

**МОДЕЛИРОВАНИЕ ИНВАРИАНТНОГО МЕТОДА РАЗРЕШЕНИЯ  
ДИНАМИЧЕСКИХ КОНФЛИКТОВ ВОЗДУШНЫХ СУДОВ**

**Аннотация.** Приводятся описание и результаты моделирования нового метода разрешения динамических конфликтных ситуаций воздушных судов. Разрабатываемый метод основан на теории инвариантности и методах математического анализа и направлен на гарантированное предупреждение угрозы столкновения воздушных судов для обеспечения высокого уровня безопасности полетов в целях перехода на новую концепцию полетов “FreeFlight”.

**Ключевые слова:** конфликтная ситуация, воздушное судно, предупреждение столкновений, моделирование, концепция “FreeFlight”.

**ВВЕДЕНИЕ**

Перспективным направлением развития гражданской авиации является концепция “FreeFlight”, направленная на повышение эффективности воздушного движения в целом и оптимизации выполнения полета отдельного воздушного судна (ВС) путем предоставления экипажу полной свободы в выборе траектории движения с соблюдением гарантированного уровня безопасности.

Обеспечение безопасности полетов, в свою очередь, непосредственно связано с решением задачи предупреждения столкновений ВС в воздухе. Для исключения превышения допустимого риска столкновений при росте интенсивности воздушного движения или для снижения его в условиях постоянной интенсивности движения необходимо повышать надежность систем навигации и управления воздушным движением прежде всего путем повышения надежности и качества технических средств этих систем.

Разрешение конфликтных ситуаций (КС) относительно воздушных судов — актуальная задача в вопросах безопасности полетов. Учитывая особенности математической теории управления, теории игр, оптимизации и используя для данного описания аппарат дифференциальных, интегральных и функционально-дифференциальных уравнений, рассмотрим конфликтно-управляемые процессы, которые имеют важное значение для принятия решений в сложных ситуациях взаимодействия таких подвижных объектов, как самолет.

Конфликтные ситуации представляют собой событие, которое соответствует фактическому или прогнозируемому нарушению норм обеспечения эшелонирования ВС в пространстве и в случае непринятия определенных мер со стороны пилотов или органов управления воздушным движением (УВД) может привести к катастрофической ситуации — столкновению ВС.

Необходимо отметить, что информация о состоянии современной системы управления воздушным движением периодически уточняется и обновляется. Траектория движения управляемых объектов (самолетов) является постоянной и математически описывается непрерывными уравнениями динамики. Анализ воздушной обстановки, прогнозируемое развитие, а также принятие решения по предотвращению предполагаемого конфликта выполняются в дискретные моменты времени. Таким образом, задача предотвращения конфликтов имеет гибридную структуру, в которой дискретно-временной процесс анализа и принятия

решений объединен с непрерывной динамикой процесса реализации решения. Такая гибридная структура должна создавать команды, которые могут быть реализованы бортовой системой управления полетом с использованием сетевых технологий для обмена данными между участниками конфликта.

#### **ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ ИССЛЕДОВАНИЙ**

В соответствии с правилами и нормативными документами [1–4] к маневру ВС предъявляются следующие принципиальные технологические требования:

— разрешение КС обычно должно выполняться маневром только одного ВС из числа всех конфликтующих и только в горизонтальной или только в вертикальной плоскости;

— маневру предписывается «S-образная» структура; он должен включать в себя участок пространства активного «уклонения», обеспечивающего безопасное эшелонирование, участок прямолинейного движения — «выдерживания» в случае расхождения и участок лавированного движения для возвращения ВС на его трассу;

— для исключения дополнительных конфликтных ситуаций маневр в целом должен выполняться с минимально необходимым отклонением ВС от его трассы;

— маневр в целом должен иметь минимальную продолжительность, и участки отклонения и возвращения должны выполняться за минимальное время с максимально допустимой величиной управления;

— обнаружение и анализ возможной КС должны выполняться в масштабе реального времени с учетом запаса на расстояние и время при таких начальных позициях судов, из которых разрешающий маневр будет выполнен гарантированно.

Создание метода разрешения динамических конфликтных ситуаций воздушных судов в масштабе реального времени удовлетворит описанным требованиям и поэтому является основной задачей настоящей работы.

Цель статьи — разработка метода разрешения конфликтных ситуаций ВС на маршрутах полета, этапах взлета и посадки в условиях обеспечения гарантированного уровня безопасности полетов, исходя из теории инвариантности с применением сетевых технологий.

#### **АНАЛИЗ СОВРЕМЕННЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ**

Для однозначного определения отсутствия потенциальной конфликтной ситуации (ПКС) для воздушного судна требуется сопоставить его маршрут полета с маршрутами других ВС, что приводит к попарной проверке всех маршрутов каждого ВС, участвующего в воздушном движении.

Для текущего планирования количество полетов в целях анализа составляет около 7–10 тысяч, а при стратегическом планировании — порядка 20 тысяч. Кроме того, необходимо отметить, что каждый план полета может иметь кроме основного несколько альтернативных маршрутов. Увеличение количества анализируемых объектов и их маршрутов, а соответственно и усложнение данной задачи приводит к полиномиальному росту сложности планирования управления в целом. Это вызывает возникновение эффекта «проклятие размерности», а именно неконтролируемых процессов, и даже может привести к распаду рассматриваемой системы в целом. Таким образом, выполнять попарную проверку всех маршрутов каждого ВС не представляется возможным ввиду трудоемкости задачи. В связи с этим одной из основных задач для любой методики определения и разрешения ПКС является сокращение числа пар ВС, проверяемых на предмет конфликтности.

Традиционные схемы сокращения перебора базируются на эвристических двухступенчатых процедурах фильтрации информации о движущихся ВС, что позволяет свести полный перебор по сотням объектов к десяткам полных переборов по единицам объектов [5]. Общеизвестен подход, согласно которому контролируемое воздушное пространство представляется в виде «слоеного пирога». Каждый его слой отображает часть пространства в конкретном диапазоне высот и покрывается координатной сеткой, дискреты которой по величине равны априорно заданному пороговому расстоянию (критерию) опасного сближения или (в других модификациях) его удвоенному значению. На этапе фильтрации все ВС, попавшие в один дискрет некоторого высотного слоя, считаются вовлеченными в конфликт. Среди них могут быть ВС, оказавшиеся в соседних дискретах, т.е. по разные стороны квадратов и слоев. Пары ВС, селектированные по квадратам сетки, анализируются в целях установления тенденции развития конфликтной ситуации.

Данный подход разрабатывался с целью использования систем в управлении воздушным движением. Для использования его в системах планирования воздушного движения потребуется выполнение имитационного моделирования развития воздушной обстановки. Количество обрабатываемых ВС при этом составляет несколько тысяч, а интервал моделирования — от 24 ч и более. Для ускорения процесса может быть использован гибкий шаг моделирования либо пропуск шагов моделирования, однако при этом количество расчетов остается значительным.

Высоким быстродействием обнаружения и разрешения КС при планировании воздушного движения обладает «фильтр конфликтов» [6], основу которого составляют алгоритмы анализа гистограмм распределения загрузки в точках воздушного пространства.

Также существует методика расчета КС в качестве подхода для решения задачи сокращения перебора пар ВС [7], которая использует списки входа ВС в определенные участки воздушного пространства (точки воздушного пространства и участки маршрутов). Методика учитывает при анализе нормы эшелонирования, действующие для данной пары ВС. При этом допускается возможность разбиения основного участка маршрута на подучастки для повышения точности описания характера движения ВС.

Большое внимание рассмотрению КС динамических объектов уделяется в работах [8, 9], где теория конфликтно-управляемых процессов рассматривается на примере динамических игр сближения.

#### **ОТОБРАЖЕНИЕ НЕРЕШЕННОЙ ЧАСТИ ПРОБЛЕМЫ**

Несмотря на сравнительно простой необходимый тактический маневр во взаимодействиях конфликтующих ВС, математическое решение задачи отыскания соответствующих оптимальных траекторий представляется достаточно сложным. Специфика задачи заключается в неоднозначности искомых траекторий, например ввиду немонотонности поведения параметров ВС, и поэтому освещение рассматриваемого вопроса приобретает смысл поиска общего подхода к получению точных решений в зависимости от конкретных требований.

Важным недостатком современных систем обнаружения и разрешения конфликтов ВС являются неопределенности, которые не учитываются в модели прогнозируемого движения ВС. Это связано с двумя главными обстоятельствами: погрешностью в нахождении текущего состояния ВС и неопределенностью в модели поведения ВС на прогнозируемом интервале времени. Именно поэтому вокруг ВС необходимо строить виртуальную защитную зону неопределенности

в виде сферической области. И в данном случае конфликтом будет считаться именно нарушение границ этой зоны областью другого ВС.

#### **МЕТОД ГАРАНТИРОВАННОГО РАЗРЕШЕНИЯ ДИНАМИЧЕСКИХ КОНФЛИКТНЫХ СИТУАЦИЙ ВОЗДУШНЫХ КОРАБЛЕЙ В МАСШТАБЕ РЕАЛЬНОГО ВРЕМЕНИ**

В основу разработанного метода поставлена задача обеспечения гарантированного разрешения конфликтных ситуаций воздушных судов в динамическом разряженном (с необходимым и достаточным запасом времени) конфликте в масштабе реального времени для повышения безопасности полетов в авиации и эффективности использования авиационной техники.

Решение поставленной задачи базируется на том, что в методе разрешения конфликтных ситуаций объектов в динамическом конфликте в масштабе реального времени определяются координаты движения каждого объекта (воздушных судов) в заданной зоне пространства. Каждому объекту задается условная «зона неопределенности» его положения для учета возможных отклонений местонахождения объектов. С помощью сетевых технологий с воздушных судов передаются данные, необходимые для проведения расчетов прогнозируемых (аппроксимированных) траекторий движения объектов в каждый момент времени при условии стабильного сохранения скорости движения, высоты и курса. Далее определяют наличие пересечений этих прогнозируемых траекторий различных ВС в заданной зоне пространства в каждый момент времени, что свидетельствует о возможной угрозе их столкновения (наличие разряженного конфликта), и при обнаружении такой угрозы вычисляют «области управляемости» (исходя из учета всех характеристик подвижных объектов) для каждого ВС. На основании сравниваемых показателей определяют объект или объекты, для которых необходимо определить траекторию маневра уклонения, рассчитываемую с учетом заложенной базы данных, содержащей набор общих правил уклонения объектов в случае возможной угрозы столкновения. Кроме того, способ учитывает критерий оптимальности, а именно глобальный оптимум по критерию минимального отклонения подвижных объектов от начальных траекторий движения (степень отклонения от маршрута). Далее происходит расчет прогнозируемых траекторий движения объектов с учетом новых показателей маневра уклонения при сохранении постоянной скорости движения и варьированности высотой и направлением курса. Затем осуществляется проверка возможного пересечения прогнозируемых траекторий движения ВС и возможных угроз столкновения. В случае обнаружения новых прогнозируемых потенциальных угроз столкновения происходит перерасчет траекторий уклонения. Во время выполнения воздушным судном маневра уклонения также рассчитывают траекторию его возвращения на начальную траекторию движения.

#### **РЕЗУЛЬТАТЫ МОДЕЛИРОВАНИЯ РАЗРАБОТАННОГО МЕТОДА**

На рис. 1 графически изображена трехмерная модель конфликта (поликонфликта) пяти самолетов, которые, двигаясь по разным маршрутам на разных высотах и скоростях, пересекутся в одной точке  $C$  в одно время  $t$ . Модель конфликта построена в среде MatLab. В качестве аэродинамической и математической моделей движения самолетов использованы параметры среднего магистрального самолета.

На рис. 2 графически показано разрешение приведенной выше трехмерной модели конфликта (поликонфликта) пяти самолетов. Моделирование проведено в среде MatLab по заложенному алгоритму работы действующей в современной авиации системы TCAS. Исходя из полученного результата следует, что кон-

фликт пяти самолетов успешно разрешен. Однако несовершенство действующей системы TCAS вызвало в процессе разрешения одного конфликта возникновение новых пар конфликтов, как показано в точках *a*, *b* и *c*.

В соответствии с разработанными в настоящей статье правилами расхождения конфликтующих самолетов (согласно принципу расхождения в планеризме с использованием диаграмм Вена) приведенный выше пример модели конфликтной ситуации самолетов предлагается решать следующим образом.

1. Определяется самолет, чей приоритет в конфликте будет выше. В данной ситуации это самолет № 1, так как летящий ниже самолет имеет преимущество перед летящими выше самолетами. Соответственно самолет № 1 должен продолжить полет без изменений.

2. Самолет № 4 должен прекратить снижение, уступив дорогу самолету № 5, который находится ниже и имеет приоритет перед самолетом № 4.

3. Самолет № 5 должен прекратить снижение и отклониться по курсу вправо, уступая дорогу самолету № 1 и не создавая ему спутного следа.

4. Самолет № 2 должен уступить дорогу самолету № 1, однако при этом учитывая его конфликт с самолетом № 3; самолет № 2 должен отклониться по курсу вправо.

5. Самолет № 3 для разрешения конфликта с самолетом № 1 должен отклониться по курсу вправо.

В соответствии с описанной последовательностью разрешения конфликтной ситуации самолетов имеем результаты моделирования конкретной ситуации расхождения самолетов (рис. 3). Как видим, конфликт успешно разрешен и не создано новых ситуаций столкновения, что является важным в обеспечении гарантированного расхождения самолетов. После разрешения КС самолеты могут успешно продолжить свой курс к исходной точке.

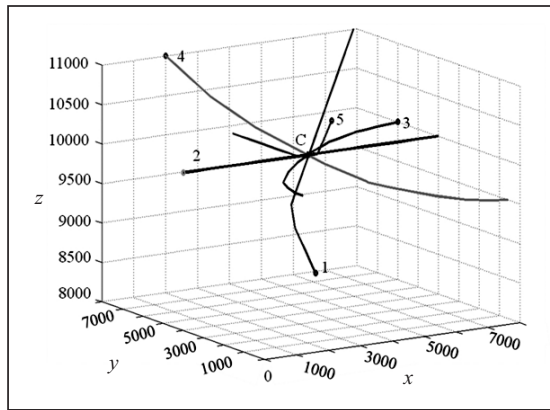


Рис. 1. Графическое изображение трехмерной модели конфликта пяти самолетов

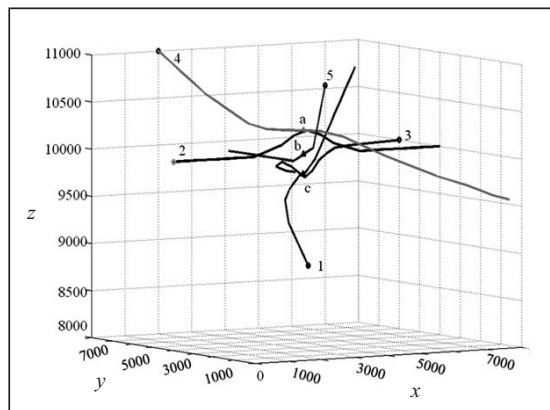


Рис. 2. Графическое изображение разрешения конфликтной ситуации пяти самолетов системой TCAS

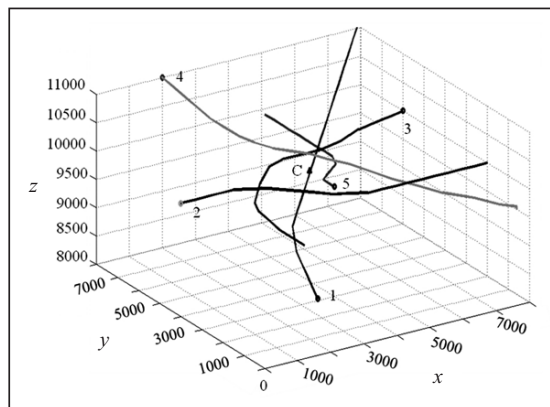


Рис. 3. Графическое изображение моделирования ситуации расхождения самолетов в поликонфликтной ситуации по предлагаемому методу

**Таблица 1**

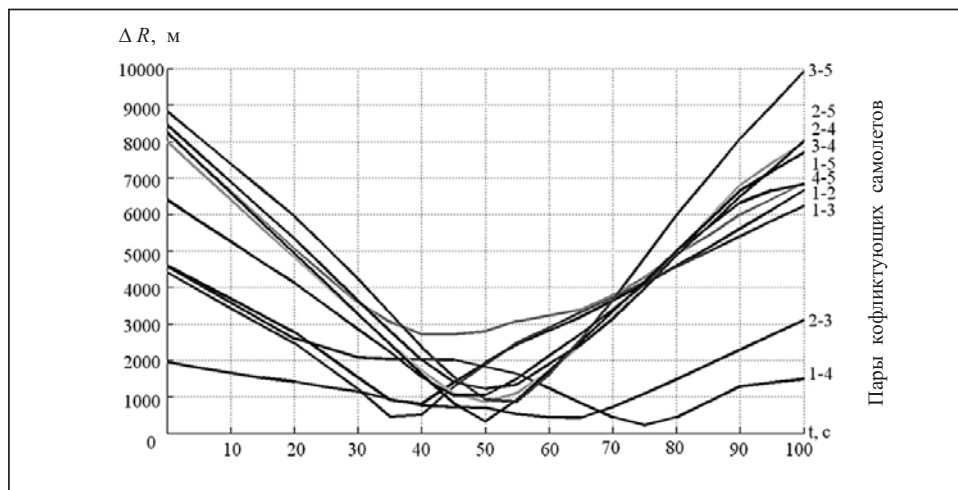
Номер самолета	Плановая длина маршрута, м	Измененная длина маршрута после маневра, м	Разность длин, м
1	8000	8680	680
2	8520	9130	610
3	10780	10780	0
4	10030	10840	810
5	9380	9600	300

временными точками 1 и 2 (отклонение по курсу влево) и постоянна между временными точками 0 и 1 (линейный полет), угол наклона траектории постоянен между временными точками 0 и 1 (меньше нуля) и увеличивается (до нуля) между временными точками 1 и 2, высота уменьшается между временными точками 0 и 1 и постоянна между временными точками 1 и 2 (прямой полет).

Блок 3 — определение точки пересечения траекторий самолетов.

Блок 4 — определение полетных параметров самолетов, которые необходимо изменить в соответствии с заявленными правилами для разрешения конфликтной ситуации. На примере самолета № 5: полетные параметры самолета необходимо изменить для расхождения с другими конфликтующими самолетами: следует прекратить снижение во временной точке 1, увеличив угол наклона траектории, чтобы избежать попадания по высоте во временную точку 2; скорость остается постоянной; необходимо изменить курс, отклонившись влево во временной точке 1, чтобы избежать попадания спутного следа во временную точку 2.

Для получения сравнительной характеристики по изменению маршрута полета каждого самолета при выполнении маневра были определены длины маршрутов по изначальной плавной траектории и траектории с выполнением маневра по предлагаемому методу для разрешения конфликтной ситуации, также определена разность длин между этими маршрутами. Результаты приведены в табл. 1.



*Рис. 4.* График изменения дистанций между самолетами в процессе возникновения и разрешения поликонфликтной ситуации

Сформулируем для данного случая правила определения и разрешения конфликтной ситуации самолетов на основе математической логики.

Блок 1 — определение текущих полетных параметров и положения самолетов.

Блок 2 — определение характеристик движения самолетов (динамики их полета). На примере самолета № 5: скорость не изменяется, курс изменяется между временными точками 1 и 2

Показателем успешного разрешения поликонфликтной ситуации пяти самолетов предлагаемым методом является рис. 4, где приведены дистанции между самолетами с момента начала опасного сближения и до успешного разрешения конфликта. Как видно из графика, наименьшая дистанция  $\Delta R$  между самолетами составляла больше 300 м, что подтверждает соблюдение установленных правил эшелонирования.

#### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Важным вопросом при разработке систем предотвращения конфликтной ситуации является достоверное прогнозирование воздушной обстановки, которое зависит, в первую очередь, от степени адекватности принятой математической модели движения самолета к реальному процессу развития воздушной обстановки. При прогнозировании случайного процесса основными факторами, влияющими на неопределенность положения самолета, считаются ошибки при неучете влияния ветра, навигационные ошибки, ошибки пилотирования и системы управления полетом, непредвиденная перепланировка маршрута полета. Особо следует отметить неопределенность положения самолета из-за ошибок при моделировании процесса его полета. Причиной ошибки может быть несоответствие принятых предположений реальным условиям полета или неопределенность значений параметров принятой модели. В некоторых случаях математическая модель не может быть решена аналитически. Тогда решение находится численным приближением, ошибка которого также вносит свою долю неопределенности.

Результаты моделирования разработанного метода гарантированного разрешения конфликтных ситуаций воздушных судов показали его востребованность. Метод базируется на следующих процедурах.

1. Выполняется совместный прогноз движения ВС в расчетной зоне воздушного пространства, рассчитываются параметры наихудшего сближения, принимается решение о наличии КС.

2. С учетом значений параметров наихудшего сближения выполняется классификация типа сближения и типа КС. Для каждого типа ситуации из базы данных с полным набором правил расхождений применяется соответствующее условие, содержащее совокупность логических положений, необходимых для расчета возможных разрешающих маневров.

3. Для определенной КС рассчитывается разрешающий маневр, при этом анализируется условие для его осуществления, т.е. возможность обеспечения заданного безопасного расстояния при расхождении судов.

Методическая оценка эффективности функционирования предложенных алгоритмов обнаружения и разрешения конфликтных ситуаций проводилась с использованием типовых исследовательских сценариев, начиная от простых конфликтов между двумя ВС до предельно сложных ситуаций с участием в одном конфликте значительного числа ВС (от пяти и более). В качестве основных показателей безопасности и эффективности разрешения конфликтов приняты расстояние расхождения одного ВС относительно другого и величина запаздывания в выполнении планового полета, вызванного разрешением конфликтов.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Анодина Т.Г., Кузнецов А.А., Маркович Е.Д. Автоматизация управления воздушным движением. Москва: Транспорт, 1992. 312 с.

2. Белкин А.М., Миронов Н.Ф., Рублев Ю.И., Сарайский Ю.Н. Воздушная навигация: справочник. Москва: Транспорт, 1998. 284 с.
3. Пятко С.Г., Красов А.И. Автоматизированные системы управления воздушным движением. С.-Петербург: Политехника, 2004. 118 с.
4. Королев Е.Н. Технологии работы диспетчеров управления воздушным движением. Москва: Воздушный транспорт, 2000. 541 с.
5. Krozel J., Peters M. Decentralized control techniques for distributed air/ground traffic separation. Los Gatos: Seagull Technology Inc., 2000. 104 p.
6. Войнич Б., Позднякова О., Соснинский А., Борисов В. Предотвращение столкновений воздушных судов. Автономная микроэлектронная радиолокационная система. Москва: Электроника, 2000. 369 с.
7. Ахмедов Р.М., Бибутов А.А., Васильев А.В. и др. Автоматизированные системы управления воздушным движением: Новые информационные технологии в авиации. С.-Петербург: Политехника, 2004. 446 с.
8. Чикрий А.А., Раппопорт И.С. Метод разрешающих функций в теории конфликтно-управляемых процессов. *Кибернетика и системный анализ*. 2012. Т. 48, № 4. С. 40–64.
9. Чикрий А.А., Чикрий Г.Ц. О матричных разрешающих функциях в динамических играх сближения. *Кибернетика и системный анализ*. 2014. Т. 50, № 2. С. 44–63.

*Надійшла до редакції 14.03.2017*

**С.В. Павлова, О.Є. Волков**

**МОДЕЛЮВАННЯ ІНВАРІАНТНОГО МЕТОДУ ВИРІШЕННЯ ДИНАМІЧНИХ КОНФЛІКТІВ ПОВІТРЯНИХ КОРАБЛІВ**

**Анотація.** Наведено опис і результати моделювання нового методу вирішення динамічних конфліктних ситуацій повітряних суден. Розроблюваний метод оснований на теорії інваріантності та методах математичного аналізу і спрямований на гарантоване упередження загрози зіткнення повітряних суден для забезпечення високого рівня безпеки польотів з метою переходу на нову концепцію польотів “FreeFlight”.

**Ключові слова:** конфліктна ситуація, повітряне судно, упередження зіткнень, моделювання, концепція “FreeFlight”.

**S.V. Pavlova, O.Ye. Volkov**

**MODELING THE INVARIANT METHOD OF DYNAMIC RESOLUTION OF AIRCRAFT CONFLICTS**

**Abstract.** The authors present the description and the results of simulation of a new method to resolve dynamic aircraft conflicts. The method is based on the theory of invariance and methods of mathematical analysis and is aimed to prevent a threat of aircraft collision to provide high-level flight safety in order to switch to the new “FreeFlight” concept.

**Keywords:** conflict situation, aircraft, collision avoidance, simulation, “FreeFlight” concept.

**Павлова Светлана Вадимовна,**

доктор техн. наук, доцент, ведущий научный сотрудник Международного научно-учебного центра информационных технологий и систем НАН Украины и МОН Украины, Киев, e-mail: psv@nau.edu.ua.

**Волков Александр Евгеньевич,**

научный сотрудник Международного научно-учебного центра информационных технологий и систем НАН Украины и МОН Украины, Киев, e-mail: alexvolk@ukr.net.