

На правах рукописи



**Тин Пхон Чжо**

**“СИСТЕМА УПРАВЛЕНИЯ ПРИОРИТЕТНЫМ ОБСЛУЖИВАНИЕМ  
ВОЗДУШНЫХ СУДОВ ПРИ ЗАХОДЕ НА ПОСАДКУ И ПАССАЖИРОВ В  
АЭРОПОРТУ ПОСЛЕ ПРИЛЕТА”**

Специальность 05.13.01

«Системный анализ, управление и обработка информации»

(информатика, управление и вычислительная техника)

**АВТОРЕФЕРАТ**

диссертации на соискание ученой степени

доктора технических наук

Москва – 2015

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

Научный консультант: доктор технических наук, профессор,  
Заслуженный деятель Науки РФ  
**Лебедев Георгий Николаевич.**

Официальные оппоненты: доктор технических наук, профессор,  
**Сельвесюк Николай Иванович**  
ведущий научный сотрудник Государственного  
научного центра РФ «Государственный  
научно-исследовательский институт  
авиационных систем» (ГосНИИАС),  
доктор технических наук, профессор,  
**Семенов Михаил Евгеньевич**  
профессор военно-учебного научного центра  
военно-воздушных сил «военно-воздушная  
академия им Н. Е Жуковского и  
Ю.А. Гагарина»  
доктор технических наук, профессор,  
**Бронников Андрей Михайлович**  
профессор Московского государственного  
технического университета им. Н.Э. Баумана.

Ведущая организация: Открытое акционерное общество  
«Московский институт электромеханики и  
автоматики»

Защита диссертация состоится «27» апреля 2015 года в 10 часов на заседании  
Диссертационного совета Д 212.125.11 Московского авиационного института  
по адресу: 125993, Москва, А-80, ГСП-3, Волоколамское шоссе, 4.

и на сайте [http://mai.ru/events/defence/doctor/index.php?ELEMENT\\_ID=54574](http://mai.ru/events/defence/doctor/index.php?ELEMENT_ID=54574)

Автореферат разослан \_\_\_\_\_.

Отзывы в 2-х экземплярах, заверенные печатью, просим направлять по адресу;  
129993, 125993, Москва, А-80, ГСП-3, Волоколамское шоссе, 4, Ученый  
секретарь МАИ.

Ученый секретарь  
Диссертационного совета Д 212.125.11.

к. т. н., доцент

\_\_\_\_\_ Горбачев Ю. В.

## Общая характеристика работы

**Актуальность работы.** Существуют ситуации, когда летящие произвольным курсом самолеты должны попасть на заданную новую линию пути или в заданный строй. К таким случаям относится, в частности, ситуация внезапного изменения условий посадки на различные ВПП по метеорологическим или техническим причинам.

В этом случае нужно быстро указать в текущий момент времени очередность или приоритет в обслуживании каждого судна и последовательно вводить их в заданный эшелон, проверяя при этом возможность соблюдения гарантированной безопасности полета, либо отправлять их в соответствующие очереди нужной трассы, называемые тромбонами.

Задача автоматизации управления оперативным планированием прилета на аэродромы Внуково, Домодедово, Шереметьево, а также организации оптимального и эффективного процесса выпуска воздушных судов с этих трех аэродромов уже сегодня является актуальной. Без решения данной задачи невозможно достичь количественных и качественных показателей, заложенных в Программе развития гражданской авиации в РФ. Основная проблема заключается в несовершенстве структуры воздушного пространства Московского узлового диспетчерского района (Московского аэроузла) (рис.1), которая может существенно меняться с изменением хотя бы одного посадочного курса, которых всего 8 (по два на каждую и четырех ВПП). Для каждого посадочного курса необходимо сформировать собственную, оптимальную по ряду критериев структуру воздушного пространства. Только в этом случае возможно эффективное разведение потоков прилета и вылета, исключение непредсказуемого так называемого в гражданской авиации «векторения», что позволит существенно увеличить интенсивность воздушного движения без ущерба безопасности полетов.

Данную процедуру необходимо применять и для аварийных самолётов, в частности, с малым запасом топлива, с техническими неисправностями, с больным на борту. Таким воздушным судам нужен быстрый заход на посадку, у

них нет времени на векторение. В экстремальной ситуации необходимы самые удобные условия для посадки авиалайнера, особенно в части направления ветра.

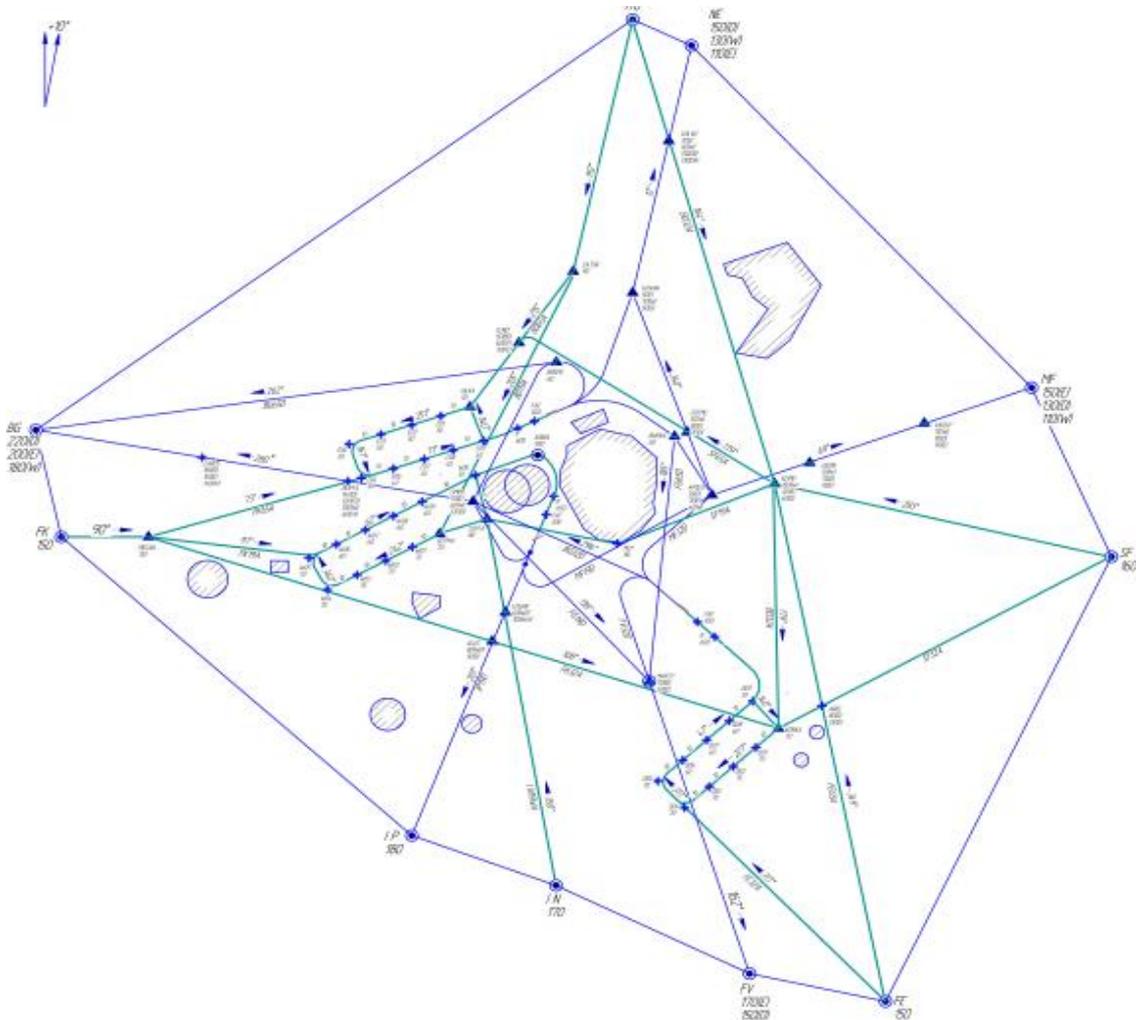


Рис.1. Московский аэроузел, включающий аэродромы Внуково, Домодедово, Шереметьево

Поэтому тема данной диссертационной работы, посвященная решению важной практической задачи перераспределения воздушных судов при их заходе на посадку на разные трассы Московского аэроузла в случае внезапного изменения ветра, является актуальной.

**Целью диссертационной работы** является повышение экономичности и безопасности полетов воздушных судов при их заходе на посадку при внезапном изменении направления ветра.

**Объектом исследования** является система управления воздушным движением при оперативном планировании прилета на аэродромы Московского аэроузла. Предметом исследования являются методы оптимального управления и принятия альтернативных решений при приоритетном обслуживании судов, имеющих аварийный запас топлива и технические неисправности, а также пассажиров в аэропорту после прилета.

**На защиту выносятся следующие научные положения:**

1. Единый параметрический критерий оценки экономичности и безопасности управления полетом.
2. Алгоритм назначения динамических приоритетов для каждого воздушного судна при заходе на посадку по любой из заданных трасс.
3. Процедура оперативного контроля безопасности попутного движения воздушных судов в эшелоне.
4. Методика вычисления оптимальной длины очереди воздушных судов в тромбоне по критерию экономичности их захода на посадку.
5. Методика расчета числа каналов беспriorитетного и приоритетного обслуживания пассажиров в аэропорту после прилета.
6. Результаты моделирования на ЭВМ, подтвердившие эффективность предложенного подхода.

**Научная новизна** полученных результатов состоит в следующем:

1. Предложенный критерий эффективности управления учитывает в линейной свертке как экономичность, так и безопасность полета, при этом весовые коэффициенты значимости обеих показателей найдены с помощью решения обратной задачи линейного программирования при использовании признанных правильными примеров поведения авиадиспетчерской службы.
2. Алгоритм назначения динамических приоритетов воздушных судов является главным научным результатом, полученным на основе теории оптимального управления и учитывающем близость судна к трассе, направление его полета, запас оставшегося топлива и близость с

соседними судами при возможном входе в эшелон. Алгоритм позволяет формировать приоритетные списки судов для каждой трассы, и в случае их ограниченного числа - списки очередей в соответствующие тромбоны для каждой трассы, чтобы потом воспользоваться окном и прилететь на тот же аэродром позднее.

3. Процедура оперативного контроля безопасности попутного движения судов в эшелоне сформирована с помощью определения специальной функции риска, вычисленной с помощью используемого в динамическом программировании уравнения Беллмана и, главное, учитывающего не только дистанцию между судами, но и скорости их полета и их изменения.
4. Методика вычисления длины очереди судов в тромбоне использует не только теорию массового обслуживания, но методы параметрической оптимизации, применив критерий минимума общего расхода топлива всех судов при заходе на посадку. Кроме того, принципиально новым научным результатом является, в отличие от беспriorитетных СМО, получение формул расчета вероятных состояний системы внеочередного приоритетного обслуживания аварийных самолетов, и с помощью этих формул – расчет средней стоимости израсходованного топлива всех судов.
5. Методика расчета необходимого числа каналов приоритетного обслуживания пассажиров в аэропорту учитывает текущую интенсивность прилета самолетов, степень их аварийности и реальную взаимопомощь между каналами при переводе части пассажиров из одного канала в освободившийся, что отличает найденные оценки от идеального случая расчетов с помощью известных формул Эрланга.

**Методы исследования.** При исследовании поставленных в диссертации задач использовались теория дифференциальных уравнений, теория автоматического регулирования, методы параметрической оптимизации,

динамического программирование и принцип максимума Понтрягина из теории оптимального управления, методы теории массового обслуживания. При моделировании динамической системы управления использовался программный пакет MATLAB и C++.

**Практическая ценность работы** прежде всего состоит в том, что в ней сделана попытка оптимизировать расходы топлива для решения задачи «векторения» воздушных судов из-за погодных условий, но с обязательным соблюдением гарантированной безопасности как с точки зрения учитываемых запасов топлива, так и при соблюдении нужной дистанции между соседними воздушными судами, что подтверждено актами о внедрении. Также предложенный подход был использован при выполнении лабораторных работ по дисциплине «Современные методы теории управления» в рамках магистерской подготовки на кафедре 301 МАИ по учебному направлению «Управление и информационные технологии в технических системах», а также в тренажерном центре МГТУ ГА при подготовке авиадиспетчеров.

**Ценность работы для науки и практики** состоит в том, что в ней на основе теории оптимального управления сформирован алгоритм назначения динамических приоритетов воздушных судов, учитывающих совместно их пространственное и техническое состояние, что позволяет рационально распределять их по трассам при заходе на посадку.

**Достоверность полученных результатов** подтверждена математическим моделированием на ЭВМ системы приоритетного обслуживания судов и пассажиров и использованием при синтезе нужных алгоритмов научно – обоснованных методов параметрической оптимизации, теории массового обслуживания и теории оптимального управления, в первую очередь динамического программирования.

**Личный вклад автора** состоит в проведении анализа известных систем управления воздушным движением, разработке алгоритмов управления приоритетным обслуживанием судов, формировании методик расчета нужных

вероятностных характеристик стоимости и безопасности полетов, личном участии в моделировании на ЭВМ и подготовке основных публикаций.

**Публикации и апробация работы.** По теме диссертации опубликовано 23 работы, из них 17 – в изданиях, рекомендованных ВАК. Научные и прикладные результаты докладывались и обсуждались конференции в Тамбове 2009.г и на Всероссийских научных конференциях (г. Тула, г. Орел, г. Пенза), на международном научно-техническом семинаре «Современные технологии в задачах управления, автоматизации и обработки информации» и г. Алушта в 2012, 2013, 2014 годах.

**Структура и объем работы.** Диссертация состоит из введения, девяти глав, заключения и библиографического списка. Основное содержание диссертации изложено на 300 страницах и содержат 65 рисунков и 10 таблиц. Список использованных источников включает 82 ссылки на научную библиографию по теме проводимых исследований.

### **Краткое содержание работы**

**Во введении** обоснована актуальность работы, перечислены ее теоретические и практические результаты, указана их научная и практическая ценность, сформулированы основные положения, выносимые на защиту.

**В первой главе** проводится анализ работы известных систем управления воздушным движением при заходе на посадку, подчеркивается возросшая необходимость взаимодействия аэропортов Внуково, Домодедово и Шереметьево и объединения усилий авиадиспетчерских служб в необходимых случаях в Московском аэроузле.

Сформулируем общую постановку решаемой в диссертации задачи при следующих допущениях:

1. Для каждой ВПП заданы исходные углы  $\Psi_{oj}$ ,  $j=1\dots N$ . Общее число полос равно  $N$ . По ним определяются курсы посадки  $\Psi_{ki}$ ,  $i = 1\dots 2N$  (на каждую полосу можно зайти с двух сторон, см. рис.2).

2. Задан текущий курсовой угол  $\Psi_w$  ветра, который может поменять своё значение. В зависимости от его направления для каждой полосы определяется один из двух посадочных курсов.

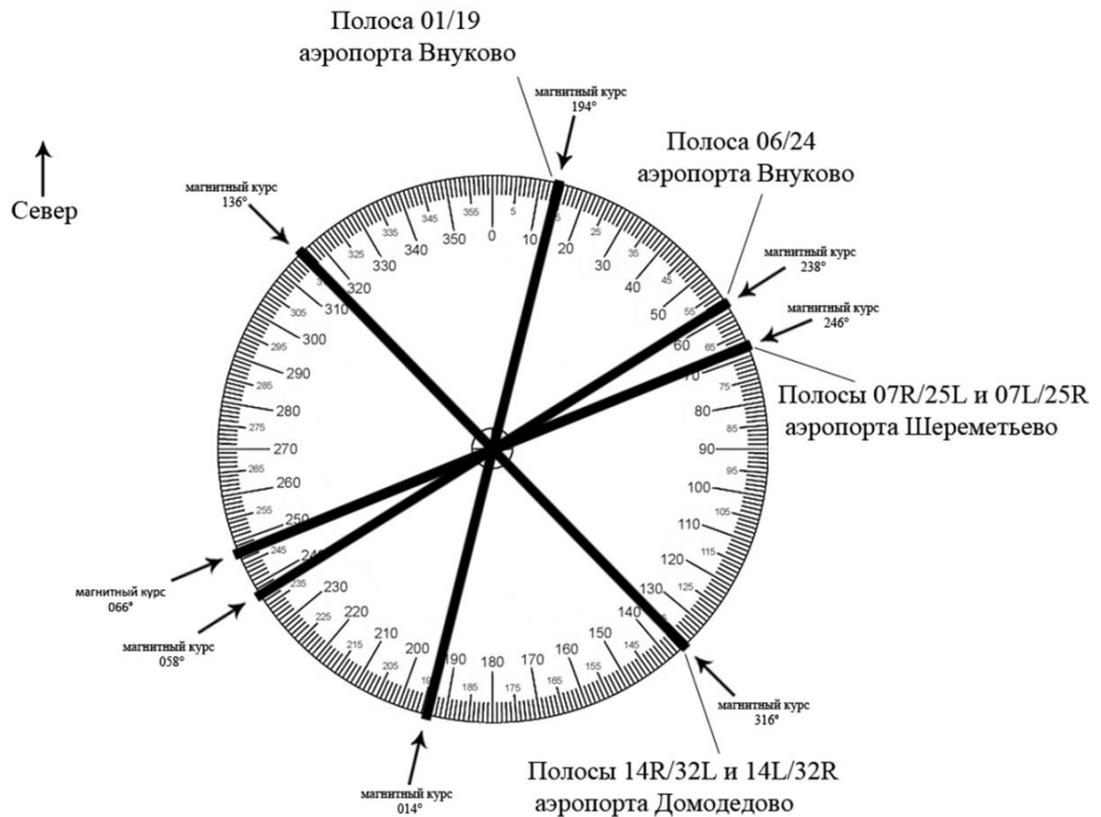


Рис.2. Упрощенное представление расположения полос Московского аэроузла.

3. Для каждой из  $N$  ВПП рассматривается задача введения на трассу воздушных судов при их безопасном заходе на посадку, как это показано на рис 3. При этом анализируется только горизонтальный полет на заданной постоянной высоте.

4. Каждое судно (ЛА) характеризуется в текущий момент времени вектором состояния, характеризуемым координатами:

$x_1$  – кратчайшим расстоянием от ЛА до указанной линии пути;

$x_2$  – минимальным расстоянием до ближайшего судна в эшелоне, уже находящегося на заданной линии пути;

$x_3$  – курсовым углом, отсчитываемым по отношению к заданному курсу линии пути;

$x_4$  – потраченным запасом топлива на дополнительное маневрирование.

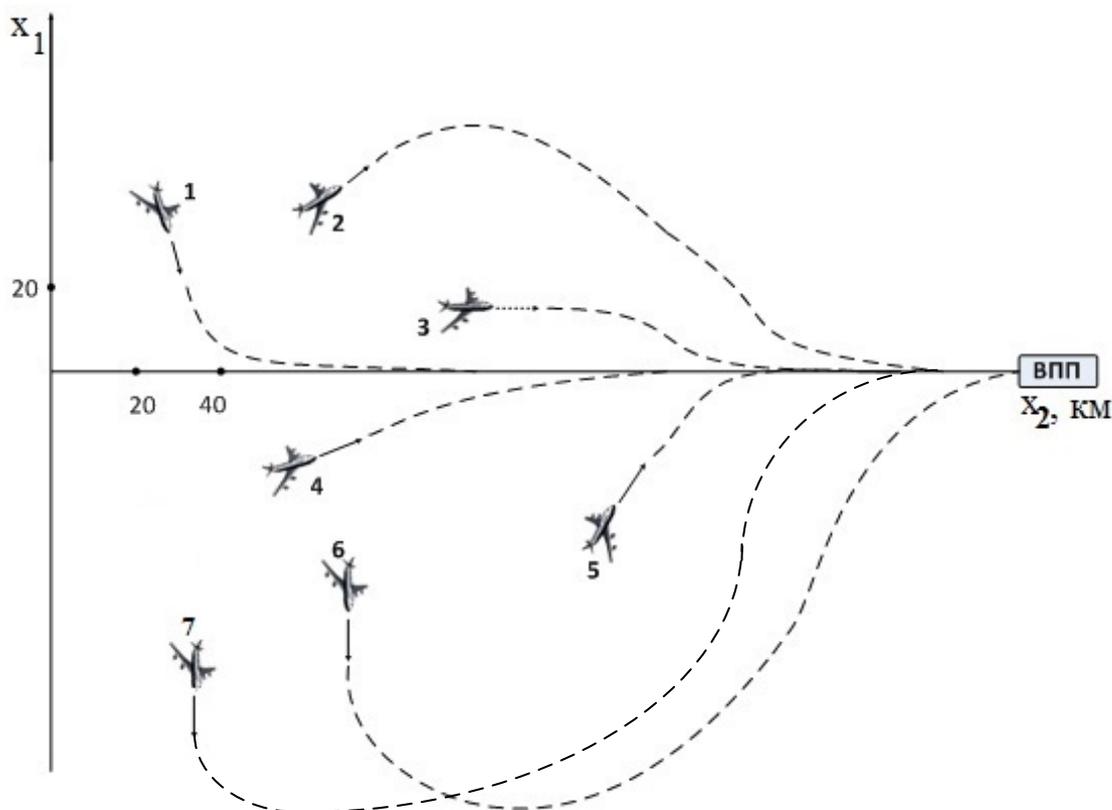


Рис.3. Картина выведения воздушных судов на заданную линию попутного движения

5. В качестве постоянных параметров принимаются, как известные скорость полета  $V$ , максимальное допустимое боковое ускорение  $a$  при разворотах, минимальная дистанция  $r$  безопасного движения ЛА в эшелоне и запас топлива  $\Delta V$ , отведенный на маневрирование и определяющий оставшийся на последующие действия запас топлива как  $(\Delta V - x_4)$ .

6. Принимаемое окончательное решение относится к одной из двух альтернатив ( $j=1,2$ ).

При  $j=1$  принимается решение о введении ЛА в воздушный эшелон, если соответствующий ему риск невелик.

При  $j=2$  дается команда об уходе ЛА на повторный круг или в «тромбон», если существует угроза возникновения аварийной ситуации в воздухе из-за опасного сближения судов, т.е. если на трассе нехватает места для безопасного движения судов, то часть из них направляется в очередь этой трассы, называемой «тромбон», чтобы потом прилететь на тот же аэродром при первой возможности.

7. Каждая из координат  $x_i$  текущего состояния ЛА меняется в соответствии с дифференциальными уравнениями движения, описывающими динамику полета. При этом для простоты каждой координате  $x_i$  соответствует одно дифференциальное уравнение. Эти дифференциальные уравнения имеют следующий вид:

Для координаты  $x_1$  принято

$$\dot{x}_1 = \begin{cases} -\frac{2x_1}{T_1+T_2} & \text{при } j=1 \\ -V & \text{при } j=2 \end{cases} \quad (1)$$

Формула (1) показывает, что при попадании на линию пути воздушное судно аperiodически постепенно стремится обеспечить попасть на указанную трассу. При этом постоянная времени  $(T_1+T_2)$  аperiodического процесса есть время  $T_2$  попадания ЛА на саму линию пути плюс время  $T_1$  ускоренного движения по линии пути до точки, имеющей безопасное расстояние  $r$  до соседнего ЛА<sub>0</sub> (см. рис. 3)

Для координаты  $x_2$  принято

$$\dot{x}_2 = \begin{cases} \frac{-x_2}{2T_2} & \text{при } j=1 \\ \frac{-x_2}{2T_0} & \text{при } j=2 \end{cases} \quad (2)$$

Где  $T_0 > T_2$  – время движения ЛА на повторном круге.

Динамику изменения курса при входе на заданную линию пути можно описать дифференциальным уравнением, аналогичным (2).

$$\dot{x}_3 = \begin{cases} \frac{x_3}{2T_2} & \text{при } j = 1 \\ \frac{-x_3}{2T_0} & \text{при } j = 2 \end{cases} \quad (3)$$

Расход топлива для обеспечения полета должен определяться с учетом того, что на самой линии пути изменение дистанции между летящими ЛА осуществится на форсированном режиме тяги двигателя, при этом расход увеличится в  $(1+\lambda)$  раз, а «скорость догона» одного ЛА по отношению к соседнему ЛА будет лишь  $V\lambda$ . Поэтому в первом приближении можно записать.

$$\dot{x}_4 = \begin{cases} \frac{w_0(1+\lambda)T_1}{T_0} & \text{при } j = 1 \\ w_0 & \text{при } j = 2 \end{cases} \quad (4)$$

где  $w_0$  – заданная скорость расхода топлива в обычном режиме работы двигателя. В частности, при уходе на повторный круг  $\lambda=0,2$ .

8. Одним из наиболее важных допущений является выбор интегрального критерия оптимальности управления воздушным движением, который должен в свертке оценивать экономичность полета. В данной работе в качестве такого критерия принят минимум интегрального функционала, который учитывает штрафные нежелательные отклонения  $x_1$  - от линии пути,  $x_3$  - от курса ВПП, дистанцию  $x_2$  - между соседними ЛА на самой трассе и величину  $x_4$  - потраченного запаса топлива, что в целом позволяет предложить следующую модель критерия:

$$; \quad I = \int_{t_0}^{t_k} f_0(\bar{x}) dt \rightarrow \min$$

$$f_o(j) = \begin{cases} \frac{m_1 x_1^2}{r^2} + \frac{m_2 (r - x_2)^2}{r^2} + m_3 x_3^2 - \frac{m_4 x_4}{\Delta V} \text{ при } j = 1 \\ l - m_4 \left( \frac{x_4}{\Delta V} + \frac{x_4^2}{\Delta V^2} \right) \text{ при } j = 2 \end{cases} \quad (5)$$

где  $m_1$ —коэффициент штрафа за линейное отклонение от трассы,  $m_2$ — коэффициент штрафа за близость ВС к соседним судам в эшелоне,  $m_3$ — коэффициент штрафа за отклонение по курсу от заданного курса посадки,  $m_4$ — коэффициент, отвечающий за безопасность достижения самолетом указанного места посадки,  $l$ — штраф за длину пути при уходе на повторный круг.

#### **Требуется:**

- определить посадочные курсы ВПП с учетом направления ветра;
- распределить воздушные суда между трассами, для чего необходимо сформировать таблицу приоритетов для всех ЛА. На основании этой таблицы получить списки ЛА для каждой полосы;
- определить первоочередность захода на посадку и приземления

судов для каждой трассы, а также списки судов, направляемых в свой “тромбон” или на запасной аэродром.

Таким образом, в данной работе **согласно общей постановке задачи предполагается найти ее решение с помощью теории оптимального управления.**

**Во второй главе** проведен анализ известных методов параметрической оптимизации, теории оптимального управления и массового обслуживания и сделан вывод о том, что наиболее подходящим для решения задач контроля безопасности и управления полетом является динамическое программирование, а для анализа случайных процессов прилета воздушных судов и обслуживания пассажиров в аэропорту – теория массового обслуживания.

**Третья глава** посвящена решению обратной задачи линейного программирования с целью установления весовых коэффициентов значимости экономичности и безопасности движения судов в эшелоне захода на посадку.

Однако, как это бывает и в других задачах, диспетчер знает, *как надо действовать* в конкретном случае, но математическая модель критерия ему *неизвестна*. Поэтому возникает целесообразность воссоздания критерия по отдельным примерам оптимального поведения, чтобы затем его использовать в общем случае. При этом считается, что задача параметрической оптимизации решается в классе задач линейного программирования, когда для каждого самолета выбирается время  $\Delta t_i \geq 0$  дополнительного маневра по критерию

$$z = \sum_{i=1}^n c_i \Delta t_i \rightarrow \max \quad (6)$$

где,  $n$  - число обслуживаемых самолетов,  $C_i$  - подлежащие оценке весовые коэффициенты и зависящие в общем случае от экономичности полета и условий безопасного воздушного движения. Также нужно учесть, что на выбираемое дополнительное время  $\Delta t_i$  бокового маневра накладывается ряд ограничений. В частности, схема ограничений для двух самолетов представлена на рис 4. При взаимодействии двух самолетов каждый из них может изменять дистанцию между ними, осуществляя дополнительный маневр тремя способами – с малым, средним и максимальным временем при следующих условиях

$$\begin{aligned} C_1 X_1 + C_2 X_2 &\rightarrow \max \\ X_1 &\leq a; X_2 \leq a \\ X_1 + X_2 &\leq b \quad (a < b < 2a) \\ X_1 + kX_2 &\leq d \quad (a < d < b; k < 1, d > kb) \\ X_2 + kX_1 &\leq d \end{aligned} \quad (7)$$

Выпуклый многогранник для этого случая показан на рис 4 и содержит кроме начала координат  $A$  еще 6 вершин.

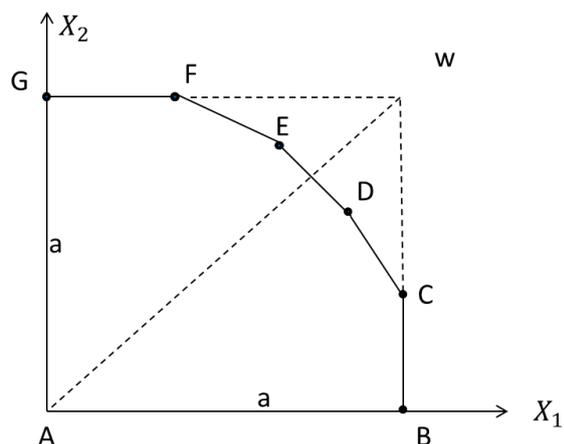


Рис 4. Выпуклый многогранник при трех - альтернативном маневре самолетов

Участки  $GF$  и  $BC$  соответствуют максимальному ограничению по длительности маневра одного самолета, участок  $ED$  учитывает условие суммарной экономичности полета двух самолетов. Участки  $EF$  и  $CD$  указывают, что чем больше время маневрирует один самолет, тем меньшее время приходится маневрировать другому в процессе их “взаимопомощи”.

Решение прямой задачи линейного программирования известном симплекс-методом использует симплекс-таблицу, в которой первой является строка с известными коэффициентами  $C_i$ .

Если же они не известны, а известно оптимальное решение в виде координат выбранной лучшей вершины, можно сделать главную попытку решения обратной задачи – найти координаты смежных с лучшей вершиной соседних вершин, если в нашем распоряжении имеется таблица, в которой строка целевой функции отсутствует.

Сущность предложенного обратного симплекс-метода состоит в следующем. Сначала исходная таблица при известной выбранной вершине преобразуется в специальную матрицу  $I$ , неимеющую строку целевой функции. Затем осуществляется перевод опорной вершины из начала координат в оптимальную вершину и формируется новая матрица  $II$ , используя следующие правила перехода:

- в качестве ведущего столбца поочередно используются столбцы с искомыми ненулевыми переменными  $X_i$ .

- в назначенном столбце анализируются только те элементы, которые принадлежат строкам с нулевыми переменными  $y_j (j= 1, \dots, n)$  в назначенной вершине.

- из всех строк ведущей является строка, имеющая главным неотрицательный элемент, а отношение  $b_j/a_j$  коэффициентов правом столбце к этому элементу минимально;

- после выбора ведущей строки стоящая в левом столбце переменная  $y_i$  заменяется на переменную  $X_i$  из ведущего столбца;

- ведущая строка нормализуется, чтобы ее главный элемент стал равным 1;

- остальные строки матрицы пересчитываются известным в прямом симплекс-методе способом;

- во вновь найденной матрице находится новый ведущий столбец ( $i=2 \dots n$ ) до тех пор, пока не будут учтены все переменные  $X_i$ , и процедура выявления новой ведущей строки и пересчета остальных строк повторяется.

- число повторяющихся циклов пересчета равно числу искомым ненулевым переменных, в результате чего будет сформирована матрица II.

- с помощью каждой переменной  $y_i$  поочередно определяется ведущий столбец, затем для него известным симплекс-методом- ведущая строка, с помощью которой пересчитываются все строки матрицы II, и получается таблиц в виде матриц III с указанными в правом столбце координатами  $X_i(l) (l = 1 \dots n)$  соседних вершин.

Для приведенного примера это означает, что в случае оптимальной вершины в точке D матрицы I и II имеют вид, представленный в таблице 1.

матрица I

	$X_1$	$X_2$	$S_1$	$S_2$	$S_3$	$Y_1$	$Y_2$	$\rho$
$S_1$	1	0	1	0	0	0	0	a
$S_2$	0	1	0	1	0	0	0	a
$S_3$	k	1	0	0	1	0	0	d
$Y_1$	1	k	0	0	0	1	0	d
$Y_2$	1	1	0	0	0	0	1	b

матрица II

	$X_1$	$X_2$	$S_1$	$S_2$	$S_3$	$Y_1$	$Y_2$	$\rho$
$S_1$	0	0	1	0	0	$\frac{-1}{1-k}$	$\frac{k}{1-k}$	$\frac{a+kb-d}{1-k}$
$S_2$	0	0	0	1	0	$\frac{1}{1-k}$	$\frac{-1}{1-k}$	$\frac{a+d-b}{1-k}$
$S_3$	0	0	0	1	1	1	-1-k	2d-b(1+k)
$X_1$	1	0	0	0	0	$\frac{1}{1-k}$	$\frac{k}{1-k}$	$\frac{d-kb}{1-k}$
$X_2$	0	1	0	0	0	$\frac{-1}{1-k}$	$\frac{1}{1-k}$	$\frac{b-d}{1-k}$

Таблицы 1. Матрицы для оптимальной и соседних вершин

Нетрудно видеть, что в последнем правом столбце матрицы II в двух нижних строках указаны заданные координаты  $X_1(0)$  и  $X_2(0)$  оптимальной вершины  $D$ . Соседние вершины  $C$  и  $E$  в выпуклом многограннике имеют координаты – в точке  $C$  – это  $X_1(1)=a; X_2(1)=\frac{d-a}{k}$ , в точке  $E$  – это

$X_1(2)=\frac{b-d}{1-k}; X_2(2)=\frac{d-kb}{1-k}$ . Эти координаты получены с помощью двух матриц

III. Поэтому можно составить неравенства.

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{d-kb}{1-k} C_1 + \frac{b-d}{1-k} C_2 > aC_1 + \frac{d-a}{k} C_2 \\ \frac{d-kb}{1-k} C_1 + \frac{b-d}{1-k} C_2 > \frac{b-d}{1-k} C_1 + \frac{d-kb}{1-k} C_2 \end{array} \right. \quad (8)$$

После ряда упрощений первое и второе неравенства сводятся к двухстороннему допуску

$$k < \frac{C_2}{C_1} < 1 \quad (9)$$

Получив интервальную оценку коэффициента  $C_2$  при  $C_1=1$  и  $k=0,7$ , можно уточнить коэффициенты  $m_1, m_2, m_4$  значимости в интегральном критерии (5), если учесть конкретную зависимость коэффициентов  $C_1$  и  $C_2$  от условий безопасности и экономичности полета двух самолетов. Расчеты этих коэффициентов  $m_i$  в ряде приведенных диссертации примеров показали, что коэффициент безопасности  $m_4$  в 10-100 раз больше коэффициента  $m_1$  экономичности полета. Таким образом, найденной формы критерия в виде

линейной формы, коэффициенты которой определяются по формуле (9), **достаточно** для замены действий диспетчера, связанных с учетом основных факторов – безопасности, экономичности и длительности полета.

**В четвертой главе** найден алгоритм определения посадочных курсов ВПП. Исходными данными в первой задаче перепланирование полета являются  $N$  углов ВПП –  $\Psi_{oj}$  (сторона для ВПП задается любая). Поэтому сначала определяются  $2N$  курсов  $\Psi_{ki}$  возможного подлета самолетов по радиомаякам. Блок-схема алгоритма представлена на рис. 5.

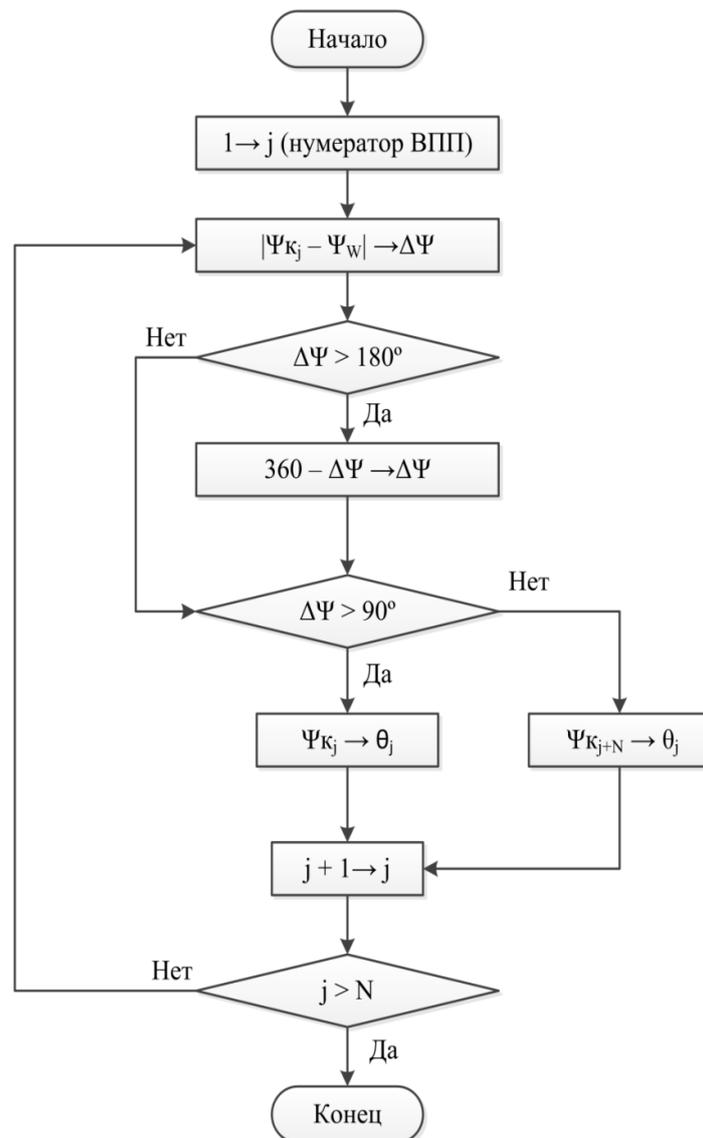


Рис. 5. Блок-схема алгоритма определения посадочного курса для каждой ВПП

В результате работы алгоритма оказывается, что курсы  $\Psi_{ki}$  записаны по возрастанию, т.е. меньшие курсы полос имеют номера  $1...N$ , а большие –

$(N+1) \dots 2N$ . Далее происходит определение одного из двух посадочных курсов для каждой ВПП в зависимости от направления ветра ( $\theta_j$ ).

Выбор стороны ВПП для посадки выбирается таким образом, чтобы ветер был встречным, т.е. выполнялась проверка условия  $\Delta\psi > 90^\circ$ , где  $\Delta\psi = |\psi_k - \psi_w|$  при  $\Delta\psi < 180^\circ$ . Если же  $\Delta\psi > 180^\circ$ , то вносится поправка, а затем опять повторяется проверка условия  $\Delta\psi > 90^\circ$ .

Полученный алгоритм хотя и не представляет научной новизны, но он является первым звеном процесса «перевекторения» и воспроизводит логику действий при любом числе  $N$  посадочных полос и их курсов. Его геометрическое решение для направления ветра 2 показано на рис. 6.

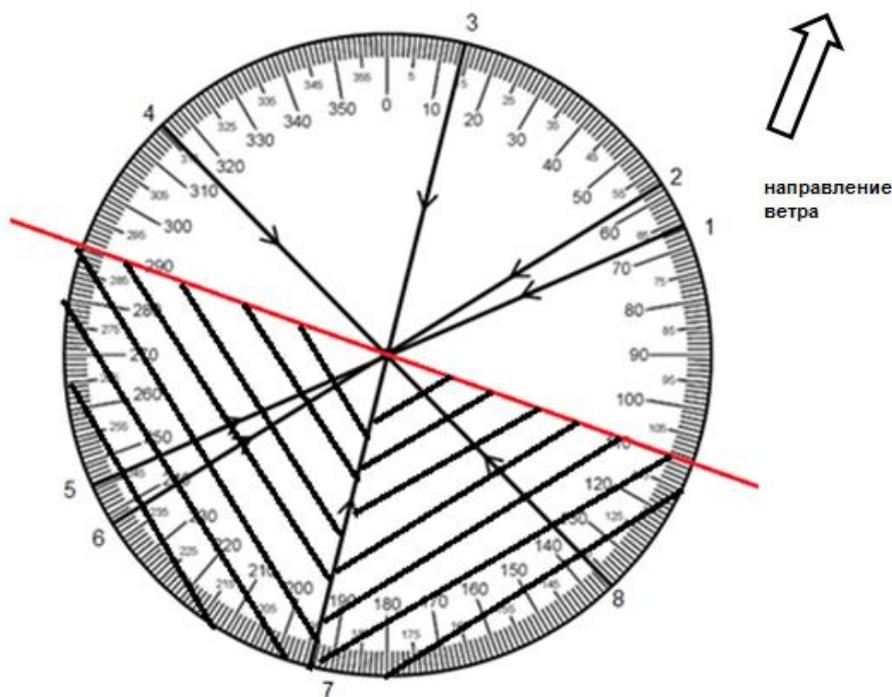


Рис. 6. Геометрическое решение задачи при подлете к Москве в случае, когда ветер определил посадочные курсы от 1-4

**В пятой главе** рассмотрено два случая назначения приоритетов включения воздушных судов в список захода на посадку на заданную трассу. В первом случае учитываются только траекторные координаты судна относительно заданной трассы и его соседей впереди и сзади, а курс движения судна считается примерно совпадающим с посадочным курсом трассы, т.е.

$x_3 = 0$ . Для этого был использован подход к решению задачи с помощью динамического программирования. Пользуясь этим подходом при решении поставленной задачи, будем вычислять ординаты риска в нужном числе полетных ситуаций и затем, приравнивая их, найдем аппроксимацию функции Беллмана  $S$ , а значит и текущие функции риска  $F_j$  ( $j = 1, 2$ ), определяющие приоритет в принятии решений. Чем больше величина  $F_1$  риска входа в эшелон и чем меньше величина  $F_2$  риска ухода на повторный круг, т.е. чем меньше  $\Delta F = F_2 - F_1$ , тем меньше шансов на попадание в эшелон. Значит, если взять величину  $\Delta F$  в качестве приоритета  $\Pi$ , то можно проранжировать все воздушные суда и поочередно планировать их введение в эшелон до тех пор, пока условия безопасности не нарушатся.

Решение начнем с записи уравнения Беллмана для двух альтернатив  $j=1, 2$ , пользуясь заданными соотношениями (1-5) и задавшись следующей аппроксимацией Беллмана  $S$  в виде степенного полинома.

$$S = \alpha + \beta_1 x_1 + \gamma_1 \frac{x_1^2}{2} + \beta_2 x_2 + \gamma_2 \frac{x_2^2}{2} + \beta_3 x_3 + \gamma_3 x_3 + \beta_4 x_4 + \gamma_4 \frac{x_4^2}{2} + \psi_{12} x_1 x_2 + \psi_{13} x_1 x_3 + \psi_{14} x_1 x_4 + \psi_{23} x_2 x_3 + \psi_{24} x_2 x_4 + \psi_{34} x_3 x_4 \quad (10)$$

Тогда нужные частные производные будут равны

$$\begin{aligned} \frac{\partial S}{\partial x_1} &= \beta_1 + \gamma_1 x_1 + \psi_{13} x_3 + \psi_{12} x_2 + \psi_{14} x_4; & \frac{\partial S}{\partial x_2} &= \beta_2 + \gamma_2 x_2 + \psi_{12} x_1 + \psi_{24} x_4 + \psi_{23} x_3; \\ \frac{\partial S}{\partial x_4} &= \beta_4 + \gamma_4 x_4 + \psi_{14} x_1 + \psi_{24} x_2 + \psi_{34} x_3; & \frac{\partial S}{\partial x_3} &= \beta_3 + \gamma_3 x_3 + \psi_{13} x_1 + \psi_{23} x_2 + \psi_{34} x_4; \end{aligned}$$

где  $\beta_i, \gamma_i, \psi_{ik}$  - искомые коэффициенты, которые необходимо определить.

Представляя эти производные и известные соотношения (1-5) в условие оптимальности, можно получить

$$-\frac{\partial S}{\partial t} = \min_{j=1,2} F_j(x_1, x_2, x_4) \quad (11)$$

где функции риска при  $j = 1$  и  $j = 2$  равны:

$$F_1 = \frac{m_1 x_1^2}{r^2} + \frac{m_2 (r - x_2)^2}{r^2} + m_3 x_3^2 - \frac{m_4 x_4}{\Delta V} - \frac{x_1}{0.5(T_1 + T_2)} (\beta_1 + \gamma_1 x_1 + \psi_{12} x_2 + \psi_{14} x_4) -$$

$$- \frac{x_2}{0.5T_2} (\beta_2 + \gamma_2 x_2 + \psi_{12} x_1 + \psi_{24} x_4) + \frac{W_0}{T_0} [T_1(1 + \lambda) + T_2] (\beta_4 + \gamma_4 x_4 \psi_{14} x_1 + \psi_{24} x_2) \quad (12)$$

$$F_2 = l - m_4 \left( \frac{x_4}{\Delta V} + \frac{x_4^2}{\Delta V^2} \right) - V (\beta_1 + \gamma_1 x_1 + \psi_{12} x_2 + \psi_{14} x_4) - \frac{x_2}{0.5T_0} (\beta_2 + \gamma_2 x_2 + \psi_{12} x_1 + \psi_{24} x_4)$$

$$+ W_0 (\beta_4 + \gamma_4 x_4 \psi_{14} x_1 + \psi_{24} x_2)$$

Теперь можно приступить к самому расчету путем вычисления нужных ординат риска, учитывая, что при  $x_3=0$  в степенном полиноме (10) имеется 9 искоемых коэффициентов. Значит, нужно вычислить 10 ординат риска, которые можно разбить на две группы – в одной группе очевидно решение  $j=1$ , в другой  $-j=2$ , а затем эти ординаты приравнять друг другу.

Сначала вычислим ординаты  $C_1^-, C_1^+, C_0$ , чтобы получить равенство.

$$C_1^- + C_1^+ = 2C_0 \quad (13)$$

$$C_1^- = F_1 \begin{pmatrix} x_1 = 0 \\ x_2 = r \\ x_4 = 0,4\Delta V \end{pmatrix} = 0,25m_2 - 0,4m_4 + \frac{4r\beta_2}{3T_2} + MW_0 (\beta_4 + 0,4\Delta V \gamma_4) \quad (14)$$

$$\text{где } M = \frac{[(1 + \lambda)T_1 + T_2]}{T_0}$$

$$C_1^+ = F_2 \begin{pmatrix} x_1 = 2r \\ x_2 = r \\ x_4 = 0,4\Delta V \end{pmatrix} = l - 0,4m_4 - V (\beta_1 + 0,4\Delta V \psi_{14} + 2r\gamma_1) \quad (15)$$

$$- \frac{4r\beta_2}{3T_2} + W_0 (\beta_4 + 0,4\Delta V \gamma_4 + W_0 \psi_{14})$$

$$2C_0 = F_1(\bar{x}_p) + F_2(\bar{x}_p) = m_1 + l + 0,25m_2 - 0,56m_4 - (\beta_1 + 0,4\Delta V \psi_{14} - r\gamma_1) \left[ V + \frac{2r}{T_1 + T_2} \right]$$

$$+ W_0 (\beta_4 + 0,4\Delta V \gamma_4 + \psi_{14} r) (1 + M)$$

В результате решения равенства (13) получим

$$\gamma_1 = -\psi_{14} \frac{W_0}{V} \quad (16)$$

Вычислим теперь ординаты риска в полетных ситуациях, в которых очевиден уход на повторный круг, т. е.  $j=2$ . Этими ординатами являются

функции  $C_{12}^{+-}, C_1^+, C_4^-, C_2^-$ , найденные с помощью  $F_2$ . Например, ордината  $C_1^+$  вычисляется по формуле (5.7), а ордината  $C_4^-$  равна

$$C_4^- = F_2 \begin{pmatrix} x_1 = 0 \\ x_2 = r \\ x_4 = 0 \end{pmatrix} = l - V(\beta_1 + \gamma_1 r) - \frac{4r\beta_2}{3T_0} + w_0(\beta_4 + r\psi_{14}) \quad (17)$$

Приравнявая эти ординаты друг другу и ординате  $C_0$ , можно убедиться

$$\psi_{12} = \psi_{24} = 0; \gamma_2 = -\frac{\beta_2}{3x_{2p}}; w_0\gamma_4 = V\psi_{14} \quad (18)$$

Теперь рассмотрим полетные ситуации, в которых очевидно решение войти в эшелон, то есть  $j = 1$ . Для этого вычислим ординаты риска  $C_1^-, C_{14}^{--}, C_{12}^{--}, C_4^+, C_2^+$  аналогичным выше способом, только пользуясь теперь функций  $F_1$ . Например, ордината риска  $C_{14}^{--}$  вычисляется так

$$C_{14}^{--} = F_1 \begin{pmatrix} x_1 = 0 \\ x_2 = r \\ x_4 = 0 \end{pmatrix} = 0,25m_2 + \frac{4r\beta_2}{3T_2} + Mw_0\beta_4 \quad (19)$$

Тогда из условия  $C_{14}^{--} = C_1^-$  получим

$$\gamma_4 = -\frac{m_4}{W_0\Delta V} \quad (20)$$

Далее вычислим ординату  $C_4^+$

$$C_4^+ = F_1 \begin{pmatrix} x_1 = r \\ x_2 = r \\ x_4 = 0,8\Delta V \end{pmatrix} = m_1 + 0,25m_2 - 0,8m_4 - \frac{2r}{T_1 + T_2}(\beta_1 + r\gamma_1 + \psi_{14}0,8\Delta V) + \frac{4r\beta_2}{3T_2} + Mw_0(\beta_4 + 0,8\Delta V\gamma_4 + \psi_{14}r) \quad (21)$$

Приравнявая ординаты  $C_4^+$  и  $C_1^-$  друг другу, получим

$$\beta_1 = -\frac{1}{V} \quad (22)$$

Действуя аналогичным образом с остальными ординатами, можно вычислить остальные коэффициенты  $\beta_2, \beta_4, \psi_{14}$ . В частности, коэффициент  $\beta_2$  можно найти, если приравнять ординаты  $C_2^-$  и  $C_1^+$

$$\psi_{14} = -\frac{1}{2rw_0}; \beta_2 = -\frac{0,75T_0}{r}; \beta_4 = -\frac{2,8}{w_0} \quad (23)$$

Это позволяет в конце концов вычислить функции риска  $F_1$  и  $F_2$  аналитически, если ввести следующие дополнительные безразмерные переменные:

$$y_1 = \frac{x_1}{r}; y_2 = \frac{x_2}{r}; y_4 = \frac{x_4}{\nabla V} \quad (24)$$

Тогда получим в общем виде

$$F_1 = 1,4 + \left[ \frac{2r}{V(T_1 + T_2)} - 0,5M \right] y_1 + m_1 y_1^2 + \frac{2T_0}{T_1 + T_2} y_1 y_4 + m_2 (1 - y_2)^2 - (2m_2 + m_4) y_4 \quad (25)$$

$$F_2 = 3,8 + l + 1,5 y_2 (1 - 0,3 y_2) - 2m_4 y_4 \quad (26)$$

Или в численном выражении при  $m_1 = 1$ ,  $m_2 = m_4 = 40$ ,  $l = 1$ ,

$$F_1 = 1,4 + 0,2 y_1 + 1,2 y_1^2 + 43(1 - y_2)^2 - 120 y_4 + 2 y_1 y_4 \quad (27)$$

$$F_2 = 14 + 1,5 y_2 - 110 y_4 \quad (28)$$

Для проверки формул (27-28) при оценке приоритетов рассмотрим движение 7 воздушных судов, летящих с различными курсами и на разных расстояниях от заданной линии пути, как это показано на рис. 3. Для каждого судна анализировались три варианта оставшегося запаса топлива, т. е. всего была рассмотрена 21 полетная ситуация. Исходные данные для этих ситуаций представлена в таблице 2. Эта таблица содержит полетные ситуации на текущий момент времени. Координаты  $x_1$  и  $x_2$  даны в километрах, курсовой угол  $x_3$  – в радианах, расход топлива  $x_4$  – в долях от общего запаса  $\Delta V$ .

Оказалось, что команде попадания в «тромбон» или ухода на повторный круг должны подчиняться суда 3, 5, 6, летящие с курсом, не соответствующим заданной линией пути, если их запас топлива ( $\Delta V - y_4$ ) велик.

Особый случай относится к воздушному судну 6 в полетной ситуации 18, для которой характерно такое количество потраченного топлива, равное  $0,8 \Delta V$ , при котором уход на повторный круг невозможен. Поэтому находящееся в

$j$	1			2			3			4			5			6			7		
$i$	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21
$x_1$	6	6	6	3	3	3	6	6	6	4,5	4,5	4,5	9	9	9	12	12	12	15	15	15
$y_1$	1	1	1	0,5	0,5	0,5	1	1	1	0,75	0,75	0,75	1,5	1,5	1,5	2	2	2	2,5	2,5	2,5
$x_2$	6	6	6	6	6	6	2	2	2	4	4	4	4	4	4	2	2	2	4	4	4
$1-y_2$	0	0	0	0	0	0	0,7	0,7	0,7	0,33	0,33	0,33	0,33	0,33	0,33	0,7	0,7	0,7	0,33	0,33	0,33
$x_3$	0	0	0	0	0	0	$\frac{\pi}{2}$	$\frac{\pi}{2}$	$\frac{\pi}{2}$	0	0	0	$-\frac{\pi}{2}$	$-\frac{\pi}{2}$	$-\frac{\pi}{2}$	$\frac{\pi}{2}$	$\frac{\pi}{2}$	$\frac{\pi}{2}$	$\frac{\pi}{2}$	$\frac{\pi}{2}$	$\frac{\pi}{2}$
$y_4$	0	0,4	0,8	0	0,4	0,8	0	0,4	0,8	0	0,4	0,8	0	0,4	0,8	0	0,4	0,8	0	0,4	0,8
$F_1$	2,8	54,8	106,8	1,8	53,8	105,8	26,4	78,4	130,4	7	59	111	10,3	62,3	114,3	27,8	77,8	131,8	15,3	67,3	119,3
$F_2$	2,9	34,9	66,9	2,9	34,9	68,9	1,9	33,9	65,9	2,45	34,5	66,5	2,45	34,5	66,5	15,3	47,4	79,3	2,45	34,5	66,45

Таблица 2. Исходных данных состояния 7 воздушных судов вблизи одной трассы

аварийном состоянии судно б должно быть введено в воздушный эшелон, что и подтверждено расчетами, т.к. в этом случае  $F_2 > F_1$ . Это означает, что *аварийное судно имеет неоспоримый приоритет*. Одним из преимуществ данного подхода является ранжирование судов с учетом его ресурсов и технической исправности, что очень важно. Кроме того, в пятой главе исследован вопрос выбора оптимальной длины тромбона для тех судов, которые при не попали сразу в эшелон движения по трассе.

Для решения этой задачи рассмотрим многоканальную систему беспriorитетного обслуживания с очередью, так как аварийные самолеты в показанный на рис. 7 «тромбон» не попадают. Примем число мест в очереди, равное максимальному числу самолетов, уже летящих в эшелоне. Это число обозначим через  $n$ . Пусть в многоканальную СМО с ожиданием поступает поток неприоритетных "заявок" - самолетов с интенсивностью  $\lambda$ ; интенсивность обслуживания равна  $\mu$ ; число мест в тромбоне -  $n$ . При этих условиях напишем выражения в виде формул Эрланга для предельных вероятностей состояний, сразу же обозначая  $\lambda/\mu = \rho$ . Считается, что длина очереди равна  $n$ .

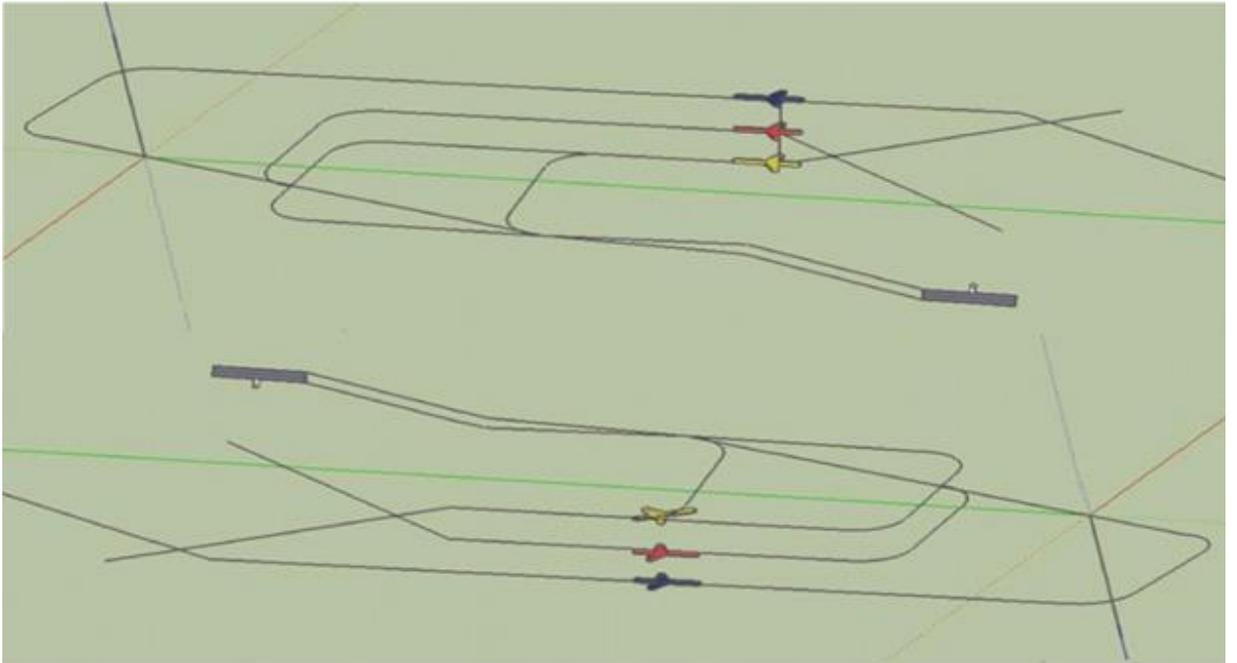


Рис.7. Схема захода на посадку по двум линиям пути с помощью тромбонов

$$P_0 = \left[ 1 + \frac{\rho}{1!} + \frac{\rho^2}{2!} + \frac{\rho^3}{3!} + \frac{\rho^n}{n!} \frac{\rho/n - \rho/n^{m+1}}{1 - \rho/n} \right]^{-1}$$

$$P_{n+n} = \frac{\rho^{n+n}}{n^n * n!} P_0 \quad (29)$$

Подставляя  $P_0$  в формулу (29), можно получить интересующую нас зависимость от длины очереди  $n$  **вероятности отказа  $P_{n+n}$  в обслуживании** самолетов тромбоном, которая указывает на необходимость принятия решения лететь на запасной аэродром.

С помощью теории массового обслуживания также можно провести расчет оптимального числа самолетов в очереди в тромбоне при следующих допущениях. Пусть при попадании самолетов в очередь, существующую в тромбоне, самолет должен дополнительно пролетать некоторый путь до выхода на трассу, пропорциональный имеющемуся числу  $k$  – впереди летящих самолетов. Пусть безопасное расстояние  $r$  между ними задано и примерно равно 20 км. Это означает, что при скорости 400 км/час эти самолеты будут приземляться друг за другом в аэропорту через время  $\frac{l}{v} = 200$  сек, т.е.

примерно через три минуты. Этому времени соответствуют лишние затраты топлива  $R_1$ , а общие затраты в тромбоне при очереди длиной  $k$  будут равны  $kR_1$ .

Пусть также у самолета есть другая возможность перелетать на соседнюю трассу, минуя тромбон, преодолев другой путь, длина которого равна в среднем расстоянию между соседними трассами. При имеющейся конфигурации Московского аэроузла параметром круга с радиусом 100 км дает примерную оценку длины этого пути примерно 80 км, что определяет свои дополнительные затраты  $R_2$  топлива.

$$R_2 = k_0 R_1, \text{ где } k_0 = 4$$

Ставится задача выбора такой оптимальной величины  $n$  допустимого числа самолетов в тромбоне, при котором затраты топлива  $R_0$  для всех самолетов будут минимальны.

С учетом вероятностного состояния  $n$  – канальной системы обслуживания можно записать следующий параметрический критерий оптимальности

$$R_0 = R_1 \sum_{i=1}^n iP_i + R_2 P_n = R_1 \sum_{i=1}^{n-1} iP_i + P_n(n + R_1 + R_2) = R_1 \left[ \sum_{i=1}^{n-1} iP_i + P_n(n + k_0) \right] \rightarrow \min \quad (30)$$

Расчеты показали, что при  $k_0 = 4$  минимум  $R_0$  обеспечивается при  $n = 5$ , т.е. расчетная длина тромбона не превышает 100 км, что соизмеримо с дистанцией ухода на повторный круг.

**В шестой главе** дается пояснение, как работает алгоритм распределения судов между трассами. Для этого рассмотрен пример захода на посадку 20 воздушных судов, показанный на рис.8, и приводятся результаты их приоритетного распределения при следующих исходных данных, представленных в таблицах 3 и 4.

Таблица.3. Входные данные о посадочных курсах ВПП для алгоритма распределения судов

№ ВПП	1	2	3	4
$\Psi_{oj}$ (град.)	136	194	238	246

Таблица .4. Входные данные о воздушных судах

№ ЛА	$\zeta_k$ (км)	$Z_k$ (км)	$\Psi_k$ (град.)
1	0	-300	100
2	100	-250	40
3	200	-150	316
4	280	-40	120
5	300	60	140
6	200	220	225
7	60	280	270
8	-40	260	260
9	-120	220	280
10	-220	200	10
11	-240	100	0
12	-280	-20	310
13	-200	-180	40
14	-140	-260	90
15	-60	-260	85
16	<b>240</b>	-50	<b>165</b>
17	<b>240</b>	-80	<b>165</b>
18	240	260	242
19	320	310	238

20	160	260	250
----	-----	-----	-----

Таблица.3 содержит информацию о курсах четырех ВПП при направлении ветра 2, в таблице 4 находятся исходные параметры движения 20 самолетов. Эти данные позволяют вычислить приоритет каждого самолета относительно каждой из четырех ВПП, если использовать только одну функцию  $F_1$  и определить приоритет как  $\Pi = -F_1$ . Это позволяет с учетом формул (27 – 28) и представления интересующего нас приоритета  $\Pi$ , понимаемого как величина, получить в завершение аналитическую форму вычисления приоритета для воздушного судна при  $y_3 = x_3/60$ :

$$\Pi = (-1,4 - 0,2y_1 - 0,6[3 - |y_3 - 3|]) - 0,1y_3^2 + [-200e^{-3y_2} + 250y_4] \quad (31)$$

По существу этот приоритет в первую очередь учитывает оценку затрат топлива при обязательном соблюдении заданных дистанций безопасного движения между судами. В формуле (31) есть слагаемые, стоящие в круглых скобках (они отвечают за экономичность полета т.к. и  $y_1$  и  $y_3$  характеризует длину пути при попадании самолета на заданную трассу) и в квадратных скобках (они отвечают за безопасность полета т.к. показатель  $y_4$  определяет оставшийся запас топлива, а  $y_2$  определяет дистанцию между самолетами при движении в эшелоне по заданной трассе), что очень важно для оценки угрозы успешного достижения места посадки. (При попадании ЛА в переднюю полусферу трассы считаем, что  $y_2=0$ ). Расчеты этих приоритетов представлены в таблице 5.

Таблица.5. Приоритеты, вычисленные для каждого судна относительно четырех ВПП

	ВПП 1	ВПП 2	ВПП 3	ВПП 4
ЛА 1	-8.7	-11.03	-10.55	-10.6
ЛА 2	-6.1	-9.1	-10.75	-10.63
ЛА 3	-0.6	-7.3	-10.9	-10.8

ЛА 4	-5.3	-3.7	-9.4	-8.9
ЛА 5	-8.2	-1.3	-9.1	-8.9
ЛА 6	-10.9	-5.5	-2.4	-4.0
ЛА 7	-10.87	-8.8	-3.7	-3.3
ЛА 8	-10.56	-8.7	-5.5	-5.3
ЛА 9	-10.35	-10.91	-8.7	-8.6
ЛА 10	-11.16	-11.8	-11.05	-11.04
ЛА 11	-11.37	-11.5	-10.89	-10.87
ЛА 12	-10.7	-11.37	-11.0	-10.8
ЛА 13	-10.5	-11.56	-11.44	-11.5
ЛА 14	-10.2	-11.69	-11.03	-11.04
ЛА 15	-9.1	-10.85	-10.22	-10.18
ЛА 16	-6.1	<b>-5.7</b>	-9.4	-9.2
ЛА 17	<b>-6.5</b>	-6.6	-9.6	-9.6
ЛА 18	210	215.1	216.2	213.4
ЛА 19	-11.17	-8.7	<b>-2.11</b>	-2.15
ЛА 20	-11.09	-8.5	<b>-1.6</b>	-1.8

Таблица.6. Список самолетов в эшелоне для четырех ВПП вместе с очередями

ЛА, заходящие на ВПП-1 (Курс 136)						
17	1	15	14	2	13	3
ЛА, заходящие на ВПП-2 (Курс 194)						
18	5	4	16	-	-	-
ЛА, заходящие на ВПП-3 (Курс 238)						
19	20	6	-	-	-	-
ЛА, заходящие на ВПП-4 (Курс 246)						
7	8	9	10	11	12	-

Видно, что эти списки имеют разную длину из-за внезапного изменения направления ветра и “перевекторения” движения воздушных судов. Если максимальная длина  $M$  этих списков ограничена, то часть самолетов не будет допущена на вход в эшелон, и они будут отправлены в очередь – соответствующий тромбон. Например, пусть  $M = 4$ , тогда для захода на ВПП-1 в эшелон не попадут самолеты № 2, 13, 3, и они полетят в очередь в свой тромбон трассы 1. Так же для захода на ВПП-4 в эшелон не попадут самолеты № 11,12, и они полетят в очередь в тромбон трассы 4.

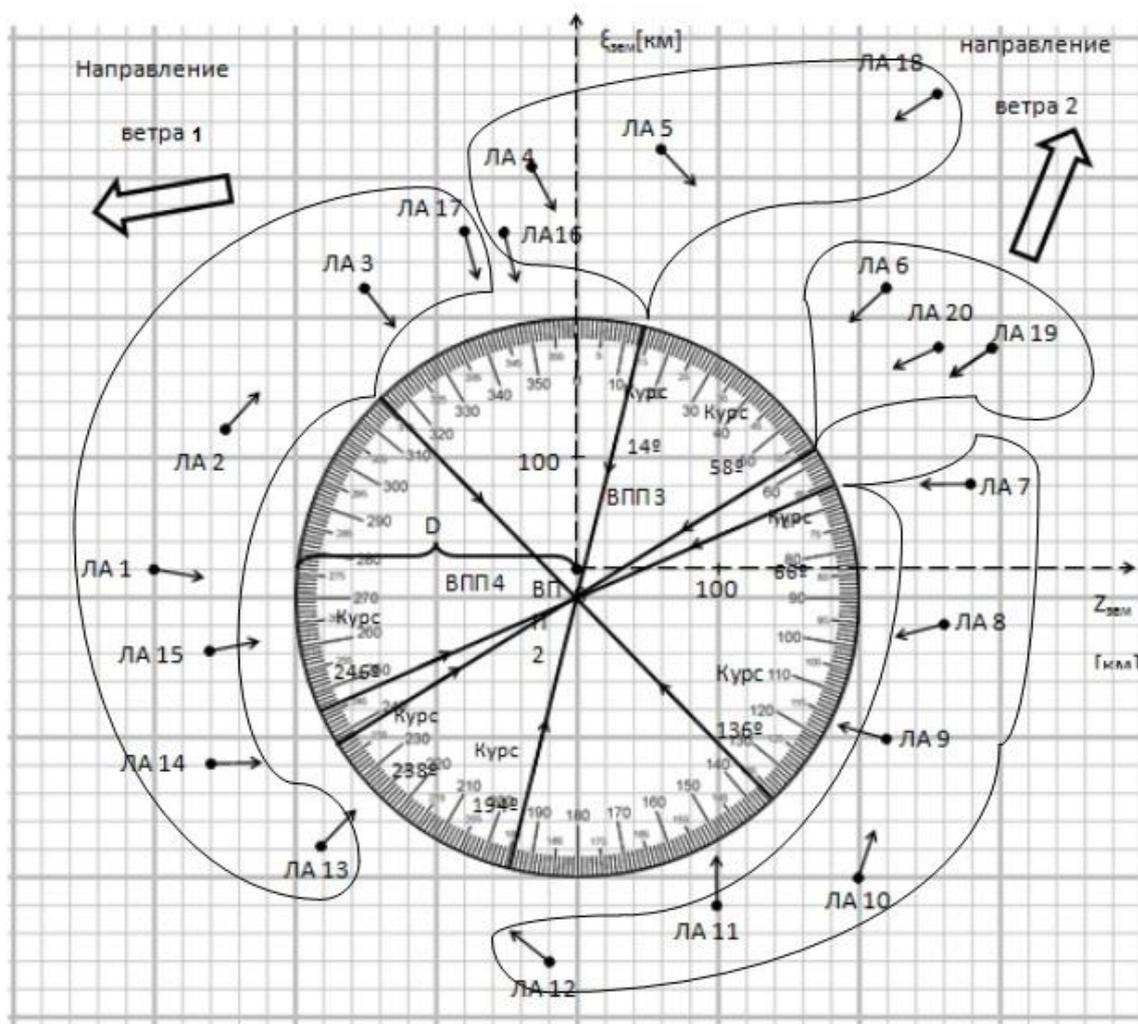


Рис 8. Картина захода на посадку для самолетов по приоритету

Таким образом, назначение приоритетов позволяет не только распределить самолеты между трассами, но и определить, какие из них сразу идут на посадку, а какие – в очередь в тромбон, чтобы потом воспользоваться окном и прилететь на тот же аэродром позднее (см. рис 8).

Также в **шестой главе** решается задача определения первоочередности приземления воздушных судов для каждой трассы. Дело в том, что судно с более высоким приоритетом может лететь дальше, чем другое судно, которое ближе к ВПП, и поэтому другое судно с более низким приоритетом должно приземляться первым.

**Седьмая глава** посвящена задаче контроля безопасности попутного движения воздушных судов на трассе. На рис.9 показана картина движения двух воздушных судов в эшелоне, характеризуемая координатами попутного движения  $x_1$  и  $l_1$ , которые определяют главный показатель – дистанцию между судами  $l_1 - x_1$ .

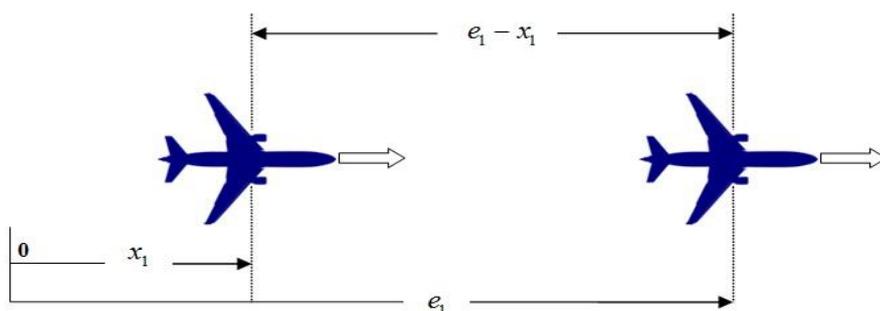


Рис.9. Картина сближения воздушных судов при попутном движении

Задача решается при следующей постановке

Дано:

1. Заданы уравнения движения сзадилетающего судна

$$\begin{cases} \dot{x}_1 = d_1 x_2 + w_1 \\ \dot{x}_2 = -a_1 x_2 + b_1 u_1 \end{cases} \quad (32)$$

2. Задано движение впередилетающего судна, двигающегося по закону :

$$\begin{cases} \dot{l}_1 = d_2 l_2 + w_2 \\ \dot{l}_2 = -a_2 l_2 + b_2 u_2 \end{cases}$$

Рассмотрим случай, когда другое впередилетающее судно движется с непредсказуемой постоянной скоростью  $w_2$ ; т. е.  $d_1 = 1, d_2 = 0, l'_2 = 0, w_1 = 0$ . Тогда решим задачу на основе следующей системы дифференциальных уравнений:

$$\begin{cases} \dot{x}_1 = x_2 \\ \dot{x}_2 = -a_1 x_2 + b_1 u_1 \\ \dot{l}_1 = w_2 \end{cases}$$

где  $x_1$  - координата попутного движения судна,  $x_2$  - попутная скорость судна,  $l_1$  - координата попутного движения другого впередилетящего судна,  $w_2$  - скорость движения другого судна.

3. Задан интегральный критерий качества  $J = \int_0^{t_k} f_0(\bar{x}, u_1, t) dt$

$$\text{где, } f_0 = r_0 \frac{u_1^2}{2} + r_1 \frac{1}{2} [(l_1 - x_1) - (D + Nw_2)]^2 + r_2 \frac{1}{2} (x_2 - w_2)^2 + M_2(x_2 - w_2) - M_1(l_1 - x_1) \quad (33)$$

- подынтегральное выражение функционала  $J$ , учитывающего штраф  $r_0$  за квадрат управления, т.е. за потраченную мощность при управлении или энергию, штраф  $r_1$  за приближение к другому судну, штраф  $r_2$  за отклонение скоростей;  $D$  - заданное безопасное расстояние между управляемым объектом и другим судном при одинаковой скорости движения;  $D + Nw_2$  - минимальная безопасная дистанция между двумя судами при заданном значении коэффициента  $N$ ;  $a_1, a_2$  - динамические коэффициенты объекта управления;  $M_1$  - коэффициент, дополнительно учитывающий отклонение траектории движения двух судов и  $M_2$  - коэффициент, дополнительно учитывающий отклонение их скоростей движения. Требуется решить прямую задачу оптимального управления, т.е. нужно найти функцию управления  $u_1 = f(x_1, x_2)$ , а затем - искомую функцию риска опасного сближения судов при их оптимальном движении. Решим поставленную задачу с помощью динамического программирования. Функция Беллмана  $\mathcal{E}$  и ее производные равны

$$\mathcal{E} = \beta_1 x_1 + \beta_2 x_2 + \beta_3 l_1 + \gamma_1 \frac{x_1^2}{2} + \gamma_2 \frac{x_2^2}{2} + \gamma_3 \frac{l_1^2}{2} + \psi_{12} x_1 x_2 + \psi_{13} x_1 l_1 + \psi_{23} x_2 l_1;$$

$$\frac{\partial \mathcal{E}}{\partial x_1} = \beta_1 + \gamma_1 x_1 + \psi_{12} x_2 + \psi_{13} l_1; \quad \frac{\partial \mathcal{E}}{\partial x_2} = \beta_2 + \gamma_2 x_2 + \psi_{12} x_1 + \psi_{23} l_1;$$

$$\frac{\partial \mathcal{E}}{\partial l_1} = \beta_3 + \gamma_3 l_1 + \psi_{13} x_1 + \psi_{23} x_2.$$

Запишем уравнение Беллмана и представим в нем функцию  $\varepsilon$  степенным полиномом:

$$-\frac{\partial \varepsilon}{\partial t} = \min_u \left\{ f_0 + \sum \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_i} x_i \right\};$$

Тогда получим

$$\begin{aligned} -\frac{\partial \varepsilon}{\partial t} = & r_0 \frac{u_1^2}{2} + r_1 \frac{[(l_1 - x_1) - (D + Nw_2)]^2}{2} + r_2 \frac{(x_2 - w_2)^2}{2} - M_1(l_1 - x_1) + \\ & + M_2(x_2 - w_2) + (\beta_1 + \gamma_1 x_1 + \psi_{12} x_2 + \psi_{13} l_1) x_2 + (\beta_2 + \gamma_2 x_2 + \psi_{12} x_1 + \psi_{23} l_1)(-a_2 x_2 + b_2 u_2) + \\ & + (\beta_3 + \gamma_3 l_1 + \psi_{13} x_1 + \psi_{23} x_2) w_2. \end{aligned} \quad (34)$$

Оптимизируя функцию Беллмана по параметру  $u_1$ , получаем таким образом:

$$f(u_1) = r_0 \frac{u_1^2}{2} + (\beta_2 + \gamma_2 x_2 + \psi_{12} x_1 + \psi_{23} l_1) b_1 u_1 \quad (35)$$

$$f'(u_1) = r_0 u_1 + (\beta_2 + \gamma_2 x_2 + \psi_{12} x_1 + \psi_{23} l_1) b_1 = 0;$$

$$\Rightarrow u_{1opt.} = -\frac{b_1}{r_0} (\beta_2 + \gamma_2 x_2 + \psi_{12} x_1 + \psi_{23} l_1) \quad (36)$$

Результат моделирования попутного движения двух судов при замедлении скорости полета впередилетящего судна представлен на рис.10 при  $D=6000$  м,  $a_1=b_1=a_2=b_2=0,5$ .

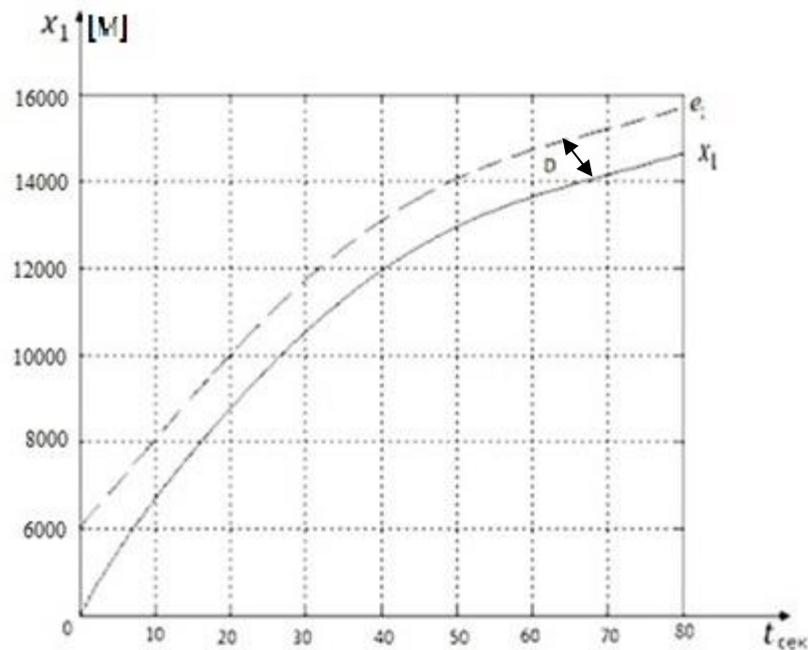


Рис.10. Результаты моделирования при попутном движении двух воздушных судов; - - - впередилетящее судно; ——— сзади летящее судно.

Видно, что оптимальное управление обеспечивает сохранение безопасной дистанции  $D$  между судами. Для нахождения функции риска опасного сближения судов воспользуемся правой частью уравнения Беллмана (34) .

Тогда подставим  $u_{1opt.}$  (36) в выражение (35) и получим:

$$f(u_{1opt.}) = r_0 \frac{b_1^2}{2r_0^2} (\beta_2 + \gamma_2 x_2 + \psi_{12} x_1 + \psi_{23} l_1)^2 - (\beta_2 + \gamma_2 x_2 + \psi_{12} x_1 + \psi_{23} l_1)^2 \frac{b_1^2}{r_0};$$

$$f(u_{1opt.}) = -\frac{b_1^2}{2r_0} (\beta_2 + \gamma_2 x_2 + \psi_{12} x_1 + \psi_{23} l_1)^2; \quad (37);$$

Подставив функцию  $f(u_{1opt.})$  (37) в уравнение Беллмана (34) и представив правую часть уравнения Беллмана степенным рядом, получаем :

$$-\frac{\partial \varepsilon}{\partial t} = F = \left[ r_1 D + r_1 N w_2 + M_1 + \psi_{13} w_2 - \frac{b_2^2}{r_0} \psi_{12} \beta_2 \right] x_1 + (-r_2 w_2 + M_2 + \beta_1 - \beta_2 a_1 + \psi_{23} w_2 - \frac{b_1^2}{r_0} \beta_2 \gamma_2) x_2 +$$

$$+ (-r_1 D - r_1 N w_2 - M_1 + \gamma_3 w_2 - \frac{b_1^2}{r_0} \beta_2 \psi_{23}) l_1 + (r_1 - \frac{b_1^2}{r_0} \psi_{12}^2) \frac{x_1^2}{2} + (r_2 + 2\psi_{12} - 2\gamma_2 a_2 - \frac{b_1^2}{r_0} \gamma_2^2) \frac{x_2^2}{2} +$$

$$+ (r_1 - \frac{b_1^2}{r_0} \psi_{23}^2) \frac{l_1^2}{2} + (\gamma_1 - a_1 \psi_{12} - \frac{b_1^2}{r_0} \gamma_1 \psi_{12}) x_1 x_2 + (-r_1 - \frac{b_1^2}{r_0} \psi_{12} \psi_{23}) x_1 l_1 +$$

$$+ (\psi_{13} - \psi_{23} a_1 - \frac{b_1^2}{r_0} \psi_{23} \gamma_2) x_2 l_1 + [\frac{r_1}{2} (D + N w_2)^2 + \frac{r_2}{2} w_2^2 + M_2 w_2 + \beta_3 w_2 - \frac{b_1^2}{r_0} \beta_2^2] \quad (38);$$

Правая часть  $F$  уравнения (38) есть степенной полином второго порядка и по определению метода динамического программирования является функцией риска. Если она превышает заданный порог  $F_0$ , то формируется сигнал тревоги, требующий увеличения дистанции между судами. В упрощенном виде эта формула может быть представлена следующим образом, удобным для технической реализации на борту при  $r_1=1, r_2=16$ , т. е  $r_2 \gg r_1$

$$F = \frac{r_1 (x_1 + D - l_1)^2}{2} + r_2 \frac{(x_2 - l_2)^2}{2} - \frac{u_1^2}{2} \quad (39)$$

Совместное использование результатов контроля безопасности и управления полетом можно реализовать в виде двухуровневой структуры, показанной на рис.11.

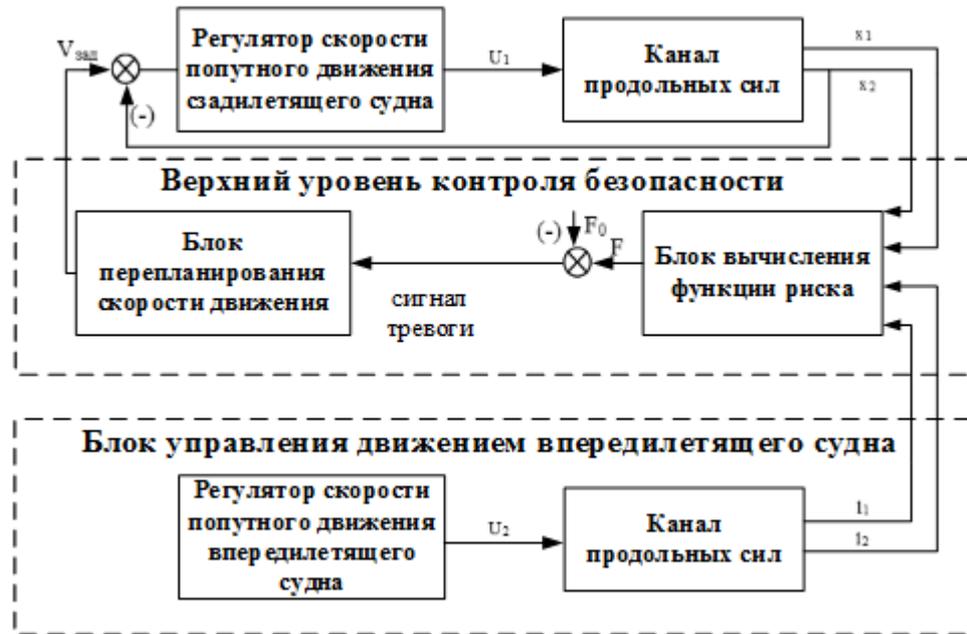


Рис.11 Двухуровневая структура принятия решений при контроле безопасности и управлении скоростью попутного движения воздушных судов

**Восьмая глава** посвящена специфической задаче расчета вероятностных характеристик обслуживания пассажиров после прилета с позиций теории массового обслуживания. При этом возможна ситуация обычного беспriorитетного обслуживания пассажиров и наоборот, когда часть пассажиров также нуждается во внеочередном обслуживании. В обоих случаях вероятность отказа в приоритетном обслуживании как в воздухе, так и на земле должна быть сведена к минимуму.

В данной работе предложена новая методика расчета **приоритетной** системы массового обслуживания (СМО), которая позволяет определить полную группу вероятностных состояний многоканальной СМО с ожиданием в очереди.

Ниже рассмотрена задача беспriorитетного и приоритетного обслуживания пассажиров в аэропорту, как это показано на рис.12, при следующей постановке.

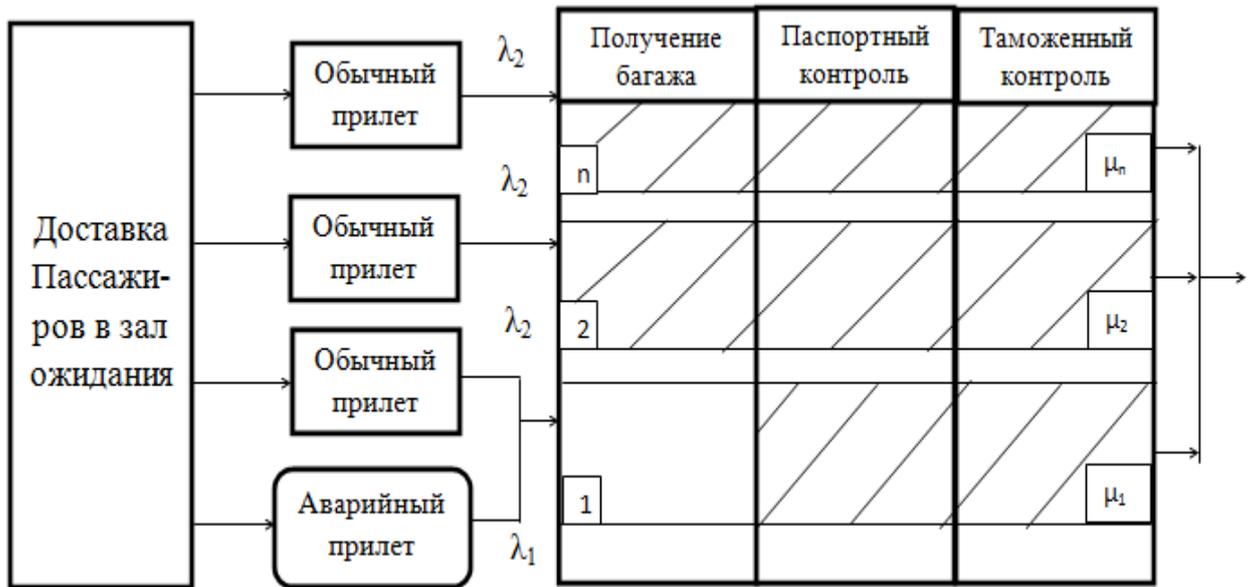


Рис.12. Схема многоканальной системы обслуживания пассажиров в аэропорту

Дано:

1. Под одной заявкой понимается группа пассажиров, прилетевшая на одном самолете.
2. Случайный поток прилетающих самолетов, как и их обслуживание в аэропорту, подчиняется закону Пуассона. Интенсивность прилета аварийных самолетов равна  $\lambda_1$ , а обычных самолетов -  $\lambda_2$ , при условии, что  $\lambda_2 \gg \lambda_1$
3. Важные заявки поступают вне очереди в первый освободившийся канал
4. В системе (либо в канале, либо в очереди) одновременно может быть только одна приоритетная заявка после аварийного прилета
5. Длина очереди  $l$  принята равной числу каналов  $n$ , что соответствует площади общего зала ожидания пассажиров, пропорциональной числу каналов обслуживания.
6. Пусть вместо привычных вероятностей  $P_0, P_i, (i=1, \dots, n); P_{n+w}(w=1, \dots, S)$  имеются следующие вероятности:

$P_0$  – вероятность того, что в системе нет никаких заявок, т.е. она свободна.

$Z_i$  – вероятность того, что  $i$  - каналов занято обслуживанием обычных заявок, приоритетных заявок нет, а заявки в очереди отсутствуют ( $i=1, \dots, n$ ).

$\zeta_i$  – вероятность того, что в одном из каналов обслуживается приоритетная заявка, в остальных  $(i-1)$  канала – обычные заявки, а заявки в очереди отсутствуют ( $i=1, \dots, n$ ).

$Z_{n+l}$  – вероятность того, что в каналах и очереди - только обычные заявки.

$\zeta_{n+l}$  - вероятность того, что в системе либо в канале, либо короткое время – в очереди длиной  $l$  имеется одна приоритетная заявка ( $l=1, \dots, n$ ).

**Требуется:**

1. Рассчитать вероятностные состояния приоритетной СМО.
2. Сравнить полученный результат с известным бесприоритетным обслуживанием и выбрать число каналов  $n$ , обеспечивающее требуемую вероятность отказа в обслуживании.

Используя общеизвестную методику расчета, можно получить новые формулы переходных вероятностей при  $n=2$ ,  $n=4$  и т. д, что позволяет при  $\nu = m$  составить следующую группу общих формул для  $n \geq 2$ , необходимую для расчета приоритетной СМО, если воспользоваться вспомогательными обозначениями А, Б, М.

$$\left. \begin{aligned}
 B &= n - 1 + \frac{p_1}{2p_2} \frac{n^{n-1} (1 + n + n^n)}{(n + 1)!} \\
 A &= \frac{(p_1 + p_2)^{n-1}}{n!} \frac{B}{B + p_1} p_1 P_0 \\
 M &= \frac{(p_1 + p_2)^{n-1}}{n!} p_1 P_0 \\
 Z_{n+l} &= \frac{n^{z_{l-1}} (1 + l + l^2)(M - A)}{(l + 1)! \prod_{m=1}^l (n - 1 + n * m)} \\
 \zeta_{n+l} &= \frac{2n^l [(l - 1 + \frac{p_1 l}{n}) A - (l - 1) M]}{\prod_{m=1}^l (n - 1 + m * n)}
 \end{aligned} \right\} \quad (40)$$

При  $l = n$  можно вычислить интересующие нас вероятности отказа в обслуживании обычных заявок  $Z_{n+n}$  и приоритетных заявок  $\zeta_{n+n}$ . Так например, зная  $P_0$ , при  $\rho_1 = 0,1$ ,  $\rho_2 = 0,7$ , можно определить окончательно значения вероятностей и установить выигрыш в отказе обслуживания важных и обычных заявок. Можно убедиться, что вероятность отказа в обслуживании пассажиров с аварийного самолета более чем в 5 раз ниже при приоритетном обслуживании, чем беспriorитетном. Значит, этим достигается максимальная безопасность обслуживания пассажиров после их прилета.

Также расчеты показывают, что при заданной вероятности отказа можно назначать требуемое число каналов. Например, если рассмотреть случай многоканального обслуживания пассажиров в аэропорту, то при требуемой вероятности  $P_{n+n} = 10^{-4}$  получается, что пассажиры после аварийного прилета будут быстро обслужены (как только освободится один из каналов) при  $n \geq 5$ . Кроме того, в этой главе сформулирована и решена задача выбора оптимального числа каналов по критерию минимальной стоимости обслуживания, учитывая при этом особый штраф за возможный отказ в обслуживании пассажиров, прилетевших на аварийном самолете.

Заключительная **девятая глава** содержит описание результатов моделирования системы на ЭВМ. Дается описание программ, реализующих сформированные алгоритмы в среде Matlab и C++. В частности, при проверке алгоритма назначения приоритетов с помощью моделирования было рассмотрено несколько случаев.

В первом случае пусть у самолетов будут разными только курсы. Сравним действия 19 и 20 самолетов. Тогда согласно рис.13.20-тый самолет при  $\zeta = 160, Z = 300, \psi = 238$  должен заходить на 246 курс, а 19-тый самолет при координатах  $\zeta = 160, Z = 260, \psi = 250$  должен заходить на тот же курс, но если  $\psi = 260$ , он должен заходить на другой 238 курс потому, что минимальный штраф самолета 20, а значит максимальный приоритет будет принадлежать ВПП-3, а самолета 19 – ВПП-4.

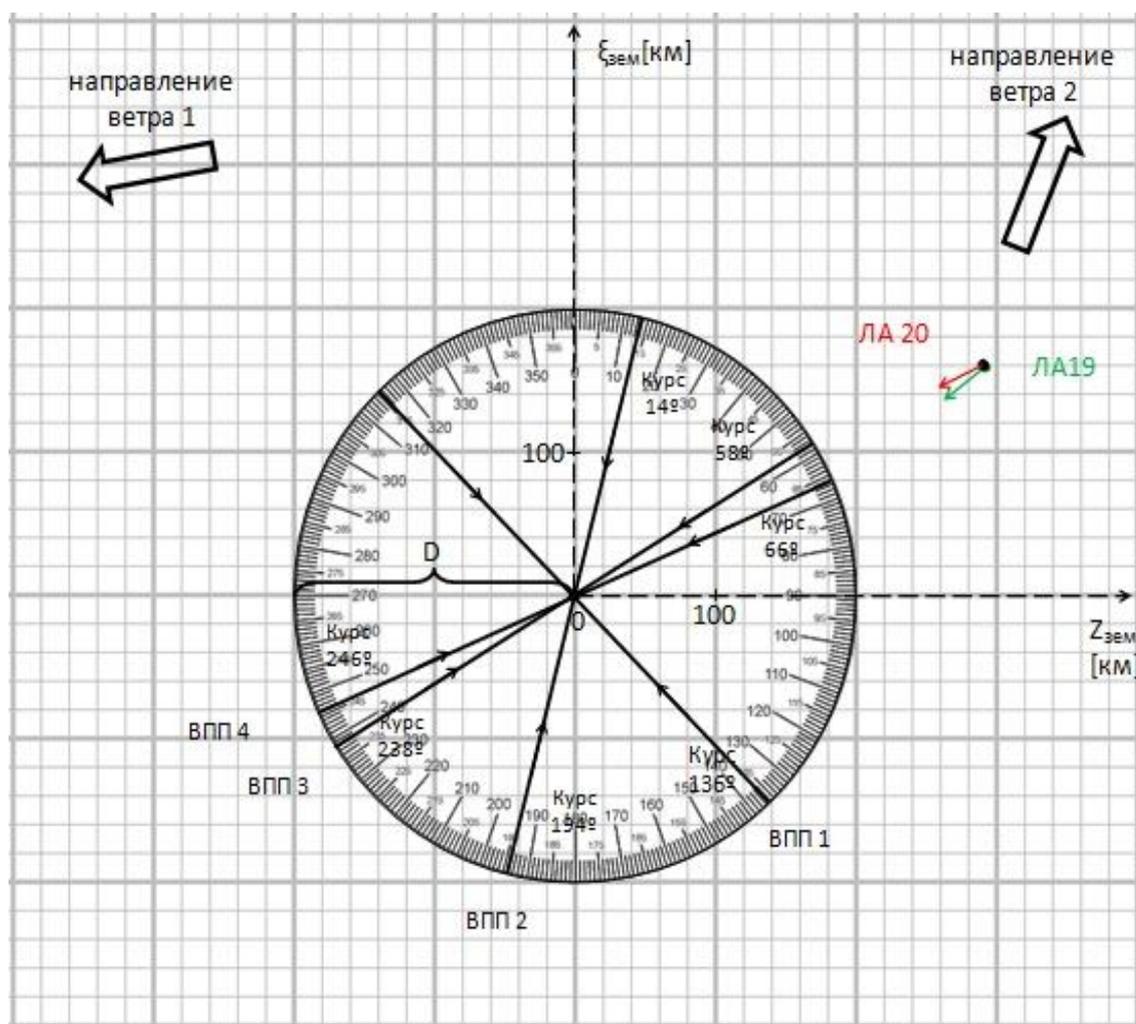


Рис .13 Заход на посадку для 19-того и 20-того самолета по приоритету

Значит, часть формулы (31), учитывающая с помощью  $y_3 = \psi - \psi_{тра}$  различные курсы – верная. Нужно подчеркнуть, что проверенные части формулы (31) в круглых скобках учитывают экономичность полета самолетов при входе в эшелон.

Перейдем теперь к проверке второй части формулы, стоящей в квадратных скобках и учитывающей безопасность полета. Этот показатель определяется двумя параметрами -  $y_2 = x_2/r$ , где  $x_2$  - дистанция между судами в эшелоне, и  $y_4 = x_4/r$ , где  $x_4$  - количество израсходованного топлива,  $\Delta V$  - общий запас топлива на дополнительные маневры.

Если доля израсходованного топлива велика, то самолет считается аварийным, и его надо сажать в первую очередь, т.е. его приоритет должен

быть очень высок. Судя по расчетам, к таким самолетам относится №18, так как его значение  $y_4 = 0.9$ . Поэтому, если этот факт не учитывать, его приоритет в списке самолетов, заходящих на ВПП-2 согласно в таблице 4, занимает шестое место, т.е его приоритет  $P = -84$ . Если этот показатель учесть, то приоритет этого самолета возрастает, его приоритет становится равным  $P = 215$ , и он займет первое место в списке и обязательно попадет в эшелон ВПП-2. Значит, на основании моделирования можно сделать вывод, что вся формула (31) реализуется в программе верно.

Также было промоделировано попутное движение двух судов на самой трассе при действии алгоритма контроля безопасности полета с помощью функции риска, равной правой части уравнения Беллмана. Моделирование системы управления попутным движением проводилось при условиях.

$$r_0 = 1, r_1 = 1, r_2 = 16, d = 1, D = 6000m, a_2 = 0.5, b_2 = 0.5, C_1 = 0$$

Результаты моделирования при попутном движении двух воздушных судов при неравномерном замедлении полета впередилетящего судна показаны на рис.14, а поведение функции риска на рис. 15. Из рисунков видно, что между судами сохраняется определенная безопасная дистанция, несмотря на незапланированное неравномерное движение впередилетящего судна. При этом в случае превышения функцией риска  $F$  порога  $F_0$  происходит координация движения судов, зато в противном случае сзади летящее судно основное время летит с постоянной скоростью без излишних перегрузок, и это время достигает 40%. Таким образом, результаты моделирования подтвердили эффективность предложенного подхода.

В заключение **девятой главы** приведены результаты внедрения разработанных алгоритмов и программ на ЭВМ. В Российской авиакомпании "Трансаэро" принят к использованию пакет программ автоматизированного

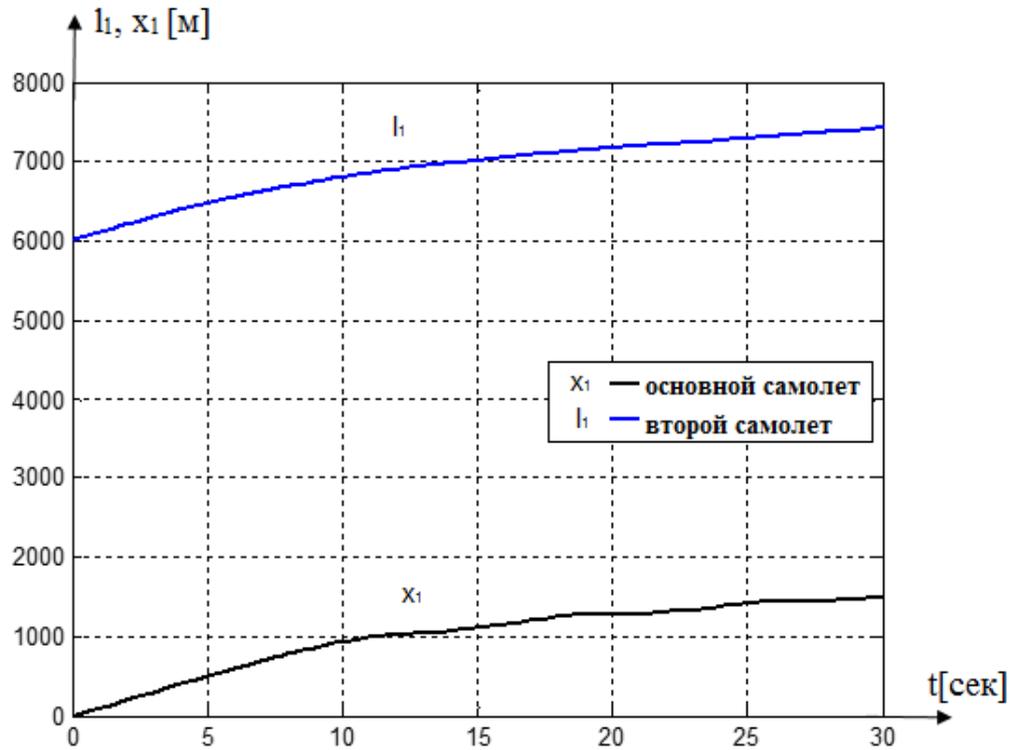


Рис.14 Траектории  $x_1$  и  $l_1$  попутного движения судов при  $P_1=2$ ,  $u_2=4$  и пороге  $F_0=10000$

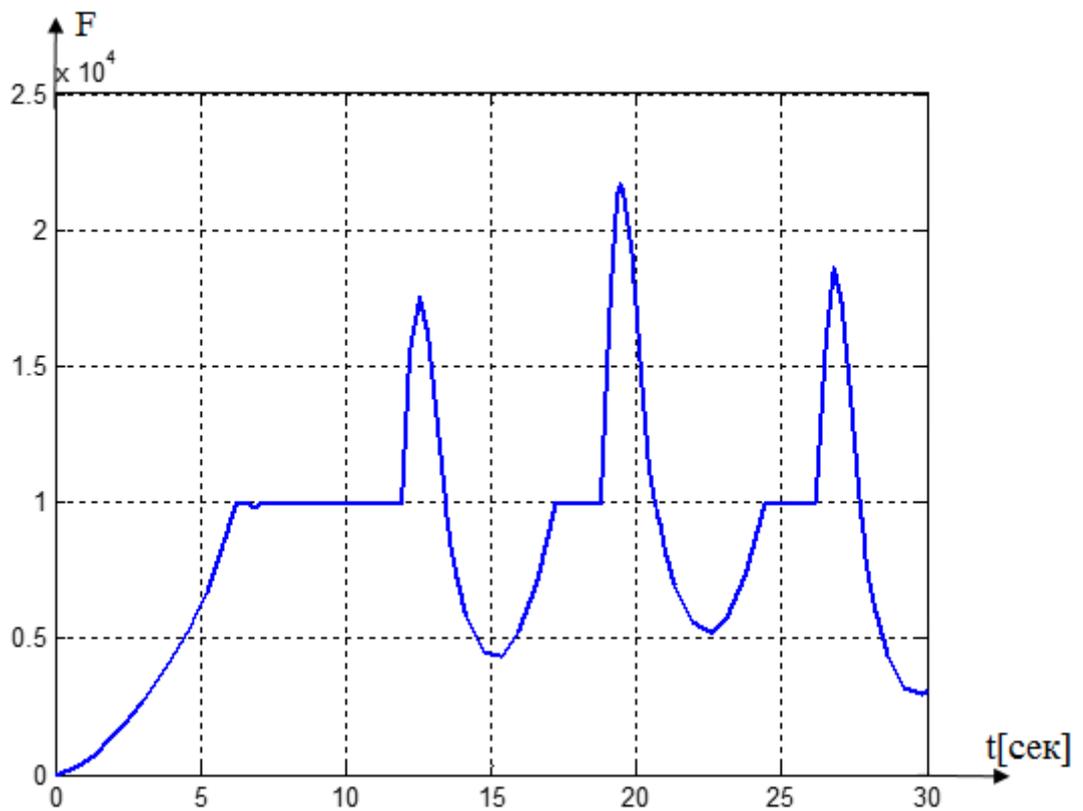


Рис.15 Поведение функции риска при  $P_1=2$ ,  $u_1=4$  и пороге  $F_0=10000$

выбора посадочных полос при изменении ветра и приоритетного распределения судов между трассами Московского аэроузла. В Республике Мьянма внедряется программа формирования списка судов, идущих на посадку в столичном аэродроме, и судов с меньшим приоритетом, отправляемых на запасной аэродром. В МГТУ ГА в его тренажерном центре подготовки авиадиспетчеров внедрен пакет программ назначения приоритетов для подлетающих к Москве судов с учетом ограниченного запаса топлива. В МАИ предложенный подход внедрен в учебный процесс кафедры 301 при магистерской подготовке по направлению "Управление и информационные технологии в технических системах".

### **Заключение**

На основании проведенных исследований можно сделать следующие выводы.

1. Предложен единый параметрический критерий экономичности и безопасности управления полета, в котором весовые коэффициенты их значимости найдены с помощью решения обратной задачи линейного программирования.
2. Сформирован алгоритм назначения динамических приоритетов для управления воздушными судами при их заходе на заданную трассу, учитывающий не только их близость к трассе, но и оставшийся запас топлива и их техническое состояние.
3. Найденные формулы приоритетного распределения судов между трассами удобны для расчетов в реальном времени и позволяют управлять потоком прилетающих судов, идущих на посадку и попадающих в очередь в соответствующий тромбон.
4. Показано, что при беспriorитетном обслуживании самолетов без учета оставшегося на борту топлива, нужная малая вероятность отказа при заходе в заданный эшелон воздушного движения требует использования тромбона значительного размера, который ограничен другими

причинами. При приоритетном обслуживании вероятность отказа и отправки на другой аэродром аварийных самолетов с малым запасом топлива в 10 раз меньше по сравнению с бесприоритетной системой обслуживания.

5. Предложен алгоритм определения первоочередности прилета в аэропорт для случайно расположенных в пространстве воздушных судов с выходом на стандартный маршрут прилета.
6. Получена объединенная двухуровневая структура контроля и управления полетом, обеспечивающая при использовании координат относительного движения судов необходимую безопасность полета в эшелоне при автоматической подсказке летчику или в диспетчерской наземной службе.
7. Получены новые формулы для вероятного состояния системы приоритетного обслуживания, которые в отличие от формул Эрланга позволяют определить отдельно вероятности отказа в бесприоритетном и приоритетном обслуживании. Показан существенный выигрыш во времени обслуживания пассажиров после их аварийного прилета.
8. Разработанные в данной работе программы на ЭВМ могут быть использованы для частичного решения проблемы загруженности диспетчеров в Московском аэроузле и других аэропортах, что подтверждается актами о внедрении.
9. Полученные результаты использованы при проведении учебного процесса на кафедре 301 МАИ по дисциплине «Эргатические системы управления» в рамках магистерской подготовки по направлению 220400 «Управление в технических системах» по программе «Управление и информационные технологии в технических системах», а также внедрены в тренажерном центре авиадиспетчерской службы в МГТУ ГА, о чем имеются акты о внедрении.

## ОСНОВНЫЕ РАБОТЫ, ОПУБЛИКОВАННОЙ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

### Публикации в изданиях, входящих в перечень ВАК

1. Горбачев Ю.В., Тин Пхон Чжо, Рыбников С.И., Степаньянц Г.А. «Назначение динамических приоритетов при обслуживании самолетов с произвольном курсом во время захода на посадку и полета в строю» г. М., Труды МАИ, № 49, 2011.
2. Лебедев Г.Н., Тин Пхон Чжо, Чан Ван Туен «Решение задачи динамического программирования при безопасном попутном движении воздушных судов» г. М. Труды МАИ, № 54, 2012.
3. Горбачев Ю.В., Лебедев Г. Н., Тин Пхон Чжо «Система приоритетного обслуживания самолетов гражданской авиации при их заходе на посадку по заданной линии пути» » г. М., Труды МАИ, № 49, 2012.
4. Лебедев Г.Н., Малыгин В.Б., Нечаев Е. Е., Тин Пхон Чжо «Использование системы приоритетного обслуживания при внедрении автоматизированного управления прилетом-вылетом в воздушном пространстве Московского аэроузла» г. М., №180(6) 2012, Научный вестник МГТУ ГА, Стр : 254-259.
5. 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.
6. Лебедев Г.Н., Тин Пхон Чжо, Зо Мин Тайк, «Система обеспечения безопасности при попутном движении воздушных или речных судов и пересечении их маршрутов» г. Тула., №7 2012, Известия Тульского государственного института, Стр : 246– 254.

7. Тин ПхонЧжо., Гасанзаде К.И., Горбачев Ю.В. «Приоритетное обслуживание самолетов при заходе на посадку и пассажиров после их прилета» г. М., Труды МАИ, № 63, 2013.
8. Лебедев Г.Н., Зо Мин Тайк, Тин Пхон Чжо, Медведев А. М., «Управление полетом пассажирских самолетов при пересечении их маршрутов во время захода на посадку» » г. М., Труды МАИ, № 63, 2013.
9. Тин Пхон Чжо «Сравнение с помощью теории массового обслуживания бесприоритетной и приоритетной систем управления заходом самолетов на посадку» » г. М., Труды МАИ, № 63, 2013.
- 10.Малыгин В.В., Тин Пхон Чжо «Задача бесприоритетного обслуживания самолётов при их попадании в тромбон во время захода на посадку» , г. М., №198(12) 2013, Научный вестник МГТУ ГА, Стр : 37-40.
- 11.Малыгин В.В., Тин Пхон Чжо, Турков А. Н., «Методика определения технологических возможностей диспетчера по управлению группой воздушных судов.», г. М., №198(12) 2013, Научный вестник МГТУ ГА, Стр: 41-44.
- 12.Тин Пхон Чжо., Малыгин В.Б., Михайлин Д. А, «Система приоритетного обслуживания при внедрении автоматизированного управления прилетом в воздушном пространстве Московского аэроузла», г. М., №198(12) 2013, Научный вестник МГТУ ГА, Стр : 45-50.
- 13.Тин Пхон Чжо, Зо Мин Тайк, Ву Суан Хыонг, «Автоматический контроль безопасности сближения двух управляемых воздушных судов при пересечении их маршрутов», г. М., №198(12) 2013, Научный Вестник МГТУ ГА, Стр: 51-59.
- 14.Тин Пхон Чжо «Автоматизированная система управления и контроля безопасности попутного и поперечного движения группы воздушных судов при заходе на посадку», г. Пенза, Вестник Пензенского государственного университета, №1 , 2014, Стр 72 - 80.
- 15.Лебедев Г.Н., Тин Пхон Чжо, Зо Мин Тайк, Дао Нгок Тхай «Автоматизированная система управления безопасном движением

наземного и воздушного транспорта при их сближении» г. Орел., ОГУ, «Фундаментальные и прикладные проблемы техники и технологии», №1 Январь-февраль (303) 2014, Стр: 109-115.

16. Тин Пхон Чжо «Автоматизация оперативного распределения воздушных судов между трассами захода на посадку в Московском аэроуле при внезапном изменении метеоусловий», г. М., № 3, 2014, Научный вестник МАИ, Стр : 128 -140.

17. Тин Пхон Чжо «Определение относительной значимости экономичности и безопасности полетов с помощью решения обратной задачи линейного программирования» г. М., Труды МАИ, №78, 2014.

#### **Публикации по теме диссертации в других изданиях**

18. Лебедев Г. Н., Тин Пхон Чжо, Зо Мин Тайк «Интегрированная система управления и контроля безопасности попутного движения воздушных или речных судов» // V Международная научно-техническая конференция «Информационные технологии в науке, образовании и производстве», 17-18 мая, 2012 г., г. Орел., ИТНОП (информационные технологии в науке, образовании и производстве. С. 25.

19. Тин Пхон Чжо «Проблема приоритетного обслуживания самолетов гражданской авиации при их заходе на посадку в воздушном пространстве Московского аэроузла» // Труды XXI международный научно-технический семинар «Современные технологии в задачах управления, автоматизации и обработки информации» 18-25 сентября, 2012 г., г. Алушта. М., МГУ. Сборник тезисов докладов, С.27.

20. Лебедев Г. Н., Тин Пхон Чжо «Система управления безопасным движением транспортных средств при их сближении»// Всероссийская научно-техническая конференция «Проблемы и решения построения систем ориентации, навигации и управления подвижными объектами» 3-5 октября 2012 г. Тула ТулГУ, С.10.

21. Тин Пхон Чжо «Управление и контроль безопасности движения самолетов при входе заданный воздушный эшелон посадки» // XXIX Международная научно-техническая конференция «Проблемы автоматизации в технических системах», 23-25 апреля, 2013 г., г. Пенза., Изд-во: ПГУ 2013г. С. 59-62.
22. Тин Пхон Чжо, Зо Мин Тайк «Проблемы обслуживания самолетов гражданской авиации при заходе на посадку и пассажиров в аэропорту после прилета при ограничений очередей» // Труды XXI международный научно-технический семинар “Современные технологии в задачах управления, автоматике и обработки информации” 18-24 сентября, 2013 г., г. Алушта .М., МГУ. Сборник тезисов докладов, С.22.
23. Тин Пхон Чжо «К вопросу о приоритетном обслуживании воздушных судов при заходе на посадку» // Труды XXIII международный научно-технический семинар “Современные технологии в задачах управления, автоматике и обработки информации” 14-20 сентября, 2014 г., г. Алушта. М., МГУ. Сборник тезисов докладов, С. 21.