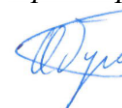


Федеральное государственное унитарное предприятие  
«Государственный научно-исследовательский институт авиационных систем»

*На правах рукописи*



**Обухов Юрий Владимирович**

**ИМИТАЦИОННЫЕ МОДЕЛИ, АЛГОРИТМЫ И ПРОГРАММЫ ДЛЯ  
АНАЛИЗА БЕЗОПАСНОСТИ ПОЛЕТОВ В СИСТЕМЕ УПРАВЛЕНИЯ  
ВОЗДУШНЫМ ДВИЖЕНИЕМ**

Специальность 05.13.18

Математическое моделирование, численные методы и комплексы программ

**АВТОРЕФЕРАТ**

диссертации на соискание ученой степени

кандидата технических наук

Москва – 2019

Работа выполнена в Федеральном государственном унитарном предприятии «Государственный научно-исследовательский институт авиационных систем» (ФГУП «ГосНИИАС»)

Научный руководитель: **Вишнякова Лариса Владимировна**  
доктор технических наук, профессор, начальник подразделения 0800 ФГУП «Государственный научно-исследовательский институт авиационных систем»

Официальные оппоненты: **Спрысков Владимир Борисович**  
доктор технических наук, начальник сектора – главный научный сотрудник отдела перспективных средств ЕС ОрВД ФГУП «Государственный научно-исследовательский институт гражданской авиации»

**Болелов Эдуард Анатольевич**  
кандидат технических наук, доцент, заведующий кафедрой «Техническая эксплуатация радиоэлектронного оборудования воздушного транспорта» ФГБОУ «Московский государственный технический университет гражданской авиации»

Ведущая организация: ФГУП «**Центральный аэрогидродинамический институт имени профессора Н.Е. Жуковского**»,  
140180, г. Жуковский, Московская область,  
ул. Жуковского, 1

Защита состоится «27» февраля 2020 года в 16:00 на заседании диссертационного совета Д 212.125.12 в ФГБОУ ВО «Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет)» по адресу: 125993, Москва, А-80, ГСП-3, Волоколамское шоссе, д. 4.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ФГБОУ ВО «Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет)» по адресу: 125993, Москва, А-80, ГСП-3, Волоколамское шоссе, д. 4, а также на сайте института по адресу: [https://mai.ru/events/defence/index.php?ELEMENT\\_ID=110806](https://mai.ru/events/defence/index.php?ELEMENT_ID=110806)

Отзывы, заверенные печатью, просим направлять по адресу: 125993, Москва, А-80, ГСП-3, Волоколамское шоссе, д. 4, Ученый совет МАИ.

Автореферат разослан «\_\_\_» \_\_\_\_\_ 20\_\_ года.

Ученый секретарь  
диссертационного совета Д 212.125.12,  
к.т.н., доцент

Старков А. В.

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

**Актуальность темы исследования.** В связи с постоянно возрастающей интенсивностью воздушного движения (ВД) в нашей стране в течение нескольких лет проводится модернизация системы управления воздушным движением (СУВД). Этот процесс включает в себя следующие мероприятия: внедрение сокращенных минимумов эшелонирования, новые эксплуатационные правила, включая процедуры обслуживания ВД, подлежащие применению в ВП, реорганизация трассовой структуры, изменение границ объемов ВП, внедрение новых систем и оборудования связи, наблюдения, навигации, а также укрупнение районных диспетчерских центров (РДЦ) и перенос диспетчерских позиций смежных центров в единый зал управления ВД.

Безопасность полетов (БП) является приоритетом развития гражданской авиации. Поэтому вышеописанные изменения в СУВД требуют тщательного анализа с целью определения того, что они не приводят к недопустимому изменению уровня БП.

**Степень разработанности.** Работы, связанные с вопросами анализа и оценки БП, проводились В. Б. Спрысковым, И. М. Грибковым, Л. К. Щербаковым, К. Л. Исаакяном, В. Л. Кузнецовым, Е. И. Компанцевой, В. Ю. Болтачевым, Reich P. G., Hsu D. A., Brooker P., Lloyd D. E., Anderson D., Lin X. G., Bakker G. J., Stroeve S., Blom H., Everdij M., Park M., Bosse T., Sharpanskykh A., Netjasov F., Fujito M., Nieto F., Castan J., и др.

Аналитические модели, используемые для анализа БП, как правило, содержат множество допущений и ограничений и позволяют получить обобщенные, количественно-качественные результаты, характеризующие ситуацию с безопасностью. Кроме того, для использования таких моделей предварительно необходимо получение большого количества статистических данных, требуемых для настройки параметров моделей.

Существующие методы анализа БП с применением имитационного моделирования также обладают рядом недостатков: упрощенное моделирование разрешения конфликтов между воздушными судами (ВС), разрешение конфликтов производится, как правило, только в горизонтальной плоскости; упрощенное моделирование других операций, выполняемых диспетчерами ОВД, не учитывается реальная технология работы диспетчера.

В ФГУП «ГосНИИАС» в последние годы был разработан ряд имитационных моделей, позволяющих проводить анализ различных аспектов функционирования СУВД. Данная диссертационная работа посвящена разработке методов, алгоритмов и моделей, предназначенных для анализа БП в таких системах.

**Объектом исследования** является система управления воздушным движением.

**Предметом исследования** является безопасность полетов в системе управления воздушным движением.

**Цель исследования** заключается в разработке имитационных моделей, алгоритмов и программ, предназначенных для анализа безопасности полетов в системе управления воздушным движением.

Для достижения поставленной цели в диссертационной работе решаются следующие **задачи**:

- анализ существующих методов и моделей оценки БП;
- разработка методов и алгоритмов анализа БП с применением имитационного моделирования;
- разработка имитационной модели управляемого ВД, основанной на подробном моделировании операций диспетчеров по управлению ВД, обнаружению и разрешению конфликтов;
- разработка программного средства (ПС), предназначенного для анализа БП в системах управления воздушным движением.

**Методы исследования.** В процессе выполнения работы применялись методы системного анализа, исследования операций, имитационного математического моделирования, методы теории вероятностей и математической статистики.

**Научная новизна** работы заключается в следующем:

- разработан метод анализа БП в СУВД с использованием имитационного моделирования (ИМ);
- разработан алгоритм формирования случайных исследовательских потоков ВД на основе реальных фактических планов полета для проведения статистического ИМ;
- разработан алгоритм получения статистических данных посредством сохранения состояния системы в определенные моменты и возврата к сохранённым состояниям;
- разработана имитационная модель, подробно моделирующая операции по управлению ВД в секторе ОВД верхнего ВП, позволяющая анализировать БП с учетом совокупности детерминированных и случайных факторов, влияющих на БП;
- разработаны структура и состав программного средства, предназначенного для анализа БП в секторе ОВД.

**Теоретическая и практическая значимость.** Разработанные модели и алгоритмы явились основой для практической реализации программного средства (ПС), предназначенного для анализа БП в СУВД. ПС является составной частью программного комплекса имитационного моделирования «КИМ ОрВД», внедренного в эксплуатацию в ФГУП «Госкорпорация по ОрВД».

На основе полученных в работе результатов были проведены исследования по оценке БП при организации Санкт-Петербургского укрупненного центра ОВД в рамках научно-исследовательской работы (НИР) «Проведение исследований по оценке БП при создании Санкт-Петербургского укрупненного центра ОВД». Также

были проведены исследования по оценке БП для перспективной структуры воздушного пространства (ВП) Московского районного диспетчерского центра в рамках НИР «Проведение исследований по оценке БП в границах ответственности Московского РДЦ с использованием Комплекса имитационного моделирования ОрВД». Результаты исследований были учтены при принятии решения о внедрении перспективной структуры ВП в эксплуатацию.

#### **Положения, выносимые на защиту:**

1. Метод анализа безопасности полетов в СУВД с использованием ИМ, основанный на получении условных вероятностей опасных событий, происходящих в результате влияния совокупности детерминированных и случайных факторов.
2. Алгоритм формирования случайных исследовательских потоков ВД для проведения статистического ИМ.
3. Алгоритм получения статистических данных посредством сохранения состояния модели в моменты реализации опасных факторов и возврата к сохранённому состоянию.
4. Состав и структура имитационной модели, подробно моделирующей операции по управлению ВД в секторе верхнего ВП, операции по обнаружению и разрешению конфликтов.

**Достоверность научных результатов** обеспечивается использованием апробированных методов (системного анализа, имитационного математического моделирования), подробным моделированием операций диспетчера ОВД и настройкой параметров модели в соответствии с реальными системами обслуживания воздушного движения, соответствием полученных результатов экспертным оценкам.

**Апробация работы.** Результаты работы докладывались и обсуждались на следующих научных конференциях: VI, VII, VIII Всероссийские научно-практические конференции по имитационному моделированию и его применению в науке и промышленности «Имитационное моделирование. Теория и практика» (ИММОД, г. Казань, 2013, г. Москва, 2015, г. Санкт-Петербург, 2017), II Всероссийская научно-техническая конференция «Моделирование авиационных систем» (г. Москва, 2013), Молодежная научно-практическая конференция «Инновации в авиации и космонавтике» (г. Москва, 2014), Конкурс научно-технических работ и проектов «Молодежь и будущее авиации и космонавтики» (г. Москва, 2014), Научно-практическая конференция «Актуальные проблемы безопасности полетов» (г. Москва, 2018), III Всероссийская научно-техническая конференция «Моделирование авиационных систем» (г. Москва, 2018).

**Публикации.** По теме диссертации опубликовано 12 печатных работ, в том числе 4 в изданиях, рекомендованных ВАК.

**Структура работы.** Диссертационная работа состоит из введения, четырех глав, заключения, библиографического списка из 78 наименований и 2 приложений.

Общий объем работы 134 страниц, в том числе рисунков и таблиц: 69 рисунков, 18 таблиц.

## СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во **введении** обоснована актуальность темы диссертации, сформулированы цели и задачи исследования, практическая значимость работы.

В **первой главе** диссертации рассматриваются существующие методы оценки БП, производятся техническая и математическая постановки задачи.

Одним из основных показателей БП является частота опасных событий на час полета ВС:

$$Q_{oc} = \frac{N_{oc}}{H} \quad (1)$$

где  $Q_{oc}$  – частота опасных события в воздухе в данной области ВП,  $N_{oc}$  – количество опасных событий, имевших место за рассматриваемый период наблюдения в данной области ВП,  $H$  – налёт всех ВС в часах за рассматриваемый период наблюдения в данной области ВП.

Система управления воздушным движением (СУВД) является сложной организационно-технической системой. Целью функционирования СУВД является осуществление безопасного, быстрого, экономного и регулярного перемещения грузов и пассажиров с помощью воздушного транспорта. В задачи системы входят организация процессов УВД, планирование воздушного движения, непосредственное управление отдельными воздушными судами (ВС) и совокупностями ВС в заданных зонах УВД. В соответствии с задачами в СУВД выделяются подсистемы организации воздушного движения (ОрВД), подсистема планирования и обеспечения ВД, подсистема непосредственного УВД в районах аэродромов, на воздушных трассах, а также управляющий и координирующий центр. В подсистеме непосредственного УВД содержится ряд простейших контуров, каждый из которых управляет воздушным движением в зоне своей ответственности. На рисунке 1 приведена структурная схема такого контура непосредственного УВД. Линиями на схеме отображены информационные потоки между подсистемами. Процессы, происходящие при функционировании контура непосредственного УВД, оказывают прямое влияние на БП в СУВД. Поэтому в дальнейшем в работе будет проводиться анализ БП с точки зрения функционирования такого контура.

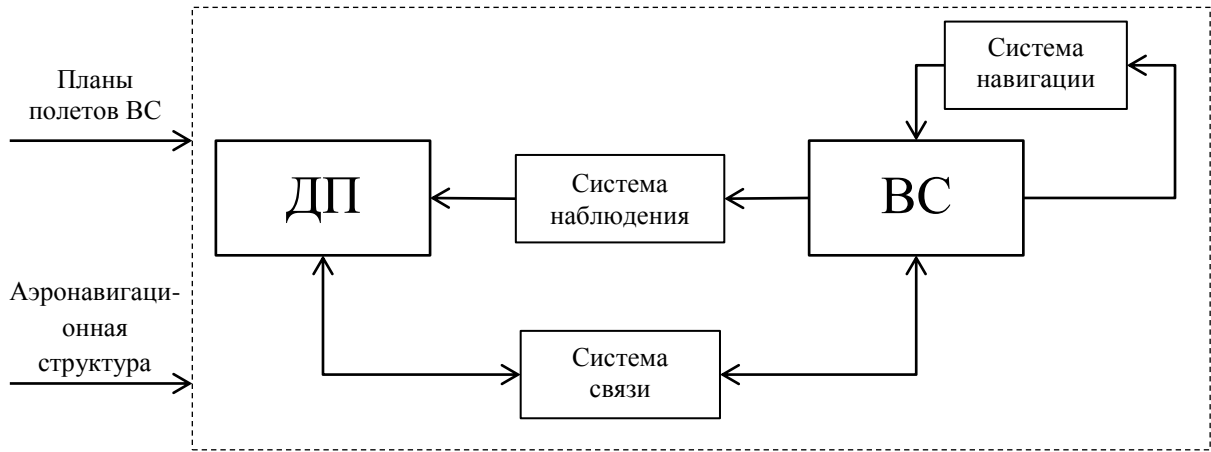


Рисунок 1 – Структурная схема контура непосредственного управления воздушным движением

На рисунке 1 ДП – это диспетчерская позиция, включающая в себя одного или несколько диспетчеров, осуществляющих непосредственное УВД в соответствии с технологией работы диспетчера, учитывая данные о планах полета ВС, поступающие от плановой подсистемы. При выявлении диспетчером потребности в предотвращении опасной ситуации между воздушными судами (ВС) экипажам ВС подаются команды посредством системы связи, в соответствии с которыми ВС изменяют траекторию своего движения. При этом учитывается аэронавигационная структура ВП: трассы, по которым разрешен полет, разрешенные эшелоны полета, а также правила эшелонирования. Система связи представляет собой совокупность центров, станций связи, оконечных устройств, различных средств электросвязи, предназначенных для передачи экипажам ВС указаний, распоряжений и сообщений по обеспечению безопасности и регулярности ВД от диспетчерских позиций и обратно, а также для связи между диспетчерскими позициями. Система наблюдения представляет собой совокупность технических средств: первичные обзорные радиолокаторы, вторичные обзорные радиолокаторы, средства автоматического зависимого наблюдения, которые обеспечивают обнаружение ВС, опознавание и измерение их параметров движения. Система навигации представляет собой совокупность технических средств, предназначенных для определения воздушным судном положения своего центра масс и других параметров движения.

Представим частоту опасного события в такой системе следующим образом:

$$Q_{oc} = F(\bar{p}, \bar{x}) \quad (2)$$

где  $\bar{p}$  – вектор детерминированных факторов, влияющих на БП,  $\bar{x}$  – вектор случайных факторов, влияющих на БП,  $F$  – функция, определяющая связь вышеперечисленных параметров между собой.

К детерминированным параметрам, определяемым вектором  $\bar{p} = (\bar{p}_1, \bar{p}_2, \bar{p}_3, \dots, \bar{p}_{10})$ , относятся:  $\bar{p}_1$  – вектор, задающий аэронавигационную структуру ВП;  $\bar{p}_2$  – вектор, задающий правила выполнения полетов;  $\bar{p}_3$  – вектор, задающий летно-

технические характеристики ВС;  $\bar{p}_4$  – вектор, определяющий планы полетов ВС;  $\bar{p}_5$  – вектор, определяющий тактико-технические характеристики (ТТХ) радиотехнических средств навигации;  $\bar{p}_6$  – вектор, определяющий расположение наземных и спутниковых радиотехнических средств навигации в пространстве;  $\bar{p}_7$  – вектор, определяющий ТТХ средств наблюдения;  $\bar{p}_8$  – вектор, определяющий расположение технических средств наблюдения в пространстве;  $\bar{p}_9$  – вектор, определяющий ТТХ средств связи;  $\bar{p}_{10}$  – вектор, определяющий технологию работы диспетчера ОВД и правила ведения радиообмена.

К случайным факторам, определяемым вектором  $\bar{x} = (\bar{x}_1, \bar{x}_2, \bar{x}_3, \dots, \bar{x}_{10})$ , относятся:  $\bar{x}_1$  – вектор, определяющий ошибки и погрешности в работе системы воздушной радиосвязи, которая является средством связи диспетчеров ОВД с экипажами ВС, находящихся в полете;  $\bar{x}_2$  – вектор, определяющий ошибки и погрешности в работе системы наблюдения;  $\bar{x}_3$  – вектор, определяющий ошибки и погрешности самолетовождения;  $\bar{x}_4$  – вектор, определяющий возможность отказов линий передачи речевой информации;  $\bar{x}_5$  – вектор, определяющий возможность отказов линий передачи траекторной информации;  $\bar{x}_6$  – вектор, определяющий интенсивность воздушного движения;  $\bar{x}_7$  – вектор, определяющий отказы авиационной техники;  $\bar{x}_8$  – вектор, определяющий ошибки диспетчеров при выполнении обслуживания ВД,  $\bar{x}_9$  – вектор, определяющий ошибки экипажей ВС при выполнении полетов;  $\bar{x}_{10}$  – вектор, определяющий неблагоприятные условия внешней среды.

Среди случайных факторов выделим факторы  $\bar{x}_4$  и  $\bar{x}_5$ , влияние которых на БП возросло в последние годы в связи с укрупнением РДЦ. Отказ линий передачи речевой информации ( $\bar{x}_4$ ) выражается в отсутствии у диспетчера возможности передавать экипажам ВС речевые команды с целью предотвращения опасных ситуаций. Отказ линий передачи траекторной информации ( $\bar{x}_5$ ) выражается в отсутствии у диспетчера возможности визуально оценить местоположение ВС друг относительно друга, выводимое на экран автоматизированной системой УВД, и произвести актуальные расчеты с целью обнаружения потенциальных конфликтных ситуаций. В этом случае диспетчер переходит на так называемое процедурное управление, когда вся информация о текущем векторе состояния ВС поступает из речевых сообщений экипажей ВС, при этом теряется точность определения потенциальных конфликтов, диспетчер вынужден применять увеличенные минимумы эшелонирования. В дальнейшем в работе случайные факторы  $\bar{x}_4$  и  $\bar{x}_5$  будем называть отказами системы связи и отказами системы наблюдения соответственно.

Вывод уравнения (2) в строго формализованном виде является сложной задачей. Сложность заключается в наличии большого количества связей между элементами и подсистемами, входящими в состав СУВД, в разнородности этих элементов по исполнению и функциям, ими выполняемым, а также в невозможности строгой формализации некоторых факторов, влияющих на БП. Цель исследования



заключается в разработке методов, алгоритмов и моделей, которые позволят оценить уровень БП  $Q_{oc}$  с помощью ИМ.

Во **второй главе** приводится описание методов и алгоритмов, разработанных для решения поставленной в первой главе задачи анализа БП в СУВД.

Для реализации поставленных задач предложен комплекс методов и алгоритмов, которые в совокупности позволяют проанализировать БП с применением ИМ. Общая схема проведения ИМ приведена на рисунке 2 и состоит из следующих этапов:

- анализ исходных данных, выбор параметров модели в соответствии с заданным уровнем технического оснащения;
- формирование «длинных» потоков ВД, предназначенных для моделирования длительных промежутков времени;
- выполнение серии статистических испытаний с целью определения условных вероятностей опасных событий, происходящих в результате отказов систем связи и наблюдения;
- получение оценок показателей БП.

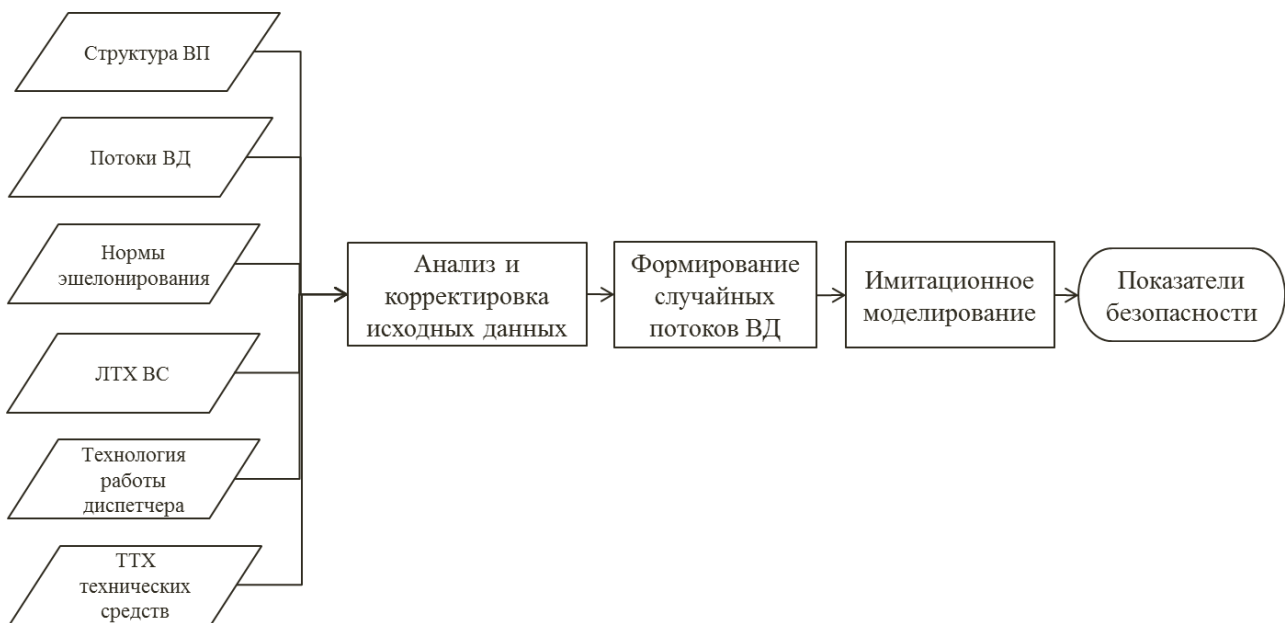


Рисунок 2 - Общая схема проведения имитационного моделирования с целью анализа БП в СУВД

Уровень БП в системе управления воздушным движением предлагается рассчитывать следующим образом.

Пусть  $A_1$  – событие, заключающееся в том, что в произвольный момент времени рассматриваемая система функционирует в нормальном режиме (в системе реализуются все случайные факторы, кроме  $\bar{x}_4$  и  $\bar{x}_5$ ),  $A_2$  – событие, заключающееся в том, что в произвольный момент времени в системе не работает система связи между диспетчерскими позициями и экипажами ВС (в системе реализовался случайный фактор  $\bar{x}_4$ ),  $A_3$  – событие, заключающееся в том, что в произвольный момент времени в системе не работает система наблюдения (в системе реализовался

случайный фактор  $\bar{x}_5$ ). События  $A_2, A_3$  являются редкими. Сделаем допущение об их несовместности, тогда:

$$P(A_1) + P(A_2) + P(A_3) = 1 \quad (3)$$

Таким образом, система может находиться одновременно только в одном из трех состояний. Каждое состояние характеризуется своей интенсивностью опасных событий.

Определяется величина  $Q_{oc}$  – частота опасных событий в системе за определенный период времени, приведенная к налету всех воздушных судов за этот же период времени, как

$$Q_{oc} = \frac{N_{oc/норм} + N_{oc/отк.св.} + N_{oc/отк.наб.}}{H} \quad (4)$$

где  $N_{oc/норм}$  – количество опасных событий, зафиксированных, когда система находилась в нормальном режиме,  $N_{oc/отк.св.}$  – количество опасных событий, зафиксированных, когда в системе не работала система связи,  $N_{oc/отк.наб.}$  количество опасных событий, зафиксированных, когда в системе не работала система наблюдения,  $H$  – налёт всех ВС в часах за рассматриваемый период наблюдения в данной области ВП.

Два последних слагаемых в числителе из уравнения (4) запишем следующим образом:

$$\begin{aligned} N_{oc/отк.св.} &= \lambda_{отк.св.} \cdot T \cdot P(A_{oc} | A_{отк.св.}) \\ N_{oc/отк.наб.} &= \lambda_{отк.наб.} \cdot T \cdot P(A_{oc} | A_{отк.наб.}) \end{aligned} \quad (5)$$

где  $\lambda_{отк.св.}$  – интенсивность отказов системы связи,  $\lambda_{отк.наб.}$  – интенсивность отказов системы наблюдения,  $T$  – рассматриваемый временной интервал,  $P(A_{oc} | A_{отк.св.})$  – условная вероятность того, что произойдет опасное событие в результате отказа системы связи,  $P(A_{oc} | A_{отк.наб.})$  – условная вероятность того, что произойдет опасное событие в результате отказа системы наблюдения.

Первое слагаемое в числителе из уравнения (4) запишем следующим образом:

$$N_{oc/норм} = Q_{oc/норм} \cdot H_{норм} \quad (6)$$

где  $Q_{oc/норм}$  – частота опасных событий в системе в нормальном режиме работы приведенная к налету,  $H_{норм}$  – налет всех ВС за время, когда система находилась в нормальном режиме работы.

$$H_{норм} = H - H_{отк.св.} - H_{отк.наб.} \quad (7)$$

где  $H_{отк.св.}$  – налет всех ВС за время, когда в системе не работала система связи,  $H_{отк.наб.}$  – налет всех ВС за время, когда в системе не работала система наблюдения.

$$H_{отк.св.} = \lambda_{отк.св.} \cdot T \cdot \tilde{T}_{отк.св.} \cdot \frac{H}{T} \quad (8)$$

где  $\tilde{T}_{отк.св.}$  – среднее время восстановления после отказа системы связи,  $\tilde{T}_{отк.наб.}$  – среднее время восстановления после отказа системы наблюдения.

Таким образом, на основе (4) – (8) запишем выражение для вычисления частоты опасных событий:

$$Q_{ос} = Q_{ос/норм} \cdot (1 - \lambda_{отк.св.} \cdot \tilde{T}_{отк.св.} - \lambda_{отк.наб.} \cdot \tilde{T}_{отк.наб.}) + \lambda_{отк.св.} \cdot P(A_{ос}|A_{отк.св.}) \cdot \frac{T}{H} + \lambda_{отк.наб.} \cdot P(A_{ос}|A_{отк.наб.}) \cdot \frac{T}{H} \quad (9)$$

Значения  $Q_{ос/норм}$ ,  $P(A_{ос}|A_{отк.св.})$ ,  $P(A_{ос}|A_{отк.наб.})$ ,  $H$  могут быть получены с помощью имитационного моделирования методом Монте-Карло. Значения  $\lambda_{отк.св.}$ ,  $\lambda_{отк.наб.}$ ,  $\tilde{T}_{отк.св.}$ ,  $\tilde{T}_{отк.наб.}$  могут быть получены на основе статистических данных об отказах, либо в первом приближении могут быть выбраны значения из тактико-технических характеристик (ТТХ) соответствующих технических систем.

Для ускорения процесса получения значений условных вероятностей был разработан **алгоритм сохранения состояний моделирования**. На рисунке 3 схематически показан процесс моделирования системы в нормальном режиме. Ось ординат обозначает вектор параметров состояния системы. На оси абсцисс отмечены моменты времени  $t_i, t_{i+1}, t_{i+2}, \dots$ , обозначающие точки сохранения состояния системы. По окончании моделирования системы в нормальном режиме производится моделирование системы в режимах с имитацией отказов системы связи или системы наблюдения в моменты  $t_i, t_{i+1}, t_{i+2}, \dots$ , при этом каждый раз моделирование начинается из сохраненного ранее момента времени. Как результат фиксируются опасные события, происходящие вследствие отказов. Длительность моделирования функционирования системы в условиях отказа выбирается с учетом требований к надежности систем связи и наблюдения, а также с учетом последствий таких отказов на функционирование системы.

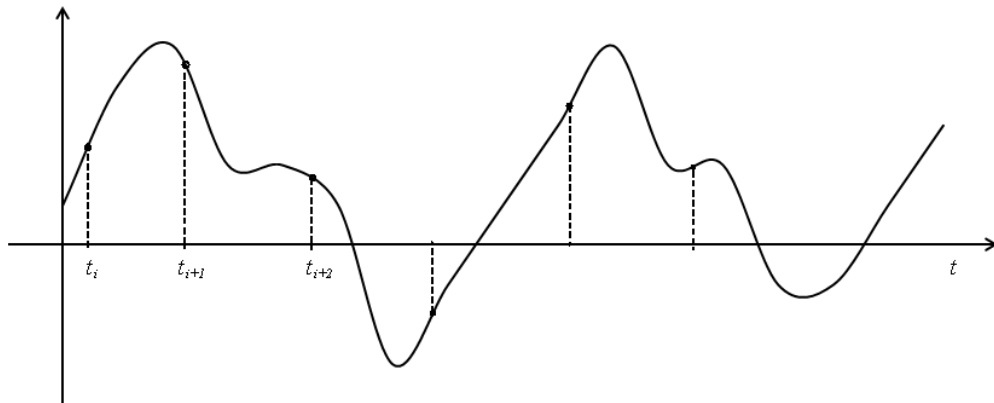


Рисунок 3 – Моделирование функционирования системы в обычном режиме и моменты сохранения состояния системы

В качестве опасных событий рассматриваются **нарушения минимумов эшелонирования** (НМЭ) между парами ВС в воздухе. Определение факта НМЭ производится как попадание центра масс второго ВС в зону безопасности первого ВС (рисунок 4).

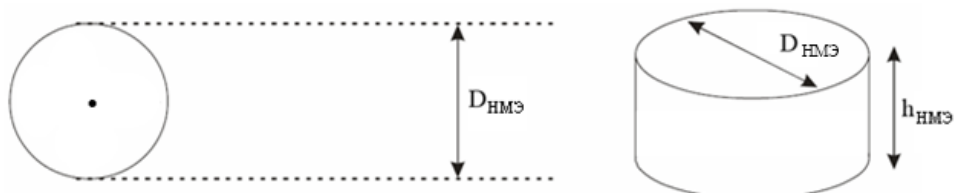


Рисунок 4 – Зона безопасности ВС, посредством которой определяются факты нарушений минимумов эшелонирования между ВС

Условие возникновения нарушения минимумов эшелонирования:

$$\begin{cases} L_{hor} < D_{HMЭ} \\ L_{vert} < h_{HMЭ} \end{cases} \quad (10)$$

где  $L_{hor}$  – расстояние между центрами масс двух ВС в горизонтальной плоскости,  $L_{vert}$  – в вертикальной плоскости,  $D_{HMЭ}$  и  $h_{HMЭ}$  – диаметр и высота цилиндра, определяющего минимумы эшелонирования в рассматриваемом воздушном пространстве.

Алгоритм **формирования случайной воздушной обстановки** предназначен для моделирования случайного фактора  $\bar{x}_6$  – случайной воздушной обстановки. Время между входами в моделируемое ВП двух ВС определяется независимыми и экспоненциально распределенными случайными величинами с изменяющимся во времени значением интенсивности  $k_\lambda \cdot \lambda(t)$ , где  $k_\lambda$  – коэффициент увеличения/уменьшения интенсивности. В качестве  $\lambda(t)$  используется кусочно-постоянная функция суточной часовой интенсивности исходного потока ВД (рисунок 5).

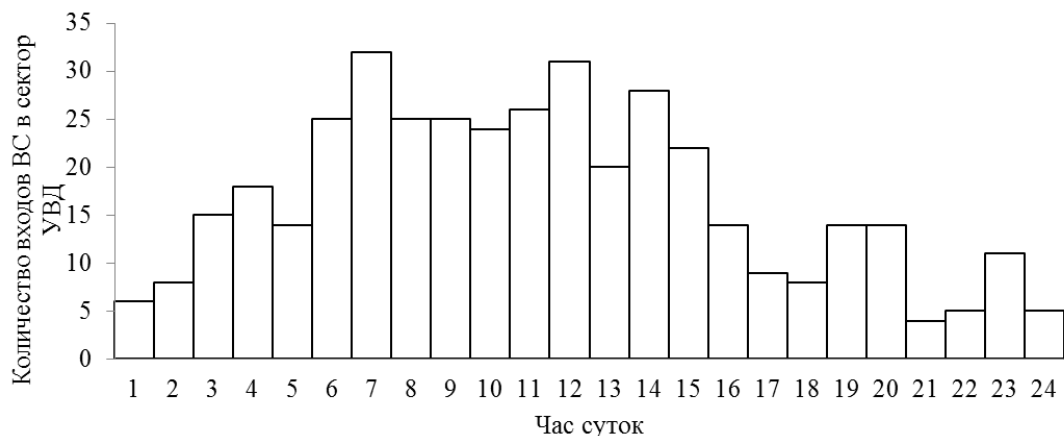


Рисунок 5 – Функция суточной часовой интенсивности воздушного движения

В **третьей главе** приводится описание имитационной модели управляемого ВД в секторе ОВД РДЦ, разработанной для целей оценки БП. Модель состоит из следующих компонентов: модели диспетчерского обслуживания, воздушной обстановки (ВО), системы наблюдения, системы связи, системы навигации. На рисунке 6 представлена общая информационная схема функционирования модели. Также показаны отдельно модули расчета показателей и отображения процесса моделирования.

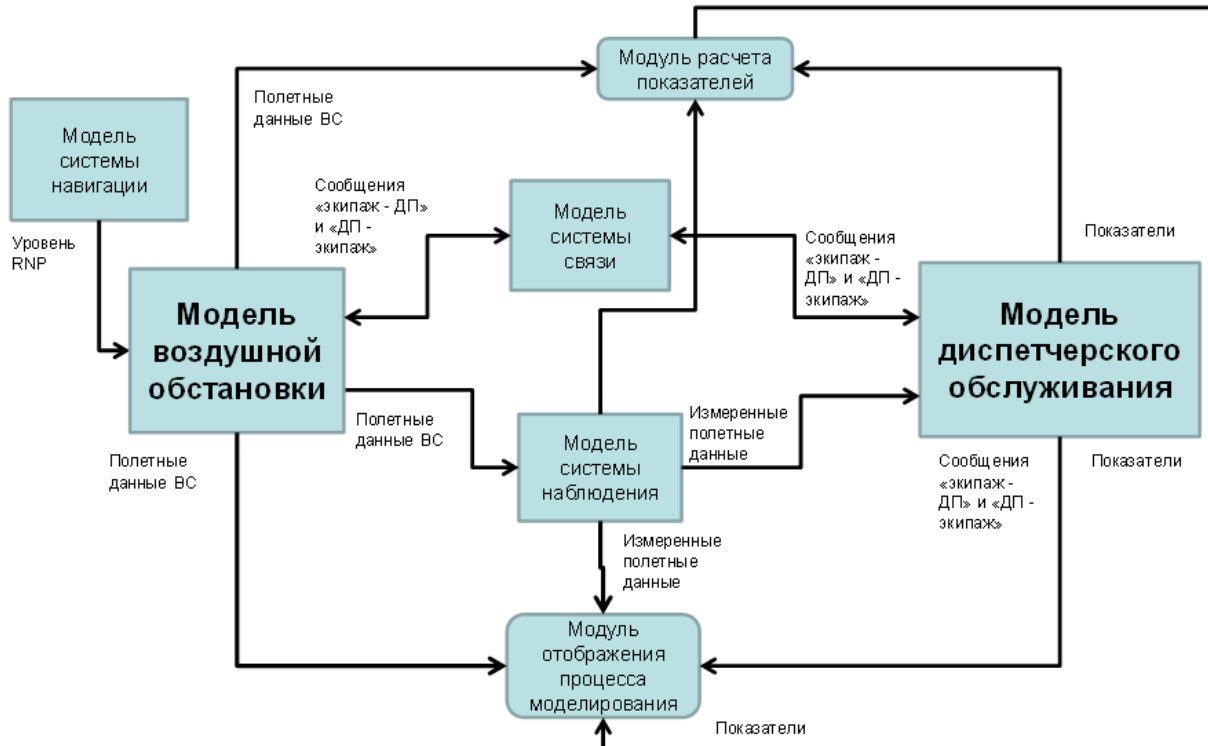


Рисунок 6 – Общая схема функционирования имитационной модели управляемого воздушного движения (стрелками показаны информационные потоки)

Особенностью имитационного моделирования, используемого в решаемой задаче, является подробное моделирование условий и процессов, происходящих при обслуживании ВД. Моделируются как реально существующие, так и модернизируемые трассовая структура ВП и границы объемов ВП, существующие и увеличенные по интенсивности потоки ВД, операции диспетчера по управлению потоком ВД, обнаружению и разрешению потенциальных конфликтных ситуаций. В модели реализовано влияние на БП следующих случайных факторов из уравнения (2):

– ошибки и погрешности в работе системы воздушной радиосвязи ( $\bar{x}_1$ ): для каждого сообщения разыгрываются случайные величины  $X_{нрj}$  и  $X_{ндj}$  в соответствии с непрерывным равномерным распределением и производится сравнение:

$$X_{нрj} > u_{нр} \text{ — сообщение неразборчиво}$$

$$X_{ндj} > u_{нд} \text{ — сообщение не доставлено}$$

где  $X_{нрj}$  – значение случайной величины, используемой для моделирования неразборчивости сообщений для  $i$ -го сообщения на  $j$ -м шаге моделирования,  $X_{ндj}$  – значение случайной величины, используемой для моделирования недоставки сообщений для  $i$ -го сообщения на  $j$ -м шаге моделирования,  $u_{нр}$  и  $u_{нд}$  – пороговые значения вероятностей неразборчивости и недоставки сообщений соответственно. В случае, если в результате розыгрыша для сообщения установлен статус «неразборчиво» или «не доставлено», то длительность операции, к которой

относится данное сообщение, увеличивается на величины  $\Delta t_{\text{нр}}$  и  $\Delta t_{\text{нд}}$  соответственно;

– ошибки и погрешности в работе системы наблюдения ( $\bar{x}_2$ ): на каждом  $j$ -м шаге моделирования текущие географические координаты  $B$ ,  $L$  каждого  $i$ -го ВС, поступающие от модели ВО, подвергаются корректировке посредством добавления ошибок наблюдения, являющихся реализацией нормально распределенной случайной величины:  $\Delta B_i \sim N(0, \sigma_B^2)$ ,  $\Delta L_i \sim N(0, \sigma_L^2)$ , где  $\Delta B_i$ ,  $\Delta L_i$  – погрешность измерения широты и долготы  $i$ -го ВС,  $\sigma_B^2$  и  $\sigma_L^2$  – дисперсия случайной величины, выбираемая исходя из технических характеристик связи моделируемой СУВД;

– ошибки и погрешности самолетовождения ( $\bar{x}_3$ ): моделирование осуществляется посредством розыгрыша значения бокового отклонения от осевой линий воздушной трассы  $i$ -го ВС. Эта ошибка разыгрывается перед началом моделирования полета каждого ВС и остается постоянной в течение всего полета. Розыгрыш осуществляется в соответствии с двойным экспоненциальным распределением, имеющим плотность:

$$f(y) = \frac{1}{2 \cdot \lambda} \cdot e^{-\frac{|y|}{\lambda}}$$

$$\lambda = -\frac{k}{\ln(0.05)} \quad (12)$$

где  $k$  – уровень минимальных требуемых навигационных характеристик в рассматриваемом ВП, определяющий ширину воздушного коридора, в котором должны находиться ВС 95% времени при полете по воздушным трассам;

– отказы системы связи ( $\bar{x}_4$ ): события отказов системы связи моделируются как стационарный пуассоновский поток с интенсивностью  $\lambda_{\text{отк.св.}}$ . Время между двумя последовательными отказами  $T_{\text{отк.св.}}$  разыгрывается как реализация случайной величины, распределенной по экспоненциальному закону  $T_{\text{отк.св.}} \sim \text{Exp}(\lambda_{\text{отк.св.}})$ . Длительность отказа  $\Delta t_{\text{отк.св.}}$  разыгрывается в соответствии с нормальным распределением:  $\Delta t_{\text{отк.св.}} \sim N(D_{\text{отк.св.}}, \sigma_{\text{отк.св.}}^2)$ , где  $D_{\text{отк.св.}}$  – средняя длительность отказа системы связи,  $\sigma_{\text{отк.св.}}^2$  – величина, характеризующая разброс времени отказа относительно среднего значения. При моделировании отказа системы связи модель диспетчерского обслуживания не имеет возможности посредством имитации команд диспетчера изменять траектории полетов ВС и таким образом разрешать ПКС;

– отказы системы наблюдения ( $\bar{x}_5$ ): события отказов системы наблюдения моделируются как стационарный пуассоновский поток с интенсивностью  $\lambda_{\text{отк.св.}}$ . Время между двумя последовательными отказами  $T_{\text{отк.св.}}$  разыгрывается как реализация случайной величины, распределенной по экспоненциальному закону:  $T_{\text{отк.св.}} \sim \text{Exp}(\lambda_{\text{отк.св.}})$ , длительность отказа  $\Delta t_{\text{отк.св.}}$  разыгрывается в соответствии с нормальным распределением:  $\Delta t_{\text{отк.св.}} \sim N(D_{\text{отк.св.}}, \sigma_{\text{отк.св.}}^2)$ , где  $D_{\text{отк.св.}}$  – средняя длительность отказа системы связи,  $\sigma_{\text{отк.св.}}^2$  – величина, характеризующая разброс длительности отказа относительно среднего значения. При моделировании отказа системы наблюдения имитируется переход диспетчера на процедурное управление. В этом случае модель диспетчерского обслуживания формирует управляющие

команды по изменению траекторий полета ВС, основываясь на информации, переданной через модель системы связи.

– интенсивность ВД ( $\bar{x}_6$ ): моделирование случайной интенсивности воздушного движения в секторе ОВД производится посредством розыгрыша времени входа ВС в сектор и маршрута полета ВС в соответствии с алгоритмом, приведенным выше.

Модель диспетчерского обслуживания является дискретно-событийной моделью, работа которой основана на правилах, разработанных в сотрудничестве с диспетчерами ОВД. Она ориентирована на подробное моделирование операций по управлению воздушным движением, обнаружению и разрешению потенциальных конфликтных ситуаций (ПКС), а именно прием ВС на сопровождение от диспетчера смежного сектора, сопровождение ВС при пролете через сектор и передача ВС диспетчеру следующего сектора. При выполнении любой операции учитывается время, затрачиваемое на ее выполнение. Главной задачей модели с точки зрения БП является обнаружение и разрешение ПКС между самолетами. ПКС – это ситуация, когда для пары ВС прогнозируется в будущем опасное событие, которое диспетчер должен предотвратить. На рисунке 7 представлен разработанный общий алгоритм функционирования модели.

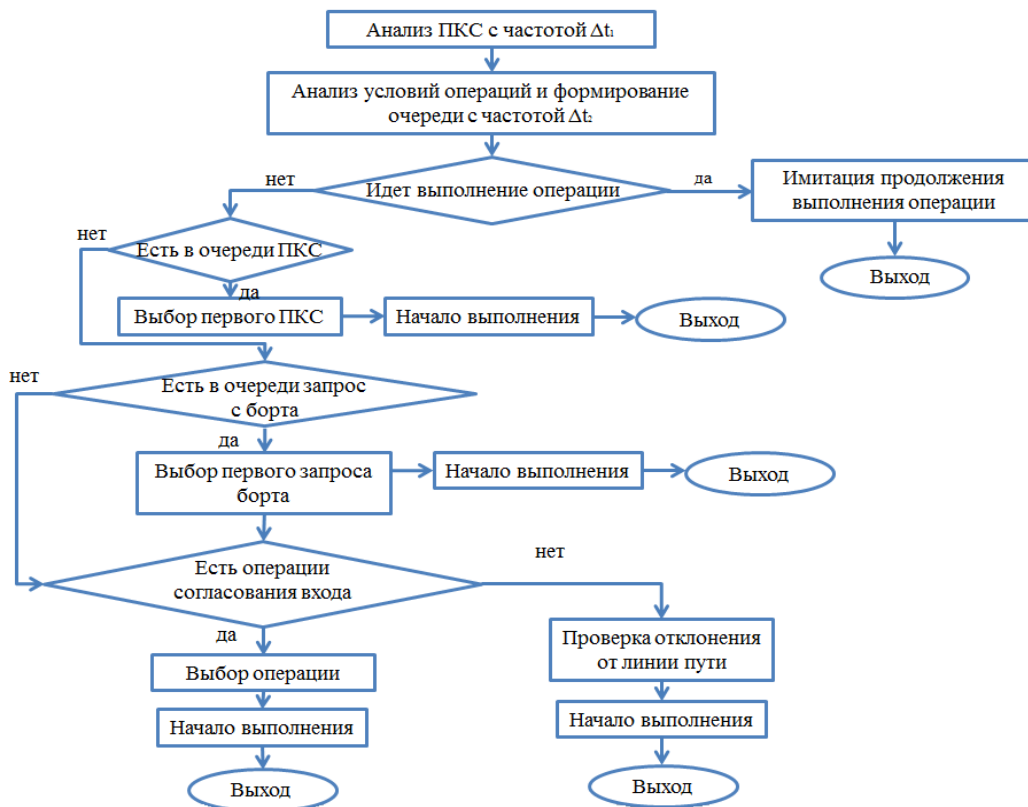


Рисунок 7 – Общий алгоритм функционирования модели диспетчерского обслуживания

Для разрешения ПКС применяются следующие меры: изменение или запрет смены эшелона полета, изменение горизонтальной скорости, изменение вертикальной скорости, боковое смещение воздушного судна.

Модель ВО имитирует движение совокупности ВС, пролетающих моделируемое ВП. Каждый самолет выполняет полет в соответствии с собственным планом, реагирует на указания диспетчера по изменению траектории для разрешения возможных конфликтов. Имитация полета осуществляется в соответствии с ЛТХ для конкретного типа ВС. Для этого используется база данных *Eurocontrol BADA*. Кинематика движения ВС имитируется численным интегрированием дифференциальных уравнений методом Эйлера первого порядка, описывающих изменение во времени текущего состояния ВС. Уравнения движения центра масс ВС в сферической системе координат:

$$\begin{aligned} \frac{dB}{dt} &= \frac{V_B \cdot \cos \psi}{(R_3 + H)} \\ \frac{dL}{dt} &= \frac{V_B \cdot \sin \psi}{(R_3 + H) \cdot \cos B} \end{aligned} \quad (11)$$

где  $B, L$  - широта и долгота текущего положения ВС,  $V_B$  – текущая воздушная скорость,  $\psi$  - текущий угол курса,  $H$  – текущая высота полета,  $R_3$  – радиус Земли.

На основе разработанных алгоритмов было реализовано программное средство (ПС) «Имитационная модель для оценки безопасности полетов». ПС предоставляет широкие возможности по созданию сценариев моделирования, определению параметров и настроек моделирования, проведению сеансов моделирования и анализу результатов. Все необходимые для исследований данные сохраняются в базе данных ПС, реализованной на основе СУБД *Oracle*. Реализованы возможности визуализации моделируемой воздушной обстановки, просмотра операций, выполняемых моделью диспетчерской позиции и разрешаемых ПКС для каждого рейса. Пример визуализации воздушной обстановки представлен на рисунке 8.



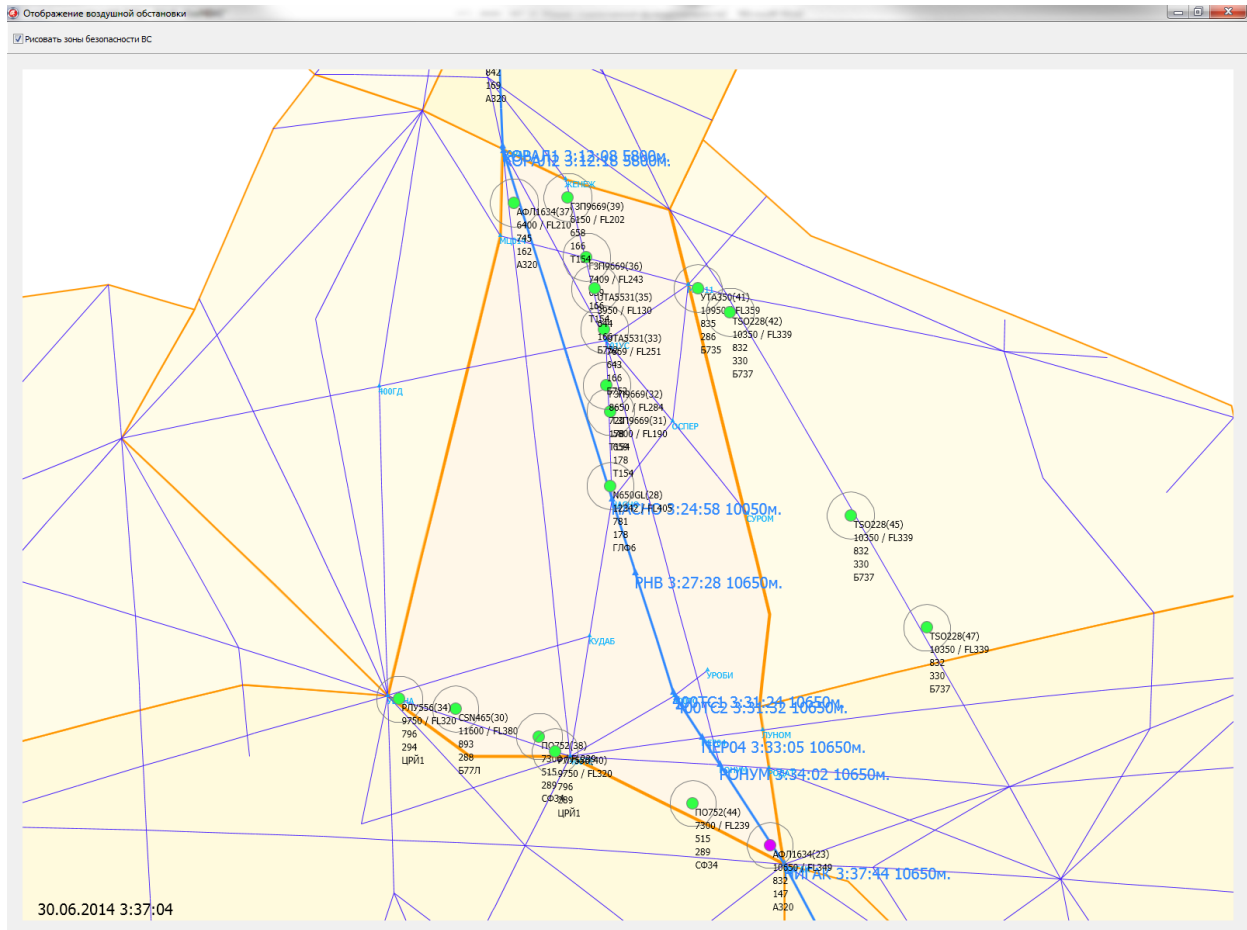


Рисунок 8 – Визуализация процесса моделирования, на карте-схеме представлены линии воздушных трасс, границы секторов ОВД, отметки ВС с информацией о текущем векторе состояния ВС, маршрут движения одного из ВС

На рисунке 9 представлен пример визуализации различных показателей, получаемых в процессе моделирования.

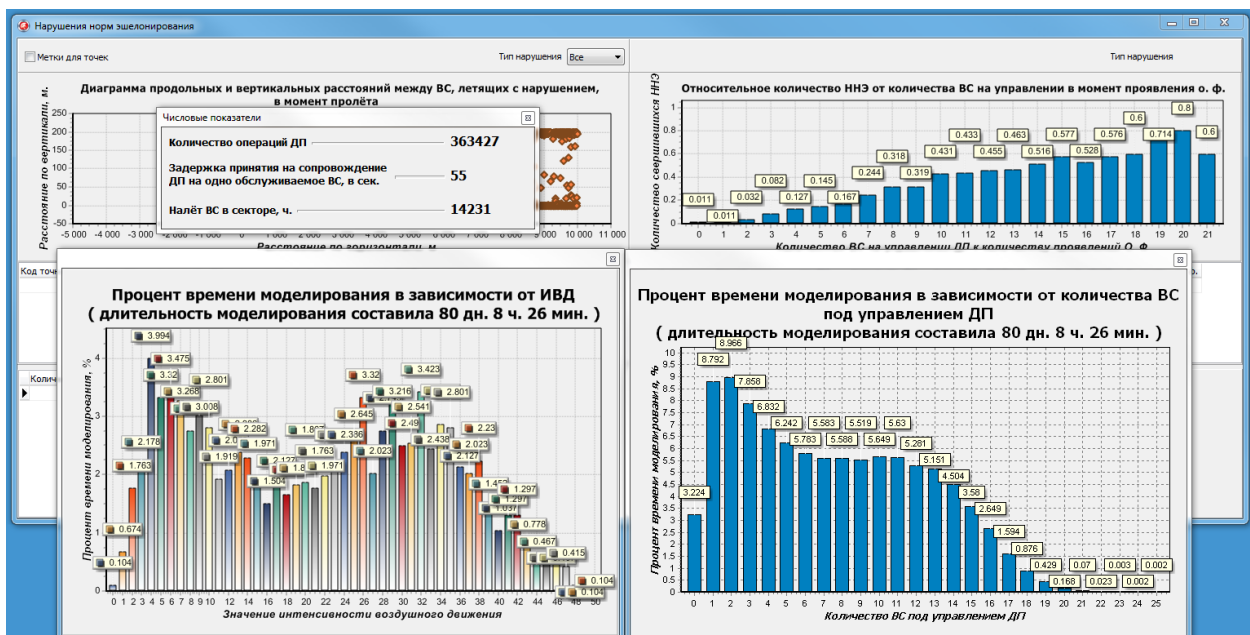


Рисунок 9 – Пример визуализации показателей, получаемых в процессе моделирования

В четвертой главе приводятся результаты исследований по оценке БП в перспективной структуре Московского РДЦ. В качестве исследуемого варианта для проведения моделирования был выбран вариант перспективной структуры ВП Московской воздушной зоны версии 2017 года (рисунок 10).

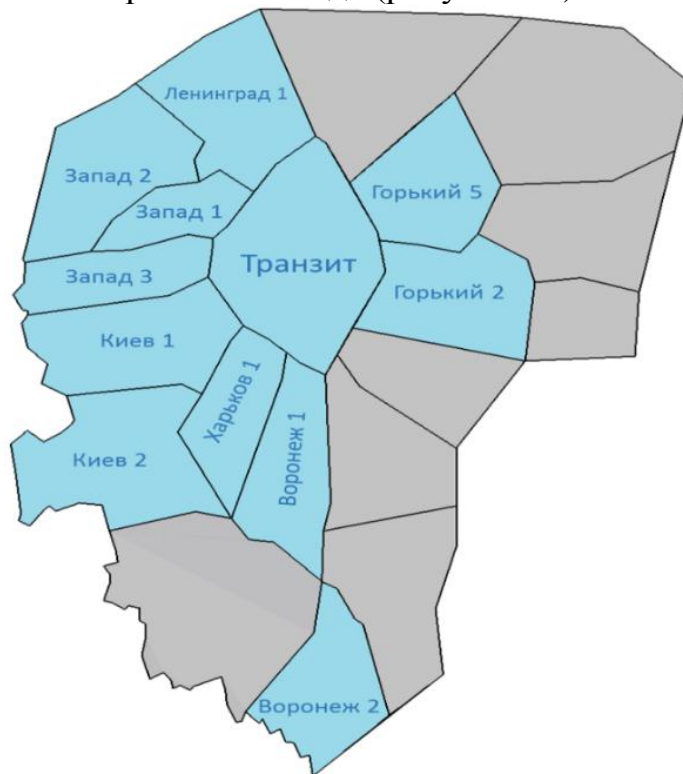
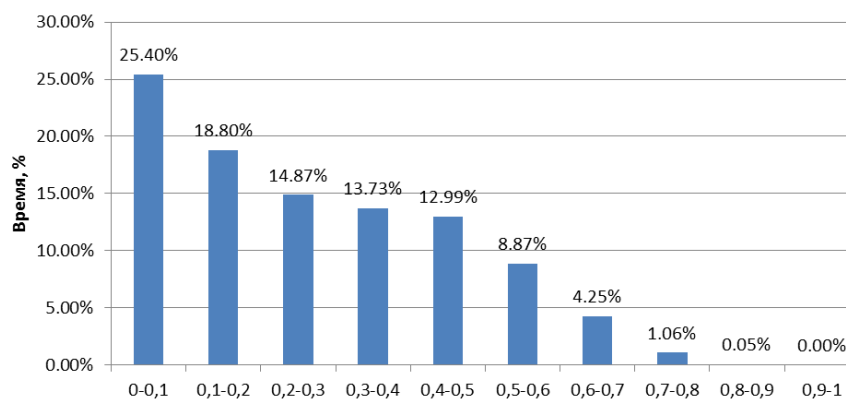


Рисунок 10 – Вариант перспективной структуры секторов ОВД Московской зоны Единой системы ОрВД

В качестве базового потока были выбраны реальные планы полетов за один из летних дней 2017 года. Была проведена их адаптация к перспективной структуре. На основе анализа интенсивности ВД были выбраны 12 секторов РДЦ, имеющих наибольшую интенсивность ВД, либо сложную пространственную структуру, включающую движение ВС на этапах снижения, либо набора высоты.

В рамках первого направления проводилось моделирование с целью определения фактов превышения значения предельно допустимого значения относительной временной загруженности диспетчера 0.7. На рисунке 11 представлены гистограммы загруженности диспетчера для наиболее загруженного сектора Воронеж 1 для исходной и увеличенной в 1.5 раза интенсивности ВД.



а) исходная интенсивность ВД

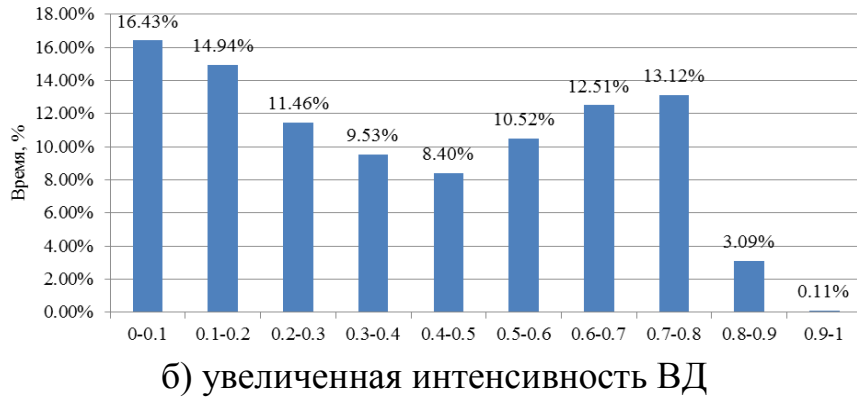


Рисунок 11 – Почасовая относительная временная загруженность сектора Воронеж 1, полученная в результате имитационного моделирования.

В секторе Воронеж 1 при увеличенной интенсивности наблюдается превышение допустимого значения относительной временной загруженности 0.7. В остальных секторах значимого превышения не наблюдалось.

На втором этапе исследования проводилось статистическое моделирование с целью определения условных вероятностей НМЭ, происходящих вследствие отказа системы связи или системы наблюдения. На рисунке 12 представлен пример сходимости оценки условной вероятности НМЭ при 10-минутных отказах систем связи и наблюдения.

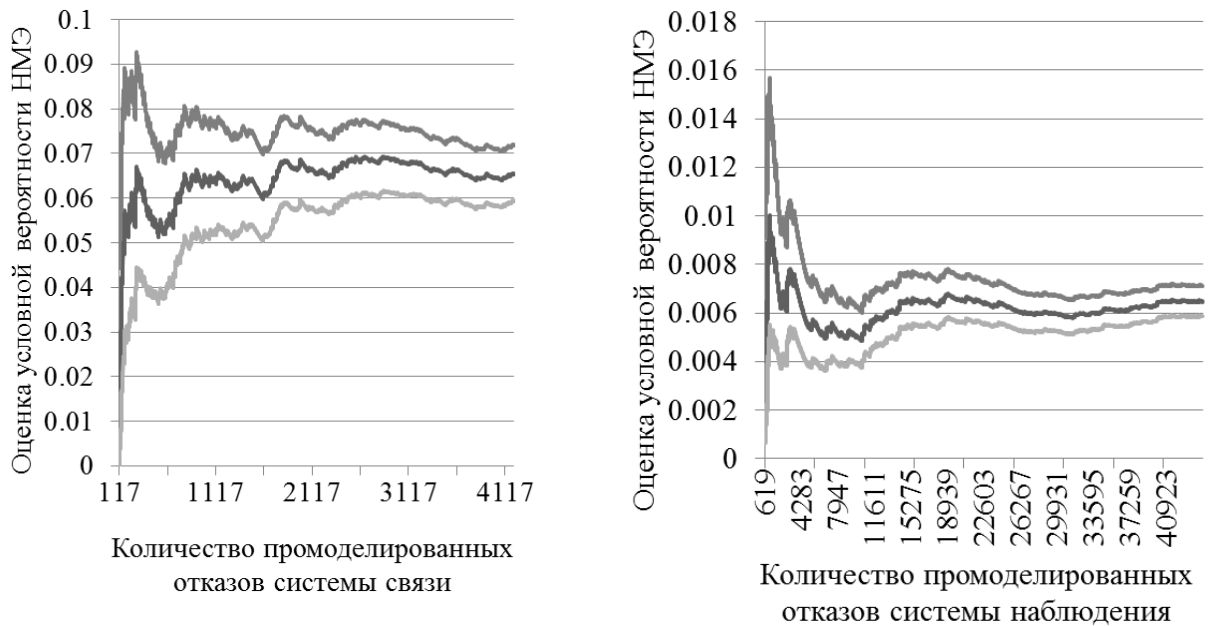


Рисунок 12 – Сходимость оценки значения условной вероятности НМЭ при отказах систем связи и наблюдения

Для расчета уровня БП полетов в соответствии с формулой (9) на основе статистических данных по БП в РФ за 2015-2018 годы, а также с учетом ТТХ различных технических средств связи и наблюдения, были выбраны следующие значения:

- частота НМЭ в нормальном режиме работы  $Q_{ос/норм} = 6.5975 \cdot 10^{-6}$  на час полета;

- интенсивность отказов системы связи:  $\lambda_{\text{отк.св.}} = 2.5 \cdot 10^{-5}$  в час;
- интенсивность отказов системы наблюдения:  $\lambda_{\text{отк.наб.}} = 5 \cdot 10^{-5}$  в час;
- среднее время восстановления системы связи  $\tilde{T}_{\text{отк.св.}} = 0.16$  ч.;
- среднее время восстановления системы наблюдения  $\tilde{T}_{\text{отк.наб.}} = 0.16$  ч.

В таблице 1 приведены рассчитанные значения уровня БП  $Q_{\text{ос}}$  для секторов перспективной структуры Московского РДЦ.

Таблица 1 – Рассчитанный уровень БП  $Q_{\text{ос}}$  для секторов ОВД перспективной структуры Московского районного диспетчерского центра

Сектор	$Q_{\text{ос}}, 10^{-6}$ на час полета		$Q_{\text{ос}} - Q_{\text{ос/норм}}, 10^{-8}$ на час полета	
	Исходная интенсивность	Увеличенная интенсивность	Исходная интенсивность	Увеличенная интенсивность
Воронеж 1	6.73846	6.93256	14.0959	33.5057
Запад 1	6.67870	6.72386	8.11952	12.6361
Харьков 1	6.67899	6.70735	8.14878	10.9852
Запад 2	6.63572	6.66109	3.82162	6.35942
Воронеж 2	6.62327	6.64315	2.57735	4.56534
Киев 2	6.62578	6.64229	2.82787	4.47887
Запад 3	6.63050	6.65727	3.30039	5.97715
Киев 1	6.62867	6.63697	3.11675	3.94712
Горький 2	6.62016	6.63513	2.26612	3.76348
Горький 5	6.63284	6.66651	3.53369	6.90093
Ленинград	6.62153	6.63993	2.40278	4.24269
Транзит	6.60880	6.61250	1.13027	1.50078

По результатам расчета можно сделать вывод, что в целом более высокая частота НМЭ наблюдается для секторов ОВД с наибольшей интенсивностью ВД (Воронеж 1, Воронеж 2, Запад 1, Запад 2). Однако, есть исключения, например, сектор Харьков 1 имеет относительно невысокую интенсивность ВД и высокую частоту НМЭ, что обусловлено особенностями структуры и потока ВД (наличие точек пересечения и точек слияния маршрутов). В процентном соотношении относительный вклад в уровень БП факторов, связанных с отказами систем связи и наблюдения, является невысоким и изменяется в диапазоне от 0.17% до 4.83%.

## ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ ДИССЕРТАЦИИ

1. Выполнен анализ методов и моделей, предназначенных для оценки БП, обоснована актуальность применения имитационного моделирования для этой цели.

2. Разработан комплекс методов и алгоритмов для оценки уровня БП с применением статистического имитационного моделирования управляемого воздушного движения.

3. Разработаны состав и структура имитационной модели управляемого воздушного движения в секторе ОВД РДЦ. Разработаны алгоритмы имитации

операций диспетчера по управлению потоком ВС, обнаружения и предотвращения конфликтов. Разработанная модель позволяет также рассчитывать загруженность диспетчерской позиции.

4. Разработано программное средство, реализующее разработанные модели и алгоритмы. Показана возможность решения задачи анализа БП на примере исследований для новой структуры Московского РДЦ.

Совокупность полученных в диссертационной работе теоретических и практических результатов позволяет сделать вывод о том, что поставленные задачи решены, цель исследований достигнута.

## **СПИСОК ПУБЛИКАЦИЙ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ**

*Публикации в научных журналах, входящих в перечень ВАК:*

1. Обухов Ю.В., Попов А.С., Орлов В.С., Котова А. О. Применение имитационного моделирования для оценки безопасности полётов // Труды МАИ, №81, 2015.

Соискателем проведен анализ методов оценки БП. Сделан вывод о необходимости применения ИМ для этой цели. Определены структура и состав имитационной модели.

2. Котова А.О., Зубкова И.Ф., Обухов Ю.В. Особенности человека-оператора в модели диспетчерского обслуживания воздушного движения в составе имитационной модели оценки безопасности полетов // Труды ГосНИИАС. Серия: Вопросы авионики, №1(34), 2018, С. 41-61.

Соискателем разработаны алгоритмы имитации операций диспетчера УВД по управлению воздушным движением. Предложена структура модели диспетчерского обслуживания.

3. Обухов Ю.В., Сикачев В.Ю., Попов А.С. Оценка безопасности полетов в одном из вариантов перспективной структуры московского районного центра с применением имитационного моделирования // Труды ГосНИИАС, Серия: Вопросы авионики, №2(35), 2018, С. 3-17.

Соискателем проведены исследования по оценке БП в перспективной структуре московского районного центра ОВД с применением разработанной ранее имитационной модели. Сделан вывод о необходимости доработки рассматриваемого варианта структуры.

4. Обухов Ю.В., Вишнякова Л.В. Решение задачи оценки безопасности полетов с помощью метода имитационного моделирования // Изв. РАН. ТиСУ, №6, 2018.

Соискателем предложены методы и алгоритмы анализа БП в СУВД с применением имитационного моделирования операций диспетчера по управлению

воздушным движением. Разработаны алгоритмы имитации различных случайных факторов, влияющих на БП.

*Публикации по теме диссертации в других научных изданиях:*

5. Косолапов Д. С., Обухов Ю. В. Имитационная математическая модель оценки безопасности в секторе управления воздушным движением. Шестая всероссийская научно-практическая конференция «Имитационное моделирование. Теория и практика» ИММОД-2013.-Казань: Изд-во «Фэн» Академии наук РТ, 2013.- Т.2-с.

Соискателем предложена структура имитационной модели управления воздушным движением в секторе ОВД.

6. Болтачёв В. Ю., Косолапов Д. С., Обухов Ю. В. Применение имитационного моделирования для оценки безопасности полётов. Сборник тезисов докладов II Всероссийской научно-технической конференции «Моделирование авиационных систем», 2013, с. 152.

Рассмотрены методы оценки БП, а также вопросы применения ИМ для анализа функционирования СУВД.

7. Обухов Ю. В. Имитационная математическая модель для оценки безопасности полётов. Московская молодёжная научно-практическая конференция «Инновации в авиации и космонавтике – 2014». 22-24 апреля 2014 года. Москва. Сборник тезисов докладов. – М.: ООО «Принт-салон». Тираж 300 экз.

Рассмотрены алгоритмы имитации различных случайных факторов в имитационной модели для оценки БП.

8. Обухов Ю. В., Попов А. С., В. С. Орлов, А. О. Котова Применение имитационного моделирования для оценки безопасности полётов. Конкурс научно-технических работ и проектов «Молодёжь и будущее авиации и космонавтики». Аннотации работ. 2014 г.

Соискателем разработаны алгоритмы обнаружения и разрешения потенциальных конфликтных ситуаций в имитационной модели диспетчерского обслуживания.

9. Обухов Ю.В. Применение имитационного моделирования для оценки безопасности полётов в Санкт-Петербургском укрупнённом центре обеспечения воздушного движения // Седьмая всероссийская научно-практическая конференция «Имитационное моделирование. Теория и практика» ИММОД-2015: Труды конф., 21-23 окт. 2015 г., Москва: в 2 т. / Ин-т проблем упр. им. В.А. Трапезникова Рос. акад. наук ; под общ. ред. С.Н. Васильева, Р.М. Юсупова. – Т. 2. – М.: ИПУ РАН, 2015, С.249-253.

Соискателем проведено исследование по анализу БП в перспективной структуре Санкт-Петербургского укрупнённого центра ОВД.

10. Обухов Ю.В. Оценка безопасности полетов вариантов аэронавигационной структуры секторов УВД с применением имитационного моделирования // Труды Восьмой всероссийской научно-практической конференции «Имитационное моделирование. Теория и практика» ИММОД-2017, г. Санкт-Петербург, 18-20 октября 2017 г. СПб.: Изд-во ВВМ, 2017. С. 491-496.

Соискателем проведено исследование по анализу БП различных вариантов аэронавигационной структуры ВП.

11. Обухов Ю. В., Зубкова И. Ф. Методы оценки безопасности полетов в гражданской авиации. III Всероссийская научно-техническая конференция «Моделирование авиационных систем», сборник тезисов докладов, 2018.

Соискателем произведен обзор современных методов оценки БП.

12. Котова А. О., Обухов Ю. В. Моделирование диспетчерского обслуживания воздушного движения в составе имитационной модели оценки безопасности полетов с учетом особенностей человека-оператора. III Всероссийская научно-техническая конференция «Моделирование авиационных систем», сборник тезисов докладов, 2018.

Соискателем разработаны алгоритмы моделирования операций диспетчера ОВД сектора верхнего ВП по управлению ВД.