

АЕРОКОСМІЧНІ СИСТЕМИ МОНІТОРИНГУ ТА КЕРУВАННЯ

УДК 629.735.05:519.226(045)

В. П. Харченко, д.т.н., проф.
І. В. Остроумов, асп.
Ю. В. Зайцев, нач. від.

БАГАТОПАРАМЕТРИЧНА КЛАСИФІКАЦІЯ СПЕКТРА ПОЛЬОТНИХ СИТУАЦІЙ

Подано принципи багатопараметричної класифікації спектра польотних ситуацій. Виконано розрахунок основних параметрів для класифікації польотної ситуації за відхиленнями навігаційних параметрів у вертикальній та горизонтальній площинах.

The multivariate classification principle of flight situation range has been represented. Main parameters of classification flight situation by two parameters (horizontal and vertical deviation from flight planed trajectory) has been estimated.

Постановка проблеми

У зв'язку з невинним зростанням обсягів авіаційних перевезень збільшується кількість повітряних кораблів (ПК) у повітряному просторі, що потребує постійного вдосконалення функціонування системи аеронавігаційного забезпечення для гарантування потрібного рівня безпеки повітряного руху.

Пілотування в сучасному завантаженому просторі вимагає від учасників повітряного руху суворого дотримання заданої траєкторії.

Непередбачене відхилення ПК може стати причиною виникнення складної конфліктної ситуації з учасниками повітряного руху.

Причиною непередбачених відхилень окремих параметрів польоту від оптимальних значень є результат дії численних імовірнісних факторів на нормальний хід польоту. Такими факторами можуть стати:

- несприятливі метеорологічні умови;
- відмови та несправності окремих елементів функціональних систем;
- технічний стан ПК і навігаційного обладнання;
- зниження точності навігаційних систем;
- похибки пілотування.

Відхилення ПК призводять до виникнення спектра можливих польотних ситуацій, а нерідко спонукають до розвитку конфліктної ситуації, що надалі може призвести до катастрофи. Тому необхідним стає постійне відслідковування основних навігаційних параметрів руху ПК.

Для дотримання заданого рівня безпеки доцільно класифікувати відхилення навігаційних параметрів відповідно до ступеня небезпеки.

Одним із найбільш перспективних напрямів сучасної теорії керування безпекою польотів є багатоальтернативна класифікація ситуацій, що дозволяє детальніше аналізувати стан [1].

Розпізнавання наявної польотної ситуації на основі аналізу значень основних навігаційних параметрів ПК є вагомим засобом контролю за дотриманням безпеки руху ПК.

Відповідно до багатоальтернативної класифікації у випадку, коли фактори, що впливають на політ ПК, не діють або результат їх дії не порушує безпеку виконання польотів, то наявна нормальна ситуація (НС) [2]. Виконання польоту за таких умов оптимальне. Проте у процесі експлуатації ПК трапляються деякі відхилення від оптимальних значень параметрів системи, що призводить до виникнення особливої ситуації, яка досить небезпечна і може призвести до значного зниження рівня безпеки чи навіть до катастрофи.

За ступенем небезпеки особливі ситуації поділяють на такі [1; 2]:

- ускладнення умов польоту (УУП);
- складну ситуацію (СС);
- аварійну ситуацію (АС);
- катастрофічну ситуацію (КС).

Натепер багатоальтернативну класифікацію повітряного стану за одним параметром широко застосовують для контролю витримування значень у багатьох сучасних навігаційних приладах. Чимало публікацій висвітлюють це питання [1; 3].

На відміну від класифікації за одним параметром багатопараметрична класифікація спектра польотних ситуацій менш досліджена. Це зумовлено складністю побудови математичних моделей класифікації та їх практичного використання. Саме тому ще й досі залишаються відкритими питання вибору методу та зон класифікації.

З огляду на проведені дослідження **мета** цієї роботи полягає в розвитку теорії багатопараметричної класифікації спектра польотних ситуацій через застосування ймовірнісного методу розпізнавання, що ґрунтується на формулі Байєса,

з використанням багатопараметричних залежностей для класифікації за двома основними навігаційними параметрами:

- висотою польоту;
- боковим відхиленням.

Багатопараметрична класифікація

Поняття польотної ситуації тісно пов’язано зі значенням кожного з численних навігаційних параметрів (рис.1).

Багатопараметрична класифікація польотної ситуації за ступенем небезпеки розглядає загальний стан ПК за сукупністю навігаційних параметрів [2]:

- величини відхилень ПК від заданого ешелону польоту у вертикальній і горизонтальній площинах;
- відстань між ПК на одному ешелоні;
- швидкість польоту;
- кутові координати.

Непередбачене відхилення значення одного із сукупності цих параметрів може стати причиною зміни польотної ситуації, а тривале надмірне відхилення – причиною катастрофи. Крім того, оскільки ПК – це складна динамічна система, зміна одного з параметрів неодмінно впливає на відхилення зв’язаних з ним інших параметрів. Саме тому дослідження сукупності всіх параметрів – одне з найважливіших завдань безпеки польотів.

Для багатопараметричної класифікації польотних ситуацій доцільно використовувати ймовірнісний метод розпізнавання, що ґрунтується на формулі Байєса [4].

Основними перевагами теорії Байєса порівняно з іншими методами розпізнавання є:

- вирішальне правило Байєса оптимальне;
- формула виводиться в явному аналітичному вигляді;
- формула проста у реалізації, дуже легко реалізується програмно;

– формула потребує мінімальних апаратних затрат для обчислення;

– для класифікації оцінюються апіорні ймовірності належності кожному з класів, що потрібно для оцінювання відповідних ризиків.

Критерій Байєса ґрунтується на розрахунку апостеріорної ймовірності для кожного з класів ситуацій за формулою

$$\hat{q}_k(x_s^{(n)}) = \frac{p_k \hat{\rho}_k^{(n)}(x_s^{(n)})}{\sum_{k=1}^N p_k \hat{\rho}_k^{(n)}(x_s^{(n)})},$$

де

$k = \overline{1, N}$ – індекс відповідного класу;

N – кількість класів;

n – кількість вимірювань одного параметра;

s – індекс відповідного параметра;

p_k – апіорна ймовірність k -го класу;

$\hat{\rho}_k^{(n)}(x_s^{(n)})$ – умовна ймовірність k -го класу.

Загальна апіорна ймовірність відповідного класу ситуації може бути оцінена як добуток відповідних апіорних ймовірностей p_k^s для кожного з класів:

$$p_k = \frac{\prod_{s=1}^K p_k^s}{\sum_{k=1}^N \prod_{s=1}^K p_k^s}, \tag{1}$$

де K – кількість параметрів.

Умовна ймовірність класу ситуації $\hat{\rho}_k^{(n)}(x_s^{(n)})$ є добутком значень умовної щільності ймовірності для різних значень вимірювальних параметрів:

$$\hat{\rho}_k^{(n)}(x_s^{(n)}) := \prod_{i=1}^n \hat{\rho}_k(x_s^i),$$

$$x^{(n)} = (x_1, \dots, x_n).$$

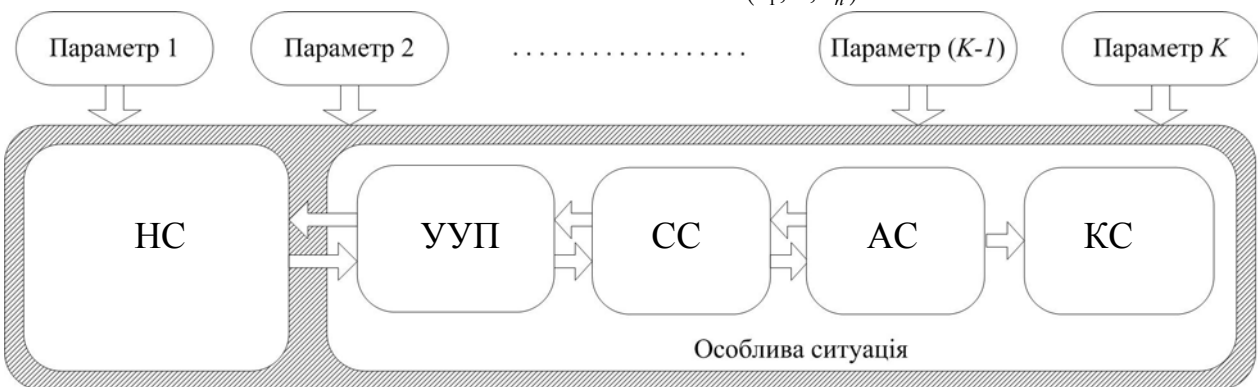


Рис. 1. Багатопараметрична класифікація

Як умовну щільність імовірності використано щільність багатопараметричного нормального розподілу [5] у вигляді

$$\hat{p}_k(x) = \frac{1}{(2\pi)^{K/2} |B|^{-1/2}} \exp\left[-\frac{1}{2} (B^{-1}(x - \mu)^T \times (x - \mu))\right], \quad (2)$$

де

$\hat{\delta} = (\hat{\delta}_1, \hat{\delta}_2, \dots, \hat{\delta}_s)$ – вектор результатів вимірювань усіх параметрів;

$\mu = (\mu_1, \mu_2, \dots, \mu_s)$ – вектор математичних сподівань для кожного з параметрів;

B – матриця середньоквадратичних відхилень:

$$B = \begin{pmatrix} \sigma_1^2 & \sigma_{12} & \dots & \sigma_{1s} \\ \sigma_{21} & \sigma_2^2 & \dots & \sigma_{2s} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ \sigma_{s1} & \sigma_{s2} & \dots & \sigma_s^2 \end{pmatrix}.$$

Після оцінювання апостеріорних імовірностей класів ситуацій виконують розпізнавання через вибір класу ситуації, для якого ця ймовірність максимальна.

У випадку декількох класів ситуацій з однаковими апостеріорними ймовірностями з-поміж них вибирають клас за максимумом апіорної ймовірності.

Двопараметрична класифікація

Одними з найголовніших навігаційних параметрів руху ПК під час польоту на заданому ешелоні є величини відхилення в горизонтальній та вертикальній площинах від заданої траєкторії [6].

Побудову зон простору, що відповідають певним класам ситуацій у вертикальній та горизонтальній площинах, показано схематично на рис. 2.

У вертикальній площині (рис.2, а) нормальній ситуації (НС) відповідає ситуація, при якій ПК знаходиться в межах свого ешелону польоту. Критерієм, який використовується для визначення того, що ПК зайняв конкретний рівень, є величина $h_N \pm 60$ м від висоти заданого ешелону польоту H_{FL} , у повітряному просторі з RVSM.

В іншому повітряному просторі він становить ± 90 м.

У випадку незапланованого відхилення ПК на величину більшу за дозовану відбувається вихід ПК за межі заданого ешелону польоту, що є початком ситуації УУП.

Для позначення напряму відхилення вводяться індекси «+» та «-», що позначають відхилення ПК вгору та вниз відповідно.

У випадку перетину середини міжешелонної зони ПК потрапляє у СС. Аварійна ситуація виникає, коли ПК настільки відхилився від заданої висоти польоту, що потрапляє в сусідній ешелон польоту. Подальше відхилення ПК у тому ж напрямку призводить до потрапляння в зону, обмежену геометричними розмірами d сусіднього ПК і перетину траєкторії його руху – КС.

Розглядаючи відхилення ПК у горизонтальній площині (рис. 2, б), зону, що відповідає НС, обмежують границі ешелону польоту, що становить ± 10 км (для ешелонів польоту нижче FL275).

Ситуації УУП та СС розбивають навпіл простір між двома паралельними ешелонами. Аварійна ситуація відповідає потраплянню ПК до сусіднього ешелону польоту.

Перетин зони, що обмежується геометричними розмірами ПК d на сусідньому ешелоні польоту, відповідає КС.

Результати оцінювання апіорних імовірностей класів ситуацій за багатоальтернативної класифікації за одним параметром для величин відхилення та результат розрахунку відповідних загальних апіорних імовірностей класів за формулою (1) наведено в табл.1.

Результати оцінювання апіорних імовірностей класів ситуацій у випадку відхилення ПК у горизонтальній площині були отримані за методикою [7] для обладнання VOR/DME/ІНС. Як щільність імовірності відхилення було використано нормальний закон розподілу з параметрами $\mu = 1,5$, $\sigma = 0,57$.

Таблиця 1

Апіорна ймовірність класів ситуацій

Клас ситуації	Відхилення в горизонтальній площині	Відхилення у вертикальній площині			Загальна ймовірність
		вгору	вниз	загальна	
НС	0,686	0,5	0,5	0,5	0,95
УУП	0,021	0,16	0,2	0,36	0,021
СС	0,036	0,04	0,056	0,096	$9,6 \cdot 10^{-3}$
АС	0,22	$6,3 \cdot 10^{-3}$	$9 \cdot 10^{-3}$	$15,3 \cdot 10^{-3}$	$9,4 \cdot 10^{-3}$
КС	$3,224 \cdot 10^{-7}$	$3 \cdot 10^{-4}$	$4,3 \cdot 10^{-4}$	$7,3 \cdot 10^{-4}$	$6,5 \cdot 10^{-3}$

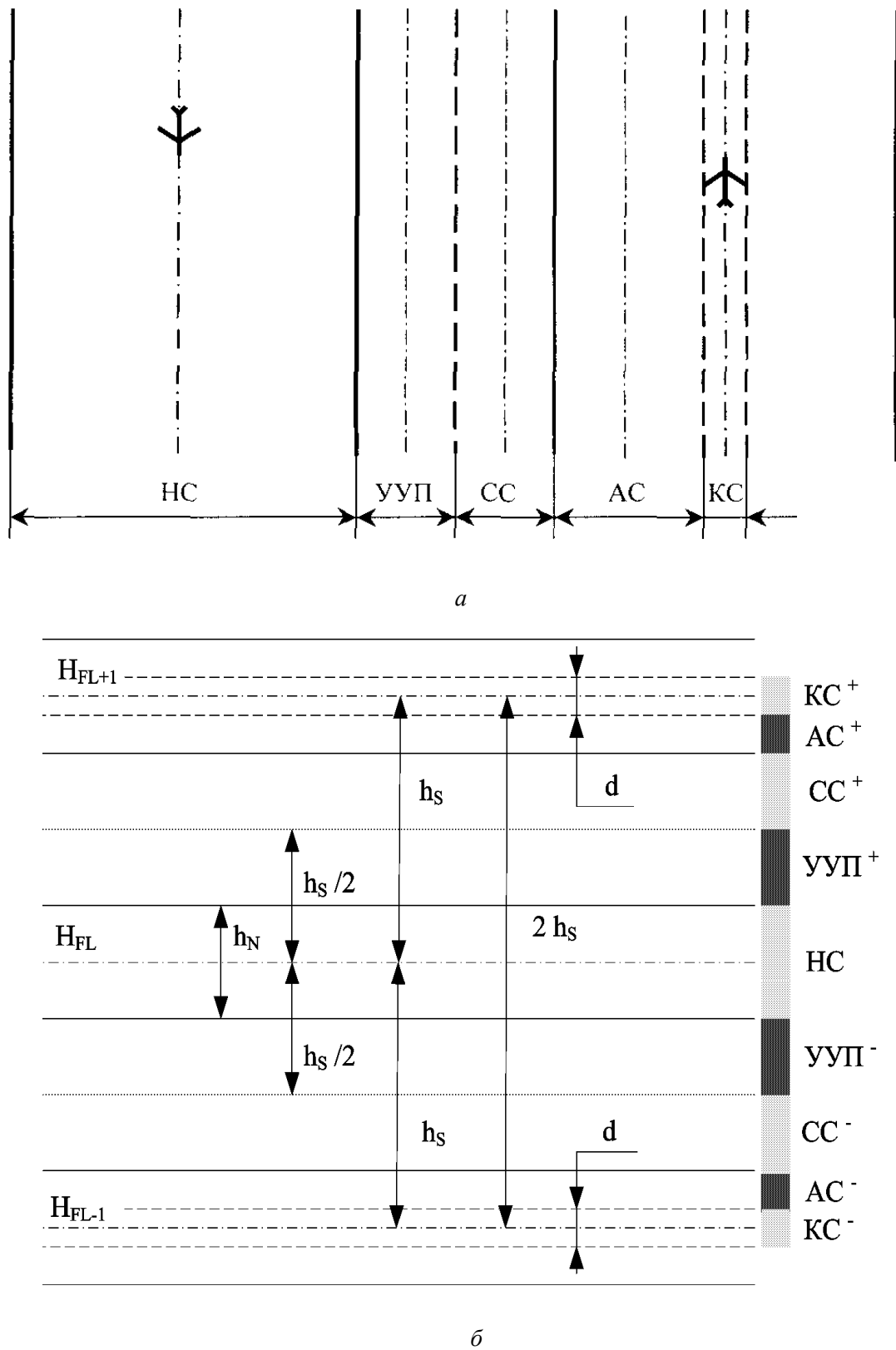


Рис. 2. Багатоальтернативна класифікація відхилення ПК у вертикальній (а) та горизонтальній (б) площинах (h_s – відстань між сусідніми ешелонами)

Оскільки відхилення ПК униз та вгору не є рівноймовірнісними подіями для регіону Європи [8; 9], у табл.1 для кожного з класів ситуацій наведено два значення апіорної ймовірності (для відхилення вгору та вниз) [7]. При цьому значення ймовірності кожного з класів визначають як суму відповідних ймовірностей.

Основними параметрами, що характеризують багатопараметричну щільність нормального розподілу (2), є вектор математичних сподівань μ та матриця середньоквадратичних відхилень B для кожного з класів ситуацій за параметром відхилення у вертикальній та горизонтальній площинах.

Математичні сподівання та середньоквадратичні відхилення досліджуваного параметра для кожного з класів ситуацій можна обчислити за відповідними формулами:

$$m_k = \frac{\int_{a_k}^{b_k} x \cdot f(x) dx}{\int_{a_k}^{b_k} f(x) dx};$$

$$\sigma_k^2 = \frac{\int_{a_k}^{b_k} (x - m_k)^2 \cdot f(x) dx}{\int_{a_k}^{b_k} f(x) dx},$$

де $f(x)$ – щільність ймовірності відхилення ПК від заданої траєкторії польоту;

a_k і b_k – нижня та верхня межі k -го класу повітряної ситуації.

Як щільність ймовірності відхилення ПК від заданої траєкторії польоту у вертикальній площині застосовують подвійний розподіл Лапласа [7; 9; 10], а в горизонтальній – щільність нормального розподілу [2].

Результати розрахунку математичних сподівань та середньоквадратичних відхилень наведено в табл. 2 та 3 відповідно.

Зовнішній вигляд двопараметричної умовної щільності ймовірності, що характеризує появу НС за результатом оцінювання параметрів відхилення ПК у горизонтальній та вертикальній площинах від заданої траєкторії польоту, показано на рис. 3.

Висновки

Наведено основні принципи багатопараметричної класифікації спектра польотних ситуацій з використанням формули Байєса. Оцінено апіорні ймовірності виникнення відповідних класів ситуацій за двопараметричною класифікацією для одночасного оцінювання величин відхилення у вертикальній і горизонтальній площинах. Подано математичні сподівання та середньоквадратичні відхилення для дев'ятикласової моделі, що характеризують умовну багатопараметричну щільність ймовірності класу ситуації. За розрахованими параметрами виконано побудову двопараметричної щільності нормального розподілу, що характеризує НС.

Таблиця 2

Математичні сподівання

Відхилення	Класи повітряного стану								
	КС ⁻	АС ⁻	СС ⁻	УУП	НС	УУП ⁺	СС ⁺	АС ⁺	КС ⁺
У вертикальній площині, м	-297,46	-262,8	-184,2	-96,79	-2,1636	96,149	183,82	262,68	297,46
У горизонтальній площині, км	-61,250	-61,225	-42,5	-17,5	0,1	17,5	42,5	61,225	61,250

Таблиця 3

Середньоквадратичні відхилення

Відхилення	Класи повітряного стану								
	КС ⁻	АС ⁻	СС ⁻	УУП	НС	УУП ⁺	СС ⁺	АС ⁺	КС ⁺
У вертикальній площині, м ²	1,443	15,435	24,496	24,999	32,642	24,892	24,4	15,417	1,443
У горизонтальній площині, км ²	7,2·10 ⁻⁴	5,2·10 ⁻³	0,16	0,36	3,6	0,365	0,017	5,2·10 ⁻³	7,2·10 ⁻⁴

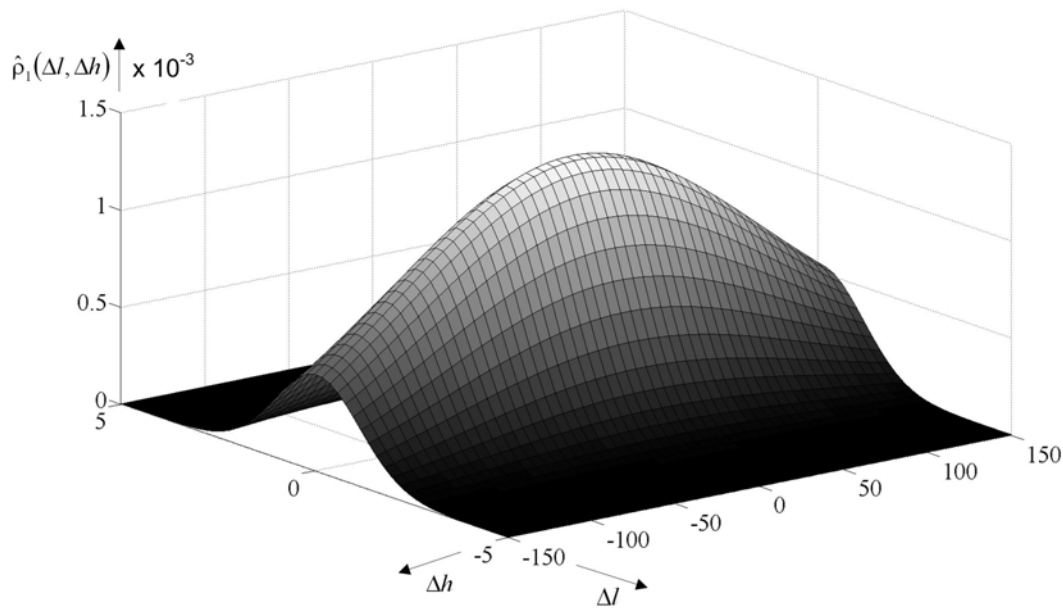


Рис. 3. Двопараметрична щільність нормального розподілу, що характеризує НС

Література

1. Харченко В. П. Многоальтернативный последовательный метод в задачах ситуационного анализа воздушной обстановки / В. П. Харченко, Г. Г. Косенко // Моделирование радиоэлектронных систем и комплексов обеспечения полётов: сб. науч. тр. – К.: КМУГА, 1996. – С. 3–10.
2. *Энциклопедия безопасности авиации* / Н.С. Кулик, В.П. Харченко, М.Г. Луцкий и др.: под ред. Н.С. Кулика. – К.: Техніка, 2008. – 1000 с.
3. Kharchenko V. Multiple-choice classification in air navigation system / V. Kharchenko, I. Ostroumov // Proc. of the NAU. – 2008. – № 2. – P. 5–9.
4. Jean-Michel Marin. Bayesian Core: A Practical Approach to Computational Bayesian / Marin Jean-Michel, P. Robert Christian. – NY: Springer Texts in Statistics, 2007. – 258 p.
5. Боровков Л. Л. Математическая статистика / Л. Л. Боровков. – М.: Наука, 1984. – 472 с.
6. Чёрный М.А. Воздушная навигация: учеб. для сред. спец. учеб. заведений / М.А. Чёрный, В.И. Кораблин. – 4-е изд. – М.: Транспорт, 1991. – 432 с.
7. Харченко В.П. Щільність ймовірності відхилення літального апарата від заданої висоти польоту / В. П. Харченко, І.В. Остроумов // Електроніка та системи управління. – 2008. – №2 (16). – С. 85–91.
8. Остроумов І.В. Методика оцінки ймовірності відхилення літака при багатоальтернативній класифікації ситуацій повітряного руху / І.В. Остроумов, В.П. Харченко // Проблеми інформатизації та управління. – 2008. – № 4 (22). – С. 72–77.
9. Международная организация гражданской авиации. Группа экспертов по рассмотрению общей концепции эшелонирования. Совещание (6; 1988). Дос 9536, RGCSP/6. Т. 1. Доклад: Монреаль, 28 нояб. – 15 дек. 1988 г. Т. 1/ICAO. – Монреаль, 1988. – 270 с.
10. Международная организация гражданской авиации. Группа экспертов по рассмотрению общей концепции эшелонирования. Совещание (6; 1988). Дос 9536, RGCSP/6. Т. 2. Доклад: Монреаль, 28 нояб. – 15 дек. 1988 г. Т. 2/ ICAO. – Монреаль, 1988. – 672 с.

Стаття надійшла до редакції 03.12.08.