\ a_{313} \\ a_{413} \end{bmatrix}, \quad \mathbf{A}_{14} = \begin{bmatrix} a_{114} \\ a_{214} \\ a_{314} \\ a_{414} \end{bmatrix}, \\
 \mathbf{A}_{15} &= \begin{bmatrix} a_{115} \\ a_{215} \\ a_{315} \\ a_{415} \end{bmatrix}, \quad \mathbf{A}_{16} = \begin{bmatrix} a_{116} \\ a_{216} \\ a_{316} \\ a_{416} \end{bmatrix}.
 \end{aligned}$$

В цьому разі систему обмежень при рішенні задачі оптимізації точки торкання літака ЗПС можна записати у векторній формі:

$$\mathbf{X}_1 \mathbf{A}_1 + \mathbf{X}_2 \mathbf{A}_2 + \dots + \mathbf{X}_{16} \mathbf{A}_{16} = \mathbf{A}_0. \quad (12)$$

Як впливає із формули (12), вектор \mathbf{A}_0 представляє собою лінійну комбінацію векторів $\mathbf{A}_1, \dots, \mathbf{A}_{16}$, де коефіцієнтами є шукані величини $\mathbf{X}_1, \dots, \mathbf{X}_{16}$.

Виберемо із 16 векторів, $\mathbf{A}_1, \dots, \mathbf{A}_{16}$, вектора $\mathbf{A}_{v(1)}$, $\mathbf{A}_{v(2)}$, $\mathbf{A}_{v(3)}$, $\mathbf{A}_{v(4)}$, лінійна комбінація яких складе 4-мірний вектор \mathbf{A}_0 :

$$\mathbf{X}_{v(1)}^B \mathbf{A}_{v(1)} + \mathbf{X}_{v(2)}^B \mathbf{A}_{v(2)} + \mathbf{X}_{v(3)}^B \mathbf{A}_{v(3)} + \mathbf{X}_{v(4)}^B \mathbf{A}_{v(4)} = \mathbf{A}_0. \quad (13)$$

Обрані нами 4 вектора:

$\mathbf{A}_{v(1)} = \mathbf{A}_4$, $\mathbf{A}_{v(2)} = \mathbf{A}_5$, $\mathbf{A}_{v(3)} = \mathbf{A}_7$,
 $\mathbf{A}_{v(4)} = \mathbf{A}_8$, називаються базисними векторами, а відповідні їм змінні $\mathbf{X}_{v(1)}^B$, $\mathbf{X}_{v(2)}^B$, $\mathbf{X}_{v(3)}^B$, $\mathbf{X}_{v(4)}^B$ – базисними змінним. Решта $n' - m = 16 - 4 = 12$ векторів та їх змінні називаються відповідно небазисними векторами і небазисними змінними.

Прирівнявши всі небазисні змінні, тобто всі змінні за виключенням $\mathbf{X}_{v(1)}^B$, $\mathbf{X}_{v(2)}^B$, $\mathbf{X}_{v(3)}^B$, $\mathbf{X}_{v(4)}^B$ до нуля отримаємо наступне рівняння:

$$\mathbf{A}_1 \mathbf{X}_1 + \mathbf{A}_2 \mathbf{X}_2 + \dots + \mathbf{A}_9 \mathbf{X}_9 - \mathbf{A}_{10} \mathbf{X}_{10} - \dots - \mathbf{A}_{13} \mathbf{X}_{13} + \mathbf{A}_{14} \mathbf{X}_{14} + \dots + \mathbf{A}_{16} \mathbf{X}_{16} = 0; \quad (14)$$

Використовуючи вище наведене, складено програму рішення задачі оптимізації точки доторкання ПС злітно – посадочної смуги.

Список використаних джерел

1. Авраменко В. Н. Вопросы анализа живучести энергообъединений: Препр. / АН Украины. Ин-т электродинамики. – К.: 1997. – № 808. – 45 с.
2. Баранов А. М. Облака и безопасность полетов. – Л.: Гидрометиздат, 1983. – 232 с.
3. ДСТУ 2860–94. Надійність техніки. Терміни та визначення. Чинний від 01.01.96. – К.: Держстандарт України, 1995. – 92 с.
4. Надежность и эффективность в технике: Справочник. В 10 т. / Ред. совет: В.С. Авдуевский (пред.) и др. Т. 1.: Методология. Организация. Терминология / Под ред. А.Н. Рембезы. – М.: Машиностроение, 1989. – 224 с.
5. Прокофьев А. И. Надежность и безопасность полетов. – М.: Машиностроение, 1985. – 180 с.
6. Блохин Л. Н., Казак В. Н. Синтез оптимальной робастной системы стабилизации объекта с отказывающими элементами // Кибернетика и системы анализа. – 2000. – № 3. – С. 151-158.