

УДК 629.735.015.7.2:656.7.08 (045)

**В.М. Казак**, д-р. техн. наук, проф.  
**Д.О. Шевчук**, канд. техн. наук, с.н.с.  
**М.П. Кравчук**, канд. техн. наук  
**Ю.М. Кеменяш**, асистент  
**М.А. Васильєв**, аспірант

## ШЛЯХИ ПІДВИЩЕННЯ БЕЗПЕКИ ВИКОНАННЯ ПОСАДКИ ПОВІТРЯНОГО КОРАБЛЯ В УМОВАХ ОСОБЛИВОЇ СИТУАЦІЇ

Національний авіаційний університет, [do@nau.edu.ua](mailto:do@nau.edu.ua)

*Науково обґрунтовано визначення системи «екіпаж – літак - САК – середовище – аеродромний світлосигнальний комплекс» і на цій основі розроблено нову математичну модель, в описі якої враховано психофізичні особливості екіпажу, аеродинамічні властивості літака, особливості функціонування інтелектуальної САК вплив властивостей середовища, що змінюється зі зміною висоти, а також вплив функціональної надійності АСК. Запропоновано метод побудови експлуатаційно надійних систем керування ПК на етапі посадки, яка ґрунтується на прогнозуванні координат точки дотику шасі літака ЗПС в умовах, що виникли у польоті, та порівняння їх з координатами потрібного положення і на цій основі контролювати дії екіпажу в умовах особливої ситуації; розроблено нові алгоритми і структури когнітивних карт та обробки їх даних.*

**Ключові слова:** повітряний корабель, особлива ситуація, когнітивне моделювання, автоматична система керування, аеродромний світлосигнальний комплекс.

**Вступ.** Аналіз статистичних даних про авіаційні події (АП) та причин їх виникнення показує, що найбільш небезпечним етапом польоту є посадка повітряного корабля (ПК). Актуальність питання підвищення безпеки виконання цього етапу підтверджується тим, що не лише авіакомпанії, державні установи та держави в цілому ведуть пошук шляхів зниження кількості небезпечних АП на етапі посадки, але й Міжнародна авіаційна організація цивільної авіації ICAO була змушена створити спеціальний комітет з майбутніх аеронавігаційних систем (FANS), який розробив нову концепцію забезпечення потрібних навігаційних характеристик (Required Navigation Performance – RNP), яку схвалено ICAO.

Концепцією RNP у концептуальному аспекті встановлено для районів повітряного простору групу з чотирьох параметрів: точності, цілісності, неперервності і готовності, які у сукупності визначають умови навігації. Головними причинами зниження безпеки виконання посадки ПК є: невитримання заданих параметрів під час посадки ПК; вплив раптових непередбачених дій зовнішніх дестабілізуювальних факторів та внутрішніх процесів, порушення технології керування ПК і його конфігурацією; помилки екіпажу та служб керування повітряним рухом; неякісне технічне обслуговування; різного роду відмови авіаційної техніки. Тому проблема забезпечення безпеки виконання посадки ПК є основною темою досліджень вітчизняних та закордонних науково-дослідних та дослідно-конструкторських установ.

З'ясовано, що в разі виникнення у польоті раптової аварійної ситуації велика кількість пілотів розгублюються або запізнюються виконувати відповідні дії, тоді як при використанні екіпажем своєчасної підказки прийняття рішення щодо дій у цій ситуації на етапі посадки максимальні значення дисперсії відхилення літака від потрібної точки (маркера) приземлення знижуються в 1,5 – 2 рази, а ймовірність прийняття помилкового рішення не перевищує  $10^{-12}$ .

Детальний аналіз сучасного стану методів уникнення неадекватної поведінки екіпажів у аварійних ситуаціях у польоті показав, що основним з них є тренування пілотів на льотних тренажерах, у які вводяться типові аварійні ситуації у польоті. На жаль, такі методи не враховують усього спектра можливих ситуацій та психофізіологічні особливості людини в екстремальних ситуаціях. Запропоновано для таких польотних ситуацій скласти базу підказок щодо дій екіпажу у типових аварійних ситуаціях та внести її в бортову ЕОМ. У разі виникнення аварійної ситуації на етапі посадки ПК інтелектуальна ергатична система висвічує відповідно до ситуації, що виникла, підказку екіпажу.

Детальний аналіз наявних методів попередження наслідків АП, що виникають на етапі посадки (з причин СМУ, помилкових дій екіпажу чи служби управління повітряним рухом, відказ елементів АСК чи систем ПК, порушення контуру зовнішніх обводів літака і ін.) показує, що для цього необхідно організувати на борту літака базу підказок щодо алгоритму правильних дій екіпажу в ситуаціях, що склалися на етапі посадки, розробити метод і алгоритм безперервного прогнозування точки приземлення на основі швидкозмінних поточних параметрів зниження ПК [1-7]. На підставі порівняння результатів

реальних дій екіпажу в польотній ситуації, що склалася, з потрібними (за базою даних) формувати підказку екіпажу. У разі несприймання екіпажем підказки та подальшого погіршення польотної ситуації до досягнення висоти прийняття рішення й прийнятті ним у цій ситуації рішення на цій висоті щодо продовження виконання посадки, у роботі пропонується відключити екіпаж від керування літаком, зазвичай попередивши його про це, перевести літак через систему автоматичного керування (САК) та автомат тяги у набір висоти. Для цього на борту літака у складі САК потрібно мати інтелектуальну систему спостереження, формування підказки й автоматичного переведення ПК у набір висоти з наступним уходом на друге коло.

**Постановка завдання.** Наукова мета роботи полягає у дослідженні можливих шляхів підвищення безпеки виконання посадки ПК в умовах особливої ситуації.

**Вирішення поставленого завдання.** Для етапу посадки під поняттям «точність» будемо розуміти здатність замкненої системи «екіпаж – ПК - САК зовнішнє середовище – аеродромний світлосигнальний комплекс» витримувати місце положення літака у кожній точці встановленої схеми зниження границі витримування характеристик з ймовірністю не менш ніж  $10^{-7}$  при одному заходженні на посадку [4].

Під цілісністю будемо розуміти характеристику довіри, з якою можна ставитися до правильності інформації, що видається замкненою системою. Цілісність, для нашого випадку, передбачає здатність системи видавати користувачу своєчасні й обґрунтовані підказки, як діяти у ситуації, що склалася на траєкторії зниження та обґрунтоване попередження про відключення управління літаком від екіпажу і переведення судна у набір висоти у тих випадках, коли екіпаж до висоти прийняття рішення не усунув наслідки помилкових дій, дії зовнішніх факторів або внутрішніх процесів, що й призвело до неможливості продовження виконання посадки. Вимоги до показника цілісності системи «екіпаж – ПК - САК - зовнішнє середовище – аеродромний світлосигнальний комплекс» щодо забезпечення польоту за траєкторією зниження і посадки, операцій у зоні аеродрому, початкового етапу заходження на посадку та неточного заходження на посадку приймемо рівним  $10^{-5}$  [1].

База даних з підказок екіпажу формується методом когнітивного моделювання [3]. Когнітивне моделювання у цьому випадку використовується як спосіб підтримки ухвалення підказки. У зв'язку з цим виникають три проблеми:

1. Проблема оцінки підказки. Якщо в когнітивній карті (КК) є кілька змінних (концептів), які визначають різні варіанти підказок, природно постає питання: які змінні (тобто підказки) повинні бути прийняті для цієї конкретної ситуації в повітрі, а які – відкинуті?

2. Проблема передбачення наслідків і ухвалення підказок:

- Якщо значення одних змінних буде збільшено, а інших зменшено, що відбудеться зі значеннями решти змінних?

- Якими будуть наслідки зміни знаку в одній із змінних?

- Якими будуть наслідки, якщо виключити одні змінні та ввести інші? Для цього необхідно згенерувати нову когнітивну карту і перерахувати її.

3. Пояснення результатів і ухвалення підказки. Зазвичай використання КК вимагає для ухвалення підказки додаткового аналізу й інтерпретації. Процес використання когнітивного моделювання в системному формуванні бази підказок зобразимо у вигляді алгоритму (рис. 1).

Блоки 1, 2, 3 формують КК одного експерта (командир екіпажу з великим досвідом льотної роботи, і таки, що потрапляв у подібні екстремальні ситуації). Блоки 4, 5, 6 формують КК групи експертів, блок 7 формує групову когнітивну карту за КК-ми окремих експертів (якщо це необхідно, якщо ні – вказаний перехід з блоку 3 в блок 8). Блоки 8 і 9 інтерпретації не підлягають.

Приналежність параметра місця положення літального апарата відповідному рівню цілісності і формування підказки у випадку порушення границі цілісності створюється наступним чином: здійснюється порівняння величин прогнозного довірчого інтервалу і рівня цілісності; за відстанню, що залишилася до досягнення заданої границі цілісності і поточної швидкості, визначається очікуваний час виходу літака за вказані межі. Наведене можна пояснити на прикладі посадкового «тунелю», для якого встановлені внутрішні і зовнішні границі (рис. 2) [4].

У якості параметра місця положення літального апарату для визначення цілісності координат оберемо кругове положення  $RK$  (рис. 2, еліпсоїд):

$$RK = \sqrt{s^2 + h^2 + z^2}, \quad (1)$$

У подальшому нас буде цікавити не саме відхилення, а колова швидкість його зростання:

$$\Delta RK = \sqrt{\dot{s}^2 + \dot{h}^2 + \dot{z}^2}, \tag{2}$$

де  $\dot{s}$ ,  $\dot{h}$ ,  $\dot{z}$  – відповідно швидкості зміни поздовжнього, вертикального і бічного відхилень.

Довірчий інтервал похибки  $\Delta RK$  будується наступним чином [2]:

- для кожного поточного моменту часу визначається оцінене на попередньому секундному інтервалі математичне очікування  $\tilde{m}_{\Delta RK}$  і середньоквадратичне відхилення  $\tilde{\sigma}_{\Delta RK}$ ;
- визначається прогнозне значення математичного очікування  $\tilde{m}_{\Delta RK}^{PP}$  на заданий час тривоги  $T_{тривзад}$ . Прогноз здійснюється методом лінійного програмування [4];
- визначається прогнозне значення середньоквадратичного

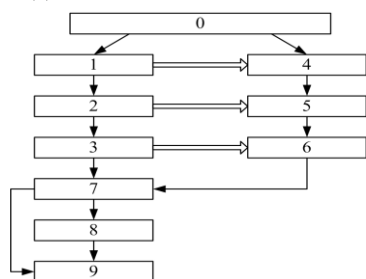


Рис. 1 Формування когнітивної карти проблеми,

де: 0 – ідентифікація проблеми; 1 – визначення списку вершин знакового графа; 2 – визначення відносин причинності між кожною парою вершин; 3 – визначення значень причинності між кожною парою вершин; 4 – визначення узгодженого списку вершин знакового графа; 5 – визначення узгоджених відносин між кожною парою вершин; 6 – визначення узгоджених значень відносин причинності між кожною парою вершин; 7 – побудова групової КК на базі КК окремих ОПР; 8 – оцінка наслідків альтернатив рішень за аналізом знакового графа; 9 – інтерпретація КК і прийняття варіанта підказки

де  $s$ ,  $h$ ,  $z$  – поздовжнє нахилене, вертикальне і бічне відхилення літака, відповідно. повітряної швидкості  $\bar{v}$  і вектора швидкості вітру  $\bar{u}$ .

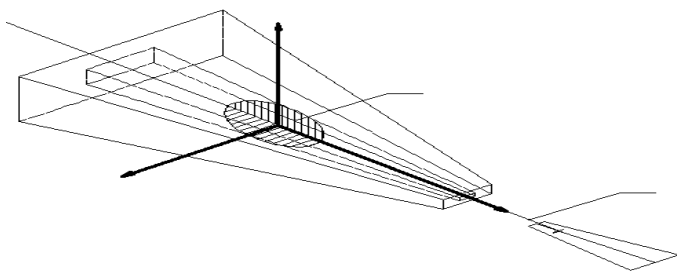


Рис. 2 Посадкові «тунелі»: 1 – еліпсоїд відхилень; 2 – глісада

критичний час  $t_{крит}$ :

$$A_{onm}(t) = \min\{T_i\} = \min\left\{ \sum_{j=1}^m g_{ij} p_{ij} \right\}, \tag{5}$$

$$i = \overline{1, n}, j = \overline{1, m},$$

де  $g_{ij}$  – величина потенційного збільшення параметрів еліпсоїда відхилень літака від заданої території;  $p_{ij}$  – ймовірність виникнення  $j$ -го порушення границі цілісності в результаті збільшення  $i$ -го параметру еліпсоїда.

Для вирішення задачі забезпечення безпечної посадки ПК в умовах особливої ситуації, розроблено структурну схему (рис.3) взаємовплив складових системи «екіпаж – ПК – САК

зовнішнє середовище – аеродромний світлосигнальний комплекс», складено модель руху літака на траєкторії посадки:

$$\left. \begin{aligned} \dot{D}_x &= \omega_z D_y - W_x - \xi_{\omega z} \hat{D}_y + \xi_{\omega y} \hat{D}_z + \hat{W}_x; \\ \dot{D}_y &= \omega_z D_x - W_y - \xi_{\omega x} \hat{D}_z + \xi_{\omega z} \hat{D}_x + \hat{W}_y \\ \dot{D}_z &= \omega_y D_x - W_z - \xi_{\omega y} \hat{D}_x + \xi_{\omega z} \hat{D}_y + \hat{W}_z \\ \dot{W}_x &= \omega_z W_x - \omega_y W_z + a_x - \xi_{\omega z} \hat{W}_y + \xi_{\omega y} \hat{W}_z - \xi_{ax} \\ \dot{W}_y &= \omega_x W_z - \omega_z W_x + a_y - \xi_{\omega x} \hat{W}_z + \xi_{\omega z} \hat{W}_x - \xi_{ay} \\ \dot{W}_z &= \omega_y W_x - \omega_x W_y + a_z - \xi_{\omega y} \hat{W}_x + \xi_{\omega x} \hat{W}_y - \xi_{az} \end{aligned} \right\} \quad (6)$$

де  $D_x, D_y, D_z, W_x, W_y, W_z$  – проекції векторів відповідно дальності та шляхової швидкості на осі зв'язаної системи координат;  $\omega_x, \omega_y, \omega_z, a_x, a_y, a_z$  – вимірні значення проекцій абсолютної кутової швидкості і лінійного прискорення ПК;  $\hat{D}_x, \hat{D}_y, \hat{D}_z, \hat{W}_x, \hat{W}_y, \hat{W}_z$  – оцінки відповідних фазових координат контрольованого процесу;  $\xi_{ax}, \xi_{ay}, \xi_{az}, \xi_{\omega x}, \xi_{\omega y}, \xi_{\omega z}$  – похибки вимірювальних датчиків кутових швидкостей і акселерометрів відповідно.

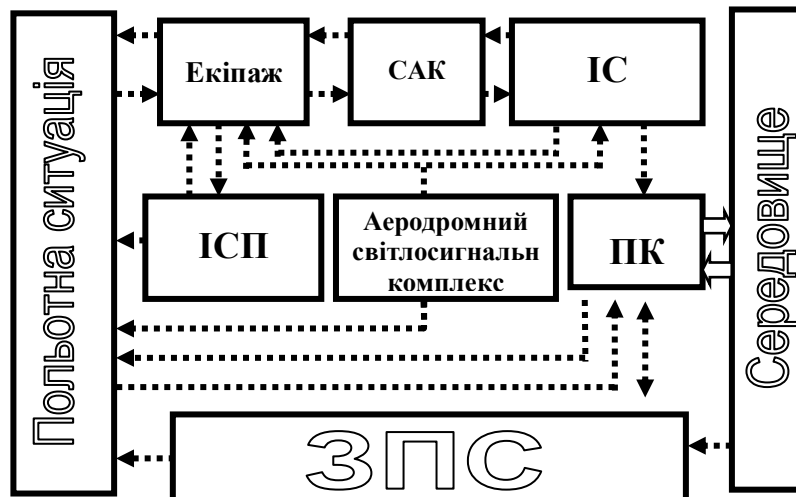


Рис. 3. Структура взаємовпливу складових системи «екіпаж – ПК – САК - зовнішнє середовище – аеродромний світлосигнальний комплекс»:  
ІСП – інструментальна система посадки;  
ІС – інтелектуальна система

У разі, якщо екіпаж на траєкторії зниження не встиг ліквідувати наростаюче збільшення еліпсоїда, тобто ліквідувати наслідки помилкових дій екіпажу (диспетчера) або інших дій зовнішніх факторів, до висоти прийняття рішення на посадку літака і виконання посадки в таких умовах веде до виникнення аварії чи катастрофи, то інтелектуальна система автоматичного керування літаком відключає пілотів від подальшого керування рухом та переводить ПК у набір висоти.

Інтелектуальна система являє собою нейронечіткий регулятор, який працює у трьох режимах:

- у режимі спостерігача – якщо процес зниження і посадки протікає у штатному режимі і літак на траєкторії не виходить за межі внутрішніх розмірів «тунелю» (рис. 2);
- у режимі підказки – якщо у процесі зниження літак відхиляється від заданої траєкторії і хоча б один параметр еліпсоїда вийшов за зовнішні межі внутрішнього «тунелю»;
- у активному режимі – при досягненні хоча б одного параметра еліпсоїда зовнішніх меж зовнішнього «тунелю» нейронечіткий регулятор відключає пілотів від керівництва літаком переводить його у набір висоти.

Графіки зміни ймовірності безпечного приземлення ПК в умовах виникнення на етапі посадки ОС, наведено на рис. 4.



Рис.4. Графіки зміни ймовірності безпечного приземлення ПК в умовах виникнення на етапі посадки ОС: 1 – за наявності на борту штатної САК; 2 – за наявності на борту інтелектуальної САК.

Частина результатів розрахунків за методикою Грішина ймовірностей безпечного приземлення ПК в задану область ЗПС в умовах раптового виникнення ОС на етапі його посадки показала (рис.4), що порівняно зі штатним обладнанням, дає змогу підвищити ймовірність безпечного приземлення ПК, наприклад у разі виникнення складної ситуації на 43 – 44. Похибка розрахунків за методикою Грішина не перевищує 10%.

#### Висновки

На основі теоретичних і експериментальних досліджень встановлено, що при візуальному пілотуванні ПК на етапі посадки в умовах невизначеності основними причинами авіаційних подій є помилки екіпажу (70% від загальної кількості авіаційних подій); несправності авіаційної техніки (19%); вплив несприятливої змінності видимості на ЗПС (11%).

Запропоновано для підвищення експлуатаційних характеристик системи «екіпаж – ПК – САК - зовнішнє середовище – аеродромний світлосигнальний комплекс» в інтелектуальній ергатичній системі керування ПК на етапі посадки мати три режими роботи: режим спостереження – для випадку, коли дії екіпажу і рух літака по траєкторії посадки здійснюються у штатному режимі; режим підказки – для випадку, коли нештатна ситуація або помилка екіпажу (диспетчера) призвели до виходу літака хоча б за одним параметром за зовнішні межі внутрішнього «тунелю»; активний режим – коли екіпаж до висоти прийняття рішення на виконання посадки не усунув відхилення від потрібної для ситуації, що склалася, траєкторії й не звертає увагу на підказку та попередження про неможливість продовжувати посадку все ж приймає рішення щодо посадки літака в таких умовах.

#### Список літературних джерел

1. Руководство по требуемым навигационным характеристикам, DOC 9613-AN 1937, ICAO, 1999.
2. Гавриленко Ю.В., Ткачева Т.П. Влияние нецентрированности погрешностей навигационных параметров, полученных с помощью СНС, на выдерживание границ целостности. // Авиакосмическое приборостроение. — 2002. — № 5. — с. 11—17.
3. Казак В.М. Системний аналіз автоматизованих організаційно-технічних систем: Навч. посібник. — К.: НАУ, 2007. — 181 с.
4. Казак В.Н., Салимон В.И. Туник А.А. Системы автоматического и полуавтоматического управления полетом. — К.: НАУ, 2001. — 200 с.
5. Казак В.М., Шевчук Д.О., Кравчук М.П. Оптимізація процесу виконання літаком посадки в умовах невизначеності з застосуванням методу лінійного програмування. // Вісник Національного університету «Львівська політехніка» — 2008. — № 616. — с. 73—78.
6. Оценка и разработка концепции требуемых навигационных характеристик (RNP) для этапов захода на посадку, посадок и вылетов, и их влияние на внедрение системы. // Доклады по пунктам 1 и 3 повестки дня для группы экспертов по всепогодным полетам (AWOP). 15-ое совещание, Монреаль, сентябрь—октябрь 1994.
7. Молоканов Г.Ф. Точность и надежность навигации летательных аппаратов. — М.: Машиностроение, 1967.