

## **ЭНЕРГЕТИКО-ПОТЕНЦИАЛЬНЫЙ МЕТОД ГАРАНТИРОВАННОГО РАЗРЕШЕНИЯ ПОЛИКОНФЛИКТОВ СТОЛКНОВЕНИЯ ДИНАМИЧЕСКИХ ОБЪЕКТОВ**

Изложены основные положения метода гарантированного разрешения поликонфликтов столкновения динамических объектов в навигационной среде. Метод позволяет преодолеть барьер «проклятия размерности» и обеспечивает реализацию управления бесконфликтного движения в реальном масштабе времени для различных классов динамических объектов, таких как пилотируемые и беспилотные летательные аппараты, наземные транспортные средства, мобильные роботы, автономные надводные и подводные транспортные средства.

**Постановка проблемы.** Развитие мировой транспортной отрасли приводит к расширению проблемы обеспечения безопасности движения для различных классов динамических объектов (ДО), таких как пилотируемые и беспилотные летательные аппараты, наземные транспортные средства, мобильные роботы, автономные надводные и подводные транспортные средства. Расширение проблемы обеспечения безопасности движения ДО характеризуется современными тенденциями:

— происходит интенсификация движения, расширение круга задач и диапазонов эксплуатации ДО. Последовательное решение конфликтов столкновения при повышении плотности движения ДО может привести к возникновению новых конфликтов с окружающими ДО. Решение этих конфликтов в свою очередь может вызвать возникновение новых конфликтов и т.д. Таким образом, резко увеличивается опасность циклического возникновения конфликтов (так называемый «эффект домино»), что может привести к неконтролируемым катастрофическим ситуациям [1];

— происходит рост топологической сложности конфликтов столкновения ДО. Увеличение количества ДО, которые могут одновременно находиться в конфликте, приводит к трансформации понятия «конфликт» в «поликонфликт». Под поликонфликтом понимается такое сближение в пространстве и времени трех и больше ДО, при котором для каждого из них имеет место нарушение заданной защитной пространственной зоны с регламентированной геометрией.

— возникают принципиально новые возможности обеспечения движения ДО, которые создает Всемирная транспортная система [2]. Новые организационные и компьютерные технологии глобального управления движением декларируют гибкое, скоординированное, а не регламентированное использование навигационного пространства с учетом всех пользователей. Декларации о переходе от централизованной командной системы управления движением к распределенной системе направлены на обеспечение участников движения возможностями выбирать маршруты исходя из критериев эффективности и экономичности.

**Анализ последних исследований и публикаций по данной проблеме.** В последнее время в научном мире большое внимание уделяется разработке методов обнаружения, мониторинга и разрешения конфликтов между ДО. Известны четыре основных класса методов разрешения конфликтов [3–7]: методы жестких схем, оптимизационные методы, вероятностно-статистические методы, полевые методы. Основные решающие правила,

отличающие каждый из классов, приведены на рис.1.

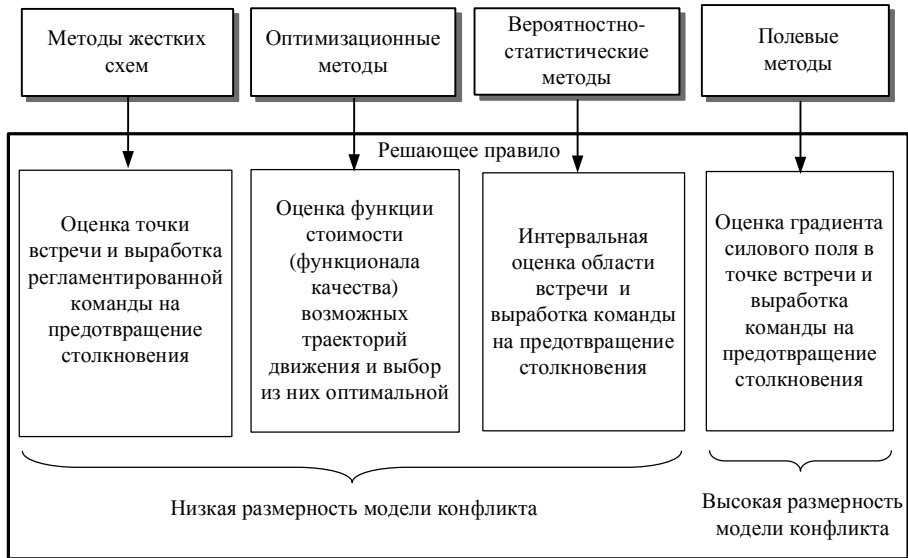


Рис.1. Характеристика методов разрешения конфликтов столкновения динамических объектов

**Выделение нерешенных прежде частей общей проблемы.** Разработанные на сегодняшний день методы обнаружения и разрешения поликонфликтов ДО имеют ряд серьезных недостатков, которые существенно ограничивают возможности их использования:

1. Методам попарного разрешения конфликтов присущ «эффект домино», что не позволяет использовать их для разрешения поликонфликтов.

2. При использовании оптимизационных методов рост сложности математической модели ДО приводит к полиномиальному росту сложности его системы управления. Существующий барьер «проклятия размерности» не позволяет разрешать поликонфликты ДО большой сложности.

3. Объем экспериментальных данных по изучению свойств неопределенных процессов при разрешении поликонфликтов недостаточен для получения устойчивых статистических характеристик этих процессов, даже если эти процессы и случайны по своей природе. Поэтому не может быть принята гипотеза о случайной природе процессов, протекающих в поликонflikте.

4. Топология силовых полей характеризуется наличием особых точек. К особым точкам и областям силовых полей относятся локальные минимумы, «русла», «плато» и т.д. Следствием этого является снижение скорости движения динамических объектов при подходе к препятствию и в процессе его обхода (эффекты «торможения» и «топтания»). В ряде случаев синтезированные траектории не могут быть реализованы некоторыми классами ДО, такими как летательные аппараты.

Таким образом, сегодня существует проблемная ситуация, которая заключается в противоречии между потребностью в универсальном системном методе разрешения поликонфликтов ДО, удовлетворяющем всем концептуальным запросам ее участников, и недостаточными возможностями существующего научно-методического аппарата.

**Цель статьи** — разработка метода, который обеспечивает гарантированное разрешение поликонфликтов столкновения ДО между собой, с препятствиями и ограничениями в реальном масштабе времени.

**Изложение сути метода.** Отсутствие эффективных методов формализации поликонфликтных процессов препятствует синтезу стратегий преобразования неупорядоченной конфликтной системы ДО в систему с целесообразной динамикой бесконфликтного движения. Целесообразность при этом должна пониматься как такое свойство преобразованных процессов, которое обеспечивает гарантированную при определенных условиях достижимость заданного конечного целевого состояния ДО при обеспечении безопасности на всей траектории движения.

Термин «гарантированная достижимость» по смыслу отождествляется с понятием «достижимая позиция». Если навигационная среда обладает свойством «гарантированной достижимости», то существует такое управление, которое способно перевести динамический объект из любой текущей позиции, принадлежащей данной навигационной среде, к позиции его целевого назначения, при наличии возмущений и поликонфликтов с другими ДО.

С целью формализации движения ДО в условиях поликонфликта (в двумерном случае) для конкретных прикладных задач чаще всего используют кинематическую систему уравнений

$$\begin{aligned} \frac{dx_{1i}}{dt} &= f(x_{1i}(t), u_{1i}(t), \xi_{1i}(t)), \\ \frac{dx_{2i}}{dt} &= f(x_{2i}(t), u_{2i}(t), \xi_{2i}(t)), \\ \{u_{1i}, u_{2i}\} &\Leftrightarrow \{\varphi_i, V_i\}, \\ 0 &\leq \varphi_i \leq 2\pi, \\ 0 &\leq V_i \leq V_{i \max}, \\ \mathfrak{G}_i &\leq \mathfrak{G}_{i \text{ доп}}, \end{aligned} \quad (1)$$

где  $x_{1i}$ ,  $x_{2i}$  — координаты  $i$ -го ДО;  $V_i$  — вектор скорости  $i$ -го ДО;  $V_{i \max}$  — максимально допустимое эксплуатационное значение скорости  $i$ -го ДО;  $\varphi_i$  — угловое положение вектора  $V_i$ ;  $\mathfrak{G}_{i \text{ доп}}$  — максимально допустимое значение угловой скорости движения вектора  $V_i$ ;  $\xi_{1i}$ ,  $\xi_{2i}$  — возмущения движения  $i$ -го ДО (по координатам  $x_{1i}$  и  $x_{2i}$  соответственно);  $u_{1i}$ ,  $u_{2i}$  — искомое бесконфликтное управление движением ДО, которое бы гарантированно обеспечило безопасность и достижение динамическим объектом позиции целевого назначения.

Особенность дифференциальных уравнений вида (1) при необходимости учета динамических процессов с поликонфликтами заключается в том, что они по своей сути являются «свернутой», «архивированной» формой свойств конфликтных процессов, недоступной для непосредственного наблюдения и использования. Они представляют собой «внешнюю» формальную оболочку системы, за которой спрятаны «внутренние» функциональные свойства конфликтных процессов. Это приводит к потерям функционально-структурных свойств поликонфликта и резкому росту размерности задачи анализа и синтеза управления движением ДО в этих условиях.

Для преодоления указанных трудностей в статье предлагается метод, заключающийся в переносе свойств реального навигационного мира  $\mathfrak{R}$  и позиций расположенных в нем поликонфликтных ДО в виртуальный мир  $\mathfrak{K}$  и наделении виртуального мира синергетическими свойствами [8]. Этот метод состоит из двух этапов (рис. 2):

- структурный и параметрический синтез виртуального мира;
- формирование структуры и параметров измерителей виртуального мира и определение с их помощью бесконфликтных траекторий движения ДО.

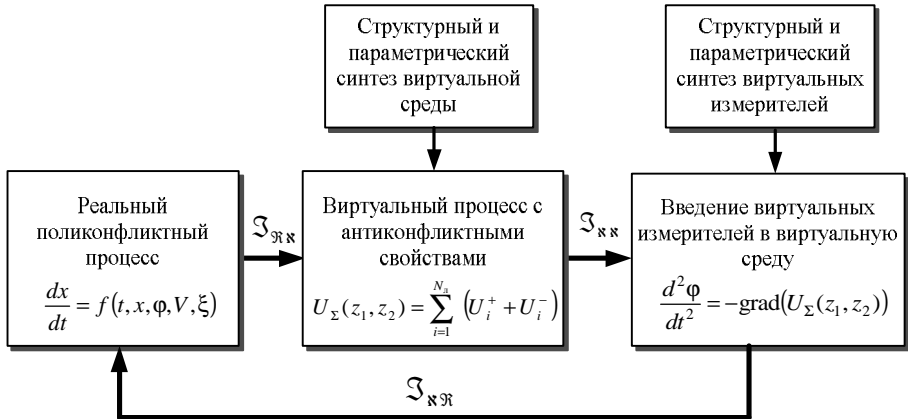


Рис.2. Структурная схема метода гарантированного разрешения поликонфликтов столкновения динамических объектов

**Структурный и параметрический синтез виртуального мира.** Системная цель этапа структурного и параметрического синтеза  $\mathfrak{K}$  — это перенос свойств реального навигационного пространства и свойств ДО из реального мира  $\mathfrak{R}$  в виртуальный мир  $\mathfrak{K}$  и создание в нем искусственных векторных гравитационных полей. Этап включает следующие шаги.

1. Первым шагом формализации свойств  $\mathfrak{K}$  является определение его границ как системы линейных неравенств с помощью оператора отображения  $\mathfrak{S}_{\mathfrak{R}\mathfrak{K}}^1$

$$\mathfrak{R}(x_1, x_2) < 0 \Rightarrow \mathfrak{K}(z_1, z_2) < 0,$$

где  $x_1, x_2$  — координаты границ  $\mathfrak{R}$ ;  $z_1, z_2$  — координаты границ  $\mathfrak{K}$ .

2. Перенос из  $\mathfrak{R}$  в  $\mathfrak{K}$  множества позиций запретных зон и ограничений с помощью оператора отображения  $\mathfrak{S}_{\mathfrak{R}\mathfrak{K}}^2$

$$\mathfrak{R}_k(x_{1k}, x_{2k}) < 0 \Rightarrow \mathfrak{K}_k(z_{1k}, z_{2k}) < 0;$$

$$k \in \{1, 2, \mathbf{K} N_{об}\}; N_{об} \in \{N_{ж} \mathbf{I} N_{\Gamma} \mathbf{I} N_{дин}\}; \mathfrak{R}_k \in \mathfrak{R}; \mathfrak{K}_k \in \mathfrak{K},$$

где  $x_{1k}, x_{2k}$  — координаты запретных зон и ограничений в  $\mathfrak{R}$ ;  $z_{1k}, z_{2k}$  — координаты запретных зон и ограничений в  $\mathfrak{K}$ ;  $N_{об}$  — общее множество запретных зон и ограничений в навигационном пространстве;  $N_{ж}$  — множество жестких запретных зон и ограничений;  $N_{\Gamma}$  — множество

гибких запретных зон и ограничений;  $N_{\text{дин}}$  — множество динамических запретных зон и ограничений.

3. Перенос из  $\mathfrak{X}$  в  $\mathfrak{K}$  позиций ДО с помощью оператора отображения  $\mathfrak{S}_{\mathfrak{X}\mathfrak{K}}^3$

$$\mathfrak{X}_i(x_{1i}, x_{2i}) \xRightarrow{\mathfrak{S}_{\mathfrak{X}\mathfrak{K}}^3} \mathfrak{K}_i(z_{1i}, z_{2i}),$$

$$i \in I\{1, 2, \mathbf{K} N_{\text{ДО}}\}; \mathfrak{X}_i \notin \mathfrak{X}_k; \mathfrak{K}_i \notin \mathfrak{K}_k,$$

где  $N_{\text{ДО}}$  — общее множество ДО в ограниченном навигационном пространстве.

4. Перенос из  $\mathfrak{X}$  в  $\mathfrak{K}$  целевых позиций ДО с помощью оператора отображения  $\mathfrak{S}_{\mathfrak{X}\mathfrak{K}}^4$

$$\mathfrak{X}_i(x_{1i}^*, x_{2i}^*) \xRightarrow{\mathfrak{S}_{\mathfrak{X}\mathfrak{K}}^4} \mathfrak{K}_i(z_{1i}^*, z_{2i}^*);$$

$$i \in I\{1, 2, \mathbf{K} N_{\text{ц}}\}; N_{\text{ц}} \geq N_{\text{ДО}},$$

где  $N_{\text{ц}}$  — общее множество целевых позиций ДО в ограниченном навигационном пространстве.

5. Назначение текущим позициям каждого ДО  $\mathfrak{K}_i(z_{1i}, z_{2i})$  масс и потенциалов отталкивания и притяжения

$$\forall \mathfrak{K}_i(z_{1i}(t), z_{2i}(t)) \in \mathfrak{K} \Rightarrow U_i^+(z_{1i}(t), z_{2i}(t), r_i(t), m_i, G) +$$

$$+ U_i^-(z_{1i}(t), z_{2i}(t), r_{\text{кр}i}, m_i, G);$$

$$i \in I\{1, 2, \mathbf{K} N_{\text{ДО}}\},$$

где  $U_i^+$  и  $U_i^-$  — соответственно потенциалы притяжения и отталкивания, которые «сопровождают»  $i$ -й динамический объект в  $\mathfrak{K}$ ;  $r_i(t)$  — расстояние от  $i$ -го ДО;  $r_{\text{кр}i}$  — критическое расстояние от  $i$ -го ДО;  $m_i$  — масса ДО;  $G$  — гравитационная постоянная, которая формирует общее гравитационное свойство искусственного гравитационного поля в  $\mathfrak{K}$ .

Критическое расстояние между ДО в  $\mathfrak{K}$  задается исходя из нормативных требований к их защитным зонам. Необходимым условием при назначении размеров защитных зон ДО в  $\mathfrak{X}$  является условие

$$r_{\text{кр}i} \geq \max(\Delta x_{1i}, \Delta x_{2i}),$$

где  $\Delta x_{1i}, \Delta x_{2i}$  — геометрические размеры  $i$ -го ДО в проекции на горизонтальную плоскость (плоскость горизонта).

6. Целевым (терминальным) позициям ДО  $\mathfrak{K}_i(z_{1i}^*, z_{2i}^*)$  назначают потенциалы отталкивания и притяжения

$$\forall \mathfrak{K}_i(z_{1i}^*(t), z_{2i}^*(t)) \in \mathfrak{K} \Rightarrow U_i^+(z_{1i}^*(t), z_{2i}^*(t), r_i^*(t), m_i^*, G) +$$

$$+ U_i^-(z_{1i}^*(t), z_{2i}^*(t), r_i^*, m_i^*, G);$$

$$i \in I\{1, 2, \mathbf{K} N_{\Pi}\},$$

где  $z_{1i}^*, z_{2i}^*$  — координаты терминальной позиции  $i$ -го ДО;  
 $r_i^*(t)$  — расстояние от  $i$ -й целевой позиции ДО,  $m_i^*$  — массы целевых (терминальных) позиций ДО.

7. Запретные зоны и ограничения реального навигационного пространства отображаются в  $\mathfrak{X}$  с помощью геометрических примитивов (круг, эллипс, прямая и др.) или их комбинаций. Границы запретных зон представляют как конечное множество гравитирующих точек, каждой из которых назначают потенциалы отталкивания и притяжения

$$\begin{aligned} \forall \mathfrak{X}_k(z_{1k}(t), z_{2k}(t)) \in \mathfrak{X} \Rightarrow & U_k^+(z_{1k}(t), z_{2k}(t), r_k(t), m_k, G) + \\ & + U_k^-(z_{1k}(t), z_{2k}(t), r_k(t), r_{\text{кр } k}, m_k, G); \\ & k \in \{1, 2, \mathbf{K} N_{\Pi}\}, \end{aligned}$$

где  $N_{\Pi}$  — количество точек, образующих все запретные зоны в  $\mathfrak{X}$ .

8. Каждая точка пространства  $\mathfrak{X}$  характеризуется суммарным потенциалом искусственного гравитационного поля

$$\begin{aligned} U_{\Sigma}(z_1, z_2) = & \sum_{i=1}^{N_{\text{ДО}}} \left( U_i^+(z_{1i}(t), z_{2i}(t), r_i(t), m_i, G) + U_i^-(z_{1i}(t), z_{2i}(t), r_i(t), r_{\text{кр } i}, m_i, G) \right) + \\ & + \sum_{i=1}^{N_{\Pi}} \left( U_i^+(z_{1i}^*(t), z_{2i}^*(t), r_i^*(t), m_i^*, G) + U_i^-(z_{1i}^*(t), z_{2i}^*(t), r_i^*(t), m_i^*, G) \right) + \\ & + \sum_{k=1}^{N_{\Pi}} \left( U_k^+(z_{1k}(t), z_{2k}(t), r_k(t), m_k, G) + U_k^-(z_{1k}(t), z_{2k}(t), r_k(t), r_{\text{кр } k}, m_k, G) \right). \end{aligned}$$

Каждый объект, введенный в  $\mathfrak{X}$ , порождает возмущение общего искусственного гравитационного поля и характеризуется виртуальными потенциалами притяжения и отталкивания  $U^+, U^-$

$$U_i^+ = \frac{Gm_i}{r_{ij}}, \quad U_i^- = -\frac{Gm_i}{r_{ij}}.$$

Результирующий вектор сил в каждой точке  $\mathfrak{X}$  состоит из сил притяжения  $F^+$  и сил отталкивания  $F^-$

$$F_{ij}^+ = \frac{Gm_i m_j}{r_{ij}^{\alpha}} = U_i^+ \frac{m_j}{r_{ij}^{(\alpha-1)}}; \quad (2)$$

$$F_{ij}^- = \frac{Gm_i m_j r_{\text{кр}}}{r_{ij}^{\beta}} = U_i^- \frac{m_j r_{\text{кр}}}{r_{ij}^{(\beta-1)}}; \quad \alpha < \beta, \quad (3)$$

где  $\alpha, \beta$  — натуральные числа.

Соответствующие проекции сил притяжения и отталкивания на оси  $z_1$  и  $z_2$  имеют вид

$$F_{ij\ z1}^+ = F_{ij}^+ \frac{|z_{1i} - z_{1j}|}{r_{ij}}; \quad F_{ij\ z2}^+ = F_{ij}^+ \frac{|z_{2i} - z_{2j}|}{r_{ij}};$$

$$F_{ij\ z1}^- = F_{ij}^- \frac{|z_{1i} - z_{1j}|}{r_{ij}}; \quad F_{ij\ z2}^- = F_{ij}^- \frac{|z_{2i} - z_{2j}|}{r_{ij}};$$

$$r_{ij} = \sqrt{(z_{1i} - z_{1j})^2 + (z_{2i} - z_{2j})^2}.$$

В уравнениях (2) и (3) соотношением  $\alpha/\beta$  выбирается агрегатное состояние среды виртуального мира (синергетическое вещество), которое характеризует степень самоорганизации совокупности ДО, находящейся в поликонфликте. Аналогией агрегатного состояния виртуальной среды может служить агрегатное состояние материи — газообразное, жидкое, кристаллическое и т.д.

Принципиальной особенностью и преимуществом сформированного таким образом виртуального мира  $\aleph$  является то, что при сближении материальных точек на критическое расстояние  $r_{кр}$  действующая на них результирующая сила равняется нулю, т.е. силы притяжения и отталкивания уравниваются друг друга. На расстоянии  $r_{кр}$  энергия взаимодействия материальных точек достигает глобального минимума, который отвечает наименьшему взаимодействию между телами. Наряду с этим,  $r_{кр}$  позволяет задавать размеры защитной зоны ДО, которая является зоной безопасности. Отсутствие пересечений таких зон с учетом неопределенности прогнозируемого положения ДО позволяет поддерживать гарантированный уровень безопасности движения ДО в условиях поликонфликта.

#### **Формирование структуры и параметров виртуальных измерителей (ВИ).**

Для измерения градиента искусственного гравитационного поля предлагается использовать ВИ, которые представляют собой виртуальную динамическую систему. Каждый ВИ является монополем и конструктивно состоит из двух виртуальных точек, соединенных жесткой осью длиной  $r_{мп}$ . Одна точка наделена массой  $m_1$ . Другая точка безынерционная и выступает в качестве точки подвеса ВИ. Координаты точки подвеса ВИ в  $\aleph$  соответствуют координатам центра масс ДО в  $\aleph$ . Динамика точки с массой  $m_1$  задается системой уравнений

$$\frac{d^2 z_{1i}}{dt^2} = \frac{1}{m_i} \sum_{i \neq j}^N (F_{ij\ z1}^+ - F_{ij\ z1}^-);$$

$$\frac{d^2 z_{2i}}{dt^2} = \frac{1}{m_i} \sum_{i \neq j}^N (F_{ij\ z2}^+ - F_{ij\ z2}^-); \quad \forall i \neq j; \quad i \in N; \quad j \in N.$$

Установившееся положение оси ВИ в каждый момент времени определяет угол  $\varphi$  направления градиента искусственного гравитационного поля.

$$\frac{d^2 \varphi}{dt^2} = f \left( \frac{d\varphi}{dt}, \varphi, p \right) = \text{grad} U_{\Sigma},$$

где  $p$  – параметры виртуального измерителя.

Линии градиента искусственного гравитационного поля можно понимать как силовые линии, которые характеризуют распределение энергии в  $\mathfrak{X}$ . Другими словами, если задано поле гравитационных потенциалов и в каждый момент времени известны позиции точки подвеса, то линии градиента определяют бесконфликтные траектории движения, которые будут реализованы ДО в поликонфликте.

Установившееся положение оси ВИ определяет оптимальное управление в понимании минимальной энергии взаимодействия виртуальных измерителей между собой и с границами запретных зон в искусственном гравитационном поле.

Измеренный бесконфликтный угол направления градиента гравитационного поля передается в  $\mathfrak{R}$  с помощью оператора  $\mathfrak{J}_{\mathfrak{X}\mathfrak{R}}$   $\mathfrak{X}(\varphi) \Rightarrow \mathfrak{R}(x_{1i}, x_{2i})$  для формирования бесконфликтных траекторий движения каждого ДО, находящегося в поликонфликте.

**Выводы.** Разработанный метод обеспечивает:

- гарантированное разрешение поликонфликтов любой размерности в 4-D пространстве;
- реализацию свободного безопасного целенаправленного движения всех ДО в реальном масштабе времени.

1. *Krozel J., Peters M.* Decentralized control techniques for distributed air/ground traffic separation. — Los Gatos: Seagull Technology Inc., 2000. — 104 p.
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. *Kuchar J.K., Yang L.C.* A review of conflict detection and resolution modeling methods, IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems. — 2000. — Vol. 1, N 4. — P. 179–189.
4. *Hii J., Prandini M., Sastiy S.* Optimal maneuver for multiple aircraft conflict resolution: A braid point of view // Proc. of the 39th IEEE conf. on decision and control. — Sydney, 2000. — Vol. 4. — P. 4164–4169.
5. *Tomlin C., Pappas G., Sastiy S.* Conflict resolution for air traffic management: A study in multi-agent hybrid systems // IEEE Transactions on automatic control. — 1998. — Vol. 43. — P. 509–521.
6. *Tomlin C.J., Mitchell I., Ghosh R.* Safety verification of conflict resolution maneuvers // IEEE Transactions on intelligent transportation systems. — 2001. — Vol.2, N 2. — P.110–120.
7. *Чепіженко В.І., Павлов В.В., Харченко В.П.* Енергетико-потенціальне управління повітряним рухом в середовищі CNS/ATM // Вісник НАУ. — 2011. — № 4. — С. 10–19.