

УДК 656.7.084

А.Е. Волков

Инвариантный метод разрешения динамических конфликтов воздушных судов

Описано повышение безопасности полетов в гражданской авиации путем создания и внедрения нового метода разрешения динамических конфликтных ситуаций воздушных судов. Разрабатываемый метод направлен на обеспечение гарантированного уровня безопасности при разрешении разряженных конфликтных ситуаций воздушных судов в масштабе реального времени.

Ключевые слова: конфликтная ситуация, воздушное судно, угроза столкновения, гражданская авиация, воздушное движение.

Описано підвищення безпеки польотів у цивільній авіації шляхом створення і впровадження нового методу розв'язання динамічних конфліктних ситуацій повітряних суден. Розроблений метод спрямовано на забезпечення гарантованого рівня безпеки при розв'язанні розряджених конфліктних ситуацій повітряних суден в масштабі реального часу.

Ключові слова: конфліктна ситуація, повітряне судно, загроза зіткнення, цивільна авіація, повітряний рух.

Введение. Обеспечение безопасности полетов в значительной мере связано с решением задачи предупреждения столкновений самолетов в воздухе. В настоящее время решение этой задачи возлагается на диспетчерскую службу системы управления воздушным движением, экипаж воздушного судна (ВС) и бортовые системы предупреждения столкновений. Однако по мере постоянного роста интенсивности воздушного движения диспетчерские службы управления воздушным движением (УВД) и экипажи ВС сталкиваются с все большими трудностями предупреждения опасных сближений самолетов в воздухе. А технические средства и системы предупреждения столкновений, устанавливаемые на борту самолетов, перестают отвечать современным требованиям и не обеспечивают необходимого уровня безопасности полетов.

Визуальные методы, используемые при полетах, не обеспечивают необходимой безопасности полетов, так как даже при очень хорошей видимости пилоты в ряде случаев обнаруживают встречный самолет, когда времени на выполнение маневра уклонения остается недостаточно. Кроме того, визуальные методы связаны с субъективными ошибками в определении дальности до самолета, его скорости и в оценке степени опасности столкновения [1].

Существующая система УВД, из-за возникающих в процессе управления перегрузок дис-

петчерского состава и некоторых ограничений технических средств, также не в полной мере обеспечивает контроль за соблюдением заданных навигационных параметров каждым самолетом, выполняющим полет по приборам. Кроме того, система УВД не позволяет осуществлять контроль за полетами во всем воздушном пространстве, особенно на малых высотах и в труднодоступных для наблюдения районах (горы, тундры, полюса, океанские просторы и т.д.).

Весьма эффективным средством повышения надежности и оперативности наземных служб УВД служит автоматизация процессов контроля и управления полетами, внедрение более совершенных систем радиолокации, вычислительных комплексов, систем отображения информации. Автоматизация систем УВД – основа развития средств наземного диспетчерского контроля над полетами самолетов, внедрение их в настоящее время значительно повышает эффективность и безопасность воздушного движения, снижает нагрузку на диспетчеров и пилотов. Вместе с тем автоматизация процессов обеспечения полетов и совершенствование радиолокационных средств не могут в достаточной степени обеспечить предупреждение опасных сближений на трассах с интенсивным движением, проходящих в труднодоступных районах, а также при межконтинентальных полетах [2].

Анализ последних исследований

При рассмотрении проблемы предупреждения столкновений самолетов в воздухе различают два понятия: опасное сближение самолетов и столкновение самолетов. Под опасным сближением самолетов понимают ситуацию, при которой самолеты сближаются на минимальное расстояние, когда еще можно предотвратить столкновение путем маневра уклонения. Под столкновением понимают ситуацию, при которой самолеты сблизались на расстояние, равное или меньшее расстоянию безопасного расхождения.

Существует несколько современных систем предупреждения столкновений ВС [3].

Сегодня для уменьшения риска столкновений ВС используется система предупреждения опасных сближений самолетов в воздухе – *TCAS (Traffic Collision Avoidance System)*. Существуют различные варианты данной системы. *ICAO (Международная организация гражданской авиации)* рекомендует применять систему *TCAS II*, так как она полностью соответствует стандартам *ACAS (Airborne Collision Avoidance System)* и установлена на большинстве коммерческих воздушных судов. Система *TCAS II* может обнаруживать ВС на расстояниях до 40 миль, выдает информацию о воздушной обстановке и прямые рекомендации по устранению возникшей конфликтной ситуации. Система одновременно может отслеживать до 30 ВС и для трех одновременно выдавать команды по разрешению конфликтной ситуации.

Итак, преимущество использования *TCAS* – неоспоримо, однако система имеет ряд существенных ограничений:

- система УВД не получает указаний, выданных *TCAS* воздушным судам, поэтому авиадиспетчеры могут не иметь достаточно информации, а также давать противоречивые указания, что есть причиной неопределенности в действиях экипажей;

- для эффективной работы системы *TCAS* необходимо, чтобы этой системой были оснащены все самолеты, так как они обнаруживают друг друга по ответчикам;

- система не может обнаружить самолеты, не оборудованные ответчиками (транспондерами). Если датчики конфликтного самолета по какой-то причине не выдают данных о своей высоте, то *TCAS* может не идентифицировать их на дисплее;

- с целью исправления конфликтной ситуации система выдает команды для маневрирования только в вертикальной плоскости, маневры в горизонтальной – пока остаются для нее невозможными.

В рамках исследованного проекта «*iFly*» [4] *Eurocontrol* предпринял попытку разработать новую бортовую систему безопасного эшелонирования *ASAS (Airborne Separation Assurance (Assistance) System)* – это бортовая система, позволяющая экипажу поддерживать безопасное эшелонирование самолета и предоставляет необходимую информацию о воздушном движении. Одна из базовых функций *ASAS* – улучшение ситуационной осведомленности экипажа, которая заключается в предоставлении ему всей необходимой информации о воздушном движении вокруг собственного ВС для принятия правильных и своевременных решений по обеспечению эшелонирования с другими самолетами.

Проектом предусматривается, что расстояние между самолетами будет сокращено, а это, в свою очередь, требует разработки системы предотвращения попадания *ВС* в *спутный след*. Алгоритмы функционирования *ASAS* в общем виде еще не стандартизированы. Это объясняется сложностью перехода к новым принципам распределения ответственности между диспетчером и пилотом по поддержке безопасного эшелонирования *ВС*, что можно отнести к основным недостаткам системы.

Рассмотрим также новую технологию радиовещательного автоматического зависимого наблюдения *ADS-B (Automatic Dependent Surveillance – Broadcast)*, которая есть усовершенствованным методом *ADS (Automatic Dependent Surveillance)*. *ADS-B*-технология, внедряемая в настоящее время на территории США и в других стран, позволяет пилотам в кабине самолета и диспетчерам на наземном пункте *ви-*

деть трафик движения воздушных судов с большей точностью, чем это было доступно ранее, и получать аэронавигационную информацию [5].

ADS-B также передает в реальном времени погодную информацию пилотам. Эта информация значительно расширяет осведомленность пилота о ситуации и повышает безопасность полетов. Кроме того, доступ к *ADS-B*-информации бесплатный и свободный для всех. Любой пользователь, находящийся в воздухе или на земле в пределах дальности радиовещательной передачи, может обрабатывать и использовать эту информацию в своих целях. Кроме того, эта информация может быть использована не только наземными службами УПК, но и бортовыми системами предупреждения столкновений *ACAS* (*Airborne Collision Avoidance System*).

Однако есть и недостатки *ADS-B*:

- отсутствие каких-либо средств защиты при передаче данных;
- возможность посылать в эфир поддельные данные или подменять информацию в настоящих пакетах данных;
- сторона, принимающая данные пакеты, не может быть уверена ни в действительности пакета, ни в идентификации отправителя.

Выделение нерешенной части проблемы

Исходя из сказанного можно сделать следующий вывод. Современные разрабатываемые и внедренные системы и технологии разрешения конфликтных ситуаций *ВС* имеют существенные недостатки, не обеспечивающие гарантированного уровня безопасности полетов. Система разрешения конфликтных ситуаций *ВС* должна синтезировать рекомендации при обнаружении 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 должны учитываться критерии оптимальности (расход топлива, временные

и пространственные затраты на выполнение маневра, комфортность пассажиров и т.д.).

Постановка задачи исследований

В связи с этим в настоящее время для решения задачи предупреждения столкновений считается технически и экономически целесообразным дополнить систему УВД специальной бортовой системой предупреждения столкновений самолетов в воздухе, способной автономно, независимо от системы УВД, в масштабе реального времени, обеспечить безопасное расхождение самолетов при возникновении угрозы столкновения.

Цель статьи – создание новой системы и технологии разрешения динамических конфликтных ситуаций *ВС* с обеспечением гарантированного уровня безопасности полетов.

Для решения задачи предупреждения столкновений самолетов с помощью технических средств системы УВД необходимо провести:

- измерение координат местоположения и параметров движения объектов;
- прогнозирование с помощью имитационного моделирования с заданной дискретностью возможного положения объектов через определенное время для обнаружения угрозы столкновения;
- информационный обмен с объектами для оповещения об опасности и координации их маневров по уклонению от столкновения;
- обеспечение выполнения автоматизированного процесса разрешения конфликтной ситуации.

Именно такие функциональные и программные задачи ставятся при создании новой системы разрешения динамических конфликтов *ВС* для организации децентрализованного управления воздушным движением в современных условиях обеспечения безопасности воздушного пространства.

Описание предлагаемого метода разрешения конфликтов воздушных судов

В основу разработанного метода поставлена задача обеспечения гарантированного предупреждения столкновений *ВС* 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.

Поставленная задача решается тем, что в методе предупреждения столкновений ВС в динамическом конфликте в масштабе реального времени обеспечивается определение координат движения каждого из ВС в заданной зоне пространства. Каждому ВС задается условная зона неопределенности его положения для учета возможных отклонений местонахождения. С помощью сетевых технологий с ВС передаются данные, необходимые для проведения расчетов прогнозируемых (аппроксимированных) траекторий движения ВС в каждый момент времени при условии стабильного сохранения скорости движения, высоты и курса. Затем определяют наличие пересечения этих прогнозируемых траекторий различных ВС в заданной зоне пространства в каждый момент времени, что свидетельствует о возможной угрозе столкновения (наличие разряженного конфликта), и при обнаружении такой угрозы вычисляют области управляемости (основанные с учетом всех характеристик ВС) для каждого из ВС. На основе их сравнения определяют ВС или воздушные суда, для которых необходимы и рациональные траектории маневра уклонения, рассчитываемые с учетом заложенной базы данных со сборником общих правил уклонения ВС в случае возможной угрозы столкновения. Кроме того, способ отмечается учетом критерия оптимальности, а именно глобального оптимума по критерию минимального отклонения ВС от начальных траекторий движения (степень отклонения от маршрута). После этого происходит расчет прогнозируемых траекторий движения ВС по новым траекториям маневра уклонения при сохранении стабильной скорости движения, высоты и курса для осуществления дальнейшей проверки возможного пересечения прогнозируемых траекторий движения ВС и определения возможных угроз столкновения. Во время выполнения ВС маневра уклонения, при необходимости

также рассчитывают траекторию его возвращения на начальную траекторию движения.

Отметим новое решение разработанного метода:

- расчет прогнозируемых траекторий движения ВС в каждый момент времени;
- расчет и учет зон неопределенности и областей управляемости ВС;
- учет нелинейности в поведении ВС и процесса конфликта вообще;
- наличие базы данных в сборнике общих правил уклонения ВС в случае возможной угрозы столкновения;
- определение глобального оптимума по критерию минимального отклонения.

Это позволит обеспечить гарантированный уровень безопасности при предупреждении столкновений ВС в динамическом конфликте.

Поясним принцип действия метода более подробно описанием конкретного примера его выполнения и рисунками, где показаны:

- на рис. 1 и 2 – примеры рассчитанной возможной области управляемости ВС по параметрам траекторного, кинематического и аэродинамического управления;
- на рис. 3 – пример возможной индикации, сигнализации и управляющих команд для ВС в случае угрозы столкновения.

Разработанный метод реализуется следующим образом.

На каждом ВС определяют координаты всех других судов, находящихся в определенной заданной ограниченной зоне пространства, с помощью данных, передаваемых от спутниковых и радиолокационных систем. В соответствии с определенными координатами каждому ВС задают зону неопределенности, характеризующую не достоверность определенного и прогнозируемого положения, которая обусловлена погрешностями оценки текущей ситуации, неадекватностью математических моделей, влиянием внешней среды, навигационными погрешностями и прочее. Для обеспечения гарантированного уровня безопасности, на основе проведенных моделирований, определено, что зона неопределенности должна выглядеть

сферической окружностью с ВС в центре. Далее с помощью сетевых технологий передачи данных ВС в заданной зоне пространства обмениваются между собой данными, необходимыми для проведения прогнозирования и построения траекторий их возможного движения в каждый момент времени, а также в случае необходимости для дальнейшего расчета их областей управляемости. При этом считается, что скорость движения, высота и курс ВС будут неизменными. Процесс определения наличия пересечения этих прогнозируемых траекторий движения различных ВС в заданной зоне пространства в каждый момент времени, т.е. процесс определения возможного *разряженного* конфликта (угрозы столкновения), осуществляется следующим образом: вероятность конфликта определяется как вероятность того, что расстояние между двумя или более ВС станет меньше некоторого установленного значения.

После выявления возможной угрозы столкновения ВС, построения прогнозируемых траекторий их движения, определения расстояния и времени до столкновения, на основе данных, которые взаимно передаются между ВС, с помощью сетевых технологий, вычисляют области управляемости для каждого из ВС, основанные на учете всех характеристик ВС. Области управляемости характеризуют возможности ВС по изменению параметров движения в один момент времени и позволяют характеризовать нелинейность его поведения и процесса конфликта вообще. Для этого используется математический аппарат кинематики и динамики движения ВС.

Пример возможной области управляемости, а именно влияния параметров траекторного управления на возникающее ускорение показан на рис. 1.

На рис. 2 показан пример возможной области управляемости ускорением в зависимости от скорости движения и угла наклона траектории.

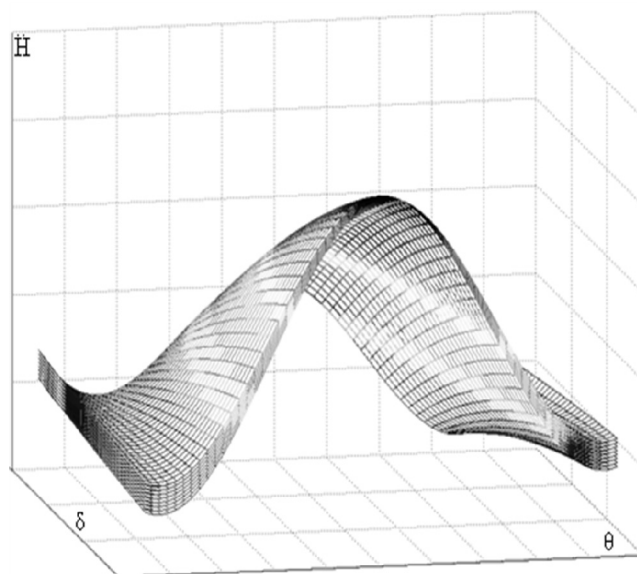


Рис. 1. Влияние параметров траекторного управления на возникающее ускорение магистрального самолета

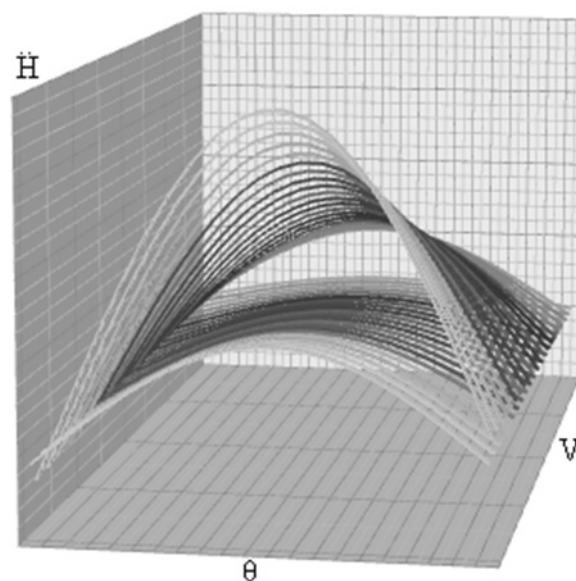


Рис. 2. Области управляемости ускорением в зависимости от скорости движения и угла наклона траектории

Расчитанные и построенные области управляемости ВС сравниваются между собой с помощью стандартных математических алгоритмов и методов моделирования. На основе проведенного сравнения определяют ВС или суда, которым необходимо выполнять маневр уклонения (определяют приоритетность). Принцип определения такой: маневр уклонения должен выполнять то ВС, которое имеет больше для этого возможностей, однако, если возможностей одного ВС для обеспечения гарантированного разли-

чия не хватает, маневр уклонения должны выполнять и другие ВС в порядке приоритетности.

Расчет необходимых траекторий маневра уклонения происходит в соответствии с требованиями, характеризующими минимально допустимые расстояния между подвижными объектами в заданной части пространства. Для этого рассчитывается расстояние между объектами в момент их наибольшего сближения.

Тип необходимого маневра, а именно: изменение высоты движения одного или нескольких ВС, изменение скорости движения, изменение курса. Комбинация этих маневров для одного или нескольких ВС определяется по следующему принципу: тип маневра уклонения одного или нескольких ВС зависит от рассчитанных в областях управляемости возможностей этих ВС изменять параметры их движения в конкретный момент времени. ВС, которое имеет больше таких возможностей, получает приоритет в выполнении маневра. При этом для определения типа маневра уклонения также используется база данных со сборником общих правил уклонения ВС в случае возможной угрозы столкновения.

При определении типа маневра, расчета траектории маневра уклонения и определении ВС или судов, которые будут выполнять маневр, обязательным условием есть учет глобального оптимума по критерию минимального отклонения ВС от начальных траекторий движения. Он характеризует отклонение конфликтующих ВС от первоначальных планов движения (мера отклонения от маршрута), а именно, площадь необходимого маневра. Кроме того, площадь маневра учитывает пространственные затраты на выполнение маневра.

В процессе выполнения маневра и по его завершению происходит постоянный расчет новых прогнозируемых траекторий движения ВС для определения новых возможных угроз столкновения. Также в случае необходимости по совершению или в процессе выполнения маневра уклонения рассчитывают траекторию возвращения ВС на начальную траекторию движения.

Пример возможной индикации и сигнализации с выдачей управляющих команд показан на рис. 3.

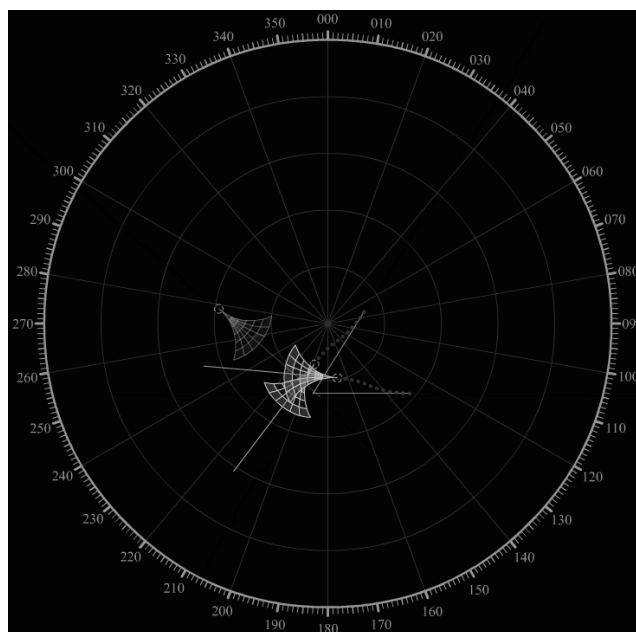


Рис. 3. Пример индикации и сигнализации системы предложенного метода

Разработанный метод имеет циклический характер реализации и выполняется постоянно в масштабе реального времени на каждом ВС в процессе его движения, обеспечивая высокий уровень безопасности движения.

Заключение. Создание системы разрешения динамических конфликтных ситуаций ВС в масштабе реального времени и реализация такого управления соответствующими алгоритмами обеспечит эффективное предотвращение опасных сближений. Разработанная система обнаружения и разрешения опасных сближений будет обеспечивать расхождение судов относительно друг друга на расстоянии, соответствующем нормам эшелонирования ВС. В условиях сложных множественных конфликтов при большом количестве (до 50) ВС и при сложной геометрии конфликта (пересечении двух плотных потоков ВС, схождении в одной точке и в одно время, летящих в разных направлениях; конфликт с сочетанием пересечений и обгонов нескольких ВС в одной точке). Команды управления формируются в автономном режиме, одновременно с другими участ-

никами воздушного движения. Имеется принципиальная возможность реализации эффективного управления как при современной структуре и интенсивности потоков воздушного движения, так и при переходе на перспективные принципы «FreeFlight».

Разрабатываемые и внедряемые системы связи, навигации и наблюдения уже в ближайшие годы обеспечат техническую возможность организации децентрализованного управления с выработкой команд на борту ВС. Реализуемые технические характеристики данных о воздушном движении на борту ВС по объему, частоте обновления и точности достаточны для эффективного использования разработанной системы разрешения конфликтных ситуаций ВС.

1. Дружинин В.В., Конторов Д.С. Конфликтная радиолокация. – М.: Радио и связь, 1982. – 62 с.
2. Автоматизированные системы управления воздушным движением: Новые информационные технологии в авиации / Р.М. Ахмедов, А.А. Бибутов, А.В. Васильев и др. – СПб.: Политехника, 2004. – 446 с.
3. Чепиженко В.І., Волкогон В.О. Роль сучасних концепцій трансформації CNS/ATM систем у забезпеченні автономних польотів повітряних кораблів // Актуальні проблеми автоматизації та інформаційних технологій. – 2015. – Т. 19. – С. 112–120.
4. iFly: ASAS Self Separation – Airborne Perspective. – http://www.asas-tn.org/towards-asasgn/session-3/3_ifly_2.pptx.
5. FAA Announces Automatic Dependent Surveillance-Broadcast Architecture. // FAA Office of Public Affairs, July 1, 2002.: APA 27–02, Retrieved 2011–02–21.

Поступила 17.10.2016

Тел. для справок: +38 044 526-0158 (Киев)

E-mail: alexvolk@ukr.net

© А.Е. Волков, 2017

UDC 656.7.084

А.Е. Volkov¹

Invariant Method of Resolution of Dynamic Conflicts of Aircraft

¹ Research fellow, Department of intelligent control, International Research and Training Center for Information Technologies and Systems of NAS of Ukraine and MES of Ukraine, 40, Glushkova ave., Kyiv, 03680, Ukraine, E-mail: alexvolk@ukr.net

Keyword: Conflict situation, aircraft, threat of collision, civil aviation, air traffic.

Purpose: The present work is devoted to improving of flight safety in civil aviation by creating and implementing a new system of resolution of dynamic conflict of aircrafts. The developed system is aimed at ensuring a guaranteed level of safety when resolution of rarefied conflict situations of aircraft in real-time.

Methods: The proposed system is based on a new method of conflict resolution of aircraft on the basis of the theory of invariance.

Results: The development of the system of conflict resolution of aircraft in real time and the implementation of the respective algorithms such control will ensure effective prevention of dangerous approaches.

Discussion: The system is implemented as single unified equipment using satellite and radar navigation systems that will ensure the positioning of aircraft in real time. Provided that the system should be installed on all aircraft and integrated on board to properly ensure its functionality and interact with navigation systems.

1. Druzhinin V.V., Kontorov D.S. (1982) *Konfliktnaya Radiolokatsiya* [The Conflict Radiolocation]. Moscow, «Radio i svyaz» Publ., 62 p.
2. Ahmedov R.M., Bibutov A.A., Vasilev A.V. (2004) *Avtomatizirovannyye sistemyi upravleniya vozdushnyim dvizheniem: Novyye informatsionnyie tehnologii v aviatsii* [The Automated Air Traffic Control System: New Information Technologies in Aviation]. Moscow, «Politehnika» Publ., 446 p.
3. Chepizhenko V.I., Volkogon V.O. (2015) [The role of modern concepts of transformation CNS/ATM systems to provide autonomous flight of aircraft]. *Mizhnarodna konferentsiya "Aktualni problemi avtomatizatsiyi ta informatsyynih tehnolohiy"* [Int. conf. «Actual problems of automation and information technology»]. Kiev, 19, P. 112–120.
4. ASAS Self Separation (2014), iFly: Airborne Perspective, available at: http://www.asas-tn.org/towards-asasgn/session-3/3_ifly_2.pptx (Accessed 29 August 2016).
5. FAA Office of Public Affairs (2002), «FAA Announces Automatic Dependent Surveillance-Broadcast Architecture», APA 27–02 p.