

НАЦІОНАЛЬНИЙ АВІАЦІЙНИЙ УНІВЕРСИТЕТ

ОСТРОУМОВ ІВАН ВІКТОРОВИЧ

На правах рукопису
УДК 629.735.05: 519.226 (043.3)

БАГАТОАЛЬТЕРНАТИВНА КЛАСИФІКАЦІЯ ПОЛЬОТНИХ
СИТУАЦІЙ ПРИ УПРАВЛІННІ ПОВІТРЯНИМ РУХОМ
В УМОВАХ РИЗИКУ

Спеціальність 05.22.13 – Навігація та управління рухом

АВТОРЕФЕРАТ
дисертації на здобуття наукового ступеня
кандидата технічних наук

Київ-2009

Дисертація є рукописом.

Роботу виконано в Національному авіаційному університеті
Міністерства освіти і науки України.

Науковий керівник заслужений діяч науки і техніки України,
лауреат Державної премії України в галузі
науки і техніки, доктор технічних наук,
професор
ХАРЧЕНКО Володимир Петрович,
Національний авіаційний університет,
проректор з наукової роботи НАУ,
завідувач кафедри аеронавігаційних
систем.

Офіційні опоненти: доктор технічних наук, професор
СІБРУК Леонід Вікторович,
Національний авіаційний університет,
завідувач кафедри електродинаміки НАУ;

кандидат технічних наук, старший
науковий співробітник
СНЦАРЕНКО Петро Миколайович,
Національна академія оборони України,
провідний науковий співробітник центру
воєнно-стратегічних досліджень.

Захист відбудеться 17 лютого 2009 р. о 14⁰⁰ годині на засіданні
спеціалізованої вченої ради Д 26.062.03 при Національному авіаційному
університеті за адресою: 03680, м. Київ-58, просп. Космонавта Комарова, 1,
НАУ.

З дисертацією можна ознайомитись у бібліотеці НАУ за адресою:
03680, м. Київ-58, просп. Космонавта Комарова, 1.

Автореферат розіслано 14 січня 2009 р.

Вчений секретар
спеціалізованої вченої ради
к.т.н., доц., с.н.с.



С.В. Павлова

ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

Актуальність теми. Нормальний хід польоту залежить від великої кількості факторів, дію яких спрогнозувати та попередити досить проблематично, оскільки більшість з них має випадковий характер. Крім того, навігаційному обладнанню притаманні похибки вимірювання. Дія цих факторів спонукає до потреби контролювати основні навігаційні параметри для своєчасного попередження незапланованих відхилень за дозволені межі, що може призвести до небажаних наслідків в умовах інтенсивного зростання авіаперевезень.

Розпізнавання наявної польотної ситуації на підставі аналізу значень основних навігаційних параметрів повітряного корабля (ПК) – вагомий засіб контролю за дотриманням безпеки руху ПК. Для дотримання заданого рівня безпеки потрібно класифікувати незаплановані відхилення навігаційних параметрів відповідно до ступеня небезпеки. Одним з найбільш перспективних напрямів сучасної теорії управління безпекою польотів є багатоальтернативна класифікація ситуацій, що дозволяє виконати більш детальний аналіз повітряного стану.

Для здійснення своєчасної і точної класифікації стану польотної ситуації ефективним є застосування ймовірнісних методів теорії розпізнавання.

Практичний бік реалізації даних методів, зокрема з використанням критерію Байеса забезпечує високу швидкість розпізнавання і потребує мінімальних апаратних затрат. Для розпізнавання потрібна наявність умовної щільності ймовірності класів ситуацій, яка оцінюється за допомогою навчальної вибірки, отриманої за результатами попередніх вимірювань досліджуваного параметра. Проте використання у розрахунках оціненої умовної щільності впливає на процес класифікації і може стати причиною неправильного розпізнавання.

Вагомий внесок у розвиток теорії багатоальтернативної класифікації внесли вчені: С. Аксоу, К.М. Бишоп, К.В. Воронцов, А.Л. Горелик, А. Коротков, Г.А. Тагліагні, Р. Хансон та інші. Питанню розпізнавання польотних ситуацій присвячені праці вчених: В.П. Харченко, Г.Г. Косенко та інших.

Аналіз останніх досліджень багатоальтернативної класифікації ситуацій показує, що значна частина ймовірнісних методів та алгоритмів на основі формули Байеса не враховує похибки оцінки ймовірності правильного розпізнавання, спричиненої тим, що для розрахунку апостеріорних ймовірностей класів використовуються умовні щільності ймовірностей, оцінені за навчальною вибіркою. Урахування цієї похибки підвищить точність розпізнавання та дозволить оцінити оптимальну кількість

вимірювань досліджуваного параметра, необхідну для розпізнавання класу ситуації з максимально можливою ймовірністю.

Крім того, застосування ймовірнісних методів потребує апріорної інформації про класи ситуацій, складність оцінювання якої зумовлюється тим, що випадкові фактори, які діють на досліджувані параметри, є рідкісними подіями, для врахування яких необхідно використовувати специфічні математичні моделі.

Отже, з наведеного вище постає актуальне науково-практичне завдання – створення нового методу багатоальтернативної класифікації та його застосування для розпізнавання стану польотних ситуацій. Крім того, доцільно враховувати записи досліджуваних параметрів попередніх польотів для більш точного визначення характеру відхилення та похибки оцінки ймовірності правильної класифікації, що дозволить забезпечити оптимальний рівень розпізнавання стану польотної ситуації.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами. Роботу виконано в рамках фундаментальних науково-дослідних робіт: шифр 147ДБ-04 – тема «Розробка методів та алгоритмів розпізнавання конфліктних ситуацій у розподілених системах управління динамічними об'єктами» (номер держреєстрації 0104U003744), шифр 493ДБ-08 – тема «Теоретичні засади багатоальтернативного ситуаційного моделювання та оцінки ризиків у соціотехнічних системах» (номер держреєстрації 0108U004004).

Мета і завдання дослідження. Метою роботи є створення і адаптація математичного методу багатоальтернативної класифікації польотних ситуацій при їх неточно відомій щільності ймовірностей.

Для досягнення мети роботи поставлено та розв'язано такі ієрархічно взаємопов'язані завдання:

- аналіз стану безпеки польотів та наявних систем попередження конфліктних ситуацій, а також методів розпізнавання класу ситуації;
- розроблення ймовірнісного методу багатоальтернативної класифікації ситуацій за неточно відомою щільності ймовірності;
- адаптація методу багатоальтернативної класифікації до розпізнавання класу наявної повітряної ситуації;
- верифікація розроблених методик та методу шляхом комп'ютерного моделювання.

Об'єктом досліджень є аеронавігаційна система соціотехнічного типу з інтегрованими компонентами.

Предметом досліджень є метод та алгоритми розпізнавання класів наявних повітряних ситуацій та оцінювання умовної щільності розподілу ймовірності відхилення ПК від заданої траєкторії руху в аеронавігаційній системі.

Методи дослідження. У дисертаційній роботі використано методи математичного аналізу, теорії ймовірностей, імітаційного та комп'ютерного моделювання.

Наукова новизна отриманих результатів.

Розроблено новий математичний метод багатоальтернативної класифікації ситуацій, що враховує неточно відомі щільності ймовірності та забезпечує оптимальний рівень розпізнавання.

Уперше отримано математичну залежність для оцінювання максимальної величини похибки розрахунку ймовірності правильного розпізнавання класів ситуації, що є наслідком використання умовних щільностей ймовірностей, оцінених за навчальною вибіркою.

Запропоновано багатоальтернативну модель побудови класів повітряних ситуацій, яка дає можливість використовувати як щільність ймовірності відхилення ПК від заданої висоти польоту закони зі зміщеним середнім значенням, що дозволить розпізнавати наявний клас ситуації з більшою вірогідністю.

Розроблено нову методику розрахунку невідомих параметрів щільності ймовірності відхилення ПК від заданої траєкторії руху на основі записів попередніх польотів, виконаних бортовою апаратурою реєстрації.

Практичне значення отриманих результатів. Основні результати роботи становлять науково-методологічну основу для створення новітніх автоматизованих систем сигналізації, попередження та розв'язання конфліктних ситуацій, систем обробки польотної інформації та керування повітряним рухом в умовах переходу до нових концепцій виконання польотів та дозволяють розв'язувати такі завдання:

- за рахунок урахування похибки, пов'язаної з тим, що умовні щільності ймовірностей відомі неточно, у процесі класифікації отримується більш точне значення ймовірності правильного розпізнавання порівняно з наявними методами класифікації;

- застосування розробленого методу багатоальтернативної класифікації ситуацій за неточно відомої щільності ймовірності забезпечує оптимальний рівень розпізнавання, що підвищує безпеку систем аеронавігаційного обслуговування;

- своєчасно оцінювати клас наявної польотної ситуації для завчасного попередження розвитку можливої конфліктної ситуації шляхом стеження за відхиленням навігаційних параметрів від заданих значень;

- надавати ймовірність правильного розпізнавання класу наявної повітряної ситуації для подальшого розрахунку ризиків.

Розроблено алгоритмічно-програмний комплекс моделювання багатоальтернативної класифікації польотних ситуацій при управлінні повітряним рухом.

Створений спеціалізований програмний комплекс дозволяє визначати за записами бортової апаратури реєстрації необхідні невідомі параметри щільності ймовірності відхилення конкретного ПК від заданої висоти польоту для оцінювання ймовірнісних характеристик.

Результати досліджень упроваджено в Державіаадміністрації, авіакомпанії «Авіаоптім» та в навчальному процесі університету, що підтверджено відповідними актами впровадження.

Особистий внесок здобувача. Основні положення і результати дисертаційної роботи отримані автором самостійно. У працях, виконаних у співавторстві, здобувачеві належить: у роботі [1] розроблено методику оцінки ймовірності вірного розпізнавання за критерієм Байеса за неточно відомої щільності ймовірності; у [2] запропоновано структурну схему алгоритму оцінки ймовірності правильного розпізнавання класу повітряної ситуації за неточно відомої щільності розподілу ймовірності; у [3] розроблено методику оцінки ймовірності відхилення повітряного корабля до певної зони повітряного простору; у [5] розроблено методику багатопараметричної класифікації польотної ситуації; у [6, 11] розроблено програмне забезпечення для статистичного аналізу результатів записів абсолютної висоти польоту літака; у [7] розроблено методику оцінки оптимальної кількості вимірювань, що є необхідною для розпізнавання класу повітряного стану; у [8] запропоновано методику побудови щільності ймовірності відхилення ПК від заданої висоти польоту; у [9] запропоновано модель поділу простору навколо заданої висоти польоту; у [10] розроблено алгоритм моделювання методу багатоальтернативної класифікації ситуацій при неточно відомій щільності ймовірності та розроблено спеціалізований програмний комплекс; у [13] виведено залежність для оцінки максимальної величини похибки розрахунку ймовірності правильного розпізнавання за формулою Байеса; у [16] виконано оцінку основних причин, що призводять до зростання кількості серйозних інцидентів та авіакатастроф.

Апробація результатів дисертації. Результати роботи обговорювалися на науково-практичній конференції «Проблеми підтримки та контролю державою експорту продукції наукоємного виробництва» (Гостомель, 5-й міжнародний авіакосмічний салон «Авіасвіт - XXI», 2006), Міжнародній науково-технічній конференції «Авіа-2007» та «Авіа-2006» (Київ, НАУ), міжнародних науково-технічних конференціях студентів та молодих вчених «Політ-2008», «Політ-2007», «Політ-2006», «Політ-2004» (Київ, НАУ).

Публікації. Основний зміст дисертації опубліковано в 16 друкованих працях: 9 статтях у збірниках фахових наукових праць, 3 тезах доповідей, 2 матеріалах конференцій та 2 свідоцтвах про реєстрацію авторського права на твір.

Структура і обсяг дисертації. Дисертація складається зі вступу, чотирьох розділів, висновків, списку використаних джерел та додатків. Загальний обсяг роботи становить 153 сторінки, ілюстрованих 61 рисунком та 11 таблицями. Список використаних джерел містить 117 найменувань на 12 сторінках.

ОСНОВНИЙ ЗМІСТ

У **вступі** до дисертації міститься обґрунтування актуальності теми досліджень, зв'язок роботи з науковими темами, визначено об'єкт та предмет досліджень, сформульовано мету та завдання дисертаційної роботи, подано основні результати, що відображають наукову новизну, та описано їх практичне значення, а також наведено апробації основних положень дисертації, публікацій, особистий внесок здобувача та структуру і обсяг дисертації.

У **першому розділі** за результатами аналізу сучасного стану безпеки польотів в Україні та світі з урахуванням зміни інтенсивності повітряного руху встановлено основні причини, що призвели до трагічних наслідків у авіаперевезеннях. Виконаний аналіз наявних методів і систем, призначених для гарантування безпечного, безконфліктного руху ПК, указує на потребу в розробленні нових, більш точних, автоматизованих систем контролю за основними навігаційними параметрами ПК, здатних забезпечити необхідний рівень безпеки в умовах постійного зростання обсягів авіаперевезень.

Установлено фактори, що безпосередньо впливають на нормальне виконання польоту ПК. Обґрунтовано доцільність та необхідність застосування багатоальтернативної класифікації повітряного стану, застосування якої для контролю за відхиленнями навігаційних параметрів ПК від заданих меж дозволить зменшити кількість відхилень ПК від заданої траєкторії руху та підвищити безпеку авіаперевезень.

На підставі аналізу методів та систем розпізнавання класу ситуації обґрунтовано доцільність та оптимальність застосування ймовірнісного методу, що ґрунтується на критерії Байеса, для розпізнавання класу польотної ситуації в умовах багатоальтернативності.

За результатами аналізу проблеми оцінювання умовної щільності ймовірності при розпізнаванні класу наявної польотної ситуації з використанням формули Байеса встановлено можливі шляхи її подолання та вказано на доцільність оцінювання похибки, що виникає під час обчислення апостеріорної ймовірності класів, і її врахування у процесі розпізнавання.

Визначено коло основних взаємопов'язаних завдань, вирішення яких потрібне для досягнення поставленої мети роботи.

У **другому розділі** розроблено новий метод багатоальтернативної класифікації ситуацій за неточно відомої щільності ймовірності, що забезпечує розпізнавання ситуації з оптимальною ймовірністю та враховує

похибку оцінки ймовірності правильного розпізнавання, пов'язану з тим, що для розрахунку апостеріорної ймовірності класу використовуються оцінені за навчальною вибіркою умовні щільності класів ситуацій. Структурну схему роботи методу показано на рис.1.

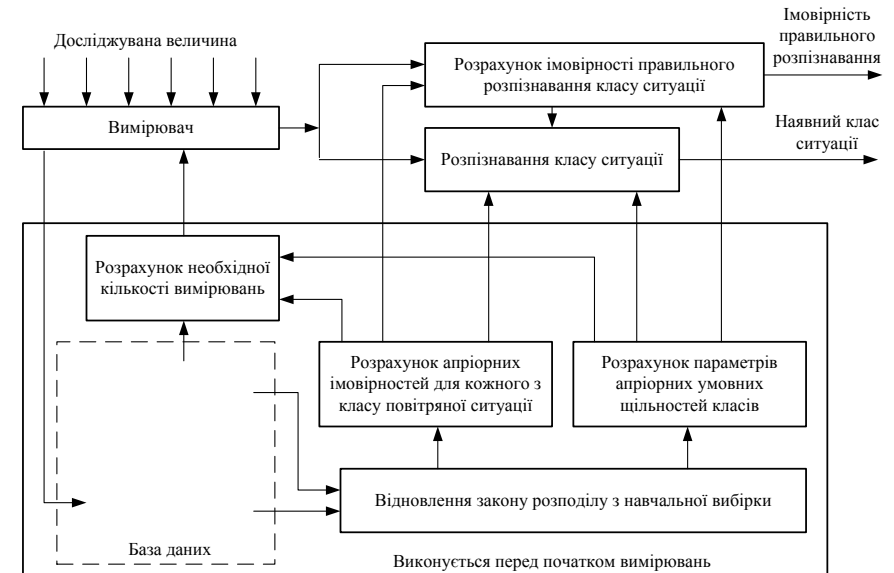


Рис. 1. Структурна схема розробленого методу багатоальтернативної класифікації ситуацій

Розроблений метод починається зі статистичної обробки записів результатів вимірювань досліджуваного навігаційного параметра. Для забезпечення фіксації навігаційного параметра використовується спеціалізована база даних, яка безперервно виконує функції запису значень вимірювань у цифровому вигляді. За допомогою навчальної вибірки з попередніх вимірювань, записаних у базі даних, виконується оцінка щільності ймовірності відхилення цього навігаційного параметра від заданого значення. Як щільність імовірності пропонується використовувати стандартні закони розподілу, основні параметри яких можуть бути оцінені з використанням методу максимальної достовірності.

На першому етапі роботи в умовах, коли немає достатньої кількості попередніх вимірювань, пропонується використовувати значення стандартних параметрів для закону розподілу, отримані за результатом статистичної оцінки для певного типу вимірювального обладнання.

За оціненим розподілом щільності ймовірності відхилення навігаційного параметра від заданого значення виконується розрахунок

апріорних ймовірностей для кожного з класів ситуацій та розрахунки параметрів умовної щільності для кожного класу.

Далі оцінюється оптимальна кількість вимірювань досліджуваного навігаційного параметра, необхідна для правильного розпізнавання класу ситуації з максимально можливою ймовірністю.

Виконуючи оптимальну кількість вимірювань (n) за допомогою вимірювального обладнання, результати записують до спеціалізованої бази даних вимірювань та розпізнають наявний клас ситуації за допомогою використання критерію Байеса з урахуванням похибки розрахунку апостеріорної ймовірності, пов'язаної з тим, що у процесі класифікації використано оцінені значення умовних щільностей ймовірностей класів ситуацій. Крім того, розраховують ймовірності правильного розпізнавання.

Запропонований метод забезпечує розпізнавання в умовах багатоальтернативності для N класів ситуацій A_k ($k=1, N$), кожен з яких характеризується відповідною умовною щільністю ймовірності $\rho(x)$ (рис.2), за яку використано щільність нормального розподілу з певними математичним сподівання m_k та дисперсією σ_k^2 .

Для розпізнавання класу ситуації використано критерій Байеса, за яким рішення на користь класу A_k приймається для ситуації, у межах якої добуток апіорної (p_k) та умовної ($\hat{\rho}_k^{(n)}(x^{(n)})$) ймовірностей має максимальне значення:

$$p_k \hat{\rho}_k^{(n)}(x^{(n)}) = \max \{ p_j \hat{\rho}_j^{(n)}(x^{(n)}) \}, j = \overline{1, N}. \quad (1)$$

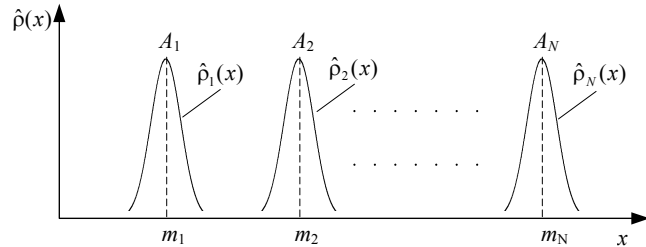


Рис. 2. Класи ситуацій

Умовну ймовірність класу ситуації визначаємо за результатами n вимірювань навігаційного параметра $x^{(n)} = (x_1, \dots, x_n)$ з використанням оціненої умовної щільності $\hat{\rho}_k(x_i)$ ($i = \overline{1, n}$):

$$\hat{\rho}_k^{(n)}(x^{(n)}) := \prod_{i=1}^n \hat{\rho}_k(x_i).$$

У випадку, якщо максимум (1) досягається на декількох значеннях $j = j_1, \dots, j_p$ ($p \geq 2$), рішення приймаємо на користь класу ситуації, для якого апіорна ймовірність має більше значення.

Значення параметрів умовної щільності $\rho(x)$ оцінюємо за результатом попередніх спостережень, тому характер її залежності відомий неточно ($\hat{\rho}(x)$). Для врахування цієї неточності запропоновано враховувати похибку R для розрахунку апостеріорних ймовірностей класів ситуацій, а ймовірність правильного розпізнавання оцінювати з нерівності:

$$P_{\Pi} \geq \hat{P}_{\Pi} - |R|,$$

де \hat{P}_{Π} – ймовірність правильного розпізнавання з використанням оцінених значень умовної щільності.

Наближений розрахунок ймовірності правильного розпізнавання класу ситуації \hat{P}_{Π} виконано за формулою Байеса:

$$\hat{P}_{\Pi} = \max_{1 \leq k \leq N} \left[\frac{p_k \hat{\rho}_k^{(n)}(x^{(n)})}{\sum_{k=1}^N p_k \hat{\rho}_k^{(n)}(x^{(n)})} \right]. \quad (2)$$

Установлено, що максимальна величина похибки оцінки ймовірності правильного розпізнавання R оцінюється за нерівністю

$$|R| \leq \sum_{k=1}^N \left[p_k \max_{\delta_1 \leq a \leq 0} \max_{0 \leq b \leq \delta_2} \varphi(a, b) \right] + [1 - (1 - \alpha)^N], \quad (3)$$

де $\varphi(a, b) = 2\Phi\left(-\frac{a}{b}\right) - 1 + e^{\frac{a^2 + b^2}{2}} \left(1 - 2\Phi\left(-b - \frac{a}{b}\right) \right)$;

$$\delta_1 = -\frac{n}{2} \left(\frac{\sqrt{2}n_{\alpha/2}}{\sqrt{m}} + \ln \left(1 - \frac{\sqrt{2}n_{\alpha/2}}{\sqrt{m}} \right) \right);$$

$$\delta_2 = \frac{\sqrt{n} \sqrt{3}n_{\alpha/2}}{\sqrt{m}};$$

α – величина рівня довіри;

$n_{\alpha/2}$ – квантиль нормального розподілу;

m – обсяг навчальної вибірки.

Характер залежності функції $\varphi(a, b)$ (рис. 3) отримано в результаті дослідження впливу неточно заданої щільності на величину ймовірності правильного розпізнавання класу ситуації.

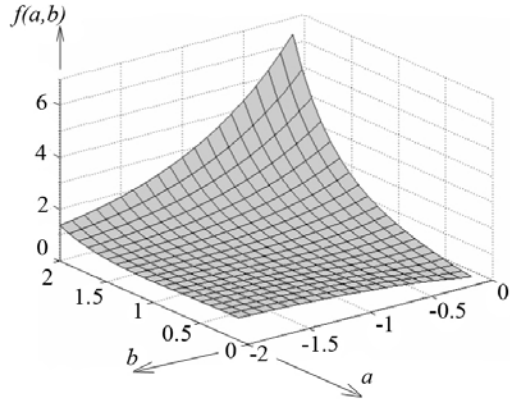


Рис. 3. Зовнішній вигляд функції $f = \varphi(a, b)$

У третьому розділі виконано адаптацію розробленого методу для розпізнавання наявного класу польотної ситуації.

Запропоновано використовувати принцип багатоальтернативності для класифікації повітряного стану. Оскільки одним з найважливіших навігаційних параметрів ПК в умовах ешелонної структури повітряного простору є висота польоту, тоді пропонується класифікувати величину відхилення ПК від висоти заданого ешелону на дев'ять класів ситуацій

Виникнення кожної із ситуацій відповідає потраплянню ПК до певної зони простору рис.4.

Нормальній ситуації (НС) відповідає ситуація, за якої ПК перебуває у межах свого ешелону польоту. Критерієм, який використовується для визначення того, що ПК зайняло конкретний рівень, є величина $h_N = \pm 60$ м від висоти заданого ешелону польоту (H_{FL}), у повітряному просторі де діють скорочені норми вертикального ешелонування. Для іншого повітряного простору $h_N = \pm 90$ м.

У випадку незапланованого відхилення ПК на величину, більшу за дозволена, відбувається вихід ПК за межі заданого ешелону польоту, що є початком ситуації ускладнення умов польоту (УУП).

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

У випадку перетину середини міжешелонної зони ($h_S/2$) ПК потрапляє у складну ситуацію (СС). Аварійна ситуація (АС) виникає, коли ПК настільки відхилився від заданої висоти польоту, що потрапляє у сусідній ешелон польоту. Подальше відхилення ПК у тому ж напрямку призводить до потрапляння у зону, обмежену геометричними розмірами (d) сусіднього ПК і перетину траєкторії його руху – катастрофічну ситуацію (КС).

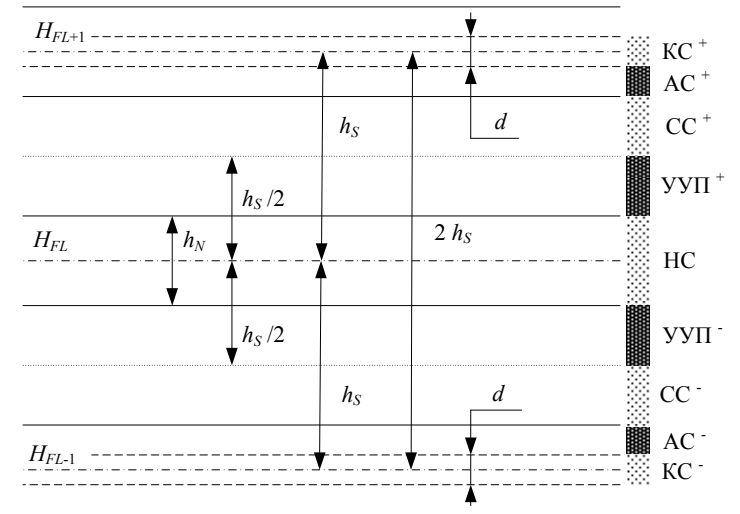


Рис. 4. Дев'ятикласова класифікація відхилень ПК від заданого ешелону польоту

Розроблено методу оцінювання щільності ймовірності відхилення ПК від заданого ешелону польоту на основі статистичної обробки записів барометричного висотоміра, виконаних бортовим пристроєм реєстрації.

Як закон розподілу щільності ймовірності відхилення ПК від заданої висоти польоту (за результатами статистичних досліджень, проведених Євроконтролем для різних регіонів земної поверхні) використано суму двох розподілів Лапласа у загальному вигляді :

$$f(H) = (1 - \alpha_1) \frac{1}{2a_1 b_1 \Gamma(b_1)} \exp\left(-\left|\frac{H - \mu}{a_1}\right|^{1/b_1}\right) + \alpha_1 \frac{1}{2a_2 b_2 \Gamma(b_2)} \exp\left(-\left|\frac{H - \mu}{a_2}\right|^{1/b_2}\right), \quad (4)$$

де H – абсолютна висота польоту ПК;

$\alpha_1 \in (0, 1)$ – параметр суміші, що відповідає за внесок кожної з частин щільності розподілу;

a_1, a_2 – додатні параметри масштабу;

b_1, b_2 – додатні параметри форми;

μ – математичне сподівання;

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

За параметр α_1 використано оцінку ймовірності виходу ПК за межі нормальної зони, що обчислюється за значеннями, отриманими у результаті аналізу статистичних даних вимірювань абсолютної висоти польоту:

$$\alpha_1 = \frac{n_{\text{вилл}}}{N},$$

де

$n_{\text{вилл}}$ – кількість вильотів ПК за межі нормальної ситуації,
 N – загальна кількість спостережень.

Оцінку параметрів масштабу та форми щільності розподілу ймовірності відхилення ПК від заданого ешелону польоту (4) запропоновано виконувати за допомогою методу максимальної достовірності:

$$\begin{cases} \sum_{i=1}^n \left(\frac{\partial f(x_i, \theta)}{\partial \theta} \cdot \frac{1}{f(x_i, \theta)} \right) = 0, \\ \theta = (a_1, b_1, a_2, b_2) \end{cases},$$

а отриману систему рівнянь розв'язувати з використанням методу Ньютона.

Апріорна ймовірність класів ситуацій розглядається як площа криволінійної фігури, зверху обмеженої щільністю ймовірності відхилення ПК від заданого ешелону польоту, знизу – віссю абсцис, а з боків – відповідним висотним інтервалом (рис.5).

Виведено залежність для оцінювання апріорних ймовірностей класів ситуацій:

$$p_k = \frac{1-\alpha}{2} \left[T \left(b_1, \left| \frac{m_k - H_{FL}}{a_1} \right|^{1/b_1} \right) - T \left(b_1, \left| \frac{n_k - H_{FL}}{a_1} \right|^{1/b_1} \right) \right] + \frac{\alpha}{2} \left[T \left(b_2, \left| \frac{m_k - H_{FL}}{a_2} \right|^{1/b_2} \right) - T \left(b_2, \left| \frac{n_k - H_{FL}}{a_2} \right|^{1/b_2} \right) \right],$$

де $T(x, y) = \frac{1}{\Gamma(x)} \int_0^y e^{-t} t^{x-1} dt$ – неповна ейлерова гамма-функція.

Параметри апріорної умовної щільності оцінено за формулами:

$$m = \frac{\int_{o_k}^{r_k} x f(x) dx}{\int_{o_k}^{r_k} f(x) dx}; \quad \sigma^2 = \frac{\int_{o_k}^{r_k} (x-m)^2 f(x) dx}{\int_{o_k}^{r_k} f(x) dx},$$

де o_k та r_k – нижня і верхня межі k -го класу польотної ситуації.

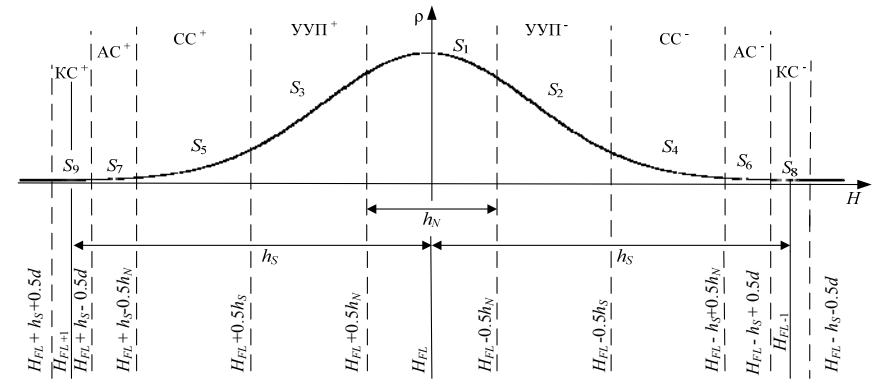


Рис. 5. Апріорні ймовірності класів ситуацій

За результатами досліджень залежності величини ймовірності правильного розпізнавання класу ситуації від кількості вимірювань шляхом комп'ютерного моделювання встановлено, що зі збільшенням кількості вимірювань поряд з ймовірністю (2) зростає похибка R (3) (рис. 5). Оскільки приріст похибки R перевищує приріст значення ймовірності, особливо у правій частині графіка (рис.6), оптимальній кількості вимірювань буде відповідати максимальна ймовірність правильного розпізнавання класу ситуації.

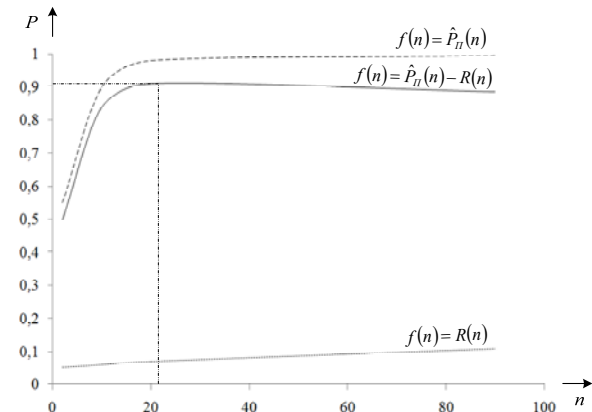


Рис. 6. Залежність ймовірності правильного розпізнавання класу ситуації P_n від обсягу основної вибірки n

Для оцінки оптимальної кількості вимірювань розроблено відповідну методику та алгоритм (рис. 7).

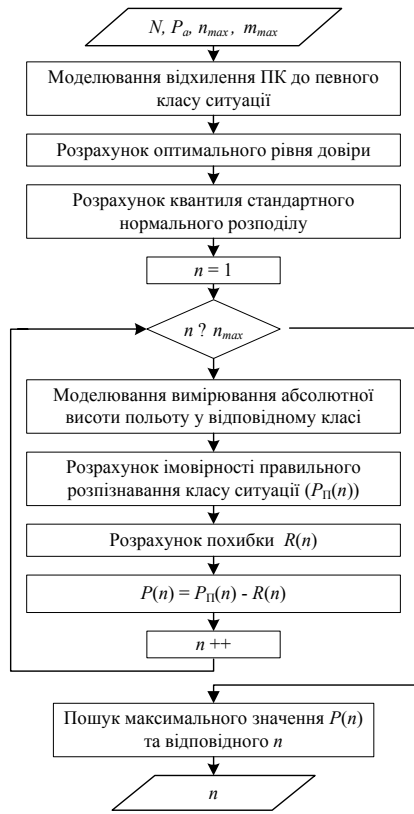


Рис. 7. Алгоритм пошуку оптимальної кількості вимірювань

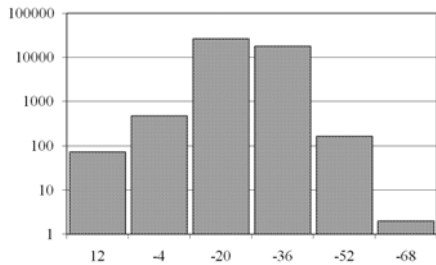


Рис. 8. Гістограма відхилень від заданої висоти польоту, побудована за статистичними даними польотів

У **четвертому розділі** перевірено працеспроможність розроблених методу та методик шляхом комп'ютерного моделювання.

Для оцінювання параметрів щільності ймовірності відхилення ПК від заданої висоти використано записи абсолютної висоти польоту, виконані бортовим пристроєм реєстрації. Для статистичного аналізу та оцінки параметрів суми двох розподілів Лапласа у загальному вигляді використано спеціально розроблений програмний комплекс.

На підставі попередньої обробки цифрових записів бортової системи реєстрації параметрів руху літака Ан-140 за допомогою розробленого програмного комплексу сформовано базу статистичних даних, що містить інформацію про відхилення ПК від висоти заданого ешелону польоту.

У результаті аналізу записів 22 польотів одного літака Ан-140, що виконував польоти за одним маршрутом, побудовано гістограму відхилення абсолютної висоти польоту ПК від заданого значення

(рис. 8) та розраховано невідомі параметри для розподілу щільності ймовірності відхилення ПК (4):

$$\begin{aligned} \mu &= -24,927; \alpha = 0,00004; \\ a_1 &= 29,686; a_2 = 252,13; \\ b_1 &= 0,5; b_2 = 1. \end{aligned}$$

За отриманими параметрами суми двох розподілів Лапласа виконано розрахунок апріорних ймовірностей класів ситуацій та оцінку параметрів умовної щільності класів.

На підставі отриманих результатів проведено моделювання відхилення ПК від заданої висоти польоту та розпізнавання розробленого методу за спеціально розробленим програмним комплексом, схему-алгоритм якого показано на рис.9.

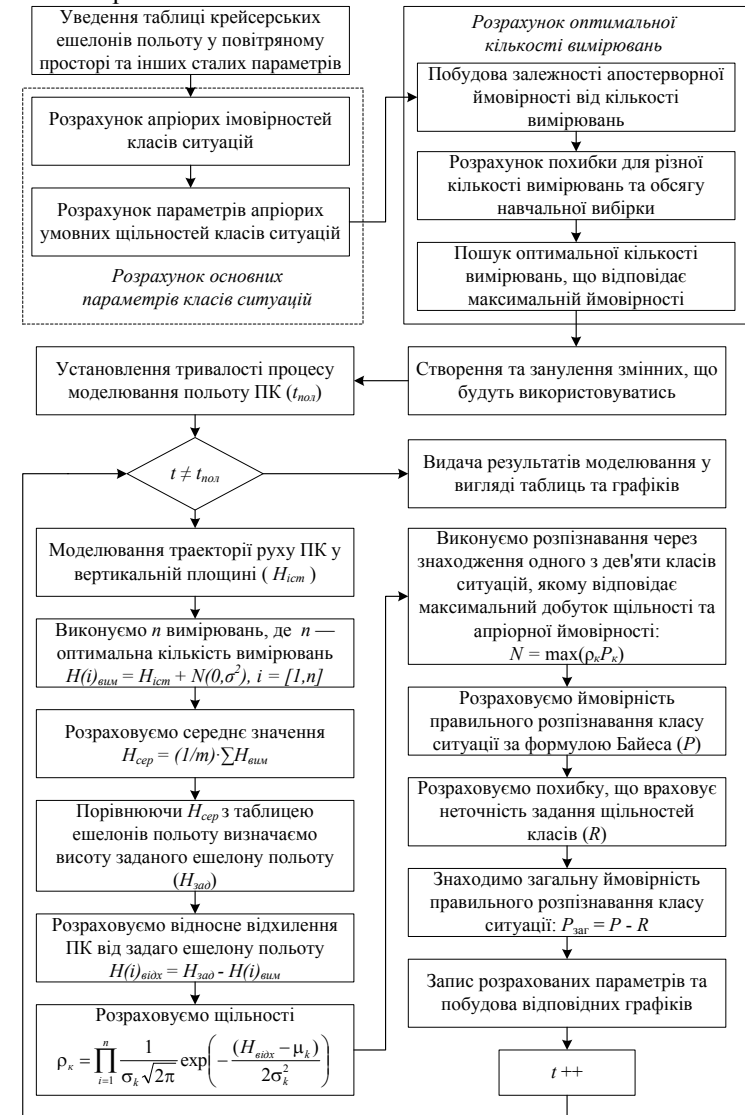


Рис. 9. Схема-алгоритм програми моделювання

Результати моделювання незапланованого відхилення ПК від заданої висоти польоту у напрямку верхнього сусіднього, зустрічного ешелону польоту, показано на рис.10,а, результати розпізнавання наявного класу ситуації для параметра абсолютної висоти польоту – на рис.10,б, а відповідні ймовірності правильного розпізнавання – на рис.10,в.

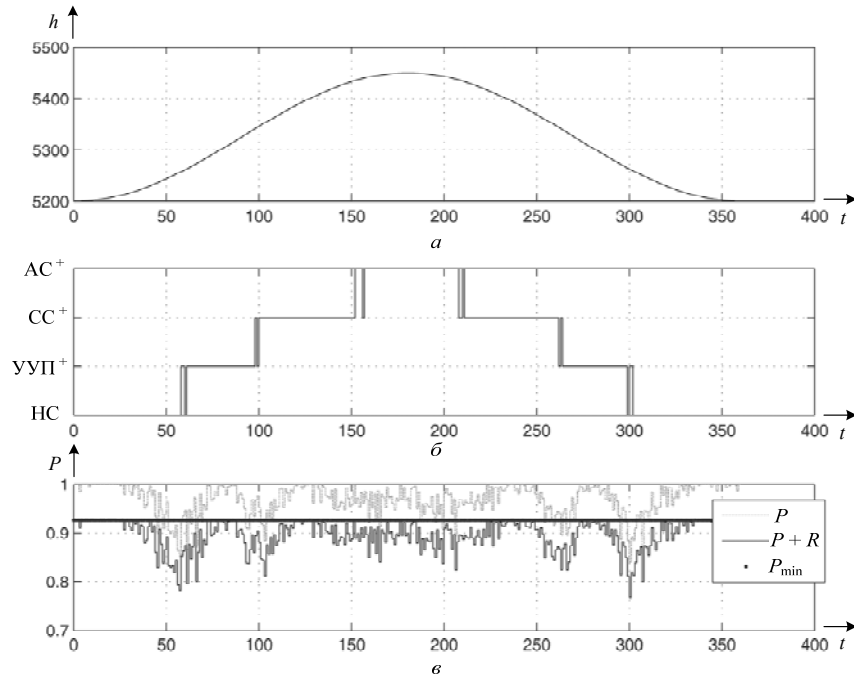


Рис.10. Результати моделювання незапланованого відхилення параметра

З аналізу результатів моделювання можна зробити висновок про те, що застосування розробленого методу багатоальтернативної класифікації ситуацій за неточно відомої щільності ймовірності до контролю за параметром абсолютної висоти дозволяє враховувати похибку R та розпізнавати наявний клас ситуації з максимально можливою ймовірністю.

ВИСНОВКИ

Результати дисертаційної роботи спрямовані на розвиток теорії управління безпекою польотів та розв'язання завдання багатоальтернативної

класифікації ситуацій, що характеризують відхилення основних навігаційних параметрів ПК за межі дозволених значень відповідно до ступеня небезпеки.

При цьому отримано такі результати:

1. За результатами аналізу методів розпізнавання класу ситуацій в умовах багатоальтернативності запропоновано враховувати похибку розрахунку апостеріорних ймовірностей при розпізнаванні наявної польотної ситуації, спричинену тим, що щільності ймовірностей відомі неточно. Це дозволяє більш точно оцінити ймовірність правильної класифікації.

2. Розроблено метод багатоальтернативної класифікації ситуацій з урахуванням апріорної інформації про класи та похибки оцінки апостеріорної ймовірності, що забезпечує оптимальний рівень розпізнавання. Запропонований метод використано для класифікації польотних ситуацій. Виведено математичну залежність для обчислення максимальної величини похибки, що враховує вплив оцінених умовних щільностей ймовірностей на апостеріорну ймовірність.

3. Запропоновано й обґрунтовано доцільність застосування дев'ятикласової моделі розбиття повітряного простору навколо заданої висоти польоту, в умовах багатоальтернативної класифікації відхилень ПК від заданого ешелону польоту, для розпізнавання наявного класу повітряної ситуації. Розроблено методику розрахунку апріорних ймовірностей класів ситуацій за відомою щільністю ймовірності відхилення ПК від заданої висоти польоту.

4. Розроблено методику та спеціалізоване програмне забезпечення оцінки щільності ймовірності відхилення ПК від заданої висоти польоту на основі статистичної обробки зафіксованих показань барометричного висотоміра, виконаних бортовим пристроєм реєстрації, що дозволить розрахувати основні параметри залежності щільності ймовірності, за яку береться сума двох узагальнених розподілів Лапласа, окремого для літака, типу літака або екіпажу.

5. Розроблено методику розрахунку оптимальної кількості вимірювань, необхідної для розпізнавання наявного класу повітряної ситуації з максимально можливою ймовірністю. Виконано розрахунок необхідної кількості вимірювань для літака Ан-140 та для різних регіонів обслуговування повітряного руху.

6. Розроблено програмний моделювальний комплекс для дослідження функціонування розробленого методу багатоальтернативної класифікації. Архітектура комплексу дозволяє моделювати незаплановані відхилення спрощеної моделі ПК від заданої висоти польоту вгору та вниз з виходом за межі дозволеного для ешелонування висотного інтервалу та виконувати розпізнавання класу наявної повітряної ситуації з обчисленням ймовірності правильної класифікації. Проведена верифікація розробленого методу та

методик за допомогою розробленого комплексу показала доцільність їх застосування до класифікації незапланованих відхилень ПК від заданого ешелону польоту.

Розроблений метод багатоальтернативної класифікації польотних ситуацій при керуванні повітряним рухом дозволяє повідомляти про незаплановані відхилення ПК від заданої висоти польоту, тим самим даючи можливість пілоту своєчасно відреагувати та зосередитись на поверненні до заданого ешелону польоту, що допоможе зупинити розвиток потенційно можливої конфліктної ситуації. Дотримання запланованих висот польоту усіма учасниками повітряного руху позитивно вплине на безпеку авіаперевезень за рахунок зменшення кількості ймовірних конфліктних ситуацій, пов'язаних з некоректним пілотуванням, та дозволить більш раціонально використовувати повітряний простір в умовах постійного зростання навантаженості авіапотоків.

Основні результати роботи становлять науково-методологічну основу для створення новітніх автоматизованих систем керування повітряним рухом в умовах переходу до нових концепцій виконання польотів.

СПИСОК ОПУБЛІКОВАНИХ ПРАЦЬ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

1. Остроумов І. В. Оценка вероятности правильного распознавания по правилу Байеса при неточно известной плотности распределения / І. В. Остроумов, А. Г. Кукуш, В. П. Харченко // Известия высших учебных заведений. Радиоэлектроника. – 2007. – Т. 50, № 11. – С. 60–68.
2. Остроумов І. В. Багатоальтернативна класифікація ситуацій повітряного стану у разі, коли щільності розподілу ймовірності відомі неточно / І. В. Остроумов, О. Г. Кукуш, В. П. Харченко // Вісн. НАУ. – 2007. – Т. 31, № 1. – С. 73–77.
3. 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.
4. Остроумов І. В. Проблеми використання наукоємних технологій у системах запобігання зіткнень повітряних кораблів / І. В. Остроумов // Технологические системы. – 2006. – Т. 35, № 3. – С. 35–38.
5. Харченко В. П. Багатопараметрична класифікація спектру польотних ситуацій / В. П. Харченко, І. В. Остроумов, Ю. В. Зайцев // Вісн. НАУ. – 2008. – № 4(37). – С. 3–8.

6. Харченко В. П. Ймовірнісні характеристики відхилень повітряних кораблів від заданого ешелону польоту / В. П. Харченко, І. В. Остроумов // Вісн. НАУ. – 2008. – № 3(36). – С. 64–67.
7. Харченко В. П. Оптимизация количества измерений координат при многоальтернативной классификации ситуаций воздушного движения / В. П. Харченко, А. Г. Кукуш, И. В. Остроумов // Кибернетика и вычислительная техника : Сб. науч. тр. – 2007. – № 153. – С. 52–59.
8. 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.
9. Kharchenko V. Multiple-choice classification in air navigation system / V. Kharchenko, I. Ostroumov // Proceeding of the NAU. – 2008. – № 2. – 5–9 p.
10. А. С. 25804 України. Комп'ютерна програма «Алгоритмічно-програмний комплекс моделювання багатоальтернативної класифікації польотних ситуацій при управлінні повітряним рухом» / І. В. Остроумов, В. П. Харченко. – заявка від 16.07.08; опубл. 24.09.08.
11. А. С. 25817 України. Комп'ютерна програма статистичного аналізу результатів записів абсолютної висоти польоту літака / І. В. Остроумов, В. П. Харченко. – заявка від 16.07.08; опубл. 24.09.08.
12. Остроумов І. В. Недосконалість систем відображення повітряної обстановки навколо літака / І. В. Остроумов // Авіа-2006 : міжнародна науково-технічна конференція, 25–27 вересня 2006 р. : матеріали конференції. – К., 2006. – С. 21.29–21.32.
13. Остроумов І. В. Похибка при обчисленні ймовірності правильного розпізнавання класу повітряної ситуації / І. В. Остроумов, О. Г. Кукуш // Авіа-2007 : міжнародна науково-технічна конференція, 25–27 квітня 2007 р. : матеріали конференції. – К., 2007. – С. 21.5–21.9.
14. Остроумов І. В. Класифікація повітряного стану за критерієм Байеса / І. В. Остроумов // Політ-2008 : міжнародна наукова конференція студентів та молодих вчених, 10–11 квітня 2008 р. : тези докл. – К., 2008. – С. 136.
15. Остроумов І. В. Багатоальтернативна класифікація ситуацій повітряного стану як засіб підвищення безпеки повітряного руху / І. В. Остроумов // Політ-2007 : міжнародна наукова конференція студентів та молодих вчених, 12–13 квітня 2007 р. : тези докл. – К., 2007. – С. 92.
16. Столярчук Т. М. Безпека повітряного руху – основна умова виконання польотів / Т. М. Столярчук, І. В. Остроумов // Політ-2008 : міжнародна наукова конференція студентів та молодих вчених, 10–11 квітня 2008 р. : тези докл. – К., 2008. – С. 146.

АННОТАЦИЯ

Остроумов И.В. Многоальтернативная классификация полётных ситуаций при управлении воздушным движением в условиях риска. – Рукопись.

Диссертация на соискание научной степени кандидата технических наук по специальности 05.22.13 – Навигация и управление движением, Национальный авиационный университет, г. Киев, 2009.

Диссертация посвящена вопросам многоальтернативной классификации ситуаций, которые характеризуют отклонения основных навигационных параметров воздушного корабля от допустимых значений относительно степени опасности.

Впервые предложено учитывать ошибку расчёта апостериорных вероятностей при распознавании текущей полётной ситуации по формуле Байеса, связанную с тем, что условные плотности известны неточно. Установлена зависимость, позволяющая оценить максимальное значение ошибки.

Разработан вероятностный метод многоальтернативной классификации ситуаций при неточно известной плотности вероятности, учитывающий в процессе распознавания априорную информацию о классах и ошибку оценки апостериорной вероятности.

Разработана методика и специализированное программное обеспечение для оценки плотности вероятности отклонения навигационного параметра от заданного значения на основании статистической обработки зафиксированных показаний навигационного оборудования. В качестве распределения плотности вероятности использована сумма двух распределений Лапласа в обобщенной форме. На основании записей показаний барометрического высотомера выполнен расчёт параметров плотности вероятности отклонения воздушного корабля от заданной высоты полёта.

Разработанный метод применён для распознавания класса полётной ситуации по результатам наблюдения за абсолютной высотой полёта. Для классификации отклонений воздушного судна от высоты заданного эшелона полёта использована девятиклассовая модель. Результат компьютерного моделирования разработанного метода в условиях незапланированного отклонения исследуемого параметра указывают на целесообразность и эффективность его использования.

Ключевые слова: многоальтернативная классификация, апостериорная вероятность, оценка плотности вероятности, оптимальное количество измерений, вероятность правильного распознавания.

АНОТАЦІЯ

Остроумов І.В. Багатоальтернативна класифікація польотних ситуацій при управлінні повітряним рухом в умовах ризику. – Рукопис.

Дисертація на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук за спеціальністю 05.22.13 – Навігація та управління рухом, Національний авіаційний університет, м. Київ, 2009.

Дисертацію присвячено питанням багатоальтернативної класифікації ситуацій, що характеризують відхилення основних навігаційних параметрів повітряного корабля за межі дозволених значень відповідно до ступеня небезпеки. Розроблено метод багатоальтернативної класифікації ситуацій з урахуванням априорної інформації відносно класів та похибки оцінки апостериорної ймовірності, що забезпечує оптимальний рівень розпізнавання. Запропонований метод використано для класифікації польотних ситуацій. Розроблено методіку та спеціалізоване програмне забезпечення оцінки щільності ймовірності відхилення навігаційного параметра від заданого значення на основі статистичної обробки зафіксованих показів навігаційного обладнання, виконаних бортовим пристроєм реєстрації.

Ключові слова: багатоальтернативна класифікація, апостериорна ймовірність, оцінка щільності ймовірності, оптимальна кількість вимірювань, ймовірність правильного розпізнавання.

ABSTRACT

I. Ostroumov. Multiple-choice classification of flight situation at air traffic control under risk condition. – Manuscript.

The thesis for earning of scientific degree of engineering Science Candidate on the specialty 05.22.13 – Navigation and movement management, National Aviation University, Kiev, 2009.

The thesis is dedicated to problems of the multiple-choice classification of flight situation, which describes navigation parameters deviation from expected values according to severity.

The probability based method of multiple-choice classification with estimation of probability density has been developed. The methodology and special software for estimation of probability density deviation of navigation parameter from expected value has been proposed.

The method has been used for a flight classes recognition. Values of barometrical altitude of flight were used for estimation of probability density. The simulation result of navigation parameter deviation reflected validity and efficiency of developed method and methodology.

Key words: Multiple-choice classification, a posteriori probability, probability density estimation, optimal measurement number, correct recognition probability.