

## АЕРОНАВІГАЦІЙНЕ ОБСЛУГОВУВАННЯ ПОЛЬОТІВ

УДК 518.12:62-50:629.735:534.836

ББК 0571.5-555-011

В.М. Алексєєв, Л.В. Сібрук, В.П. Харченко

### ВПЛИВ СТОХАСТИЧНИХ ЗБУРЕНЬ НА ЯКІСТЬ ФУНКЦІОНУВАННЯ СИСТЕМ ПОСАДКИ ПОВІТРЯНИХ КОРАБЛІВ

*Подано стохастичні рівняння, які дозволяють досліджувати вплив збурень в системі посадки, а також відбиття і затінення радіохвиль при багатопроменевому поширенні. Отримані результати дозволяють визначити вплив стохастичних збурень на ефективність і безпеку польотів. Наведено приклад моделювання, який дає уяву щодо поведінки випадкового процесу руху повітряного корабля при наявності відбитого від поверхні сигналу.*

Стохастичні збурення в системах посадки суттєво впливають на їхню ефективність [1–5]. Такий вплив обумовлений рядом факторів. Серед них можна виділити найбільш впливові – відбиття та затінення електромагнітних хвиль при їх багатопроменевому поширенні, шуми та перешкоди. У зв'язку з проявом зовнішніх  $\xi(t)$  та внутрішніх  $\varepsilon(t)$  збурень проблема вимірювання і локалізації фазових координат повітряного корабля (ПК), а також утримування його в певних межах особливо загострюється.

Припустимо, що  $\varepsilon(t) \in E$  і  $\xi(t) \in \Xi$ . Необхідно знайти такі показники якості системи посадки  $F^* \subset F$  та її параметри  $\Lambda^* \subset \Lambda$ , щоб  $\forall \xi(t) \in \Xi$ ,  $\forall \varepsilon(t)$  забезпечувалося виконання умови  $\{\bar{x}(t), \bar{\alpha}(t)\} \in \hat{Q}(t)$ . Тобто, сукупність вектора фазових координат ПК  $\bar{x}(t)$  і вектора-параметра дії  $\bar{\alpha}(t)$ , який включає фактор керування, належить до області обмежень  $\hat{Q}(t)$ . Параметр дії  $\bar{\alpha}(t)$  визначає вихід процесу заходу на посадку [1-3]. Тоді однією з важливих задач є визначення такої допустимої граничної множини показників якості і параметрів інформаційно-керуючої підсистеми при фіксованій структурі, що при заданому рівні перешкод і зовнішніх збурень на керований об'єкт (ПК) забезпечується успішне завершення посадки без порушення експлуатаційних льотних обмежень.

Оберненою до цієї задачі є задача аналізу: якщо задано  $\forall \xi(t) \in \Xi$ ,  $\forall \varepsilon(t) \in E$ ,  $F \subset F^*$  і  $\exists \{\bar{x}(t), \bar{\alpha}(t)\} \in \hat{Q}(t)$ , то необхідно відповідно до сформульованих критеріїв визначити якість посадки.

У системах посадки повний вектор  $X$  недоступний для оцінки, оскільки його не можна фізично спостерігати. Рішення про посадку можна прийняти на основі спостереження вектора  $\bar{Y}(t) \in Q_r(t)$ . Тоді загальна задача системи посадки може бути подана у такому вигляді:

$$\begin{aligned} \dot{\bar{X}} &= f(X, \alpha, t); \bar{X}(t) \in Q(t) \subset R^V; \\ \dot{\bar{Y}} &= g(X, t); \bar{Y}^* = g^*(X, \bar{F}, \lambda, \varepsilon, t); \\ \bar{X}(t_0) &= \bar{X}_0; \bar{X}(t_k) = \bar{X}_{t_k}; \alpha = A(X, F, t); \\ F &\in \tau; t \in J_\tau = [t_0, t_k]; \lambda \in \Lambda; \varepsilon(t) \in \Xi, \end{aligned}$$

де  $R^V$  – багатомірний простір обмежень  $Q$ ;  $Y^*$  – оцінка вектора спостережень  $Y$  в системі посадки;  $A$  – оператор фіксований;  $\tau$  – множина можливих значень показників якості інформаційно-керуючої системи;  $\Lambda$  – множина параметрів системи посадки.

У просторі стану  $R^m$  системи виділимо таку область  $D_\tau$ , що  $D_\tau \subset R^m$ . При  $\{Y, t\} \in D_\tau \times J_\tau$ ,  $\forall t \in J_\tau$  забезпечується нормальне функціонування системи посадки. Навпаки, якщо  $\{Y, t\} \notin D_\tau \times J_\tau$  при  $t \in J_\tau$ , стан системи не буде нормальним. Прикладом цього може бути неможливість посадки з першого заходу і, як наслідок, вихід ПК на друге коло, ймовірність передування льотних подій і т. ін. Із цього випливає, що вимога безпеки польоту полягає в утриманні фазової точки динамічного об'єкта, яка задається вектором  $\vec{Y}(t)$  в середині області  $D_\tau$ . Керування об'єктом у цьому випадку ведеться в умовах неповної інформації, оскільки розмірність вектора  $\vec{Y}(t)$  менша від розмірності вектора  $\vec{X}(t)$ , крім того, визначення координат ПК виконується в умовах впливу стохастичності  $\xi(t)$  та  $\varepsilon(t)$  [6].

Якщо відомий розподіл імовірності компонент вектора стану  $X$  за умови, що до моменту  $t + \tau$  ні разу не була порушена межа, то щільність цієї ймовірності визначається як розв'язок другого рівняння Колмогорова. Позначимо через  $G$  деякий критерій безпеки. Тоді його можна записати у вигляді

$$G = \int_{D_\tau} \gamma(\vec{X}) dF(\vec{X}, \tau), \quad (1)$$

де  $D_\tau$  – область допустимих значень вектора  $\vec{X}$  або при зменшенні розмірності – вектора спостереження  $\vec{Y}$ ;  $\gamma(\vec{X})$  – функція ваги, яка визначає зміст критерія  $G$ .

Як видно із співвідношення (1), для кількісної оцінки рівня безпеки польотів важливо знати та уміти будувати області  $D_\tau$  [1-5]. В першу чергу необхідно побудувати  $D_\tau$  в горизонтальній і вертикальній площинах і врахувати збурення в системі.

Розглянемо приклад. Нехай структура динаміки бокового руху ПК на малі переміщення описується такою системою диференціальних рівнянь:

$$\dot{\psi} = K_\gamma(t); \dot{Z}(t) = \gamma\psi(t); \dot{R}(t) = V \quad (2)$$

при співвідношенні лінійно-кутових координат

$$Z(t) = R(t)\varepsilon(t), t \in [0, T], \quad (3)$$

де  $\psi, \gamma, Z, R, V$  відповідно кути курсу, крену, між лінією курсу і ПК, а також бокове відхилення, відстань від точки посадки і швидкість ПК.

Вихідною інформацією, яка надходить від радіомаяка, є випадковий вектор

$$y(t) = y_n(t) + \varepsilon_n(t), t \in [0, T], \quad (4)$$

де  $T$  – час дії повного контуру керування в системі посадки;  $y = [R, \varepsilon, z]$  – вектор координат ПК.

У результаті зовнішніх і внутрішніх збурень нормальна геометрія передпосадкового маневру викривляється. Представимо типову залежність за законом керування з диференційною складовою

$$\delta = i\{\gamma \pm [K_\varepsilon(\varepsilon + \xi_\varepsilon(t)) + K_\varepsilon(\dot{\varepsilon} + \xi_\varepsilon(t))]\}. \quad (5)$$

Із виразів (2)–(5) отримаємо систему диференціальних рівнянь для системи посадки:

$$\begin{aligned} t^2 \ddot{z} + a_1 t \dot{z} + (a_2 t + a_3) z &= a_4 \xi_\varepsilon(t) + a_5 \xi_\varepsilon(t) t^2; \\ \ddot{\varepsilon} + (2 - a_1) \dot{\varepsilon} - a_2 \varepsilon &= a_2 \xi_\varepsilon(t) + a_1 \xi_\varepsilon(t). \end{aligned} \quad (6)$$

Одержані рівняння є гіпергеометричними рівняннями зі специфічними параметрами, які визначаються співвідношеннями в контурі керування:

$$a_1 = \pm K_\gamma K_\varepsilon; \quad a_2 = \pm K_\gamma K_\varepsilon; \quad a_3 = \pm K_\gamma K_\varepsilon; \\ a_4 = \pm \nu K_\gamma K_\varepsilon; \quad a_5 = \pm \nu K_\gamma K_\varepsilon.$$

В системі (6) параметром є час, який залишився до сходження з глісади. Якщо представити перше рівняння системи (6) у вигляді

$$t^2 \ddot{z} + a_1 t \dot{z} + (a_2 t + a_3) z = w_z(t), \quad (7)$$

то випадковий процес

$$w_z(t) = (a_4 \xi_\varepsilon(t) + a_5 \xi_\varepsilon(t)) t^2$$

виконує роль збурень у рівнянні (7), яке, в свою чергу, при відповідних умовах перетворюється у збурене рівняння Бесселя.

Таким же чином представимо збурене диференціальне рівняння за кутовою координатою  $\varepsilon$ :

$$t \ddot{\varepsilon} + (2 - a_1) \dot{\varepsilon} - a_2 \varepsilon = w_\varepsilon(t);$$

де

$$w_\varepsilon(t) = a_2 \xi_\varepsilon(t) + a_1 \xi_\varepsilon(t). \quad (8)$$

Диференціальне рівняння (8) відноситься до класу вироджених гіпергеометричних рівнянь із випадковою правою частиною і описує траєкторію руху літака в зоні дії системи посадки будь-якого типу.

Опускаючи проміжні викладки розв'язку, рівняння (8) можна подати таким чином. Однорідному диференціальному рівнянню

$$t \ddot{\varepsilon} + (2 - a_1) \dot{\varepsilon} - a_2 \varepsilon = 0$$

відповідає

$$y(t) = t^{\frac{\nu}{2}} J_\nu(2\sqrt{-a_2 t}), \quad \nu = a_1 - 1.$$

Загальний розв'язок рівняння (8) з імовірністю 1 має вигляд:

$$\varepsilon(t) = y(t)\varphi(t), \quad t \in [0, T],$$

де

$$\varphi(t) = C_1 + C_2 \int_t^1 \frac{1}{t} J_\nu^{-2}(2\sqrt{-a_2 t}) dt + \int \left( \frac{1}{t} J_\nu^{-2}(2\sqrt{-a_2 t}) \int t^{\frac{\nu}{2}} J_\nu^{-2}(2\sqrt{-a_2 t}) w_\varepsilon(t) dt \right) dt,$$

а константи  $C_1$  і  $C_2$  визначаються крайовими умовами задачі польоту за розглянутою координатою, тобто вектором стану ПК, що спостерігається.

При заданій структурі розраховують числа  $K_\varepsilon$  і  $K_\varepsilon$  для функції  $Z(t)$ , яка виражається через спеціальні циліндричні функції Бесселя першого і другого роду:

$$Z(t) = \exp\left(\frac{\nu}{2}\right) (C_1^0 J_\nu(\tau) + C_2^0 J_\nu(\tau)).$$

Представлені стохастичні рівняння дозволяють досліджувати вплив збурень в системі посадки на її ефективність та безпеку польотів ПК.

З урахуванням правил вибору області  $D_c$  і характеру стохастичних рівнянь на рис.1 і 2 показані ймовірності успішного заходу на посадку ПК для одного з аеропортів України. Характер поведінки випадкового процесу руху ПК пов'язаний з типом відбиткової поверхні.

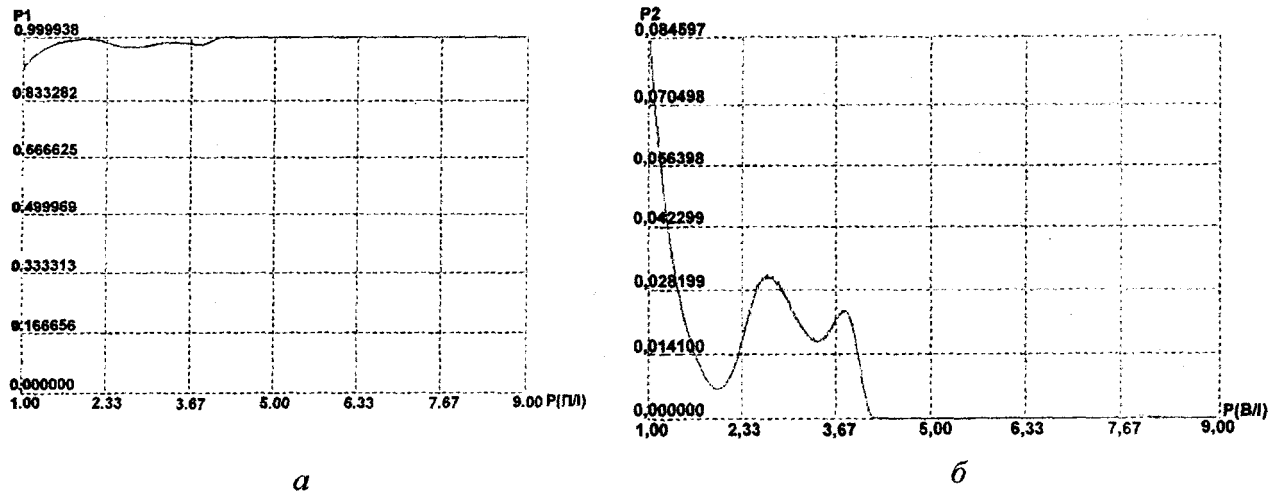


Рис. 1. Імовірнісні характеристики процесу заходу ПК на посадку з урахуванням граничних значень різниці глибини модуляції:  
 а – нормальний захід на посадку; б – помилковий захід на друге коло;  
 P1 – імовірність правильного заходу на посадку; P(ПІ) – імовірність правильного прийняття істини; P2 – імовірність хибного прийняття рішення щодо виходу на друге коло; P(ВІ) – імовірність хибного відхилення істини

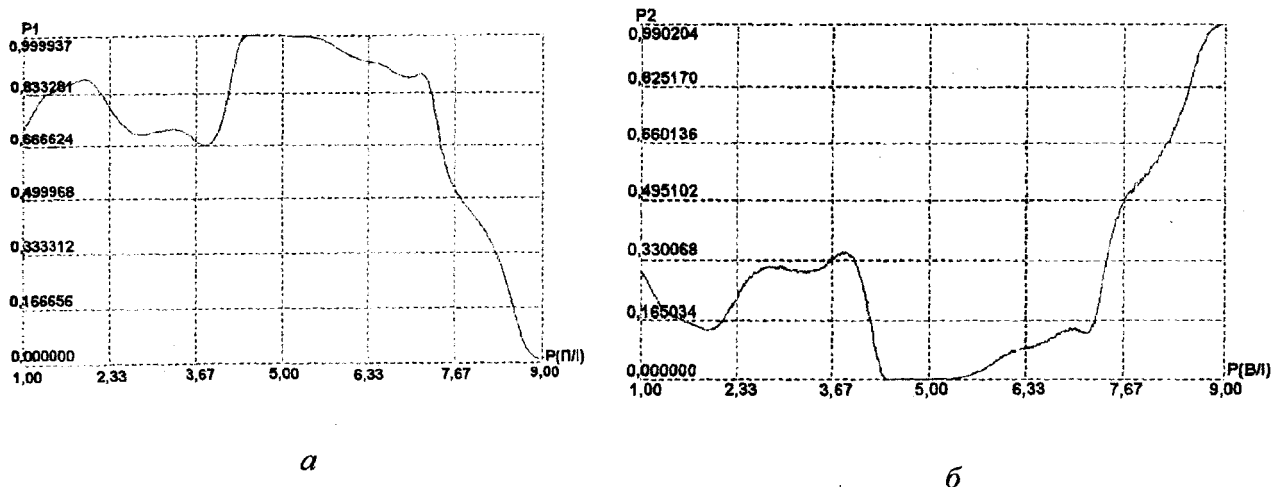


Рис. 2. Імовірнісні характеристики процесу заходу ПК на посадку для RNP/7:  
 а – нормальний захід на посадку; б – помилковий захід на друге коло

Таким чином, викладений загальний підхід визначення якості систем посадки з урахуванням динамічних характеристик ПК дозволяє досить чітко досліджувати системи посадки в залежності від умов їх використання в конкретних аеропортах, а також визначити якість систем в очікуваних умовах використання. Стохастичності факторів  $\xi(t)$  і  $\epsilon(t)$  наведено в роботі [7].

## Список літератури

1. Касьянов В.А., Харченко В.П., Хамракулов И.В., Чеботарев В.П. Влияние характеристик предельной управляемости самолета на потенциальные возможности системы посадки // Оптимизация радиотехнических систем и устройств. – Владимир: ВПИ, 1976. – С. 21-23.
2. Грачев Н.П., Харченко В.П., Чеботарев В.П. Об одной оценке функционирования систем посадки // Вопросы радиоэлектроники. Серия ОВР. – 1983. – Вып. 3. – С. 61-68.
3. Грачев Н.П., Лазарев Г.Н., Харченко В.П., Чеботарев В.П. Оценка ориентированного действия системы посадки // Вопросы радиоэлектроники. Сер. ОВР. – 1985. – Вып. 13. – С. 61-68.
4. Харченко В.П., Лазарев Г.Н. Повышение эффективности и качества использования технических систем в условиях эксплуатации. – К.: Знание, 1986. – 24 с.
5. Харченко В.П., Чеботарев В.П. Случайные воздействия в системах посадки самолетов. Контроль и управление техническим состоянием авиационного и радиоэлектронного оборудования воздушных судов гражданской авиации: Сб. науч. тр. – К.: КИИГА, 1986. – С. 29-33.
6. Харченко В.П., Чеботарев В.П., Таныгин Ю.И. Стохастическое воздействие на динамику самолета при эксплуатации систем посадки // Вопросы оптимального обслуживания и ремонта АиРЭО воздушных судов гражданской авиации: Сб. науч. тр. – К.: КИИГА, 1985. – С. 51-56.
7. Харченко В.П., Сібрук Л.В., Алексеев В.М. Визначення показників якості функціонування супутникових систем посадки повітряних кораблів // Вісник Центрального наукового центру транспортної Академії України. – 1999. – Вип.2. – С. 56-59.

Стаття надійшла до редакції 1 листопада 1999 року.

УДК 510.22:62-50

ББК 050-021.8641.7  
У 651.435.8641.7

В.П. Бочарніков, С.В. Свешніков

## ОЦІНКА І ПРОГНОЗ ПОВІТРЯНОЇ СИТУАЦІЇ НА ОСНОВІ НЕЧІТКОГО АНАЛІЗУ ПОДІЙ

*Розглянуто метод оцінки спільного впливу на систему змінних у часі факторів, сила та напрямок дії яких визначається нечітко. Наведено алгоритм розрахунку такої оцінки.*

Аналіз потоку подій  $M = \{m_j, j = \overline{1, N_j}\}$  та його вплив на повітряну ситуацію  $S$  є важливою задачею сучасних бортових кібернетичних комплексів [1]. При цьому прогнозування ситуації  $S$ , що описується набором характеристик  $\{S_i | i = \overline{1, N}\}$ , дозволяє оптимізувати керування літальним апаратом у складній повітряній ситуації, наприклад, у ближньому повітряному бою [2].

Аналіз подій та прогноз повітряної ситуації  $S$  передбачає виявлення і оцінку можливих подій  $m_j \in M$ , які змінюють загальну оцінку ситуації. Як події можуть розглядатися інформаційні повідомлення від різних джерел (як бортових, так і наземних систем) про зміни взаємного розташування літальних апаратів, застосування ними тактичних прийомів, маневрів та ін.