

На правах рукописи



Зо Мин Тайк

**КОНТРОЛЬ И УПРАВЛЕНИЕ БЕЗОПАСНЫМ ДВИЖЕНИЕМ
ПАССАЖИРСКИХ ВОЗДУШНЫХ СУДОВ ПРИ ПЕРЕСЕЧЕНИИ ИХ
МАРШРУТОВ И РЕЧНЫХ СУДОВ ПРИ ИХ СБЛИЖЕНИИ**

Специальность 05.13.01 –

«Системный анализ, управление и обработка информации»

(информатика, управление и вычислительная техника)

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени

кандидата технических наук

Москва – 2014

Работа выполнена на кафедре «Системы автоматического и интеллектуального управления» Московского авиационного института (национального исследовательского университета) «МАИ».

Научный руководитель: доктор технических наук, профессор,
заслуженный деятель науки РФ

Лебедев Георгий Николаевич

Официальные оппоненты:

Слепцов Владимир Владимирович - доктор технических наук, профессор, ФГБОУ ВПО «Московский государственный университет приборостроения и информатики», проректор, заведующий кафедрой.

Мышляев Юрий Игоревич - кандидат технических наук, доцент, Калужский филиал ФГБОУ ВПО «Московский государственный технический университет имени Н.Э. Баумана», доцент.

Ведущая организация:

Федеральное государственное унитарное предприятие «Государственный научно-исследовательский институт авиационных систем»

Защита диссертации состоится « 12 » февраля 2015г. на заседании диссертационного совета Д 212.125.11 при Московском авиационном институте (национальном исследовательском университете) «МАИ» по адресу: 125993, г. Москва, А-80, ГСП-3, Волоколамское шоссе, д. 4., зал заседаний Ученого Совета МАИ.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке и на сайте Московского авиационного института (национального исследовательского университета),

http://mai.ru/events/defence/index.php?ELEMENT_ID=52988

Автореферат разослан « ___ » _____ 2015 г.

Учёный секретарь

диссертационного совета Д 212.125.11

к. т. н., доцент

_____ Горбачев Ю.В.

Введение

Актуальность работы. Вопросы безопасности движения воздушных судов при пересечении их траекторий остро стоят на практике при организации прилета и вылета на наиболее загруженные аэродромы, к которым относится Московский аэроузел, включающий в себя аэропорты Внуково, Домодедово и Шереметьево. Внезапное изменение или неустойчивое направление ветра может привести к изменению посадочного курса, что вносит существенные изменения структуры маршрутов полета, которые могут пересекаться.

Аналогичные ситуации часто возникают в акватории крупных морских и речных портов при оживленном движении судов. Сложность перечисленных ситуаций требует в помощь человеку автоматизации принятия ответственных решений по изменению режима движения для исключения опасного сближения судов. Поэтому тема данной диссертационной работы, посвященная разработке алгоритмов автоматического контроля и управления безопасным движением судов различного класса при их сближении, является **актуальной**.

Целью диссертационной работы является повышение безопасности движения воздушных или речных судов на пересекающихся курсах под произвольным углом. Объектом исследования являются системы управления боковым движением и скоростью судов, гарантирующие безопасность их сближения. Предметом исследования являются алгоритмы автоматического контроля и управления безопасным движением судов на пересекающихся курсах и их совместного взаимодействия, чтобы избежать столкновение.

На защиту выносятся следующие основные научные положения:

1. Метод классификации типов сближения судов и автоматического определения предупредительных мер избежания их столкновения.
2. Алгоритм двухступенчатой оценки прогнозируемого риска опасного сближения судов для формирования сигналов предупредительной и аварийной тревоги.
3. Алгоритмы оптимального управления боковым движением двух сближающихся судов при уклонении от опасной точки встречи.

4. Результаты моделирования на ЭВМ, подтвердившие эффективность предложенного подхода, использующего средства автоматического управления и контроля.

Научная новизна полученных результатов состоит в следующем:

1. Поперечное движение имеет два типа - левое и правое, для каждого из которых действует своё правило: если встречное слева судно не достигает прогнозируемой точки встречи, то оба судна маневрируют вправо, в противном случае – оба влево. Если встречное справа судно не достигает прогнозируемой точки встречи, то оба судна маневрируют влево, в противном случае – вправо. Таким образом, правило маневрирования в отличие от известного зависит не только от направления движения судов, но и от знака прогнозируемой минимальной дистанции между ними.
2. При оценке риска опасного сближения судов предложено вычислять две оценки:
 - формирование сигнала предупредительной тревоги с помощью вычисления минимальной дистанции между судами при гипотезе о их прямолинейном движении по заданным курсам. При этом автоматически среди всех судов выявляется одно наиболее опасное судно, от встречи с которым нужно уклониться;
 - формирование функции риска с помощью правой части уравнения Беллмана при гипотезе об оптимальном управлении уклонением судов от точки встречи. При превышении этой функции заданного порога формируется второй сигнал аварийной тревоги для экстренного торможения.
3. Найденный с помощью динамического программирования закон управления боковым движением каждого из двух судов учитывает текущее состояние как “своих” координат, так и координат положения, скорости и курса встречного судна при любой разнице в курсах, не превышающей по модулю 90° .

Практическая ценность работы состоит в следующем. Полученные алгоритмы обеспечивают автоматический контроль и управление движением на борту судна, что исключает влияние человеческого фактора. Главное – формирование двухступенчатой оценки прогнозируемого риска позволяет своевременно вмешаться в процесс управления и резко повысить безопасность движения в сложной динамической обстановке.

Кроме того, полученные результаты были использованы в учебном процессе кафедры 301 МАИ в виде лабораторной работы при магистерской подготовке по направлению “Управление и информационные технологии в технических системах”, что подтверждено актом о внедрении.

Достоверность полученных результатов подтверждена математическим моделированием на ЭВМ системы контроля и управления безопасным поперечным движением судов, использованием при синтезе оптимального управления научно - обоснованного метода динамического программирования.

Значимость для науки и практики работы состоит в том, что предложенный путь автоматизации оценки опасности текущей ситуации и принятия решений о способе управления весьма эффективен в отличие от ручного управления и пригоден для различных видов транспорта – самолетов, речных и морских судов, автомобилей и т.д.

Личный вклад автора состоит в проведении анализа известных способов управлений речных и воздушных судов; разработке алгоритмов контроля безопасности и управления боковым и продольным движением; личном участии в моделировании на ЭВМ и подготовке основных публикаций.

Публикации и апробация работы. По теме диссертации опубликовано 8 работ, из них 5 – в изданиях, рекомендованных ВАК. Научные и прикладные результаты докладывались и обсуждались на международном научно – техническом семинаре «Современные технологии в задачах управления, автоматизации и обработки информации» г. Алушта в 2012, 2013 и 2014 годах.

Структура и объем работы. Диссертация состоит из введения, пяти глав, заключения и библиографического списка. Основное содержание диссертации изложено на 126 страницах и содержит 43 рисунка. Список использованных источников включает 59 ссылок на научную библиографию по теме проводимых исследований в диссертационной работе.

КРАТКОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении дается краткая характеристика работы, её актуальность, научная и практическая значимость.

Первая глава посвящена анализу функционирования известных систем управления речными и воздушными судами и делается вывод о сложности принятия решений при их поперечном движении на пересекающихся курсах. Для повышения безопасности движения ставится задача автоматического контроля и координированного управления боковым движением двух сближающихся объектов при следующей постановке.

Постановка задачи. Дано:

1. Задана группа подвижных управляемых объектов (воздушных или речных судов) с известными в текущий момент времени земными координатами местоположения и заданным курсовым углом ψ_i движения с заданной постоянной попутной скоростью V .
2. Курс движения основного объекта с координатами x_1, x_2, x_3 совпадает с осью x_3 , как показано на рис. 1, т.е. угол $\psi_0 = 0$, а курсовые углы сближающихся остальных объектов с координатами y_{1i}, y_{2i}, y_{3i} отсчитываются в каждой точке пересечения их линий пути против часовой стрелки. Таким образом, курсовые углы ψ_i лежат в широком диапазоне $0 < \psi_i < 360^\circ$, как показано на рис. 1.

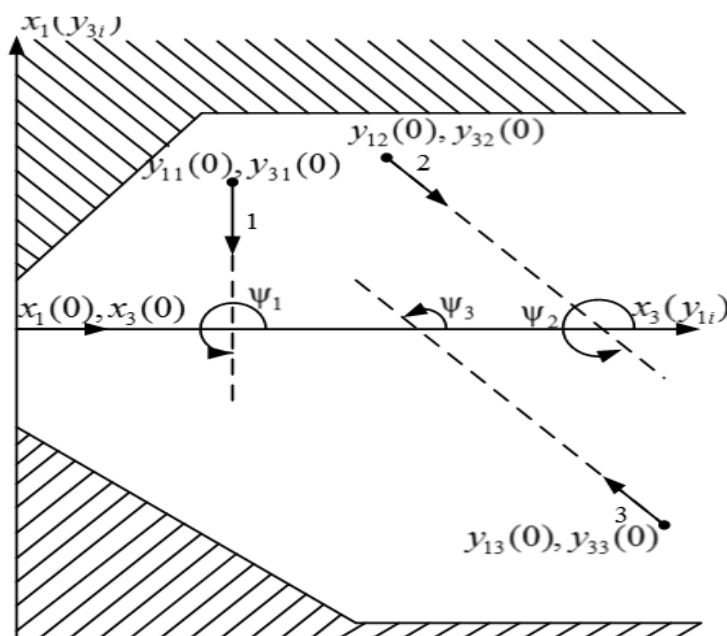


Рис.1 Картина на плане местности движения судов по заданным пересекающимся курсам

3. Не вызывающие угрозу безопасности объекты, которые при попадании в точку встречи основного объекта оказываются от него на расстоянии, большем заданной безопасной дистанции d , не рассматриваются.
4. Весь процесс управления движением основного объекта при встрече с другими объектами может быть представлен последовательностью координированного взаимодействия пар – основного объекта с первым, вторым и т.д. при их сближении, очередность которых предстоит установить.
5. В качестве основной меры уклонения от аварийного сближения очередной пары в данной работе рассматривается боковое движение одного или двух судов одновременно при постоянной попутной скорости.
6. Динамические свойства сближающихся судов примерно одинаковы, и движение основного судна по заданной линии пути m_0 описывается упрощенной системой дифференциальных уравнений.

$$\begin{aligned}
 \dot{x}_1 &= x_2 \\
 \dot{x}_2 &= -ax_2 + bu_0 \\
 \dot{x}_3 &= V \\
 x_1(0) &= m_0, x_2(0) = 0, x_3(0) = 0
 \end{aligned} \tag{1}$$

где x_1 - линейная координата бокового движения, x_2 - боковая скорость, a и b - заданные динамические параметры, u_0 - синтезируемый сигнал управления, x_3 - координата попутного движения.

Поперечное движение другого i -того сближающегося судна по заданной линии пути m_i при пересекающемся курсе ψ_i аналогично описывается своими дифференциальными уравнениями.

$$\begin{aligned}
 \dot{y}_{1i} &= y_{2i} - V \sin(270 - \psi_i) \\
 \dot{y}_{2i} &= -ay_{2i} + bu_i \cdot \cos(270 - \psi_i) \\
 \dot{y}_{3i} &= V_1 = -V \cos(270 - \psi_i) \\
 y_1(0) &= m_i(0), y_2(0) = 0, y_3(0) = M - m_0 = 0; i \geq 1
 \end{aligned} \tag{2}$$

где y_{1i} - линейная координата бокового движения другого судна, двигающегося поперечно основному; y_{2i} - боковая скорость, u_i - синтезируемый сигнал координированного управления другим судном; y_{3i} - координата попутного движения, V_1 - величина скорости, равная $(-V)$, если судно приближается к основному слева под углом $\psi_i = 270^\circ$ (см. объект 1 на рис.1), либо равная V , если судно приближается справа под углом $\psi_i = 90^\circ$ (см. объект 1 на рис.1).

7. Считается, что на борту каждого судна имеются необходимые измерительные средства о параметрах собственного движения и встречающихся судов с необходимой точностью.
8. Интегральный штраф за снижение безопасности движения каждой пары судов при их сближении описывается заданным минимизируемым функционалом J

$$J = \int_0^T f_0 dt$$

$$= \int_0^T \left[\frac{\tau_0}{2} (u_0^2 + u_1^2) + \frac{\tau_1}{2} [(x_1 - m_1)^2 + (x_3 - m_1)^2] + \frac{\tau_2}{2} (x_2^2 + y_2^2) + \frac{\tau_3}{1 + (x_1 + x_3 + d)^2 k + k(y_1 + y_3 + d)^2} \right] dt \quad (3)$$

где $\tau_0, \tau_1, \tau_2, \tau_3$ - весовые коэффициенты значимости штрафов соответственно за расходуемую мощность, отклонения от заданных линий пути, отклонения по боковой скорости и штрафа за опасное сближение по сравнению с заданной величиной d безопасной дистанции.

Последнее слагаемое в подинтегральном выражении f_0 в формуле (3) определяет растущий риск столкновения по мере приближения судов друг к другу, а τ_3 есть стоимость ущерба при их столкновении.

Требуется:

- сформировать процедуру альтернативного выбора первоочередного объекта, сближающегося с основным, для организации взаимодействия пары при их безопасном сближении;
- провести классификацию сближения объектов, чтобы для каждого случая указать основной способ избежания столкновения объектов друг с другом;

- на основе динамического программирования синтезировать закон оптимального координированного управления боковым движением сближающейся пары объектов для обеспечения необходимой безопасности;
- сформировать функцию риска возможного столкновения объектов при их сближении, чтобы осуществлять оперативный контроль безопасности движения и своевременно принять необходимые меры.

Во второй главе решается задача классификации типов сближения объектов для назначения в случае опасности нужного способа дополнительного маневрирования. Предложено различать четыре типа движения, как показано на рис.2. – встречное движение при $135^\circ < \Delta\psi < 225^\circ$ (где $\Delta\psi$ - разница в курсах прямолинейного движения двух объектов), попутное движение при $0^\circ < \Delta\psi < 45^\circ$ и $315^\circ < \Delta\psi < 360^\circ$, левое поперечное движение при $225^\circ < \Delta\psi < 315^\circ$ и правое поперечное движение при $45^\circ < \Delta\psi < 135^\circ$.

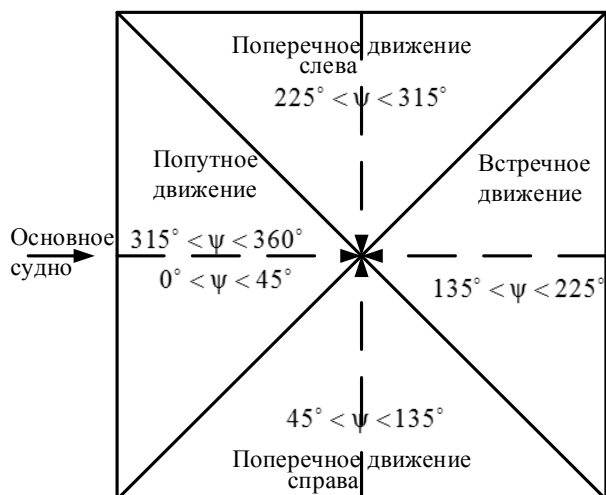


Рис.2 Диаграмма направлений движения сближающихся судов при различных курсах

Последние два типа движения являются предметом исследования, для которых были установлены свои правила маневрирования:

- для левого поперечного движения нужно боковое маневрирование обеих судов вправо, если встречное судно не достигает прогнозируемой точки встречи(придёт в неё позже), в противном случае – оба влево;

- для правого поперечного движения нужно боковое маневрирование обеих судов влево, если встречное судно придет в прогнозируемую точку встречи позже, в противном случае – оба вправо.

Предложена процедура выбора первоочередной пары объектов по критерию наибольшей опасности сближения при гипотезе о их прямолинейном движении, как показано на рис.3.

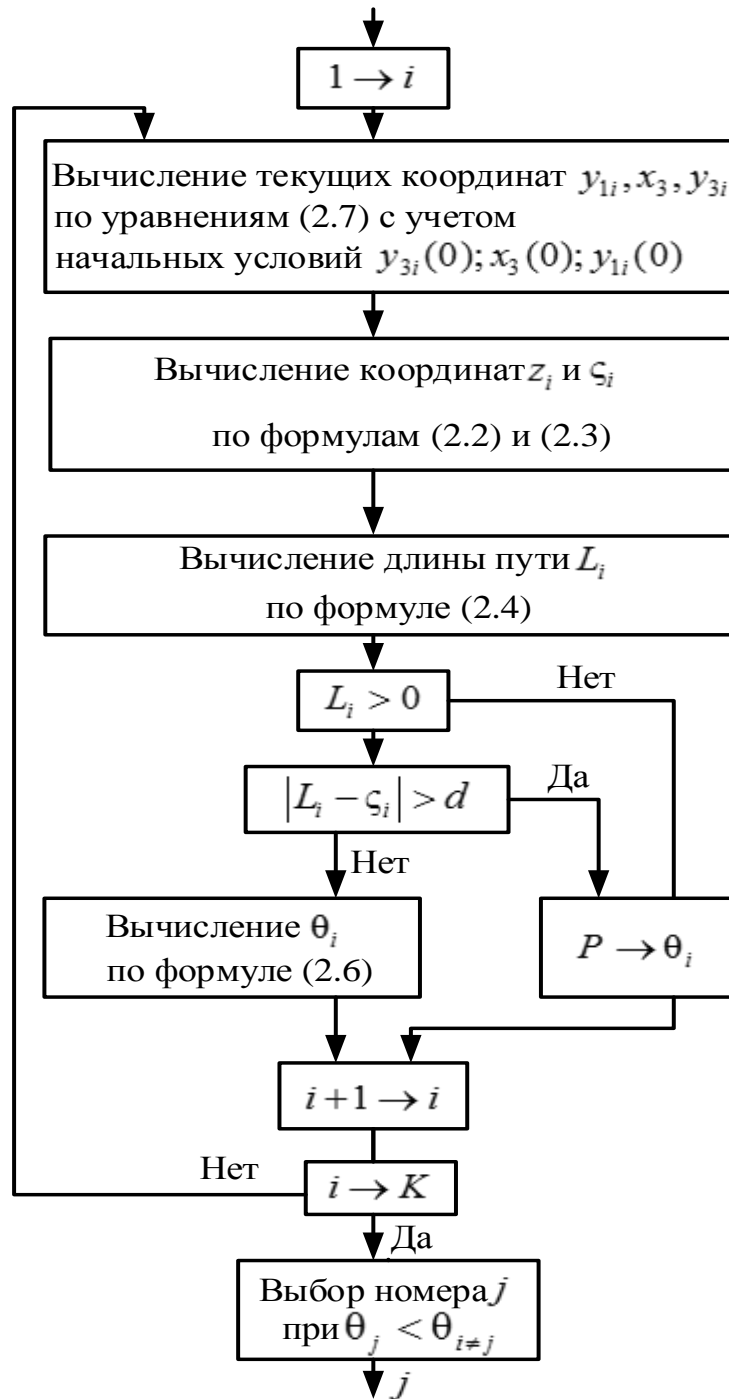


Рис.3 Блок-схема алгоритма приоритетного выбора

В представленной блок-схеме алгоритма величина L_i - расстояние между основным объектом и точкой встречи с i -тым сближающимся объектом. ζ_i - дистанция от i -того объекта до точки встречи, d - безопасная минимальная дистанция, $0 < \theta_i < 1$ - оцениваемый коэффициент безопасности при прямолинейном движении анализируемой пары объектов, θ_j - минимальный среди остальных коэффициент безопасности, определяющих первоочередной j -тый объект при встрече. Примеры поведения этих коэффициентов для трех сближающихся с основным судов показаны на рис.4.

Главным аналитическим результатом главы 2 является формула вычисления коэффициента безопасности θ прямолинейного движения.

$$\theta = \left| \frac{L_i - \zeta_i}{d} \right| \cdot \left(1 + \frac{L}{d} \right) \quad (4)$$

где L_i - дистанция от основного судна до прогнозируемой точки встречи, ζ_i - дистанция от встречного судна до прогнозируемой точки встречи, d - заданная минимальная дистанция безопасного сближения судов.

Значение θ в формуле (4) по смыслу означает, что его безразмерная величина есть поделенное на величину d ожидаемое значение дистанции в конце сближения при гипотезе о неоптимальном управлении, когда предпринимаются лишь ограниченные меры по уклонению от опасной встречи. Присутствие в формуле дистанции L_i до точек встречи с другими судами позволяет при прочих равных условиях выбрать наиболее опасным то судно, которое ближе.

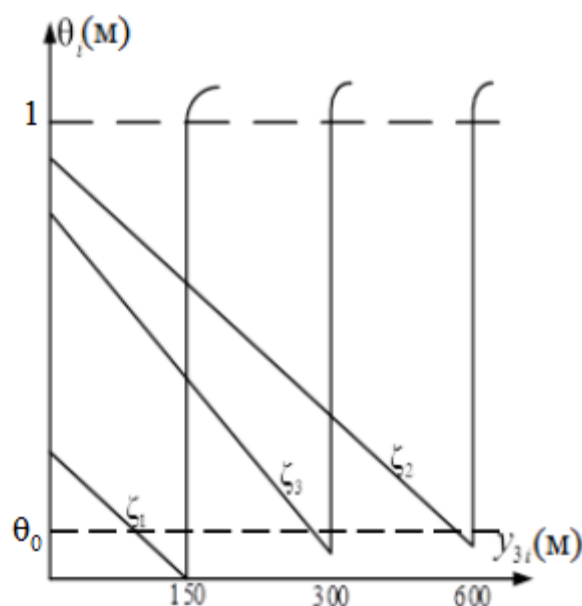


Рис.4 Графики изменения оценок безопасности сближения с тремя объектами при разных пересекающихся курсах

В этой же главе определена логика назначения одного из двух способов маневрирования – поворота влево или вправо, либо повышения скорости или торможения. Получена блок-схема логического анализа условий встречи, позволяющая в автоматическом режиме выбрать нужные задающие воздействия для управления боковым и продольным движением судов.

В третьей главе на основе динамического программирования получены основные теоретические результаты.

Учитывая тот факт, что используемая в подинтегральном выражении минимизируемого функционала (3) функция штрафа за сближение объектов не является строго квадратичной, а дробно-рациональной функцией растущего риска, функцию Беллмана ε нужно представить следующим степенным полиномом второго порядка.

$$\begin{aligned} \varepsilon = & \beta_1 x_1 + \beta_2 x_2 + \beta_3 y_1 + \beta_4 y_2 + 0,5\gamma_1 x_1^2 + 0,5\gamma_2 x_2^2 + 0,5\gamma_3 y_1^2 + 0,5\gamma_4 y_2^2 + \psi_{12} x_1 x_2 + \psi_{13} x_1 y_1 + \psi_{14} x_1 y_2 \\ & + \psi_{23} x_2 y_1 + \psi_{24} x_2 y_2 + \psi_{34} y_1 y_2 \end{aligned} \quad (5)$$

где $\beta_i, \gamma_i, \psi_{ik}$ - искомые коэффициенты функции Беллмана.

После чего уравнение Беллмана, в том числе её правую часть $F(\bar{x}, \bar{y})$, являющуюся функцией текущего риска, можно представить в виде

$$\begin{aligned}
-\frac{\partial \varepsilon}{\partial t} &= \min_{u_0 u_2} \{ f_0(\bar{x}, \bar{y}, u_0, u_1) + (\beta_1 + \gamma_1 x_1 + \psi_{12} x_2 + \psi_{13} y_1 + \psi_{14} y_2) x_2 + (\beta_3 + \gamma_3 y_1 + \psi_{34} y_2 + \psi_{13} x_1 + \psi_{23} x_2) y_2 \\
&+ (\beta_2 + \gamma_2 x_2 + \psi_{12} x_1 + \psi_{23} y_1 + \psi_{24} y_2)(b_1 u_1 - a_1 x_2) + (\beta_4 + \gamma_4 y_2 + \psi_{34} y_1 + \psi_{14} x_1 + \psi_{24} x_2)(b_2 u_2 - a_2 y_2) \} \\
&= \min_{u_0 u_2} \{ F(x_1, x_2, y_1, y_2, u_0, u_1) \}
\end{aligned} \tag{6}$$

где f_0 - подинтегральное выражение минимизируемого функционала (3), $F(x_1, x_2, y_1, y_2, u_0, u_1)$ - минимизируемая функция текущего риска, используемая ниже для контроля безопасности движения. Согласно принятой методике аналитического конструирования оптимальных регуляторов с учетом квадратичной зависимости f_0 от управлений u_0 и u_1 , условию экстремума по u_0 и u_1 соответствуют при $\tau_0 = 1$ следующие оптимальные управления

$$u_{0opt} = -b_1(\beta_2 + \gamma_2 x_2 + \psi_{12} x_1 + \psi_{23} y_1 + \psi_{24} y_2) \tag{7}$$

$$u_{1opt} = -b_2(\beta_4 + \gamma_4 y_2 + \psi_{34} y_1 + \psi_{14} x_1 + \psi_{24} x_2)$$

Таким образом, для окончательного определения найденного алгоритма линейного оптимального управления необходимо вычислить искомые коэффициенты $\beta_2, \beta_4, \gamma_2, \gamma_4, \psi_{12}, \psi_{14}, \psi_{23}, \psi_{24}, \psi_{34}$ - всего 9 коэффициентов функции Беллмана ε .

Чтобы это сделать, нужно представить левую и правую части уравнения (6) степенным полиномом второго порядка относительно координат состояния. Для этого нужно, во-первых, избавиться от дробно рациональной функции штрафа за опасное сближение, входящей в состав подинтегрального выражения f_0 , заменив дробь на степенной полином

$$\frac{\tau_3}{1 + k(x_1 + x_3 + d)^2 + k(y_1 + y_3 + d)^2} \approx \tau_3 - k\tau_3(x_1 + x_3 + d)^2 - k\tau_3(y_1 + y_3 + d)^2 \tag{8}$$

Во-вторых необходимо подставить найденные значения (7) оптимального управления u_{0opt} и u_{1opt} в слагаемые правой части уравнения Беллмана (6). Если использовать условие $\frac{\partial \varepsilon}{\partial t} = 0$ для установившегося состояния, то приравняв множители при одинаковых степенях координат системы, можно получить следующие 14

алгебраических нелинейных уравнений относительно искоемых коэффициентов $\beta_i, \gamma_i, \Psi_{ik}$
:

1. $\tau_1 m_0 + k\tau_3(x_3 + d) + b^2\beta_2\phi_{12} + q^2b^2\phi_{14}\beta_4 - \phi_{13}p = 0$
2. $\beta_1 - a\beta_2 - b^2\beta_2\gamma_2 - q^2b^2\beta_4\phi_{24} + \phi_{13}p = 0$
3. $\tau_1 m_i - k\tau_3(y_3 + d) - b^2\phi_{12}^2 - q^2b^2\phi_{14}^2 = 0$
4. $0,5\tau_2 + \phi_{12} - a\gamma_2 - 0,5b^2\gamma_2^2 - 0,5q^2b^2\phi_{24}^2 = 0$
5. $\tau_1 m_i + k\tau_3(y_3 + d) + b^2\beta_2\phi_{23} + q^2b^2\phi_{34}\beta_4 - \gamma_3p = 0$
6. $\beta_3 - a\beta_4 - b^2\beta_2\phi_{24} - q^2b^2\beta_4\gamma_4 + \phi_{34}p = 0$
7. $\tau_1 - k\tau_3 - b^2\phi_{23}^2 - q^2b^2\phi_{34}^2 = 0$ (9)
8. $0,5\tau_2 + \phi_{34} - a\gamma_4 - 0,5b^2\phi_{24}^2 - 0,5q^2b^2\gamma_4^2 = 0$
9. $\gamma_1 - a\phi_{12} - b^2\phi_{12}\gamma_2 - q^2b^2\phi_{14}\phi_{24} = 0$
10. $\gamma_3 - a\phi_{34} - b^2\phi_{23}\phi_{24} - q^2b^2\gamma_4\phi_{34} = 0$
11. $b^2\phi_{12}\phi_{23} + q^2b^2\phi_{14}\phi_{34} = 0$
12. $2a\phi_{24} + b^2\gamma_2\phi_{24} + q^2b^2\gamma_4\phi_{24} - \phi_{14} - \phi_{23} = 0$
13. $\phi_{13} - (a + b^2\gamma_4q^2)\phi_{14} - b^2\phi_{12}\phi_{24} = 0$
14. $\phi_{13} - (a + b^2\gamma_2)\phi_{23} - q^2b^2\phi_{34}\phi_{24} = 0$

Тогда при допущении о том, что динамические свойства сближающихся судов одинаковы, можно вычислить искоемые коэффициенты $\beta_i, \gamma_i, \Psi_{ik}$ в квадратурах.

Далее, проведя ряд дополнительных алгебраических преобразований над видом управляющих сигналов, обеспечивающих эффект переключения движения с одних асимптот на другие и возвращения на прежний курс, был получен следующий результат. Координация взаимодействия в месте сближения достигнет максимума, а оптимальное управление (7) двух судов примет следующий окончательный вид при произвольной разнице в курсовых углах $\Delta\Psi$

$$u_{0_{онм}} = b.N \left[\sum_{i=2,3,\dots,i}^n \left[\frac{\lambda \left[\frac{R_{1i}^{2n}}{d^{2n}} - 1 \right] m_1 + \text{sign}(y_{1i} - y_{3i}) \cdot (1 + \lambda)(y_{3i} + d \cdot \text{sign} y_{3i})}{\left[1 + \lambda \left[\frac{R_{1i}^{2n}}{d^{2n}} \right] \right]} \right] - x_1 \right] - \left(\sqrt{\tau_2 + 2N} - \frac{a}{b} \right) x_2$$

(10)

$$u_{i_{онм}} = bN \cdot \cos(270^\circ - \Delta\psi_i) \left[\frac{\lambda \left[\frac{R_{1i}^{2n}}{d^{2n}} - 1 \right] m_i + \text{sign}(y_{1i} - y_{3i}) \cdot (1 + \lambda)(x_3 + d)}{\left[1 + \lambda \left[\frac{R_{1i}^{2n}}{d^{2n}} \right] \right]} - y_{1i} \right] - \left(\sqrt{\tau_2 + 2N} - \frac{a}{b} \right) y_{2i}$$

где $m_i = m_i(0) + Vt \cos(270^\circ - \Delta\psi_i)$, $N = \frac{\sqrt{\tau_1 - k\tau_3}}{b}$; $R^2 = (x_1 - y_{3i})^2 + (x_3 - y_{1i})^2$, $\Delta\psi_i$ -

заданный угол поперечного курса встречного судна относительно курса основного судна, $x_1, x_2, x_3, y_{1i}, y_{2i}, y_{3i}$ - текущие координаты движения судов. При этом координаты x_3 и y_{3i} соответствуют кратчайшим расстояниям до заданной линии пути от подвижного “препятствия” – сближающегося с поперечным курсом встречного судна.

Комментируя формулы (10), можно заметить, что вдали от места сближения при $R^2 > d^2$ при специальных выбранных параметрах $\lambda = 1$ и $n = 2$ боковое движение встречного и основного судна будет стабилизировано относительно своих заданных линий пути m_2 и m_1 . Но при $\frac{R^2}{d^2} \leq 1$ целью управления станет безопасное уклонение судов с помощью асимптот $x_3 + d$ и $y_{3i} + d$. Кроме того, в сигнале $u_{i_{онм}}$ управления встречным судном присутствуют поправки как в передаточном числе регулятора, так и для асимптот m_i и y_i . Эти поправки исчезают при $\psi_i = 90^\circ$ или 270° .

В четвертой главе рассмотрена процедура контроля безопасности движения сближающихся судов с помощью вычисления функции риска F в виде правой части

уравнения Беллмана, которая обладает свойством прогнозировать опасность в точке встречи и служить сигналом аварийной тревоги для экстренного торможения. Таким образом, данный прогноз опасности строится в предположении об оптимальном поведении судов.

Используя известный прием вычисления функции риска, когда движется одно судно, вначале анализируется её зависимость от скорости движения судов. Показано, что при невысокой относительной скорости сближения судов на поперечных курсах его можно пренебречь, и в первую очередь нужно учитывать дистанцию между судами. Поэтому полученная после ряда упрощений окончательная формула оценки функции риска F имеет вид.

$$F = f_0^* + \frac{\tau_3 \cdot d}{1 + k(x_1 - y_{3i})^2 + k(x_3 - y_{1i})^2} - 0.5b^2(u_{0onm}^2 + u_{ionm}^2) \quad (11)$$

Формула (11) означает, что при $u_0 = u_i = 0$, т.е. при отсутствии принятых мер, функция риска F максимальна, а при увеличении дистанции между судами, оцениваемой с помощью знаменателя дроби, она уменьшается. Минимум функции риска возникает при координированном уклонении двух судов от прогнозируемой точки встречи.

Сравнивая её с заданным порогом F_0 , можно в случае его превышения сформировать сигнал аварийной тревоги, требующий экстренного изменения скорости движения (например, основное судно тормозит, встречное повышает скорость, или наоборот). В частности, если разность $\Delta F = F - F_0$ положительна, то нужно снизить скорость основного судна до значения V_{\min} , если отрицательна – то увеличить до заданного значения V_{\max} .

Приведенные соображения можно отобразить в виде двухуровневой структуры контроля и управления безопасным движением судна, представленной на рис.5.

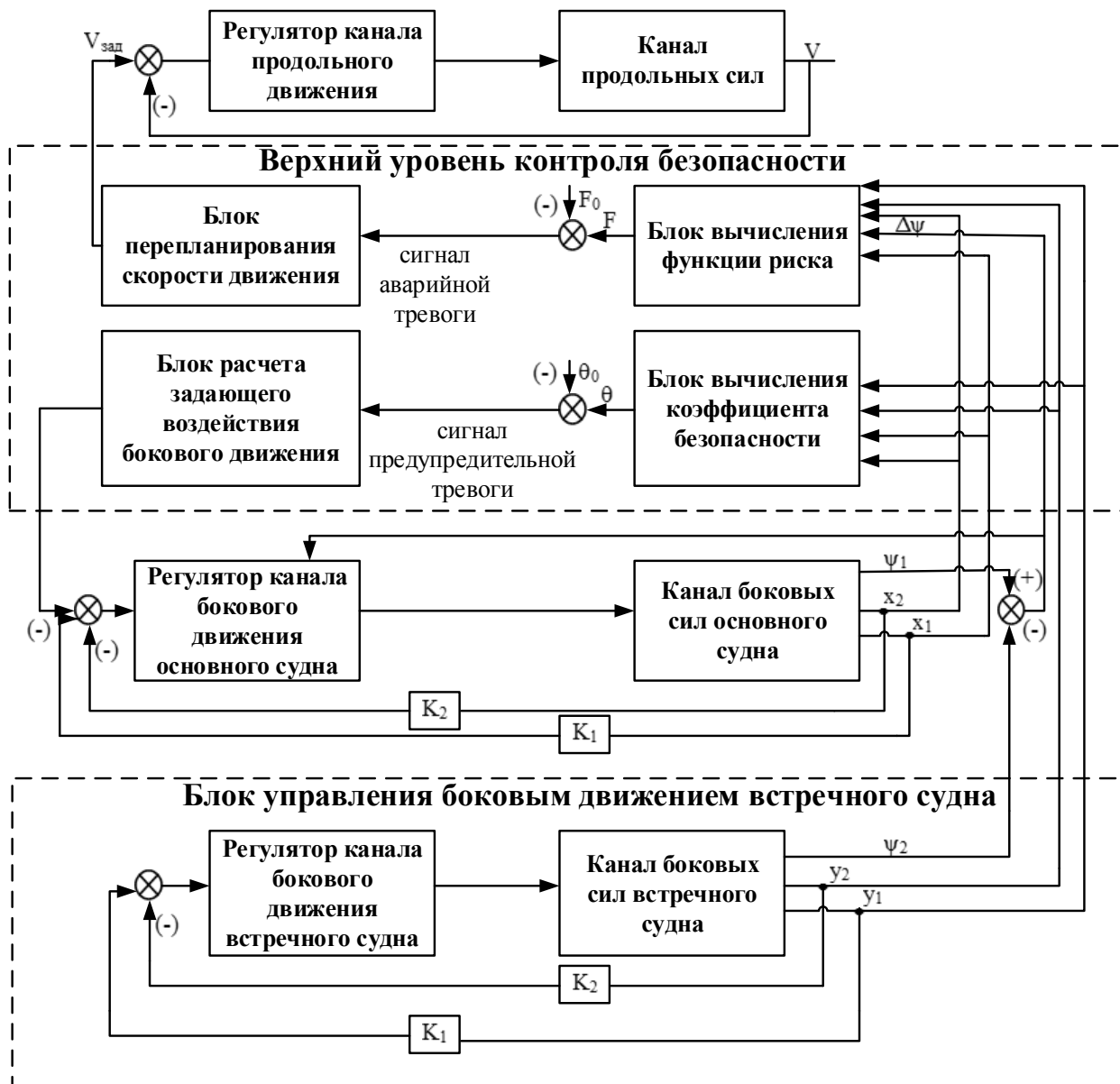


Рис.5 Двухуровневая структура контроля и управления безопасным поперечным движением судов

Согласно этой структуре, на верхнем уровне непрерывно оцениваются две функции – коэффициент безопасности θ и функция риска F . Первый коэффициент прогнозирует опасность в предположении о прямолинейном движении, второй коэффициент вычисляется при гипотезе об оптимальном управлении боковым движением судов. В случае возникновения опасного сближения со встречным судном первым реагирует канал оценки безопасности θ , и в случае превышения порога θ_0 начинается боковое движение для уклонения от точки встречи. Если и это не помогает,

функция риска F , преодолевая второй порог F_0 , формирует команду на изменение скорости судов вплоть до полного торможения.

На нижнем исполнительном уровне работают два канала непосредственного управления боковым движением и скоростью продольного движения. Задающие воздействия для этих каналов формируются на верхнем уровне, в который дополнительно поступают текущие данные по положению y_1 , скорости y_2 и курсу ψ_2 встречного судна.

В пятой главе изложены результаты моделирования на ЭВМ поперечного движения судов в среде Matlab.

При моделировании движения речных судов считалось, что они движутся со скоростью 4 м/сек . Динамические параметры судов были взяты одинаковыми и равными $a = b = 0,5$.

Дистанция d безопасного сближения были принята равной 30 м . Было рассмотрена три случая – только бокового маневрирования двух судов с поперечным курсам одного из них под углом 90° , боковое маневрирование и изменение скорости попутного движения двух судов и, наконец, боковое движение четырех судов, маршруты которых пересекаются под произвольным углом. Все они подтвердили работоспособность предложенных алгоритмов.

В последнем случае картина возможных столкновений основного судна, движущегося вдоль оси x , с тремя встречными судами, движущимися с курсами, отличающимися от основного курса соответственно под углами $90^\circ, 45^\circ$ и 135° , представлена на рис.6.

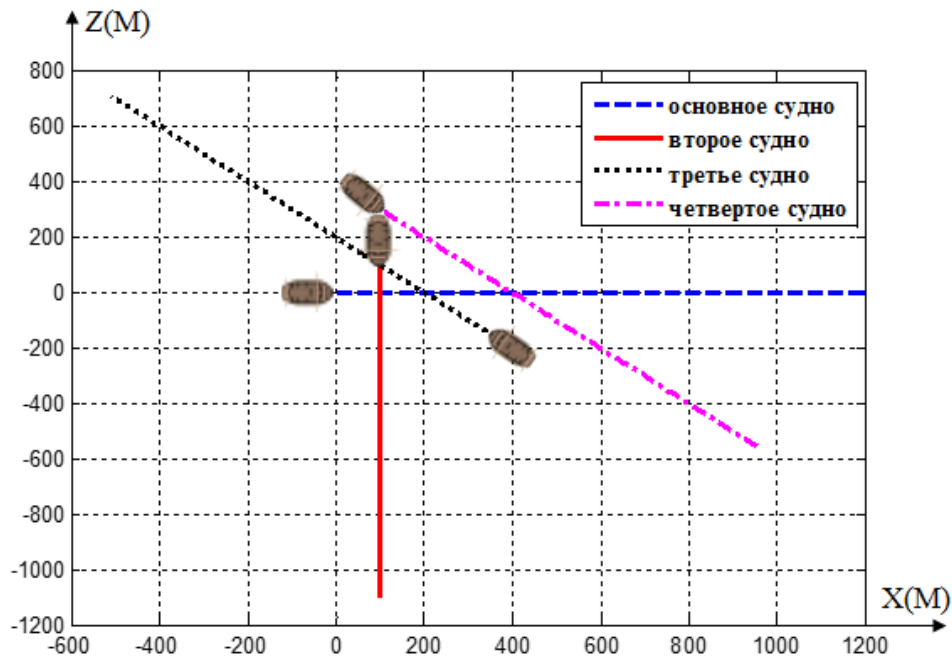


Рис.6 Картина возможных неизбежных столкновений основного судна с тремя другими судами, движущимися на поперечных курсах при отсутствии управления боковым движением

Коэффициенты безопасности взаимных пар судов – первого и второго, первого и третьего, первого и четвертого, показаны на рис.4, а функции риска резко возрастают (см. рис.7).

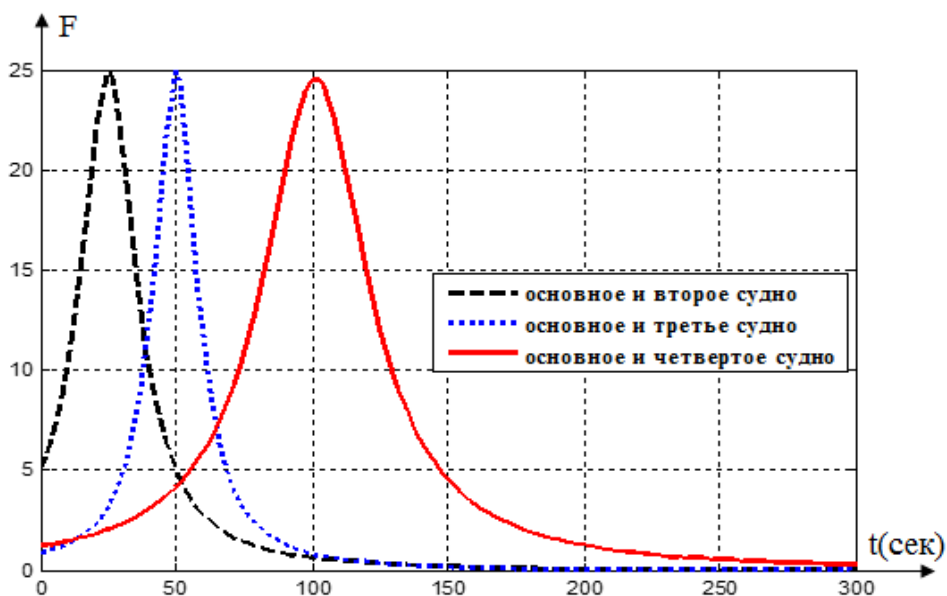


Рис.7 Функции риска при отсутствии управления боковым движением судов

Далее двухуровневая система контроля и управления моделировалась полностью при $\theta_0 = 0,2; F_0 = 10$, причем при выходе из порта основного судна оно обнаруживает первое встречное судно слишком близко. Поэтому дается команда не только поворачивать обеим судам вправо, но и повысить скорость хода основного судна до $V = 6 \text{ м/сек}$, чтобы избежать опасность близости при встрече. Оказалось, что минимальное расстояние при сближении стало равно 35 м и превысило заданный порог d .

Вторым по приоритету опасности оказалось третье судно. При первоначальной оценке коэффициента безопасности прогноз прямолинейного движения этих судов показал, что основное судно опередит в точке встречи третье судно на 5 м , поэтому оба судна должны поворачивать вправо, и этот маневр обеспечил уклонение друг от друга на 40 м . Последним встречным судном является второе судно, а условия сближения таковы, что обеим судам нужно поворачивать влево без изменения скорости.

В итоге оказалось, что функция риска F основного судна всегда является ниже порога F_0 , все дистанции до остальных судов больше безопасной дистанции d , а функция риска приобрела вид, показанный на рис.8

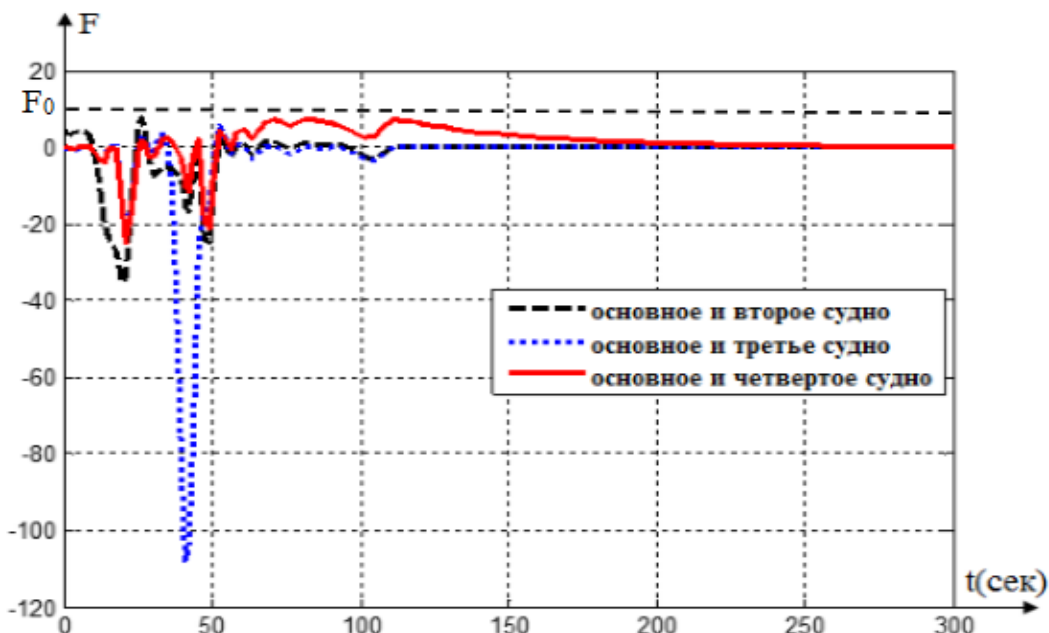


Рис.8 Функции риска при управлении боковым движением судов
Итоговые траектории маневрирующих судов представлены на рис.9

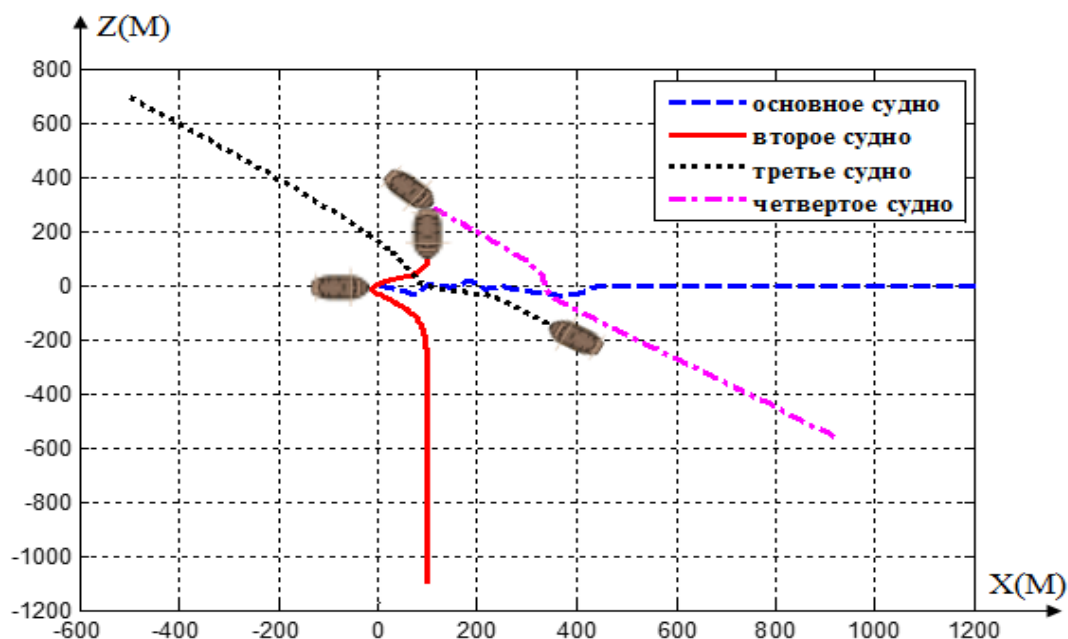


Рис.9 Траектории четырех судов при управлении боковым движением

Видно, что после уклонения от опасных точек встречи суда возвращаются к прямолинейному движению по заданным курсам.

Таким образом, моделирование показало, что одновременный контроль безопасности наряду с управлением позволяет своевременно вмешиваться в процесс движения, и если это нужно-реализовать эти действия автоматическим путем или в виде подсказки. Для этого необходимо иметь текущие данные о положении сближающегося объекта с помощью спутниковой навигации. В целом это существенно повысит безопасность движения на пересекающихся маршрутах.

Заключение

Проведенные исследования позволяют сделать следующие выводы:

1. При движении группы воздушных судов сформирована процедура приоритетного выбора очередной пары взаимодействующих судов при пересечении их маршрутов, которая позволяет указать наиболее опасное встречное судно и принять необходимые меры.
2. Предложенная классификация типов взаимного движения двух сближающихся судов обеспечивает выбор нужных способов дополнительного маневрирования для устранения угрозы их столкновения.

3. Сформирован закон управления боковым движением каждого из двух судов, если они сближаются на пересекающихся курсах под произвольным углом.
4. Уточненный синтез координированного оптимального управления боковым движением двух сближающихся судов учитывает, под каким углом пересекаются их курсы, и предписывает вдали от точки встречи стабилизацию относительно заданных линий пути, а в локальном месте сближения – уклонение друг от друга на заданную безопасную дистанцию.
5. Предложено вычисление функции риска опасного сближения судов с помощью правой части уравнения Беллмана. Это позволяет сформировать сигнал аварийной тревоги. Если функция риска больше порога, тогда судно начинает экстренно менять скорость движения.
6. Моделирование на ЭВМ движения группы речных и воздушных судов подтвердило эффективность предложенного подхода.
7. Полученные результаты использованы в учебном процессе кафедры №301 МАИ при магистерской подготовке по дисциплине “Эргатические системы управления” для учебного направления “Управление и информационные технологии в технических системах”, что подтверждается актом о внедрении.

СПИСОК ОПУБЛИКОВАННЫХ РАБОТ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

В изданиях, рекомендованных перечнем ВАК:

1. Лебедев Г.Н., Тин Пхон Чжо, Зо Мин Тайк, Хахулин Г.Ф., Малыгин В.Б. “Оптимальное управление и контроль безопасности поперечного движения речных и воздушных судов при пересечении их маршрутов”, М., “Новые технологии”, “Мехатроника, автоматизация, управление”, 2012, №12, стр. 50-55.
2. Лебедев Г.Н., Тин Пхон Чжо, Зо Мин Тайк. Система обеспечения безопасности при попутном движении воздушных или речных судов и пересечение их маршрутов // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. - 2012, Выпуск 7. - С. 254-259.
3. Лебедев Г.Н., Зо Мин Тайк, Тин Пхон Чжо, “Управление полетом пассажирских самолетов при пересечении их маршрутов во время захода на посадку”, Труды МАИ, М., № 63, 2013.г.

4. Ву Суан Хыонг, Зайцев А.В., Зо Мин Тайк, Тин Пхон Чжо «Автоматический контроль безопасности сближения двух управляемых воздушных судов при пересечении их маршрутов». Научный вестник МГТУ ГА, Выпуск № 198, декабрь 2013 года, стр. 51-59.
5. Лебедев Г.Н., Зо Мин Тайк, “Синтез оптимального управления боковым движением воздушных или речных судов при пересечении их маршрутов под произвольным углом”, М., “Новые технологии”, “Мехатроника, автоматизация, управление”, 2014, №5, стр. 61-68.

В других изданиях:

1. Зо Мин Тайк «Выбор маршрутов полета пассажирских самолетов при их пересечении во время захода на посадку» // Труды XXI Международного научно-технического семинара «Современные технологии в задачах управления, автоматизации и обработки информации» 18-24 сентября, 2012 г.. Алушта. М., МГУ. Сборник тезисов докладов, С. 93.
2. Зо Мин Тайк, Тин Пхон Чжо «Проблемы обслуживания самолетов гражданской авиации при заходе на посадку и пассажиров в аэропорту после прилета при ограничениях очередей» // Труды XXII Международного научно-технического семинара «Современные технологии в задачах управления, автоматизации и обработки информации» 18-24 сентября, 2013 г.. Алушта. М., МЭИ. Сборник тезисов докладов, С. 22.
3. Зо Мин Тайк «Система автоматического контроля безопасности сближения двух управляемых воздушных судов при пересечении их маршрутов» // Труды XXIII Международного научно-технического семинара «Современные технологии в задачах управления, автоматизации и обработки информации» 14-20 сентября, 2014 г.. Алушта. М., МАИ. Сборник тезисов докладов, С. 13.