

УДК 656.7.084

С.В. Павлова, О.Є. Волков

Конфліктна взаємодія повітряних кораблів при запобіганні загроз зіткнення

Предложен новый метод разрешения конфликтных ситуаций воздушных судов с определением приоритетности каждого судна на основе построения областей управляемости и диаграмм Венна. Метод направлен на обеспечение уровня безопасности при разрешении разряженных конфликтных ситуаций воздушных судов в масштабе реального времени.

Ключевые слова: области управляемости, конфликтная ситуация, диаграммы Венна, воздушное судно, угроза столкновения.

Запропоновано новий метод вирішення конфліктних ситуацій повітряних суден з визначенням пріоритетності кожного з них на основі побудови областей керованості та діаграм Венна. Метод спрямований на гарантований рівень безпеки при вирішенні розряджених конфліктних ситуацій повітряних суден в масштабі реального часу.

Ключові слова: області керованості, конфліктна ситуація, діаграми Венна, повітряне судно, загроза зіткнення.

Вступ. Система управління повітряним рухом (УПР) не повною мірою забезпечує контроль над витримуванням навігаційних параметрів кожного літака через перевантаження диспетчерського складу і деяких обмежень технічних засобів, які виникають в процесі управління. Відповідно, для запобігання зіткнень технічно і економічно доцільне доповнення системи УПР спеціальною бортовою системою, здатною автономно, незалежно від системи УПР, гарантувати безпечне розходження літаків в разі виникнення загрози зіткнення.

Вирішення конфліктів повітряних кораблів (ПК) є актуальним в питаннях безпеки польотів. Поєднуючи риси математичної теорії управління, теорії ігор і оптимізації та використовуючи для опису апарат диференціальних, інтегральних і функціонально-диференціальних рівнянь, конфліктно-керовані процеси мають суттєве значення у прийнятті рішень за складних ситуацій взаємодії рухомих об'єктів, таких як літак.

Конфліктні ситуації (КС) являють собою події, які відповідають фактичному або прогнозованому порушенню норм забезпечення ешелонування ПК у просторі, і за відсутності відповідних дій пілотів або органів управління повітряним рухом можуть призвести до катастрофічної ситуації – зіткнення ПК.

Постановка завдання досліджень

Існує проблемна ситуація, яка полягає у суперечності між потребою в універсальній технології вирішення конфліктних ситуацій повітряних кораблів, що задовольняє всі концептуальні запити її учасників, і недостатніми можливостями існуючого науково-методичного апарату [1–6].

Мета даної роботи – розробка методу, який забезпечує вирішення конфліктних ситуацій повітряних суден і запобігання їх зіткнення, з урахуванням перешкод і обмежень у реальному часі при збуреннях і факторах невизначеності.

Поставлено також задачу розробки системи вирішення конфліктних ситуацій повітряних кораблів на маршрутах польоту, етапах зльоту і посадки з забезпеченням гарантованого рівня безпеки польотів і застосуванням мережецентричних технологій та теорії інваріантності [7, 8].

Розрахунок областей керованості повітряних кораблів для визначення пріоритетності в конфліктній ситуації

При визначенні необхідних маневрів доцільно використовувати побудову математичних функцій керованості кожного ПК для визначення його можливостей в управлінні. Розв'язання цієї задачі ґрунтується на побудові графіків залежностей керівних параметрів ПК

одного від одного і отриманні так званих «областей керованості» ПК. Ці «області» характеризують можливості корабля змінювати параметри руху в один момент часу і дозволяють характеризувати нелінійність його поведінки.

З урахуванням аеродинамічних характеристик кожного ПК використовуються моделі кінематики та динаміки його руху: рівняння руху центру мас; кінематичні рівняння руху; рівняння аеродинамічних сил і відповідно їхні аеродинамічні коефіцієнти лобового опору, підйомної і бічної сил; рівняннями описують характеристики роботи двигунів; рівняння прискорень, які виникають на ПК під час польоту. Перетворивши відповідним чином перераховані рівняння, можна спостерігати, які параметри впливають на прискорення в польоті. Розділивши дані параметри на групи, можна побачити:

$(\theta, \psi, \delta_{РКД})$ – параметри елементів траєкторного управління;

$(\alpha, \beta, \gamma_a)$ – параметри елементів кінематичного управління;

$(\delta_{пр}, \delta_{зак})$ – параметри елементів аеродинамічного управління.

В рівняннях під символами розуміють: ψ – кут рискання; α – кут атаки; β – кут ковзання; θ – кут тангажу; γ_a – кут крену; $\delta_{РКД}$ – кут установки ручки керування двигуном; $\delta_{пр}$ – кут встановлення передкрилків; $\delta_{зак}$ – кут встановлення закрилків.

При підстановці значень параметрів конкретних літаків і проведенні всіх необхідних математичних розрахунків сучасними засобами математичного моделювання можна отримати «області керованості» літаків, а також їх графічне відображення у вигляді тривимірних проєкцій. Приклад таких графіків проєкцій для середнього магістрального літака, побудованих на підставі його аеродинамічних характеристик і польотних даних, отриманих за результатами моделювання польоту, подано на рис. 1 і 2.

Імітаційне моделювання та аналіз математичної моделі ПК дозволяють шляхом накладення і порівняння «областей керованості» в середовищі *MatLab* отримати інформацію про функціональні і аеродинамічні можливості ко-

жного літака, що бере участь у конфлікті, а також визначити, який з літаків буде виконувати маневр відхилення за правилом встановлення пріоритетності, а саме: маневр ухилення повинен виконувати той ПК, який має більший запас можливостей з управління, однак, якщо можливостей одного ПК для забезпечення розходження не вистачає, маневр ухилення мають виконувати і інші ПК в порядку пріоритетності.

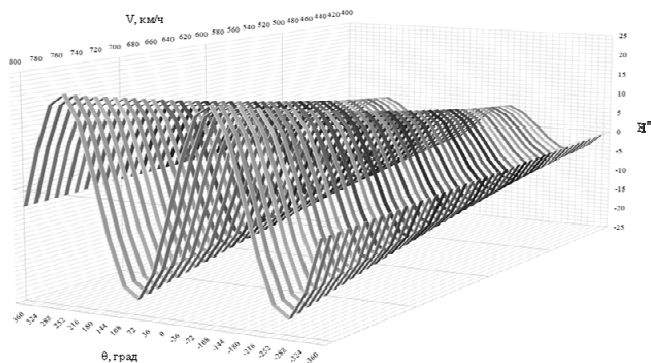


Рис. 1. Проєкція області керованості вертикальною швидкістю в залежності від кута нахилу траєкторії при постійній швидкості руху

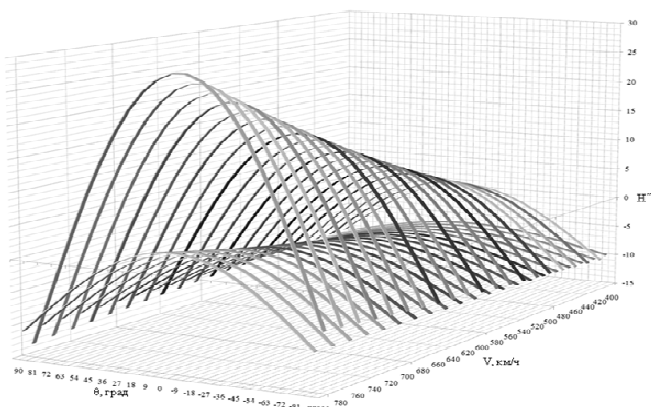


Рис. 2. Проєкція області керованості вертикальною швидкістю в залежності від швидкості руху при постійному куті нахилу траєкторії

Тип необхідного маневру, а саме: зміна висоти руху одного або декількох ПК, зміна швидкості руху, зміна курсу або комбінація цих маневрів для одного або декількох ПК – визначається також на підставі «областей керованості» за принципом: тип маневру ухилення одного або декількох ПК залежить від розрахованих в «областях керованості» можливостей цих ПК зі зміни параметрів їх руху в один конкретний момент часу (ПК, який має більше таких мож-

ливостей, отримує вищий пріоритет у виконанні маневру).

Наприклад, шляхом порівняння областей керованості висотою (рис. 3) (залежності швидкості і кута нахилу траєкторії від висоти) для двох середніх магістральних літаків можна визначити, що літак № 1 має більше аеродинамічних і функціональних можливостей (запас по керованості) для виконання маневру у вертикальній площині з керуванням параметрами швидкості і кута нахилу траєкторії (що перевершує область керованості літака № 1 позначена на рис. 3 штриховою лінією). Відповідно саме він і буде визначений як пріоритетний літак для виконання маневру в конфліктній ситуації.

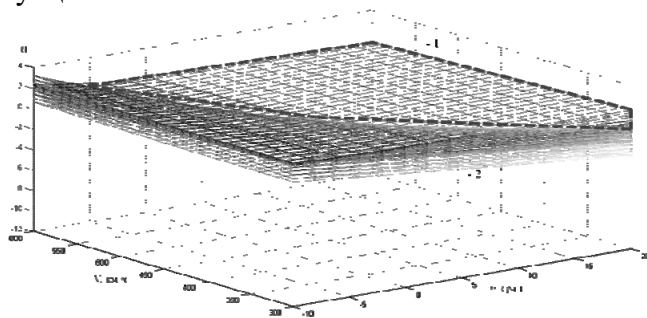


Рис. 3. Порівняння проєкцій областей керованості висотою двох середніх магістральних літаків

Базові правила розходження повітряних кораблів в динамічній конфліктній ситуації

Для універсальності пропонованого в роботі методу і створення набору правил (бази знань для системи) пропонуються розроблені правила розходження ПК в динамічній конфліктній ситуації. За основу для створення правил взято правила розходження літальних апаратів в планеризмі. Власне правила для наочності були побудовані за зразком діаграм Ейлера–Венна з накладенням зон невизначеності ПК при конфліктній ситуації.

Діаграма Ейлера–Венна – схематичне зображення всіх можливих перетинів декількох множин. Діаграми Ейлера–Венна зображують всі 2^n комбінацій n властивостей, тобто кінцеву булеву алгебру. Вони також є геометричним представленням множин. Побудова діаграми полягає в зображенні великого прямокутника, що представляє універсальну множину, а всередині нього –

кіл (або тих чи інших замкнутих фігур), що представляють множини. Фігури мають перетинатися у необхідному загальному випадку, і відповідним чином позначатися. Точки, що лежать всередині різних областей діаграми, можна розглядати як елементи відповідних множин. Маючи побудовану діаграму, можна заштрихувати певні області для позначення новоутворених множин, операції над якими використовуються для отримання нових множин з існуючих.

В нашому випадку прямокутником є область розглянутого повітряного простору розміром 50 метрів. Крім того, захисні зони ПК зображатимемо у вигляді секторів, які враховують невизначеності положення ПК. Область перетину секторів (нова множина) є зоною конфліктної ситуації (зоною загрози зіткнення ПК).

В основу створення правил розходження за діаграмами Ейлера–Венна покладено побудову і порівняння областей керованості ПК, і для кожного окремого випадку конфліктної ситуації дані правила матимуть характерні особливості. Отже ці правила передбачені також і для випадків, коли побудова областей керованості є неможливою з будь-яких причин, або ж у конфліктуєчих літаків ці області однакові.

Приклад вірогідної конфліктної ситуації двох ПК подано на рис. 4. У даному випадку ПК рухаються в одному ешелоні з попутним курсом.

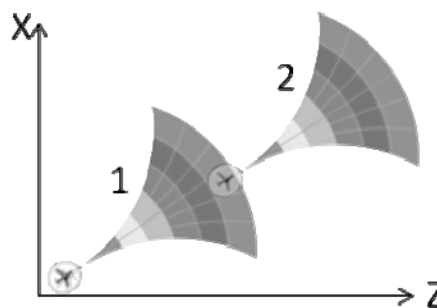


Рис. 4. Приклад діаграм Ейлера–Венна можливої конфліктної ситуації двох ПК

Відповідно до розроблених правил розходження у даній конфліктній ситуації (відбувається порушення «захисних зон» ПК) у випадку, якщо невідомі області керованості двох ПК або вони однакові, то правило розходження буде таким: перевагу у КС має той ПК, швид-

кість якого менше; у випадку, якщо один ПК наздоганяє іншого (з перевагою у швидкості), необхідно здійснити обгін з правого боку, попередньо набравши висоту для відходу від супутного сліду. Приклад розходження ПК за даним правилом показано на рис. 5. Цей випадок підходить і для ситуації, коли, наприклад, на основі аналізу і порівняння областей керуваності визначаємо, що можливості літака № 2 з керування швидкісними параметрами в горизонтальній площині менші, і, відповідно, літак № 1 має пріоритет для виконання маневру.

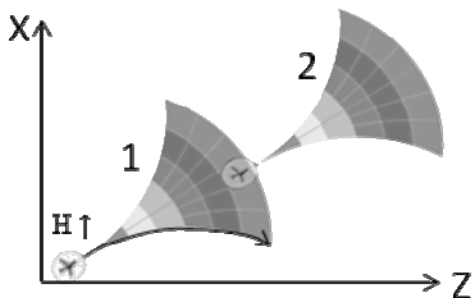


Рис. 5. Приклад діаграм Ейлера–Венна у розходженні ПК

Розглянемо приклад конфліктної ситуації ПК і побудову діаграм Ейлера–Венна з висновком відповідного правила розходження. В даній ситуації один з ПК набирає висоту, інший летить прямо, курс обох – попутний (рис. 6).

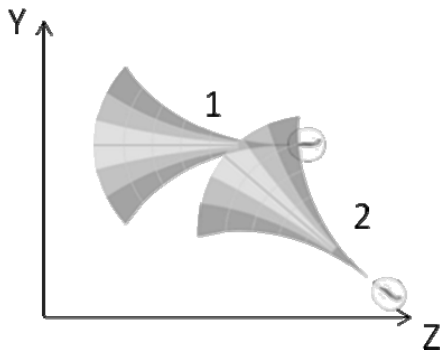


Рис. 6. Приклад діаграм Ейлера–Венна можливої конфліктної ситуації двох ПК

Припустимо (у випадку, коли області керуваності ПК невідомі або однакові), що можливості літака № 2 у керуванні швидкісними і висотними параметрами у вертикальній площині менші і, відповідно, літак № 1 має пріоритет у виконанні маневру, то перевагу матиме той ПК, що знаходиться нижче; літак, що летить вище, повинен відхилитися за курсом лі-

воруч. Приклад розходження ПК за даним правилом показано на рис. 7.

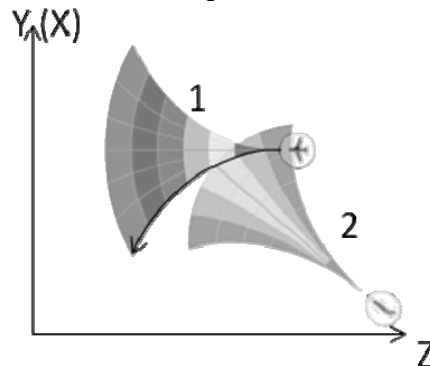


Рис. 7. Приклад розходження ПК

Математично процес вирішення конфліктної ситуації можна надати для наочності у предикативній формі:

$$\begin{aligned}
 &S1 (H1(t0), \psi1(t0), \theta1(t0), V1(t0), pos1(t0)); \\
 &S2 (H2(t0), \psi2(t0), \theta2(t0), V2(t0), pos2(t0)); \\
 &V1(t0) = V2(t0) = V1(t1) = V2(t1) = const; \\
 &\psi1(t0) = \psi2(t0) = \psi1(t1) = \psi2(t1) = const; \\
 &\theta1(t0) = \theta1(t1) = const, (H1(t0) = H1(t1) = const); \\
 &\theta2(t1) > \theta2(t0), (H2(t1) > H2(t0)); \\
 &H1(t1) = H2(t1); \\
 &pos1(t1) + \varepsilon = pos2(t1) + \varepsilon; \\
 &S1 (H1 = const, \theta1 = const, V1 = const); \\
 &S2 (H2 \uparrow, \theta2 > 0, V2 = const, \psi2 = const); \\
 &\psi1(t1) = \psi1(t0) - \Delta\psi; \psi1(t1) \neq \psi2(t1); \\
 &H1(t1) = H2(t1); \\
 &pos1(t1) + \varepsilon \neq pos2(t1) + \varepsilon; \\
 &S1 (H1 = const, \theta1 = const, V1 = const); \\
 &\psi1(t2) = \psi1(t1) + \Delta\psi; \psi1(t2) = \psi1(t0).
 \end{aligned}$$

Символами позначено: $S1$ і $S2$ – літаки № 1 і № 2; $H1$ і $H2$ – відповідно висоти літаків; $t0$ – початковий час моделювання; $V1$ і $V2$ – швидкості літаків; $pos1$ і $pos2$ – координатне положення літаків; $\theta1$ і $\theta2$ – кути нахилу траєкторії літаків; $\psi1$ і $\psi2$ – курс літаків; $t1$ – час конфліктної взаємодії; ε – похибка у визначенні координат літаків; $t2$ – час закінчення конфліктної взаємодії; $\Delta\psi$ – сигнал корегування.

Висновки. Незважаючи на порівняльну простоту необхідного тактичного маневру у взаємодіях конфліктуючих ПК, математичне роз-

в'язання задачі пошуку відповідних оптимальних траєкторій є досить складним. Специфіка задачі полягає в неоднозначності шуканих траєкторій, в немонотонності параметрів цільових об'єктів, і тому висвітлення даного питання набуває сенсу пошуку загального підходу до отримання точних рішень залежно від конкретних вимог.

Методичну оцінку ефективності функціонування запропонованих алгоритмів конфліктної взаємодії ПК проведено з використанням типових дослідних сценаріїв, починаючи від простих конфліктів між двома ПК до гранично складних за участі в одному конфлікті значного числа ПК (п'яти і більше). Основними показниками безпеки та ефективності розв'язання конфліктів прийнято дві величини: відстань розходження одного ПК від іншого і величина запізнення у виконанні планового польоту, викликаного конфліктами.

Запропонована методика вирішення конфліктних ситуацій ПК спрямована на синтезування рекомендацій за умов виявлених конфліктів, які мають забезпечити, в загальному випадку, просторовий маневр ухилення з метою запобігання можливого небезпечного зближення ПК, а після вирішення конфлікту – забезпечення повернення ПК на планову траєкторію і подальше дотримання її. При цьому в процесі

синтезування рекомендацій з виконання маневру необхідно враховувати критерії оптимальності.

1. Krozel J., Peters M. Decentralized control techniques for distributed air/ground traffic separation. – Los Gatos: Seagull Technology Inc., 2000. – 104 p.
2. Предотвращение столкновений воздушных судов. Автономная микроэлектронная радиолокационная система / Б. Войнич, О. Позднякова, А. Соснинский и др. – М.: Электроника, 2000. – 369 с.
3. Чикрий А.А., Ратнопорт И.С. Метод разрешающих функций в теории конфликтно-управляемых процессов // Кибернетика и системный анализ. – 2012. – № 4. – С. 40–64.
4. Риски столкновения и эшелонирование воздушных кораблей / В.П. Харченко, Г.Ф. Аргунов, С.А. Загора и др. – К.: НАУ, 2011. – 326 с.
5. Загора С.А. Анализ методов решения конфликтных ситуаций в условиях свободного полета // – Вестн. Нац. авиацион. ун-та. – 2005. – № 1. – С. 42–74.
6. Красовский Н.Н. Игровые задачи о встрече движущихся. – М.: Наука, 1970. – 424 с.
7. Павлов В.В., Волков А.Е. Способ предупреждения столкновений движущихся объектов в динамическом конфликте в масштабе реального времени: пат. Украины № 106765, МПК G05B 1/00; G05B 15/00; G05B 17/00; G06F 9/00; G06N 7/00; G08G 5/00. – № 201510017; заявл. 13.10.2015; опубл. 10.05.2016, Бюл. № 9.
8. Павлова С.В., Волков А.Е. System of guaranteed resolution of dynamic conflicts of aircrafts in real time // Вестн. Нац. авиацион. ун-та. – 2017. – № 1. – С. 29–35.

Поступила 07.08.2017

Тел. для справок: +38 044 406-7244 (Киев)

E-mail: alexvolk@ukr.net, psv@nau.edu.ua

© С.В. Павлова, О.С. Волков, 2017

С.В. Павлова, А.Е. Волков

Конфликтное взаимодействие воздушных судов при предупреждении угроз столкновения

Введение. Система управления воздушным движением (УВД) не в полной мере обеспечивает контроль над поддержанием навигационных параметров каждого самолета из-за возникающих в процессе управления перегрузок диспетчерского состава и некоторых ограничений технических средств. Соответственно, для предупреждения столкновений технически и экономически целесообразно дополнить систему УВД специальной бортовой системой предупреждения столкновений, способной автономно, независимо от системы УВД, обеспечить безопасное расхождение самолетов.

Разрешение конфликтов воздушных судов (ВС) – актуальная задача в вопросах безопасности полетов. Объ-

единя черты математической теории управления, теории игр и оптимизации и используя для описания аппарат дифференциальных, интегральных и функционально-дифференциальных уравнений, конфликтно-управляемые процессы имеют существенное значение для принятия решений в сложных ситуациях взаимодействия движущихся объектов, таких как самолет.

Конфликтные ситуации (КС) представляют собой событие, соответствующее фактическому или прогнозируемому нарушению норм обеспечения эшелонирования ВС в пространстве, и в отсутствие соответствующих действий со стороны пилотов или органов управления воздушным движением может привести к катастрофической ситуации – столкновению.

Постановка задачи исследований

Существует проблемная ситуация, которая заключается в противоречии между потребностью в универсальной технологии разрешения конфликтных ситуаций воздушных кораблей, удовлетворяющей всем концептуальным запросам ее участников, и недостаточными возможностями существующего научно-методического аппарата [1–6].

Цель данной работы – разработка метода, обеспечивающего разрешение конфликтных ситуаций воздушных судов и предотвращения их столкновения с учетом препятствий и ограничений в масштабе реального времени при возмущениях и факторах неопределенности.

Актуальна также задача разработки системы разрешения конфликтных ситуаций воздушных судов на маршрутах полета, этапах взлета и посадки при обеспечении уровня безопасности полетов и применении сетцентрической технологии и теории инвариантности [7, 8].

Расчет областей управляемости воздушных судов для определения приоритетности в конфликтной ситуации

При определении необходимых маневров целесообразно использовать построение математических функций управляемости каждого ВС для определения его возможностей в управлении. Решение этой задачи основывается на построении графиков зависимостей управляющих характеристик ВС одного от другого и получении так называемых «областей управляемости» ВС. Области управляемости характеризуют возможности ВС в изменении параметров движения в один момент времени и позволяют характеризовать нелинейность поведения ВС.

Используются модели кинематики и динамики движения ВС с учетом аэродинамических характеристик каждого ВС: уравнения движения центра масс; кинематические уравнения движения; уравнения аэродинамических сил и соответственно их аэродинамические коэффициенты лобового сопротивления, подъемной силы и боковой силы; уравнения, описывающие характеристики работы двигателей; уравнения ускорений, возникающих во время полета. Преобразовав соответствующим образом перечисленные уравнения, можно наблюдать, какие параметры влияют на ускорение, возникающее в полете. Разделив данные параметры на группы, можно увидеть:

$(\theta, \psi, \delta_{руд})$ – параметры элементов траекторного управления;

$(\alpha, \beta, \gamma_a)$ – параметры элементов кинематического управления;

$(\delta_{пр}, \delta_{зак})$ – параметры элементов аэродинамического управления.

В уравнениях под символами понимаются: ψ – угол рыскания; α – угол атаки; β – угол скольжения; θ – угол тангажа; γ_a – угол крена; $\delta_{руд}$ – угол установки ручки управления двигателем; $\delta_{пр}$ – угол установки предкрылков; $\delta_{зак}$ – угол установки закрылков.

При подстановке значений параметров конкретных самолетов и проведении всех необходимых математиче-

ских расчетов современными средствами математического моделирования можно получить области управляемости самолетов, а также их графическое представление в виде трехмерных проекций. Такие графики проекций для среднего магистрального самолета, построенные на основе его аэродинамических характеристик и полетных данных, полученных по результатам моделирования, показаны на рис. 1 и 2.

Имитационное моделирование и анализ математической модели ВС позволяют путем наложения и сравнения областей управляемости в среде *MatLab* получить информацию о функциональных и аэродинамических возможностях каждого самолета, участвующего в конфликте, а также определить, какой из них будет выполнять маневр уклонения по правилу установления приоритетности, а именно: маневр уклонения должен выполнять тот ВС, который имеет больший запас возможностей в управлении, однако, если возможностей одного ВС для обеспечения расхождения не достаточно, маневр уклонения должны выполнять и другие ВС в порядке приоритетности.

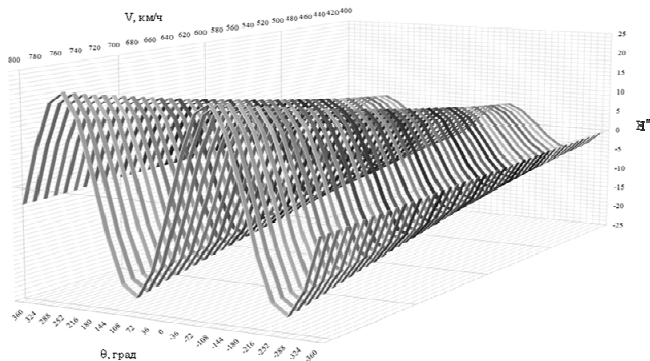


Рис. 1. Проекция области управляемости вертикальной скоростью в зависимости от угла наклона траектории при постоянной скорости движения

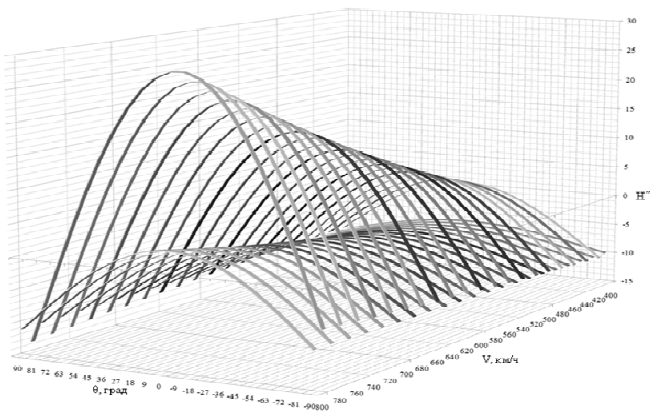


Рис. 2. Проекция области управляемости вертикальной скоростью в зависимости от скорости движения при постоянном угле наклона траектории

Тип необходимого маневра, а именно: изменение высоты движения одного или нескольких ВС, изменение

скорости движения, курса или комбинация этих маневров для одного или нескольких ВС определяются также на основе областей управляемости по следующему принципу: тип маневра уклонения одного или нескольких ВС зависит от рассчитанных в областях управляемости возможностей этих ВС по изменению параметров их движения в один конкретный момент времени (ВС, который имеет больше таких возможностей получает высший приоритет в выполнении маневра).

Например, путем сравнения областей управляемости высотой (рис. 3) (зависимости скорости и угла наклона траектории от высоты) для двух средних магистральных самолетов можно определить, что самолет № 1 имеет больше аэродинамических и функциональных возможностей (запас управляемости) для выполнения маневра в вертикальной плоскости с управлением параметрами скорости и угла наклона траектории (превосходящая область управляемости самолета № 1 отмечена на рис. 3 штриховой линией). Соответственно именно он и будет определен как приоритетный для выполнения маневра в конфликтной ситуации.

Базовые правила расхождения ВС в динамической конфликтной ситуации

Для универсальности предлагаемого метода и создания набора правил (базы знаний для системы) предлагаются правила расхождения ВС в динамической конфликтной ситуации. За основу для создания правил были взяты правила расхождения летательных аппаратов в планировании. Собственно правила для наглядности были построены по образцу диаграмм Эйлера–Венна с наложением зон неопределенности ВС при конфликтной ситуации.

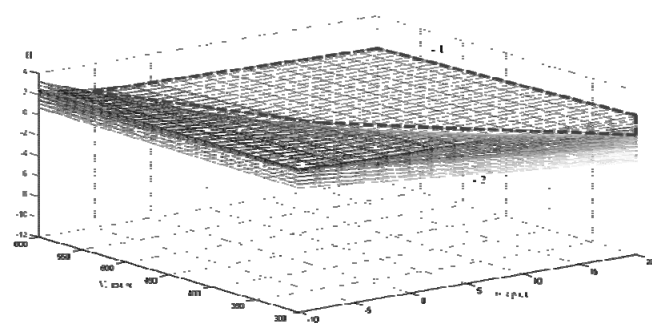


Рис. 3. Сравнение проекций областей управляемости высотой двух средних магистральных самолетов

Диаграмма Эйлера–Венна – схематическое изображение всех возможных пересечений нескольких множеств, всех 2^n комбинаций n свойств, т.е. конечная булева алгебра и является геометрическим представлением множеств. Построение диаграммы заключается в изображении большого прямоугольника, представляющего универсальное множество, а внутри него – кругов (или каких-нибудь других замкнутых фигур), представляющих множества. Фигуры должны пересекаться в наиболее общем требуемом случае, и должны быть соответствующим образом обозначены. Точки, лежащие внутри

различных областей диаграммы, могут рассматриваться как элементы соответствующих множеств. Имея построенную диаграмму, можно заштриховать определенные области для обозначения вновь образованных множеств. Операции над множествами используются для получения новых множеств из уже существующих.

В нашем случае прямоугольником является область рассматриваемого воздушного пространства размером 50 метров. Кроме того, будем изображать защитные зоны ВС в виде секторов, учитывающих неопределенности положения ВС. Область пересечения секторов (новое множество) – это зона конфликтной ситуации (зона угрозы столкновения ВС).

В основу создания правил расхождения по диаграммам Эйлера–Венна положено построение и сравнение областей управляемости ВС, и для каждого отдельного случая конфликтной ситуации данные правила будут иметь свои характерные особенности. Однако эти правила предусмотрены и для случаев, когда построение областей управляемости невозможно по каким-либо причинам или у конфликтующих самолетов эти области одинаковы.

Пример возможной конфликтной ситуации двух ВС приведен на рис. 4. В данном случае ВС движутся в одном эшелоне с попутным курсом.

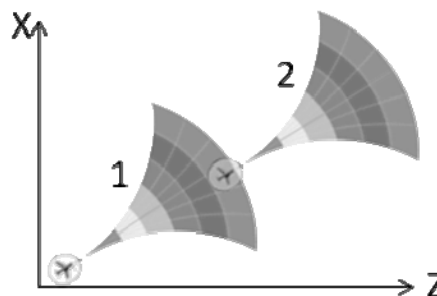


Рис. 4. Пример диаграммам Эйлера–Венна возможной конфликтной ситуации двух ВС

В соответствии с разработанными правилами расхождения в данной конфликтной ситуации (происходит нарушение «защитных зон» ВС) в случае, когда неизвестны области управляемости двух ВС или они одинаковы, то правило расхождения будет звучать так: преимущество в КС имеет то ВС, чья скорость меньше; в случае, когда одно ВС догоняет другое (с преимуществом в скорости), необходим обгон справа, предварительно набрав высоту для отклонения от спутного следа. Пример расхождения ВС по данному правилу показан на рис. 5. Также этот случай подходит для ситуации, когда, например, на основе анализа и сравнения областей управляемости определяется, что возможности самолета № 2 по управлению скоростными параметрами в горизонтальной плоскости меньше, и соответственно самолет № 1 имеет приоритет для выполнения маневра.

Рассмотрим еще один пример конфликтной ситуации ВС и построение диаграмм Эйлера–Венна с выводом

соответствующего правила расхождения. В данной ситуации один из ВС набирает высоту, другой летит прямо, курс обоих – попутный (рис. 6).

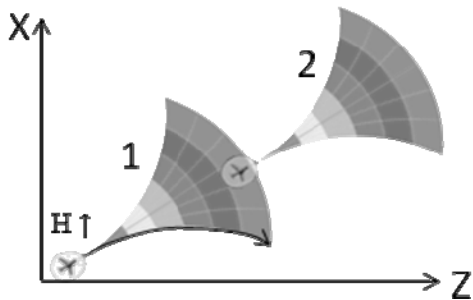


Рис. 5. Пример диаграммам Эйлера–Венна по расхождению ВС

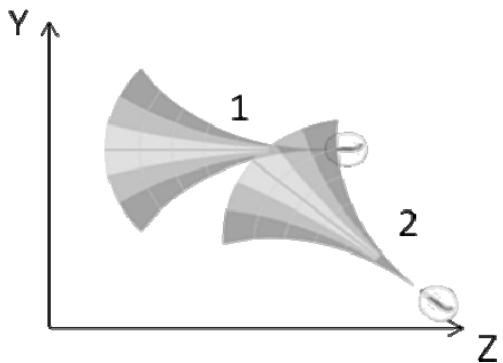


Рис. 6. Пример диаграммам Эйлера–Венна возможной конфликтной ситуации двух ВС

Предположим (когда неизвестны области управляемости ВС или они одинаковы), что возможности самолета № 2 по управлению скоростными и высотными параметрами в вертикальной плоскости меньше, и соответственно самолет № 1 имеет приоритет в выполнении маневра, то правило расхождения будет звучать так: преимущество имеет то ВС, которые находятся ниже; выше летящий самолет должен отклониться по курсу влево. Пример расхождения ВС по данному правилу показан на рис. 7.

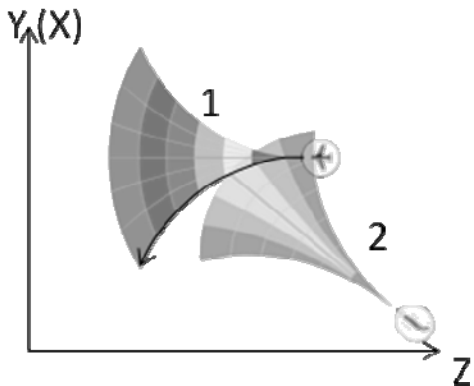


Рис. 7. Пример расхождения ВС

Предположим (когда неизвестны области управляемости ВС или они одинаковы), что возможности само-

лета № 2 по управлению скоростными и высотными параметрами в вертикальной плоскости меньше, и соответственно самолет № 1 имеет приоритет в выполнении маневра, то правило расхождения будет звучать так: преимущество имеет то ВС, которые находятся ниже; выше летящий самолет должен отклониться по курсу влево. Пример расхождения ВС по данному правилу показан на рис. 7.

Математически процесс разрешения конфликтной ситуации можно представить в предикатной форме:

$$S1 (H1(t0), \psi1(t0), \theta1(t0), V1(t0), pos1(t0));$$

$$S2 (H2(t0), \psi2(t0), \theta2(t0), V2(t0), pos2(t0));$$

$$V1(t0) = V2(t0) = V1(t1) = V2(t1) = \text{const};$$

$$\psi1(t0) = \psi2(t0) = \psi1(t1) = \psi2(t1) = \text{const};$$

$$\theta1(t0) = \theta1(t1) = \text{const}, (H1(t0) = H1(t1) = \text{const});$$

$$\theta2(t1) > \theta2(t0), (H2(t1) > H2(t0));$$

$$H1(t1) = H2(t1);$$

$$pos1(t1) + \varepsilon = pos2(t1) + \varepsilon;$$

$$S1 (H1 = \text{const}, \theta1 = \text{const}, V1 = \text{const});$$

$$S2 (H2 \uparrow, \theta2 > 0, V2 = \text{const}, \psi2 = \text{const});$$

$$\psi1(t1) = \psi1(t0) - \Delta\psi; \psi1(t1) \neq \psi2(t1);$$

$$H1(t1) = H2(t1);$$

$$pos1(t1) + \varepsilon \neq pos2(t1) + \varepsilon;$$

$$S1 (H1 = \text{const}, \theta1 = \text{const}, V1 = \text{const});$$

$$\psi1(t2) = \psi1(t1) + \Delta\psi; \psi1(t2) = \psi1(t0).$$

Символами обозначены: $S1$ и $S2$ – самолеты № 1 и № 2; $H1$ и $H2$ – высоты самолетов соответственно; $t0$ – начальное время моделирования; $V1$ и $V2$ – скорости самолетов; $pos1$ и $pos2$ – координатное положение самолетов; $\theta1$ и $\theta2$ – углы наклона траектории самолетов; $\psi1$ и $\psi2$ – курс самолетов; $t1$ – время конфликтного взаимодействия; ε – погрешность в определении координат самолетов; $t2$ – время окончания конфликтного взаимодействия; $\Delta\psi$ – корректирующий сигнал.

Заключение. Несмотря на сравнительную простоту необходимого тактического маневра во взаимодействии конфликтующих ВС, математическое решение задачи поиска соответствующих оптимальных траекторий представляется достаточно сложным. Специфика задачи заключается в неоднозначности искомых траекторий, в немонотонности параметров целевых объектов и поэтому освещение рассматриваемого вопроса приобретает смысл поиска общего подхода к получению точных решений в зависимости от конкретных требований.

Методическая оценка эффективности функционирования предложенных алгоритмов конфликтного взаимодействия ВС проводилась с использованием типовых исследовательских сценариев, начиная от простых конфликтов между двумя ВС до предельно сложных, с участием в одном конфликте значительного числа ВС (пяти и более). Основными показателями безопасности и эффективности разрешения конфликтов приняты две ве-

личины: расстояние расхождения одного ВС относительно другого и величина запаздывания в выполнении планового полета, вызванного конфликтами.

Предлагаемая методика решения конфликтных ситуаций ВС направлена на синтезирование рекомендаций в условиях обнаруженных конфликтов, которые должны обеспечить, в общем случае, пространственный

маневр уклонения с целью предотвращения возможного опасного сближения ВС, а после разрешения конфликта – обеспечить возвращение ВС на плановую траекторию и ее дальнейшее соблюдение. При этом в процессе синтезирования рекомендаций по выполнению маневра следует учитывать критерии оптимальности.

UDC 656.7.084

S.V. Pavlova¹, O.Ye. Volkov²

¹ Place of work: Research fellow, Department of intelligent control, International Research and Training Center for Information Technologies and Systems of NAS of Ukraine and MES of Ukraine, Address: 40, Glushkova ave., Kyiv, 03187, Ukraine, E-mail: alexvolk@ukr.net

² PhD, associate professor, Place of work: senior research fellow, Department of intelligent control, International Research and Training Center for Information Technologies and Systems of NAS of Ukraine and MES of Ukraine, Address: 1, Kosmonavta Komarova ave., Kyiv, 03187, Ukraine, Phone: +38 (044) 406-72-44, E-mail: psv@nau.edu.ua

The Conflict Interaction of Airships in Collision Prevention Threats

Keywords: Area of control, Conflict situation, Venn diagrams, aircraft, threat of collision.

Purpose: The proposed work is devoted to a new method for resolving conflict situations of aircraft with the prioritization of each aircraft based on the construction of control areas and Venn diagrams. This method is aimed at providing a guaranteed level of security in the resolution of depleted conflict situations of aircraft in real time.

Methods: The proposed technology is based on a new method for resolving aircraft conflicts using Venn diagrams and determining the areas of control of each aircraft.

Results: The introduction of a new technology to resolve aircraft conflicts in real time and the implementation of appropriate algorithms of such technology will ensure an effective increase in the level of safety of flights.

Discussion: The new technology proposes a method for determining the areas of controllability of aircraft, which characterize the capabilities of the aircraft to change the parameters of motion at a single time and allow us to characterize the nonlinearity of the behavior of the aircraft. For the universality of the proposed method, the developed rules for the divergence of the aircraft in a dynamic conflict situation are proposed. The rules for clarity are constructed according to the pattern of Venn diagrams.

1. Krozel J., Peters M. Decentralized control techniques for distributed air/ground traffic separation, Los Gatos: Seagull Technology Inc., 2000, 104 p.
2. *Predotvrashhenie stolknovenij vozdushnyh sudov. Avtonomnaja mikroelektronnaja radiolokacionnaja sistema* / B. Vojnich, O. Pozdnjakova, A. Sosnivskij i dr., M.: Jelektronika, 2000, 369 p. (In Russian).
3. Chikrij A.A., Rappoport I.S. Metod razreshajushhih funkcij v teorii konfliktno-upravljaemyh processov, Kibernetika i sistemnyj analiz, 2012, № 4, P. 40–64. (In Russian).
4. *Riski stolknovenija i jeshelonirovanie vozdushnyh korablej* / V.P. Harchenko, G.F. Argunov, S.A. Zakora i dr., K.: NAU, 2011, 326 p. (In Russian).
5. Zakora S.A. Analiz metodov reshenija konfliktnyh situacij v uslovijah svobodnogo poleta, VestnProceedings of the National Aviation University, 2005, № 1, P. 42–74. (In Russian).
6. Krasovskij N.N. Igrovyje zadachi o vstreche dvizhenij, M.: Nauka, 1970, 424 p. (In Russian).
7. Pavlov V.V., Volkov A.E. Sposob preduprezhdenija stolknovenij dvizhushhihsja ob#ektov v dinamicheskom konflikte v masshtabe real'nogo vremeni: patent Ukrainy № 106765, MPK G05V 1/00; G05B 15/00; G05B 17/00; G06F 9/00; G06N 7/00; G08G 5/00, № 201510017; zajavl. 13.10.2015; opubl. 10.05.2016, Bjul. № 9. (In Russian).
8. Pavlova S.V., Volkov A.E. System of guaranteed resolution of dynamic conflicts of aircrafts in real time, Proceedings of the National Aviation University, 2017, № 1, P. 29–35.

