

## АЕРОКОСМІЧНІ СИСТЕМИ МОНІТОРИНГУ ТА КЕРУВАННЯ

УДК 629.735.05:519.226(045)

**В.П. Харченко**, д-р техн. наук, проф.  
**І.В. Остроумов**, асп.

### ІМОВІРНІСНІ ХАРАКТЕРИСТИКИ ВІДХИЛЕНЬ ПОВІТРЯНИХ КОРАБЛІВ ВІД ЗАДАНОГО ЕШЕЛОНУ ПОЛЬОТУ

*Оцінено ймовірнісні характеристики відхилення повітряного корабля від заданого ешелону польоту за відповідною цільністю ймовірності з використанням спеціально розробленого програмного комплексу.*

*The probabilistic characteristics of the aircraft deviation from the flight-planned level have been estimated. Deviation probability density has been used. Special program software has been used for estimation deviation probability density.*

#### Постановка проблеми

Однією з основних причин виникнення конфліктних ситуацій під час польоту за маршрутом є незаплановані відхилення повітряного корабля (ПК) від заданої траєкторії руху. Про це свідчать результати аналізу стану безпеки повітряного руху як у межах України, так і за кордоном [1; 2]. Дотримання заданого нормами вертикального ешелонування [3] висотного інтервалу є неодмінною умовою виконання польотів. Порушення одним з учасників повітряного руху заданих норм ешелонування впливає на загальний стан безпеки польотів і може стати причиною виникнення ситуації небезпечних зближень ПК.

На нормальний хід польоту за маршрутом впливає велика кількість різнорідних факторів, загальна дія яких може призвести до відхилення ПК. Основними з таких факторів є:

- технічний стан ПК та навігаційного обладнання;
- погіршення метеорологічних умов;
- похибки пілотування.

Загальна дія цих факторів значно впливає на один із головних параметрів польоту – висоту.

Ускладнює стан справ наявність похибки визначення абсолютної висоти польоту, яка у загальному випадку становить  $\pm 1$  % від вимірюваного значення для сучасного цифрового навігаційного обладнання.

Крім того, більшість ПК укомплектована ще менш точним вимірювальним обладнанням, що може призвести до негативних результатів в умовах стрімкого зростання інтенсивності авіаперевезень.

Оцінка основних ймовірнісних характеристик відхилень ПК від заданого ешелону польоту є необхідною умовою для аналізу стану безпеки повітряного руху та моделювання ризиків небезпечних зближень ПК.

До таких характеристик можна віднести:

- ймовірність дотримання ПК заданого ешелону польоту;
- ймовірність відхилення ПК за межі дозволеного інтервалу висот;
- ймовірність потрапляння ПК до сусіднього ешелону польоту.

Особливо важливо оцінити ці ймовірності окремо для кожного ПК чи для конкретного екіпажу. Суттєво впливає на ці величини техніка пілотування ПК, а отже, людський фактор справляє безпосередній вплив на ймовірнісні характеристики відхилення ПК, а їх оцінка характеризує професійність екіпажу. Авіакомпанії повинні проводити постійний моніторинг параметрів контролю заданого рівня безпеки авіаційних перевезень.

#### Оцінка цільності ймовірності відхилення повітряних кораблів від заданого ешелону польоту

Для розрахунку ймовірнісних характеристик відхилення ПК від заданого ешелону польоту доречно використовувати записи висоти польоту.

Переважає більшість ПК натеper укомплектована бортовою апаратурою реєстрації. Основним завданням різноманітних типів подібного обладнання є безперервний запис інформації від численних датчиків, розміщених на борту ПК.

Зазвичай інформація записується на звичайну карту пам'яті. Після кожного польоту екіпаж змінює нагромаджувач інформації на новий. Карту пам'яті із записом приєднують до персонального комп'ютера і за допомогою спеціального програмного забезпечення записану інформацію піддають декодуванню. Далі записи польоту додаються до авіаційної бази даних і там зберігаються.

Оскільки одним з фіксованих параметрів руху ПК є абсолютна висота польоту, то її записи можуть бути отримані з електронної бази характеристик польоту за будь-які рейси, для різних екіпажів чи для різних літаків.

За результатами статистичної оцінки вибраних записів висоти польоту будується гістограма, що характеризує відхилення ПК, які сталися під час польотів.

На підставі отриманої гістограми виконують розрахунок щільності ймовірності відхилення ПК від заданого ешелону польоту.

У загальному випадку як щільність імовірності використовують подвійний розподіл Лапласа у вигляді [4]:

$$f(h) = (1 - \alpha_1) \frac{1}{2a_1 b_1 \Gamma(b_1)} \exp\left(-\left|\frac{h - \mu}{a_1}\right|^{1/b_1}\right) + \alpha_1 \frac{1}{2a_2 b_2 \Gamma(b_2)} \exp\left(-\left|\frac{h - \mu}{a_2}\right|^{1/b_2}\right),$$

де  $\alpha \in (0, 1)$  – параметр суміші, що відповідає за внесок кожної з частин щільності розподілу;

$a_1, a_2$  – додатні параметри масштабу;

$b_1, b_2$  – параметри форми;

$\mu$  – математичне сподівання;

$\Gamma(b) = \int_0^{\infty} e^{-t} t^{b-1} dt$  – ейлерова гамма-функція.

Параметри розподілу оцінюють методом максимальної достовірності, а отриману систему рівнянь розв'язують з використанням методу Ньютона [5].

### Програмний комплекс оцінки щільності ймовірності відхилення

Для оцінки параметрів щільності ймовірності відхилення за результатами записів абсолютної висоти польоту розроблено спеціальний програмний комплекс.

Основні завдання програмного комплексу:

- розпізнавання записів параметрів польоту ПК, виконаних бортовою системою реєстрації «БУР-5», підданих цифровому декодуванню програмним забезпеченням «Монстр»;
- фільтрація великих похибок вимірювального обладнання ПК, вибір відповідної ділянки польоту для подальшого аналізу;
- автоматичне розпізнавання заданого ешелону польоту ПК;
- попередня статистична обробка запису абсолютної висоти польоту;
- зберігання записів у загальній базі даних польотів;
- статистична обробка вимірних даних з визначенням основних параметрів закону, що описує

щільність імовірності відхилення ПК від заданої траєкторії руху окремо для кожного польоту ПК, для кожного ПК, окремо для кожного типу ПК та для вибраних записів, а також загалом для всіх ПК у базі даних польотів.

Вхідними даними для роботи програми є текстовий файл з даними висоти польоту ПК через певні проміжки часу. Інформація такого вигляду отримується за допомогою функції експорту дискретизованих величин висоти польоту програмним забезпеченням «Монстр».

Після завантаження до програми нового запису висоти польоту будується графік залежності зміни абсолютної висоти польоту ПК  $h_{\text{абс}}$  залежно від часу (рис. 1).

Програмний комплекс забезпечує розрахунок параметрів розподілу тільки для польоту на заданому ешелоні.

Ділянки зльоту і посадки та зміни заданого ешелону польоту не враховуються в подальшій статистичній обробці.

Автоматично програмне забезпечення пропонує стандартні межі прямолінійної ділянки польоту для подальшої обробки. У разі потреби вибір можна виконати в ручному режимі.

Після вибору прямолінійної ділянки польоту (рис. 2) виконується функція фільтрації «великих похибок» для зменшення впливу інструментальних похибок.

Підменю «Гістограма» виконує попередню статистичну обробку даних та побудову гістограми відхилення ПК від заданої траєкторії польоту (рис. 3). Крім того, оцінюються значення абсолютної висоти заданого ешелону польоту та проміжок часу, для якого виконується оцінювання.

За допомогою підменю «База» додається оцінена статистична інформація до загальної бази даних польотів. Крім того, зберігаються такі дані, як відомості про модель літака, бортовий номер ПК, скорочена інформація про виконуваний рейс, дата запису, крок шкали вимірювання барометричного висотоміра.

Для оцінки параметрів щільності ймовірності відхилення ПК від заданої траєкторії руху за результатами записів декількох польотів використовується меню «База даних».

Спочатку необхідно вибрати польоти для подальшої взаємної їх обробки. Щоб вибрати конкретні польоти, позначку «+» устанавлюють навпроти відповідного польоту, натиснувши ліву кнопку мишки на назві.

За результатами аналізу 22 польотів ПК Ан-140 будується загальна гістограма відхилення від заданої висоти (рис. 4).

У вікні «Таблиця значень» відображається загальна вибірка для обраних польотів.

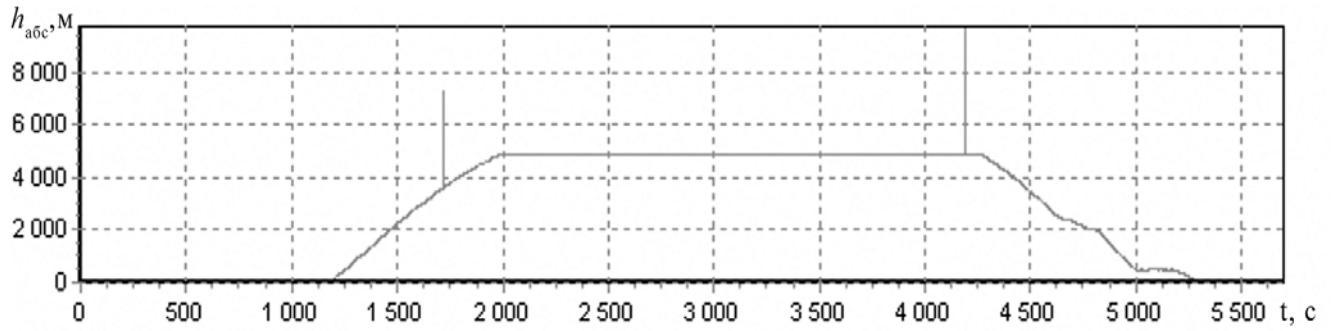


Рис.1. Запис зміни параметра абсолютної висоти під час польоту

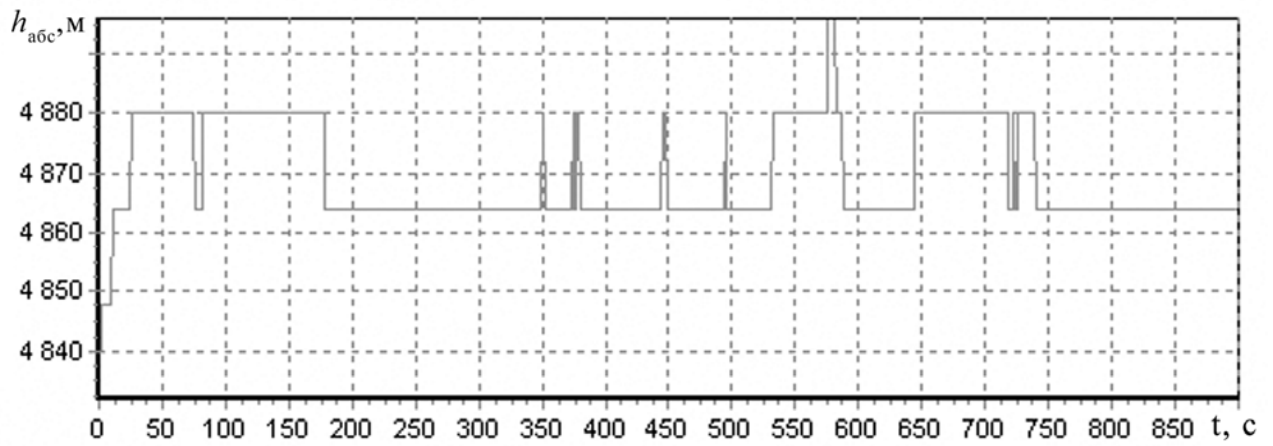


Рис.2. Незаплановані відхилення ПК від заданої висоти польоту

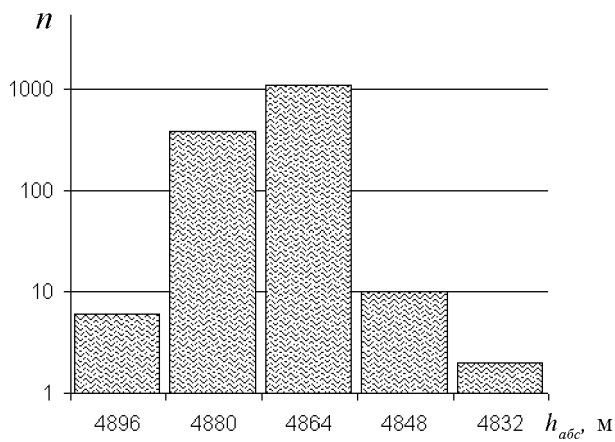


Рис. 3. Гістограма відхилення ПК від заданої висоти польоту

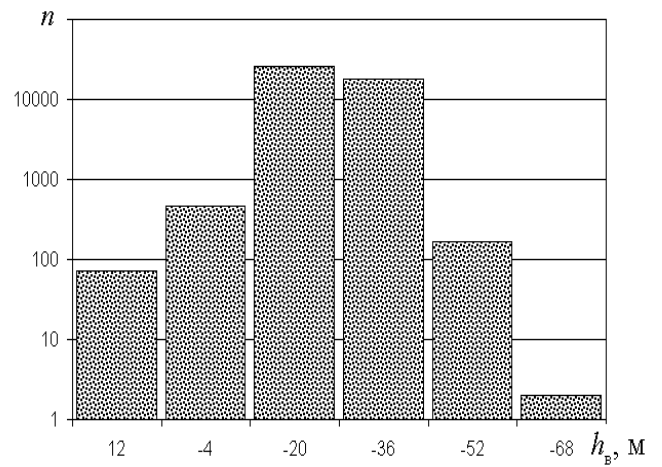


Рис.4. Загальна гістограма відхилення

Підменю «Статистична оцінка» забезпечує розрахунок параметрів, що характеризують загальну вибірку вимірів за такою інформацією:

- кількість одночасно оцінюваних польотів;
  - максимальне відхилення ПК від заданої траєкторії польоту вгору;
  - максимальне відхилення ПК від заданої траєкторії польоту вниз;
  - ширина смуги відхилення;
  - середнє математичне значення;
  - дисперсія;
  - загальний час спостереження;
  - період реєстрації значень абсолютної висоти польоту ПК бортовим обладнанням;
  - кількість вильотів ПК за задані межі коридора;
  - параметр альфа подвійного розподілу Лапласа.
- Далі виконується розрахунок параметрів закону розподілу ймовірності відхилення ПК від заданої висоти польоту, таких, як параметри масштабу і форми та математичного сподівання.

#### Оцінювання щільності ймовірності відхилення для літака Ан-140

Для оцінювання щільності ймовірності відхилення ПК від заданої висоти польоту були використані записи 22 польотів літака Ан-140 для ділянки заданого ешелону польоту ЕП160. Після декодування зафіксованої інформації застосували розроблений програмний комплекс для розрахунку параметрів подвійного розподілу Лапласа. У результаті отримано такі значення параметрів:  $\mu = -24,927$ ;  
 $\alpha = 0,0035533$ ;  
 $a_1 = 29,686$ ;  
 $a_2 = 252,13$ ;  
 $b_1 = 0,5$ ;  
 $b_2 = 1$ .

#### Оцінювання основних ймовірнісних характеристик відхилення літака Ан-140 від заданої висоти польоту

Ймовірність відхилення ПК до певної зони простору за відомою щільністю ймовірності можна визначити як площу фігури, зверху обмежену кривою щільності, знизу – віссю абсцис, а з боків – відповідним висотним інтервалом (рис. 5):

$$P = P\{\xi \in [a, b]\} = \int_a^b f(h)dh,$$

де  $a$ ,  $b$  – межі відповідного висотного інтервалу. Політ по маршруту на заданому ешелоні вимагає від екіпажу дотримання заданої нормами ешелонування відповідного висотного інтервалу, що становить  $\pm 60$  м від висоти ешелону в межах RVSM простору [3].

Для ешелону польоту ЕП160 відповідає абсолютна висота  $h_{\text{зад}} = 4900$  м [3].

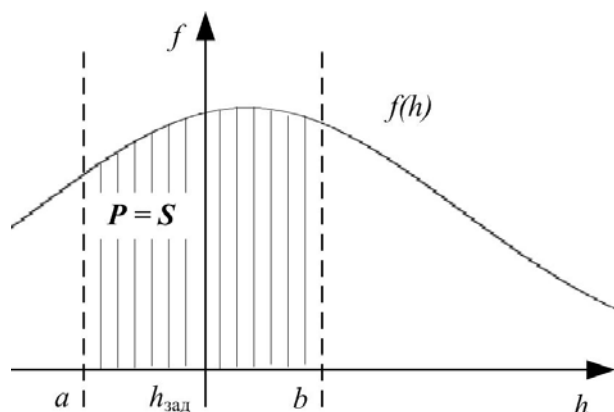


Рис. 5. Оцінка ймовірності відхилення

Тоді ймовірність дотримання ПК заданого ешелону польоту для літака Ан-140 становитиме

$$P_1 = \int_{-60}^{60} f(h) = 0,95.$$

Ймовірність відхилення ПК від дозволеного інтервалу висот:

$$P_2 = 1 - P_1; P_2 = 1 - 0,95 = 0,05.$$

Ймовірність потрапляння ПК до сусіднього, зустрічного ешелону польоту відповідає ймовірності відхилення ПК від заданої висоти ешелону на величину більшу за  $\pm 240$  м:

$$P_3 = \int_{-360}^{-240} f(h) + \int_{240}^{360} f(h) = 2,9 \cdot 10^{-4}.$$

#### Висновки

Подано спеціалізований програмний комплекс оцінювання основних параметрів щільності ймовірності відхилення ПК від заданого ешелону польоту, за який використано подвійний розподіл Лапласа. Виконано аналіз параметрів розподілу на підставі записів абсолютної висоти польоту літака Ан-140 та оцінено основні ймовірнісні характеристики відхилення конкретного ПК від заданого ешелону польоту.

#### Література

1. *Анализ состояния аварийности в гражданской авиации Украины за период 1998 – 2007 годы.* – К.: Госавиаадминистрация, 2008. – 80 с.
2. *SAR 763. Aviation Safety Review 2005.* Safety Regulation Group, Civil Aviation Authority, 2006.
3. *Сокращённый минимум вертикального эшелонирования (RVSM) – К.: Альфа – Принт, 2002.* – 80 с.
4. *Международная организация гражданской авиации.* Группа экспертов по рассмотрению общей концепции эшелонирования. Совещание (6; 1988). Doc 9536, RGCS/6 TOM 1. Доклад: Монреаль, 28 ноября – 15 декабря 1988 г. Т. 1 // ICAO. – Монреаль, 1988. – 270 с.
5. *Харченко В.П., Остроумов И.В.* Щільність ймовірності відхилення літального апарата від заданої висоти польоту // *Електроніка та системи управління.* – 2008. – № 2 (16). – С. 85–91.

