



**НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ  
«ВЫСШАЯ ШКОЛА ЭКОНОМИКИ»**

**НАУЧНЫЙ ДОКЛАД**

**по результатам подготовленной научно-квалификационной работы  
(диссертации)**

**«Математическое моделирование методов регулирования воздушного  
движения с учетом недостоверности прогноза воздушной обстановки»**

**ФИО Габейдулин Рамис Хайдерович**

**Направление подготовки 09.06.01 Информатика и вычислительная  
техника**

**Профиль (направленность) программы 05.13.18 Математическое  
моделирование, численные методы и комплексы программ**

**Аспирантская школа по компьютерным наукам**

Аспирант \_\_\_\_\_/Габейдулин Р.Х.

Научный руководитель \_\_\_\_\_/Зыков С.В.

Директор Аспирантской школы

по компьютерным наукам \_\_\_\_\_/Объедков С.А.

Москва, 2019

## Содержание

1. Введение .....	3
2. Актуальность исследования.....	3
3. Цель и задачи исследования.....	5
4. Анализ степени разработанности темы исследования.....	6
5. Алгоритм регулирования потоков воздушного движения задержкой вылетов.....	10
6. Анализ ошибок прогноза времен прилета плановых данных....	13
7. Предлагаемая методология стохастической оценки загрузки секторов.....	15
8. Имитационная модель системы организации потоков.....	16
9. Методология и методы исследования.....	18
10. Основные результаты исследования и положения, выносимые на защиту.....	18
11. Апробация результатов исследования (конференции, научные публикации) .....	19
12. Список использованных источников и литературы.....	24

## **1. Введение**

Тема диссертационного исследования: «Математическое моделирование методов регулирования воздушного движения с учетом недостоверности прогноза воздушной обстановки». Исследование посвящено вопросам организации потоков воздушного движения (ВД), решению задачи задержек рейсов из-за прогнозируемой перегрузки диспетчеров управления ВД. В работе проводится анализ реализации систем в Европе, США, Российской Федерации. Проводится анализ подходов и математических моделей задачи назначения задержек. В ходе исследования предложен жадный алгоритм расчета задержек вылета, предлагающий системное решение в отличие от работающих в реальных системах алгоритмах. Проведен статистический анализ ошибок предсказания времени прилета рейсов на основе данных выполнения полетов в Российской Федерации за 2017 год. На основе анализа предложена новая методология оценки загрузки секторов УВД с учетом неопределенности (за счет ошибок в прогнозировании времени прилета каждого конкретного рейса). Данная методология может быть внедрена в любую современную систему и повысить качество принимаемых решений. В ходе диссертационного исследования была создана имитационная математическая модель организации потоков ВД, задаче которой является оценка загрузки секторов УВД и расчет задержек вылетов. Данная модель была внедрена в состав системы распределенного имитационного моделирования системы управления воздушным движением «КИС УВД» (разрабатываемой в ФГУП «ГосНИИАС»).

## **2. Актуальность исследования**

При выполнении полетов в соответствии с заявками пользователей (авиакомпаний, отдельных авиаперевозчиков и др.) возникают проблемы, связанные с превышением интенсивности воздушного движения над возможностями системы организации воздушного движения по их

безопасному и эффективному обслуживанию, прежде всего связанные с перегрузкой диспетчера.

Очевидный выход: имея заявки пользователей с маршрутами движения, спрогнозировать загрузку диспетчеров и заранее внести изменения в порядок выполнения полетов и условия их выполнения. Это является задачей организации и планирования потоков воздушного движения (ОПВД, ATFM – Air Traffic Flow Management).

В настоящее время многими научными организациями, прежде всего, США и Западной Европы, проводятся интенсивные исследования в области организации потоков ВД, разрабатываются алгоритмы решения задач планирования и управления потоками ВД. Учет неопределённости в прогнозах и движение от детерминистских к стохастическим системам ОПВД - важная часть научно-исследовательских программ NextGen (США) и SESAR (Евросоюз). Доклады с результатами исследований, с алгоритмами управления составляют значительную часть представляемых на ежегодно проводящейся в США конференции «AIAA Guidance, Navigation, and Control Conference». Этим вопросам полностью посвящен ежегодный международный семинар «ATM R&D Seminar». Интенсивность исследований и число публикаций, ввиду сложности проблемы и многообразия возможных постановок, не снижается год от года. Наблюдается увеличение глубины исследований и их большая адаптация к реальным условиям, требованиям и ограничениям. В последние годы особое внимание уделяется вопросам учета неопределенности при прогнозировании воздушного движения. Оптимизация потоков воздушного движения с целью повышения безопасности, уменьшения издержек авиакомпаний и пассажиров, уменьшения негативного влияния на окружающую среду, безусловно, является актуальным вопросом в научном мире.

В мире существуют системы организации потоков воздушного движения, работающие в режиме реального времени уже много лет, самые известные – европейская система ETFMS с алгоритмом CASA (Computer

Assisted Slot Allocation) и система ОПВД в США с алгоритмом RBS. В этих системах задачи решаются упрощенно, используется принцип «Первым пришёл – Первым обслужен», назначаются неоптимальные меры регулирования, основанные на предположении о достоверности прогноза воздушного движения, такие меры зачастую ведут к дополнительным издержкам авиакомпаний, увеличению негативного влияния на окружающую среду.

К сожалению, в Российской Федерации в полном объёме регулирование потоков ВД не внедрено. Связано это с меньшей интенсивностью потоков и общим состоянием планирования ВД, часто проблемы перекладываются на службу управления воздушным движением (УВД). Функционирующая автоматизированная система планирования потоков ВД [2] подготавливает данные для анализа, прогнозирует перегрузку, выявляет проблемные области, однако не дает возможности повлиять на ситуацию.

В рамках данной работы была поставлена задача предложить новые подходы к решению задачи регулирования потоков ВД, принимая во внимание недостоверность прогнозов загрузки секторов УВД.

### **3. Цель и задачи исследования.**

Целью исследования является разработка новых подходов регулирования потоков воздушного движения задержками вылетов с учетом неопределенности прогноза воздушной обстановки.

Для достижения цели в рамках работы были сформулированы следующие задачи:

1. анализ мирового опыта, современных средств и алгоритмов планирования и регулирования потоков воздушного движения;
2. анализ существующих математических моделей для решения задачи задержек вылетов в целях снижения загруженности диспетчеров УВД;

3. сбор данных по точности выполнения плановых времен пролета точек в планах полетов и статистический анализ неопределенности в прогнозе воздушной обстановки;
4. разработка методологии оценки уровней загрузки секторов с учетом неопределенности;
5. разработка алгоритма вычисления задержек вылетов, решающего задачу системно: для всех перегруженных секторов одновременно и с учетом возможных ошибок прогноза времени прилета;
6. разработка имитационной модели системы организации потоков воздушного движения.

Предложенные в работе подходы могут лечь в основу новой технологии работы системы организации потоков воздушного движения в Российской Федерации.

#### **4. Анализ степени разработанности темы исследования.**

В связи с неуклонным ростом воздушного движения задаче регулирования потоков ВД уделяется всё больше внимания как в авиационном сообществе, так и в научном мире.

Принципы «первым прибыл - первым обслужен» и «равный доступ к воздушному пространству» традиционно играют важную роль в процессах ОрВД. Со временем в целях оптимизации процессов придётся включить и постепенно включаются новые принципы, основанные на оптимизационных алгоритмах, нарушающих порядок, но снижающих издержки. Одновременно с оптимизационными методами рассматривается концепция совместного принятия решений, при решении задачи используются предпочтения главных потребителей – авиакомпаний, поэтому применяются широко уже и методы теории игр.

Критически важными требованиями к алгоритмам для работы в реальных системах организации потоков являются быстроедействие, работа в

реальном масштабе времени, обработка больших объемов входных данных, учет всех необходимых в повседневной работе ограничений.

Развитие технологий и математического аппарата привели к развитию различных стратегий нахождения оптимальных (или близких к оптимальным) решений в задаче организации потоков.

Существует большое, без преувеличения, количество научных публикаций, посвященных задаче регулирования потоков воздушных судов. С начала 1990-х годов по текущее время ежегодно публикуются десятки исследований.

Большинство ранних работ посвящены простым моделям, в которых не принимается в учет ограниченность пропускной способности секторов. Это связано во многом с тем, что проблему начали исследовать в США, где проблемы и на настоящий момент связаны, в основном, с перегрузкой аэропортов. По мере развития появлялись модели, учитывающие не только ограниченную пропускную способность секторов, но и много дополнительных ограничений.

Надо отметить, что подавляющее большинство моделей, представленных в литературе, сформулированы в виде задачи 0-1 целочисленного программирования. К задаче применялись и другие подходы и методы оптимизации, есть много примеров применения методов стохастической оптимизации, программирования в ограничениях, динамического программирования.

Одни из самых полных обзоров работ опубликованы в работах [4] и [5], коротко осветим важные вехи и направления. Спектр работ необычайно широк: от простых моделей для регулирования расписания прилетов для одного аэропорта до крупномасштабных моделей аэронавигационной системы государства, от простых эвристических моделей до точных решений. Предложенные модели можно классифицировать по-разному. Например, модели могут быть детерминистскими или стохастическими в зависимости от того, учитывается ли в модели неопределённость (в большинстве работ

неопределенность связана с предсказанием пропускной способности, она может меняться из-за плохих погодных условий). В детерминистских моделях предполагается, что значение пропускной способности секторов и аэропортов остается неизменным. В стохастических моделях задаются различные сценарии изменения пропускной способности, они формируют дерево сценариев, каждому сценарию соответствует своя вероятность [6], это позволяет свести стохастическую задачу к эквивалентной детерминистской. Также модели могут быть статическими или динамическими в зависимости от того, пересчитывается ли решение динамически с учетом новой поступившей информации. Динамические модели могут решать задачу частично, используя актуальную текущую информацию, статические модели предполагают решение в один этап. Задача регулирования может быть также отнесена к одной из групп в зависимости от типа решаемой задачи:

- 1) Задача расчёта задержек рейсов на земле для одного аэропорта (Single-Airport Ground-Holding Problem – SAGHP) [7-14]. Это самая простая версия проблемы: решается задача назначения задержек вылета рейсам, прилетающим в один заданный аэропорт, при этом предполагается, что пропускная способность остальных аэропортов и секторов бесконечна.
- 2) Задача расчёта задержек рейсов на земле для множества аэропортов (Multi-Airport Ground-Holding Problem – MAGHP) [15-21]. Эта версия задачи также имеет дело с превышением пропускной способности аэропортов, но в учет принимается множество аэропортов и «связанных» рейсов (выполняемых последовательно на одном воздушном судне, задержка первого рейса может повлиять на вылет второго). Предполагается, что пропускная способность секторов бесконечна. Несмотря на это допущение, модели вполне могли быть применены в воздушном пространстве США, где проблемы с пропускной способностью возникают в большей степени в аэропортах, чем в секторах.
- 3) Задача расчёта задержек рейсов на земле для аэропортов и секторов (Air Traffic Flow Management Problem – ATFMP)[21-27]. Эта версия



предназначена для решения более сложных проблем, возникающих в реальных системах. Если прогнозируется превышение пропускной способности какого-либо сектора или аэропорта, назначаются наземные задержки рейсам, прилетающим в перегруженный сектора или аэропорт в течение прогнозируемого времени перегрузки. Наиболее полно формализовал и описал задачу, сформулировал основные проблемы и положения задачи АТФМР Одони в своей работе 1994 года [22]. Одной из самых значимых работ с точки зрения полученных результатов и по вкладу в последующие работы стала публикация Бертсимаса и Сток в 1998 [23], в которой была предложена детерминистская модель 0-1 целочисленного программирования.

- 4) Задача расчёта задержек рейсов на земле и изменения их маршрутов для разгрузки аэропортов и секторов (Air Traffic Flow Management Rerouting Problem – АТФМРР) [28-34]. Модели позволяют решать проблему с перегрузкой аэропортов и секторов не только назначением наземных задержек, но и изменением маршрутов полетов.

Стоит отметить, что оптимизационные модели и алгоритмы, реализующие точные решения, на текущий момент нигде не внедрены. Возможно, оптимальные решения могут быть не всегда понятны и объяснимы пользователям (и диспетчерам, и авиакомпаниям), проблемой также может быть скорость работы при большом объеме входных данных. Эвристики с простыми и понятными правилами очень популярны, но полученное решение, разумеется, может быть далеко от оптимального. Однако предметная область позволяет применять приближенные решения.

В большей части опубликованных работ [40-51], посвященных учету неопределенности, применяется одна и та же идея моделирования неопределённости: сначала генерируются сценарии (дерево сценариев и множества значений случайных параметров для стохастической и робастной оптимизации соответственно) реализации случайных параметров, затем следует этап оптимизации, использующей сценарии в качестве ограничений.

Такая постановка задачи позволяет свести задачу к эквивалентной детерминистской модели. В стохастической постановке предложенное решение должно быть таким, чтобы учитывались все сценарии, и оно не должно зависеть только от одного конкретного сценария.

Работ, посвященных анализу неопределенности, возникающих из-за точности выполнения планов полетов, гораздо меньше. Среди них можно выделить работу [39], в которой анализируется неточность определения перегрузок в секторах и аэропортах из-за ранних прилетов или прилетов с задержкой, в работе авторы предлагают учитывать два соседних 15-минутных интервала, когда оценивается загрузка в интересующий интервал времени (речь идет о правилах определения загрузки секторов и аэропортов в системе ОПВД США).

Данное диссертационное исследование посвящено именно такому источнику ошибок, когда рейсы прилетают в сектор не по плану, а с задержкой или опережением.

## **5. Алгоритм регулирования потоков воздушного движения задержкой вылетов**

В данном подразделе кратко представлен жадный алгоритм, предлагаемый для регулирования потоков в Российской Федерации, его облик во многом сформирован под влиянием существующих технических решений [2-3] в Госкорпорации по ОрВД (провайдер аэронавигационных услуг в РФ). Задача алгоритма - поиск системного решения, учитывающего ситуацию во всех перегруженных объектах. Предложенную математическую модель проблемы можно отнести к динамической (предполагается, что решение будет постоянно пересчитываться с учетом актуальных данных, а сообщения о задержках будут отправляться рейсам за некоторое достаточное время до их вылета), и к АТФМР (учитываются все аэропорты и все сектора РФ, меры регулирования – наземные задержки, ремаршрутизация не применяется). Предполагается, что задерживать можно только рейсы, ещё не вылетевшие из

аэропортов РФ. Маршрут каждого рейса задается как последовательность пролетаемых секторов между аэропортами вылета и прилета.

Предполагается, что алгоритм будет запускаться с заданной периодичностью и решать задачу на заданной глубине прогноза  $\Delta_{depth}$ , используя доступные на текущий момент возможности. За определенное время до вылета  $\Delta_{send}$  рейсам будут отправляться сообщения о назначенных задержках, при этом алгоритм будет пытаться при каждом запуске снизить эту назначенную задержку, ухудшение запрещено. Суть алгоритма состоит в пошаговом последовательном снижении уровня перегрузки за счет минимально возможных задержек доступных на текущий момент рейсов. Предлагаемый полиномиальный алгоритм не всегда приводит к глобальному минимуму критерия, однако алгоритм работает устойчиво и на основе текущей известной информации последовательно гарантированно устраняет перегрузку. Принимаемые решения по задержкам системны - локальные изменения должны, по крайней мере, не ухудшить ситуацию в других элементах системы. Ниже представлен псевдокод предлагаемого алгоритма.

Алгоритм	
1.	Актуализация данных (планы полетов, пропускные способности элементов);
2.	Расчет загрузки элементов ВП на глубину $\Delta_{depth}$ ;
3.	Вызов процедуры «Регулирование потоков задержкой вылетов»;
4.	Цикл по списку рейсов, предлагаемых к коррекции:
5.	Если для текущего рейса в списке время до вылета меньше $\Delta_{send}$ , то отправить авиакомпании и аэродрому сообщение о задержке этого рейса;
6.	Удалить рейс из списка;
7.	Выход

Псевдокод процедуры «Регулирование потоков задержкой вылета»:

Регулирование потоков задержкой вылетов	
1.	Подготовка данных, создание списка проблем $Reg$ , обнуление списка неразрешимых проблем $Unsolv$ , обнуление списка предлагаемых решений $Result$ ;
2.	Пока список проблем $Reg \setminus Unsolv$ не пуст:
3.	Выбор проблемы с максимальной перегрузкой $(s, h, Exc_h^s) = \max_{Exc_h^s}(Reg \setminus Unsolv)$
4.	Формирование списка рейсов, доступных для регулирования, $F_h^s \cap F^R$ , подготовка массива текущих решений $Res$ ;

---

5.	Цикл по списку рейсов из $F_h^S \cap F^R$ :
6.	Вызов процедуры «Расчет задержки вылета» для текущего рейса $f$ и проблемы $(s, h, Exc_h^S)$ ;
7.	Записать вариант в массив $Res$ и удалить рейс из списка;
8.	Если список вариантов $Res$ не пуст, то
9.	Выбрать рейс с минимальной ценой задержки;
10.	Записать решение в массив $Result$ ;
11.	Скорректировать проблему $(s, h, Exc_h^S)$ в списке $Reg$ ;
12.	Иначе занести проблему $(s, h, Exc_h^S)$ в список временно неразрешимых $Unsolv$ ;
13.	Формирование списка рейсов $Result$ с рекомендуемыми задержками;
14.	Выход

---

### Процедура «Расчет задержки вылета» для текущего рейса:

---

Расчет задержки вылета	
1.	Если рейсу уже было отправлено сообщение о задержке, то
2.	Сохранение назначенной задержку в $\Delta t_{f_{утв}}$ ;
3.	Восстановление исходного плана полета с $\Delta t_f = 0$ ;
4.	Переход к шагу 9;
5.	Время входа $t_{СТО_f^S}$ в текущий перегруженный элемент ВП $(s, h, Exc_h^S)$ сдвигается в начало одного из следующих интервалов $h^*$ так, чтобы после сдвига перегрузка в этом интервале $h^*$ не стала больше перегрузки в текущем интервале $h : Exc_{h^*}^S \leq Exc_h^S$ , текущая задержка равна $\Delta t_{f_{тек}} = h_{begin}^* - t_{СТО_f^S}$ ;
6.	Подсчет полной задержки рейса $f : \Delta t_f = \Delta t_f + \Delta t_{f_{тек}}$ ;
7.	Если нарушается ограничение на максимальную задержку $\Delta t_f < \Delta t_{max}$ ИЛИ нарушается ограничение на неувеличение уже назначенной задержки $\Delta t_f > \Delta t_{f_{утв}}$ , то
8.	Переход к шагу 15, завершение работы;
9.	Пересчет загрузки элементов ВП по маршруту рейса $f$ с учетом изменений (с учетом $\Delta t_f$ );
10.	Поиск по маршруту $Path(f)$ на предмет нарушения условия неувеличения перегрузки в результате изменений: $Exc_j^{P(f,i)} \leq Exc_h^S, \forall j \in T, i = \overline{0, N_f}$ ;
11.	Если такой элемент $(s', h', Exc_{h'}^S)$ найден, то
12.	Этот элемент становится текущим: $s = s', h = h', Exc_h^S = Exc_{h'}^S$ ;
13.	Переход к шагу 5;
14.	Добавить рейс $f$ в список регулируемых и запомнить значение полной задержки $\Delta t_f$ ;
15.	Выход

---

Алгоритм продемонстрировал устойчивую работу в рамках работы в составе имитационной модели в режиме реального времени. Предложенный

алгоритм по сравнению с CASA [35] и RBS[37] обладает следующими преимуществами: 1) принимаемые решения о задержках системны - локальные изменения должны, по крайней мере, не ухудшить ситуацию в других элементах системы; 2) меньшее количество рейсов подвергаются регулированию; 3) меньше суммарная задержка всех рейсов; 4) в отличие от алгоритмов CASA и RBS есть возможность исключать рейсы из регулирования, не применяя к ним задержки.

## **6. Анализ ошибок прогноза времен прилета плановых данных**

Перед выполнением каждого полета в верхнем воздушном пространстве авиакомпания (командир воздушного судна в общем случае) обязана подать план полета в международном формате FPL (Doc4444). В Главном Центре Организации воздушного движения в Москве при помощи развернутой автоматизированной системы планирования воздушного движения на основе поданных планов и заложенной математической модели построения траектории [2] строится прогноз времени пролета каждой точки по плану. Т.е. для каждого полета рассчитываются плановое время отправления (так называемое Estimated Off Block Time EOBТ, оно подается в заявке FPL), плановое время взлета ETOT (Estimated Take Off Time), плановые времена пролета точек по маршруту ETO (Estimated Time Over), плановое время посадки ELDT (Estimated Landing Time) и плановое время прибытия EIBТ (Estimated In-Block Time) . На основе этих данных производится плановый расчет загрузки секторов управления ВД, аэропортов, выявляются потенциальные проблемы с перегрузкой [2].

В соответствии с действующими нормативными актами обязательно фиксируются такие фактические времена, как: фактическое время отрыва от ВПП – ATOT (Actual Take-Off Time), фактическое время посадки – ALDT (Actual landing time), а также фактические времена пролета ATO (Actual Time Over) некоторых точек по маршруту, а именно пролет государственной

границы. Эти данные отправляются телеграммами в том числе и в Главный центр, где и производится анализ интегральной загрузки.

Исходя из имеющихся фактических данных о временах взлета, посадки, пролета государственной границы, ставилась задача оценить, как выглядит эмпирический закон распределения ошибки прогноза времен пролета точек по маршруту.

На основе модели распределения ошибки для каждого рейса ставится задача оценить интегральную загрузку секторов. Допускается, что ошибка в прогнозе времени пролета государственной границы распределена так же, как ошибка в прогнозе времени пролета любой другой точки внутри воздушного пространства РФ.

В данном анализе не учитываются данные о фактических метеорологических условиях, которые могли влиять на выполнение полетов, это является одним из слабых мест проводимого анализа. Интуитивно понятно, что на точность выполнения полета влияют сила и направление ветров по маршруту движения, прочие погодные условия (грозовые облака, в первую очередь) влияют только на этапы взлета и посадки поскольку имеют ограничения по высоте образования. К сожалению, нет возможности собрать фактические данные по силе и направлению ветров во всем воздушном пространстве за длительный период. Такие данные собираются и анализируются бортовыми компьютерами только во время выполнения полета на самих воздушных судах, на земле такие данные не аккумулируются.

В рамках данной работы были собраны и проанализированы данные о выполнении полетов во всем воздушном пространстве Российской Федерации за 2017 год (объем данных – 439015 уникальных записей). Источником являются планы полетов, поданных авиакомпаниями в Главный центр Организации Воздушного Движения РФ, а также телеграммы ФЛИ, ДЕП и АРР. Данные были собраны в рамках совместных работ по развитию автоматизированной системы планирования потоков воздушного движения [2].

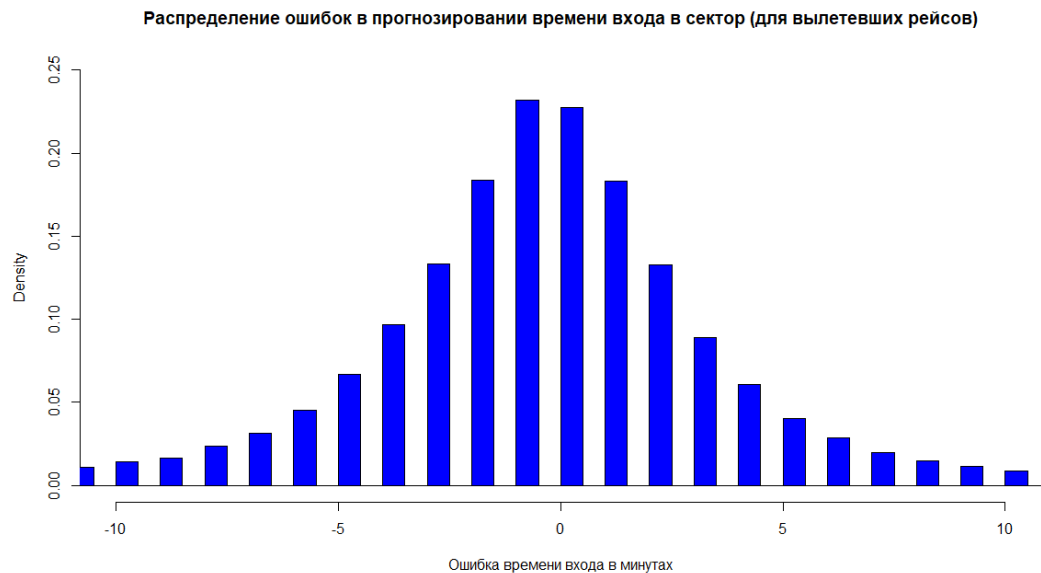


Рисунок 1. Распределение ошибок прогноза времени входа в сектор.

Проведенная в исследовании проверка статистических критериев о нормальности распределения показала, что распределение ошибки времени влета в сектор может быть смоделировано нормальным законом. Этот факт использовался далее при построении имитационной модели ОПВД.

## **7. Предлагаемая методология стохастической оценки загрузки секторов**

В рамках исследования предлагается методология, которая позволит учесть неопределенность в прогнозе загрузки секторов. Идея заключается в стохастической оценке загрузки за заданный промежуток времени через характеристики ошибки в прогнозе времени прилета для индивидуальных рейсов.

Для этого:

1) на основе фактических данных за длительный период времени проводится анализ ошибок в прогнозе времени прилета для индивидуальных рейсов и строится эмпирический закон распределения ошибки (или моделируется законом распределения);

2) детерминистский прогноз времен прилета и полученный закон распределения ошибки используются для вывода вероятности, что конкретный рейс прилетит в сектор в течение заданного промежутка времени/

Рейс, который должен прилететь в сектор по плану во время  $x$ , может попасть в интервал  $[b;e]$ , если ошибка прогноза будет лежать в интервале  $[x - b; x - e]$ . Используя эмпирический закон распределения (или его аппроксимацию), получим вероятность прилета  $r$ -ого рейса в  $i$ -ый сектор;

$$P(t_i^r \in [b,e]) = CDF(x - b) - CDF(x - e), \text{ где}$$

$[b,e]$  – заданный временной интервал;

$x$  – время прилета по плану;

$t_i^r$  – время прилета.

3) далее из совокупности вероятностей множества рейсов выводится стохастический прогноз загрузки сектора в заданный интервал, включая математическое ожидание количества рейсов и доверительный интервал такой оценки. Например, математическое ожидание загрузки  $i$ -ого сектора в интервал  $[b;e]$  рассчитывается как:

$$МОЗ_{i[b,e]} = \sum P(t_i^r \in [b,e]), \text{ где}$$

$[b,e]$  – заданный временной интервал;

$P(t_i^r \in [b,e])$  – вероятность входа  $r$ -ого рейса в  $i$ -ый сектор в интервал  $[b;e]$ .

## 8. Имитационная модель системы организации потоков

Разработанная имитационная модель с алгоритмом регулирования потоков была внедрена в состав стенда распределенного имитационного моделирования системы организации потоков воздушного движения КИС УВД [52], разрабатываемого в Научно-Исследовательском Институте Авиационных Систем для проведения исследований в поддержку перспективных авиационных решений.



Разработанная имитационная модель входит в состав АРМ Системы Централизованного Планирования полетов (АРМ СЦП). Под АРМ СЦП понимается программно-аппаратный комплекс в составе стенда КИС УВД[52], с помощью которого имитируются процессы централизованного планирования воздушного движения и их взаимодействие с другими участниками планирования и управления воздушного движения.

Назначение макета СЦП – моделирование двух главных функций централизованного планирования:

- регулирование потоков ВД;
- обеспечение всех участников моделирования ВД актуальной плановой информацией.

Моделирование работы центра планирования является автоматизированным, т.е. моделируются как функции автоматически выполняемых расчетов, так и функции работы диспетчеров планирования на специально для этого предназначенном АРМ СЦП в составе стенда.

В состав АРМ СЦП включено функциональное программное обеспечение (ФПО), обеспечивающее работу оператора, который выполняет реализуемые в составе стенда КИС УВД функции, имитирующие влияние и роль системы планирования на процессы моделирования управления и выполнение полетов. ФПО включает средства ЧМИ оператора, интеллектуальные средства поддержки диспетчера для контроля и принятия решения, а также средства, обеспечивающие информационное взаимодействие с другими участниками. Пример пользовательского интерфейса приведен на рисунке ниже:

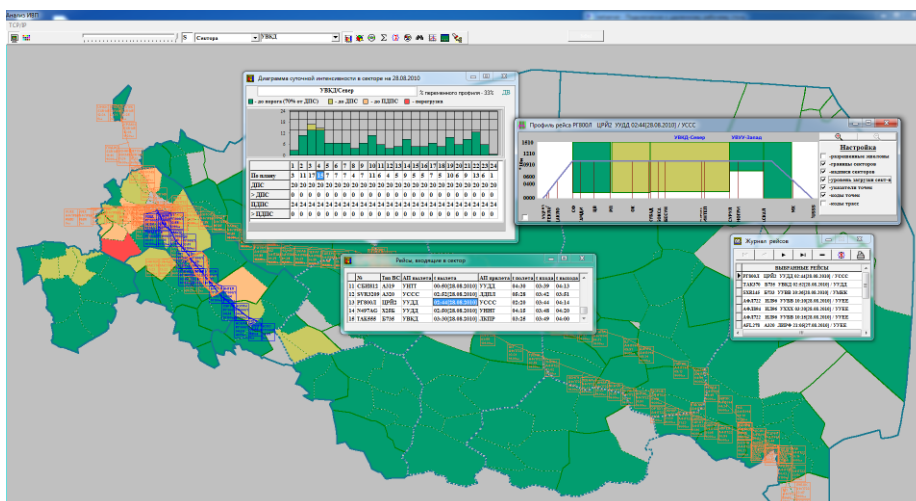


Рисунок 2. Пример пользовательского интерфейса АРМ СЦП

## 9. Методология и методы исследования.

При выполнении работы использовались методы теории оптимизации, статистического анализа, теории алгоритмов и сложности, методы имитационного математического моделирования.

## 10. Основные результаты исследования и положения, выносимые на защиту

На защиту выносятся:

- Аналитический обзор мирового опыта, современных средств и алгоритмов планирования и регулирования потоков воздушного движения;
- Результаты статистического анализа реальных плановых данных полетов над территорией Российской Федерации. Полученные результаты анализа данных могут быть использованы в дальнейшем для проведения имитационного моделирования процессов управления воздушным движением. Выявлен эмпирический закон распределения ошибок прогноза времени пролета границ секторов, предложена аппроксимация нормальным законом с выявленными параметрами.

- Методология оценки уровней загрузки секторов на основе данных о плановых временах прилета и данных об ошибках прогнозов времени прилетов по рейсам;
- Алгоритм вычисления задержек вылетов, решающего задачу системно: для всех перегруженных секторов одновременно и с учетом возможных ошибок прогноза времени прилета;
- Имитационная модель системы организации потоков воздушного движения.

## **11. Апробация результатов исследования (конференции, научные публикации)**

### **11.1. Внедрение результатов работы**

Разработанная имитационная модель с алгоритмом регулирования потоков была внедрена в состав стенда распределенного имитационного моделирования системы организации потоков воздушного движения КИС УВД [52], разрабатываемого в Научно-Исследовательском Институте Авиационных Систем для проведения исследований в поддержку перспективных авиационных решений.



Рисунок 3. Схема компонентов стенда КИС УВД

## 11.2. Список публикаций в рецензируемых журналах

1. Stand-loop simulation of Air Traffic control systems, Proceedings of Digital Avionics Systems Conference (DASC), 2015 IEEE/AIAA 34th. IEEE, 2015. P. 1F5-1-1F5-11

2. Габейдулин Р.Х., Горячев Д.И., Зубкова И.Ф. Алгоритмическое и программное обеспечение автоматизированной системы планирования использования воздушного пространства в ГЦ ЕС ОрВД. Научный Вестник МГТУ ГА. Серия Прикладная математика. Информатика. 2010, № 159, 121-127 с.

3. Габейдулин Р.Х., Горячев Д.И., Зубкова И.Ф., Мучинский А.В. Реализация дистанционной функции анализа данных по использованию воздушного пространства. Научный Вестник МГТУ ГА. Серия Прикладная математика. Информатика. 2012, № 184, 100-107 с.

4. Габейдулин Р.Х., Вересов К.А., Сикачев В.Ю., Скавинская Д.В., Канадин В.Н. Комплексный исследовательский стенд полунатурного имитационного моделирования систем управления воздушным движением.

Труды ГосНИИАС. Серия: Вопросы авионики. ISSN: 2411-1902 №1(34), 2018, С 3-22

5. Габейдулин Р.Х. Задача динамического регулирования потоков воздушного движения задержками вылетов воздушных судов. Труды ГосНИИАС. Серия: Вопросы авионики. ISSN: 2411-1902 №2(35), 2018, С. 39-53

### **11.3. Список публикаций в трудах конференций**

1. Габейдулин Р.Х., Имитационная модель процесса регулирования потока воздушного движения назначением слотов вылета. Сборник трудов Всероссийской научно-технической конференции «Навигация, наведение и управление летательными аппаратами». Тезисы докладов. ООО Издательство «Научтехлитиздат», 2012. – 246-248 с"

2. Габейдулин Р.Х., Дегтярев О.В., Зубкова И.Ф. Имитационное моделирование в интересах валидации концепций, принципов и алгоритмов организации потоков воздушного движения. Материалы конференции «Имитационное моделирование. Теория и практика». ИММОД-2013. – Казань: Изд-во «Фэн» Академии наук РТ, 2013.-Т.2- 77-83 с.

3. Габейдулин Р.Х., Котова А.О. Регулирование потоков воздушного движения с учетом неопределенности прогнозирования выполнения планов полетов. Материалы XI МЕЖДУНАРОДНОГО СИМПОЗИУМА «ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНЫЕ СИСТЕМЫ -2014».- М.: Изд-во РУДН, 2014. – 265-269 с.

4. Gabeydulin R., Orlov V., Skavinskaya D. The research of airborne ADS-B-based procedures using fast-time and real-time simulation. Integrated Communications, Navigation and Surveillance Conference (ICNS), IEEE/AIAA, 2015

5. Gabeydulin R., Orlov V., Skavinskaya D. Simulation studies of airborne ADS-B applications. Proceedings of The 6TH EUROPEAN CONFERENCE FOR AERONAUTICS AND SPACE SCIENCES (EUCASS), 2015

6. Габейдулин Р.Х., Математическое моделирование методов регулирования воздушного движения с учетом недостоверности прогноза воздушной обстановки. Сборник тезисов докладов Международной научно-технической конференции «Гражданская авиация на современном этапе развития науки, техники и общества», Московский государственный технический университет гражданской авиации, 18-20 мая 2016, Москва. – 174 с.

7. Габейдулин Р.Х., Котова А.О. Математическое моделирование методов регулирования воздушного движения с учетом недостоверности прогноза воздушной обстановки. Сборник текстов докладов Всероссийской научно-технической конференции «Авиационные системы в XXI веке», 26-27 мая 2016, Москва. – 268 с

8. Габейдулин Р.Х., Зыков С.В. Автоматизация планирования потоков воздушного движения в целях повышения безопасности управления воздушным движением. Материалы Девятой Международной конференции, 3-5 окт, 2016 г., Москва: в 2-х т. / Ин-т проблем упр. Им. В.А.Трапезникова Рос. Акад. Наук; под общ. Ред. С.Н.Васильева, А.Д.Цвиркунова. – Т. 1: Пленарные доклады, секции 1-4. – М.: ИПУ РАН 2016. – 353 с.

9. Габейдулин Р.Х., Зыков С.В. Задача оптимального назначения задержек вылетов воздушных судов при регулировании потоков воздушного движения. Десятая Всероссийская мультikonференция по проблемам управления: материалы 10-й Всероссийской мультikonференции (с. Дивноморское, Геленджик, Россия, 11-16 сентября 2017г.): в 3 т./[редкол.: И.А.Каляев (отв.ред.) и др.]. – Ростов-на-Дону; Таганрог : Издательство Южного федерального университета, 2017. Т.1. – 224 с.

10. Габейдулин Р.Х., Зыков С.В. Тактическое регулирование потоков воздушного движения в условиях неопределённости, Десятая международная конференция «Управление развитием крупномасштабных систем» (MLSD'2017)

11. Gabeydulin R., Zykov S. The Global Crisis as Digital Transformation

Motivator: from Lifecycle Optimization to Efficient Implementation Series.  
AMERICAN CONFERENCE ON INFORMATION SYSTEMS 2017  
WORKSHOP ON SMART MANUFACTURING PROCEEDINGS.

12.Габейдулин Р.Х. Оценка неопределенности в прогнозировании уровня загрузки элементов воздушного пространства для задачи организации потоков воздушного движения. Сборник тезисов докладов Международной научно-технической конференции «Гражданская авиация на современном этапе развития науки, техники и общества», Московский государственный технический университет гражданской авиации, 16-17 мая 2018, Москва.

13.Габейдулин Р.Х. Оценка неопределенности в прогнозировании уровня загрузки элементов воздушного пространства для задачи организации потоков воздушного движения. Сборник тезисов докладов III Всероссийской научно-технической конференции «Моделирование авиационных систем». 21-22 ноября 2018г., Москва.

## 12. Список использованных источников и литературы

1. Дос 9971. Руководство по совместной организации потоков воздушного движения. ИКАО 2014.
2. ГАБЕЙДУЛИН Р.Х., ГОРЯЧЕВ Д.И., ЗУБКОВА И.Ф. Алгоритмическое и программное обеспечение автоматизированной системы планирования использования воздушного пространства в ГЦ ЕС ОрВД. Научный Вестник МГТУ ГА. Серия Прикладная математика. Информатика. 2010, № 159
3. GABEYDULIN R., ORLOV V., SKAVINSKAYA D. Stand-Loop Simulation of Air Traffic Control Systems, Digital Avionics Systems Conference (DASC), Prague, 2015
4. AGUSTÍN A., ALONSO-AYUSO A., ESCUDERO L.F., PIZARRO C. Mathematical Optimization models for Air Traffic Flow Management: A review // Universidad Rey Juan Carlos, Spain, 2010
5. BARNHART, C., FEARING, D., ODoni, A., VAZE, V., 2012. Demand and capacity management in air transportation. Eur. J. Transp. Logist. 1, 135–155.
6. M.O. BALL, R. HOFFMAN, A.R. ODoni, AND R.RIFKIN. A stochastic integer program with dual network structure and its application to the ground-holding problem. Operations Research, 51(1) :167–171, 2003
7. A. ODoni, “The Flow Management Problem in Air Traffic Control,” Flow Control of Congested Networks, pp. 269–288, 1987
8. G. ANDREATTA, G. ROMANIN-JACUR. Aircraft flow management under congestion. Transportation Science, 21(4) :249–253, 1987
9. M. TERRAB, A.R. ODoni, Strategic flow management for air traffic control, Operations Research 41 (1) (1993) 138-152
10. O. RICETTA, A.R. ODoni, Solving optimally the static ground-holding policy problem in air traffic control, Transportation Science 27 (3) (1993)
11. O. RICETTA AND A. R. ODoni, “Dynamic Solution to the Ground-Holding Problem in Air Traffic Control,” Transportation Research Part A: Policy



and Practice, vol. 28, no. 3, pp. 167–185, May 1994

12. L. BIANCO, G. RINALDI, AND A. SASSANO. A combinatorial optimization approach to aircraft sequencing problem. In A.R. Odoni, L. Bianco, and G.Szego, editors, Flow Control of Congested Networks, pages 323–339. Springer-Verlag, 1987

13. L. BIANCO. Trends in transportation system and relation with air transportation demand. In Advanced Workshop in Air Traffic Control. Capri (Italy), pages 2–6, 1995

14. A. IDRISSE AND C.M. LI. Modeling and optimization of the capacity allocation problem with constraints. Modelization and Simulation Systems Conference. Rabat (Marruecos), 2006

15. VRANAS, P.B., The Multi-Airport Ground-Holding Problem in Air Traffic Control. 1994, Massachusset Institute of Technology:Cambridge, Massachusset

16. P.B. VRANAS, D.J. BERTSIMAS, AND A.R. ODONI. The multi-airport ground-holding problem in air traffic control. Operations Research, 42(2) :249–261, 1994

17. P.B. VRANAS, D.J. BERTSIMAS, AND A.R. ODONI. Dynamic ground-holding policies for a network of airports. Transportation Science,28 :275–291, 1994

18. M.O. BALL, R. HOFFMAN, A.R. ODONI, AND R.RIFKIN. A stochastic integer program with dual network structure and its application to the ground-holding problem. Operations Research, 51(1) :167–171, 2003

19. XJ ZHANG, Y. ZHOU, B. LIU, AND Z.WANG. The air traffic flow management with dynamic capacity and co-evolutionary genetic algorithm. IEEE Transactions on Intelligent Transportation System Conference, 2007

20. ANDREATTA, G., DELL'OLMO, P. AND LULLI, G., 2011. An aggregate stochastic model for air traffic flow management. European Journal of Operation Research 215 697-704

21. M. HELME. Reducing air traffic delay in a space-time network. IEEE International Conference on Systems, Management and Cybernetics. Chicago, 1992

22. A.R. ODONI. Issues in air traffic flow management. In H. Winter and H.-G.

Nüßer, editors, *Advanced Technologies for Air Traffic Flow Management*, pages 43–63. Springer-Verlag, 1994

23. D. BERTSIMAS AND S. STOCK. The air traffic flow management problem with enroute capacities. *Operations Research*, 46 :406–422, 1998

24. N. BARNIER, P. BRISSET, AND T. RIVIERE. Slot allocation with constraint programming : Models and results, 2001

25. RIOS, J. AND ROSS, K., 2009. Massively parallel Dantzig- Wolfe decomposition applied to traffic flow scheduling. AIAA Guidance, Navigation and Control Conference, Chicago, Illinois, 10-13 August

26. LULLI, G., AND ODONI, a. The European Air Traffic Flow Management Problem. *Transportation Science* 41, 4(Nov. 2007), 431–443

27. BERTSIMAS, D., LULLI, G., AND ODONI, A., 2011. An integer optimization approach to large-scale air traffic flow management. *Operation Research*, 59(1) 211-227

28. D. BERTSIMAS AND S. STOCK. The traffic flow management rerouting problem in air traffic control : A dynamic network flow approach. *Transportation Science*, 34(3) :239–255, 2000

29. D. BERTSIMAS, G. LULLI, AND A. ODONI. The air traffic flow management problem : an integer optimization approach. In 13th International Conference, IPCO. Bertinoro (Italy), pages 36–46, 2008

30. A.M. CHURCHILL, D.J.LOVELL, AND M.O.BALL. Evaluating a new formulation for large-scale traffic flow management. 8th USA/Europe Air Traffic Management R&D Seminar. Napa (California, USA), 2009

31. MUKHERJEE, A. AND HANSEN, M., 2009. A dynamic rerouting model for air traffic flow management. *Transportation Research Part B*, (43) 159-171

32. A. AGUSTIN, A. ALONSO-AYUSO, L. F. ESCUDERO, AND C. PIZARRO, “On air traffic flow management with rerouting. Part I: deterministic case,” *European Journal of Operational Research*, vol. 219, no. 1, pp. 156–166, 2012

33. A. AGUSTIN, A. ALONSO-AYUSO, L. F. ESCUDERO, AND C. PIZARRO, “On air traffic flow management with rerouting. Part II: stochastic case,”

European Journal of Operational Research, vol. 219, no. 1, pp. 167–177, 2012

34. A. AGUSTIN, A. ALONSO-AYUSO, L.F. ESCUDERO, AND C. PIZARRO. A deterministic model for air traffic flow management with rerouting. Proceedings of the INO 2009 workshop, EUROCONTROL Experimental Centre, Bretigny-sur-Orge (France), pp. 47- 53, 2009, 2009

35. ATFCM Operations Manual: Network Operations Handbook, 2016.

36. CASTELLI, L., PESENTI, R., RANIERI, A., 2011. The design of a market mechanism to allocate Air Traffic Flow Management slots. Transp. Res. Part C Emerg. Technol.19, 931–943.

37. Traffic Flow Management in the National Airspace System. FAA, USA, 2016.

38. VOSSSEN T., BALL M. Optimization and Mediated Bartering Models for Ground Delay Programs // University of Colorado, University of Maryland, USA, 2005.

39. E. P. GILBO AND S. B. SMITH, “NEW METHOD FOR PROBABILISTIC TRAFFIC DEMAND PREDICTIONS FOR EN ROUTE SECTORS BASED ON UNCERTAIN PREDICTIONS OF INDIVIDUAL FLIGHT EVENTS,” IN NINTH USA/EUROPE AIR TRAFFIC MANAGEMENT RESEARCH AND DEVELOPMENT SEMINAR (ATM2011), 2011

40. S. GUPTA AND D. J. BERTSIMAS, “MULTISTAGE AIR TRAFFIC FLOW MANAGEMENT UNDER CAPACITY UNCERTAINTY: A ROBUST AND ADAPTIVE OPTIMIZATION APPROACH,” IN PROCEEDINGS OF THE 51ST AGIFORS ANNUAL PROCEEDINGS: ANNUAL SYMPOSIUM AND STUDY GROUP MEETING, PP. 692–721, ANTALYA, TURKEY, OCTOBER 2011

41. D. BERTSIMAS AND V. GOYAL, “ON THE POWER OF ROBUST SOLUTIONS IN TWO-STAGE STOCHASTIC AND ADAPTIVE OPTIMIZATION PROBLEMS,” MATHEMATICS OF OPERATIONS RESEARCH, VOL. 35, NO. 2, PP. 284–305, 2010

42. C. WANKE AND D. GREENBAUM. INCREMENTAL, PROBABILISTIC

DECISION MAKING FOR EN ROUTE TRAFFIC MANAGEMENT. THE MITRE CORPORATION, 2007

43. L. GRIGNON. ANALYSES OF DELAY IN AN AIR TRAFFIC SYSTEM WITH WEATHER UNCERTAINTY. PHD THESIS, UNIVERSITY OF WASHINGTON, 2002

44. A. NILIM AND L. EL GHAOUI. ALGORITHMS FOR AIR TRAFFIC FLOW MANAGEMENT UNDER STOCHASTIC ENVIROMENTS. AMERICAN CONTROL CONFERENCE. BOSTON (MASSACHUSETTS, USA), 2004

45. A. D'ASPREMONT, D. SOHIER, A. NILIM, L. EL GHAOUI, AND V. DUONG. OPTIMAL PATH PLANNING FOR AIR TRAFFIC FLOW MANAGEMENT UNDER STOCHASTIC WEATHER AND CAPACITY CONSTRAINTS. PROCEEDINGS OF THE 4TH IEEE INTERNATIONAL CONFERENCE ON RESEARCH, INNOVATION AND VISION FOR THE FUTURE, RIVF'06, PAGES 1–6, 2006

46. E. P. GILBO AND S. B. SMITH, “NEW METHOD FOR PROBABILISTIC TRAFFIC DEMAND PREDICTIONS FOR EN ROUTE SECTORS BASED ON UNCERTAIN PREDICTIONS OF INDIVIDUAL FLIGHT EVENTS,” IN NINTH USA/EUROPE AIR TRAFFIC MANAGEMENT RESEARCH AND DEVELOPMENT SEMINAR (ATM2011), 2011

47. MUKHERJEE, A. AND HANSEN, M., 2009. A DYNAMIC REROUTING MODEL FOR AIR TRAFFIC FLOW MANAGEMENT. TRANSPORTATION RESEARCH PART B, (43) 159-171

48. ANDREATTA, G., DELL' OLMO, P. AND LULLI, G., 2011. AN AGGREGATE STOCHASTIC MODEL FOR AIR TRAFFIC FLOW MANAGEMENT. EUROPEAN JOURNAL OF OPERATION RESEARCH 215 697-704

49. GLOVER, C. AND BALL, O., M., 2012. STOCHASTIC OPTIMIZATION MODELS FOR GROUND DELAY PROGRAM PLANNING WITH EQUITY-EFFICIENCY TRADEOFFS. TRANSPORTATION RESEARCH PART C.

50. YOON1, Y., HANSEN, M. AND BALL, O., M., 2011. OPTIMAL ROUTE

DECISION WITH A GEOMETRIC GROUND-AIRBORNE HYBRID MODEL UNDER WEATHER UNCERTAINTY. PROCEEDIA SOCIAL AND BEHAVIORAL SCIENCES, 17 551-571

51. CHURCHILL, M., A. AND LOVELL, J., D., 2012. COORDINATED AVIATION NETWORK RESOURCE ALLOCATION UNDER UNCERTAINTY, TRANSPORTATION RESEARCH PART E, 48 19-33

52. Габейдулин Р.Х., Вересов К.А., Сикачев В.Ю., Скавинская Д.В., Канадин В.Н. Комплексный исследовательский стенд полунатурного имитационного моделирования систем управления воздушным движением. Труды ГосНИИАС. Серия: Вопросы авионики. ISSN: 2411-1902 №1(34), 2018, С 3-22

53. Габейдулин Р.Х. Задача динамического регулирования потоков воздушного движения задержками вылетов воздушных судов. Труды ГосНИИАС. Серия: Вопросы авионики. ISSN: 2411-1902 №2(35), 2018, С. 39-53