

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**

05.13.18 – Математическое моделирование, численные методы и комплексы программ

Диссертация на соискание ученой степени

кандидата технических наук

Научный руководитель

д.т.н., профессор,

Вишнякова Л.В.

Москва, 2019

ОГЛАВЛЕНИЕ

ВВЕДЕНИЕ.....	4
ГЛАВА 1 БЕЗОПАСНОСТЬ ПОЛЕТОВ В СИСТЕМАХ УПРАВЛЕНИЯ ВОЗДУШНЫМ ДВИЖЕНИЕМ.....	8
1.1 Аналитические модели оценки уровня безопасности полетов	9
1.2 Имитационные модели и алгоритмы для оценки уровня безопасности полётов.....	11
1.3 Моделирование редких событий методом Монте-Карло	18
1.4 Недостатки существующих методов оценки безопасности полетов.....	19
1.5 Техническая постановка задачи	20
1.6 Математическая постановка задачи.....	22
1.7 Выводы	23
ГЛАВА 2 РАЗРАБОТКА МЕТОДОВ И АЛГОРИТМОВ АНАЛИЗА БЕЗОПАСНОСТИ ПОЛЕТОВ.....	26
2.1 Методы и алгоритмы имитационного моделирования для анализа безопасности полетов	26
2.2 Метод анализа безопасности полетов	28
2.3 Получение статистических данных посредством сохранения состояния моделирования в моменты реализации опасных факторов и возврата к сохранённому состоянию	29
2.4 Определение фактов опасных событий в процессе имитационного моделирования.....	30
2.4 Детерминированные факторы, влияющие на безопасность полетов	31
2.5 Случайные факторы, влияющие на безопасность полетов	36
2.6 Выводы	43
ГЛАВА 3 ОПИСАНИЕ ИМИТАЦИОННОЙ МОДЕЛИ УПРАВЛЯЕМОГО ВОЗДУШНОГО ДВИЖЕНИЯ	45
3.1 Принципы моделирования, состав и структура имитационной модели управляемого воздушного движения в секторе ОВД.....	45
3.2 Модель диспетчерского обслуживания.....	46
3.3 Модель воздушной обстановки.....	73

3.4 Модели технических систем	78
3.5 Моделируемые случайные факторы, влияющие на безопасность полета	80
3.6 Вычисляемые показатели безопасности полетов	83
3.7 Возможности по анализу моделируемой воздушной обстановки пользователем	87
3.8 Пример исследования.....	92
3.9 Выводы	96
ГЛАВА 4 ОЦЕНКА БЕЗОПАСНОСТИ ПОЛЁТОВ В НОВОЙ СТРУКТУРЕ МОСКОВСКОГО РАЙОННОГО ЦЕНТРА	97
4.1 Анализ структуры воздушного пространства.....	97
4.2 Анализ исследовательских потоков воздушного движения	98
4.4 Определение рисков для безопасности полетов, связанных с временной загруженностью диспетчерской позиции.....	100
4.5 Расчет вероятности нарушений минимумов эшелонирования в результате отказов систем связи и наблюдения	102
4.6 Расчет уровня безопасности полетов.....	104
4.7 Выводы	107
ЗАКЛЮЧЕНИЕ	108
СПИСОК СОКРАЩЕНИЙ И УСЛОВНЫХ ОБОЗНАЧЕНИЙ	110
СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ.....	112
ПРИЛОЖЕНИЕ 1. РЕЗУЛЬТАТЫ РАСЧЕТА ВРЕМЕННОЙ ЗАГРУЖЕННОСТИ ДИСПЕТЧЕРСКИХ ПОЗИЦИЙ МОСКОВСКОГО УКРУПНЕННОГО РАЙОННОГО ДИСПЕТЧЕРСКОГО ЦЕНТРА	119
ПРИЛОЖЕНИЕ 2. РЕЗУЛЬТАТЫ РАСЧЕТА УСЛОВНЫХ ВЕРОЯТНОСТЕЙ ОПАСНЫХ СОБЫТИЙ ПРИ ОТКАЗАХ СИСТЕМ СВЯЗИ И НАБЛЮДЕНИЯ.....	128

ВВЕДЕНИЕ

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 сокращенного минимума эшелонирования, подлежащего применению в воздушном пространстве (ВП), 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. За предыдущие годы было проведено создание Санкт-Петербургского, Самарского, Екатеринбургского и Хабаровского укрупненных районных диспетчерских центров (РДЦ) обслуживания воздушного движения (ОВД)[1]. В ходе такой реорганизации осуществлялось объединение небольших районных центров (РЦ) в один крупный центр и перенос всех диспетчерских позиций, входящих в состав объединяемых РЦ, в единый зал управления ВД.

Все эти изменения должны подвергаться всестороннему анализу, поскольку они затрагивают интересы многих сторон, к которым относятся авиакомпании, провайдеры аэронавигационных услуг, аэропорты, авиационные власти. При этом исследуются экономические, организационные, технические аспекты функционирования СУВД. 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.

Сложность анализа функционирования СУВД заключается в наличии большого количества случайных и неопределенных факторов, действующих в ней. К ним относятся ошибки и погрешности в работе различных технических подсистем, возможность отказов в работе авиационной техники, неблагоприятные условия внешней среды, а также «человеческий фактор».

Степень разработанности темы исследования. Работы, связанные с вопросами оценки рисков для безопасности полетов, проводились В. Б. Спрысковым, И. М. Грибковым, Л. К. Щербаковым, К. Л. Исаакином, 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 операций, выполняемых диспетчерами ОВД, не учитывается реальная технология работы диспетчера.

В ФГУП «ГосНИИАС» в последние годы был разработан ряд имитационных моделей, позволяющий проводить исследования различных аспектов функционирования СУВД. Данная диссертационная работа посвящена разработке методов, алгоритмов и моделей, предназначенных для анализа безопасности полета 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 необходимо решить следующие **задачи**:

- произвести анализ существующих методов и моделей оценки безопасности полетов;
- разработать методы и алгоритмы анализа безопасности полетов с применением имитационного моделирования;
- разработать имитационную модель управляемого ВД, основанную на подробном моделировании операций диспетчеров по управлению ВД, обнаружению и разрешению конфликтов;
- разработать структуру и состав программного средства (ПС), предназначенного для анализа безопасности полетов 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 безопасности полетов в системах управления воздушным движением с использованием имитационного моделирования (ИМ);
- разработан алгоритм формирования случайных исследовательских потоков ВД 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;
- разработана 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 безопасности полетов в СУВД. ПС является составной частью программного комплекса имитационного моделирования «КИМ ОрВД», установленного 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 безопасности полетов 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 безопасности полетов 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 диспетчеров 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 132 страницы, количество рисунков и таблиц: 69 рисунков, 18 таблиц.

ГЛАВА 1 БЕЗОПАСНОСТЬ ПОЛЕТОВ В СИСТЕМАХ УПРАВЛЕНИЯ ВОЗДУШНЫМ ДВИЖЕНИЕМ

Безопасность полетов является одним из приоритетов развития гражданской авиации. В соответствии с Руководством по управлению безопасностью полётов ИКАО [2] под этим термином понимается состояние, при котором вероятность нанесения вреда человеку или порчи имущества поддерживается на приемлемом уровне или ниже его, что обеспечивается в ходе непрерывного процесса выявления угроз и управления рисками. Конечной целью является полное устранение авиационных происшествий и серьёзных инцидентов, однако в авиационной системе невозможно полностью исключить влияние угроз и связанных с ними рисков. Поэтому необходимо, чтобы риски для безопасности полетов непрерывно уменьшались.

С этой целью в Европе и США возникли и развиваются программы модернизации систем организации воздушного движения «Single European Sky ATM R&D» (SESAR) и «Next Generation» (NextGen) [3]. В России также существует федеральная целевая программа «Модернизация Единой системы организации воздушного движения Российской Федерации».

В соответствии с документами ИКАО [2, 4] одним из основных показателей БП является частота опасных событий на час полета ВС:

$$Q_{oc} = \frac{N_{oc}}{H} \quad (1.1)$$

где Q_{oc} – частота опасных событий на час полета ВС 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.

Опасными событиями являются различные инциденты и авиационные происшествия: нарушения минимумов эшелонирования, опасные сближения, столкновения воздушных судов в воздухе или на аэродроме, несанкционированное занятие взлетно-посадочной полосы (ВПП), столкновения воздушных судов с землей, столкновения воздушных судов с птицами, попадание в опасные явления погоды и другие.

В настоящее время основным методом определения уровня безопасности полётов является метод «мозгового штурма» [4, 5], проводимого группами экспертов в сфере эксплуатации радиотехнического оборудования и связи, а также в сфере управления

воздушным движением (УВД). Анализ научно-технической литературы показал, что существует большой объём работ, посвящённых методам оценки уровня безопасности полётов с помощью математического моделирования. Эти методы можно разделить на две группы: аналитические и методы с применением имитационного моделирования.

К аналитическим моделям и алгоритмам относятся модели Reich P. G. [6], Hsu D. A. [7], Brooker P., Lloyd D. E. [8-13], Anderson D. [14], Bakker G. J., Blom H. [15-17]. В нашей стране этим вопросам посвящены работы В. Б. Спрыскова, К. Л. Исаакяна, Демидова О. М., И. М. Грибкова, Л. К. Щербакова, В. Л. Кузнецова [18-26], Е. И. Компанцевой [27-30], А. Д. Габринович [31], В. М. Рухлинского, А.А. Хаустова, А. С. Молотовника [32].

Работы на тему применения имитационного моделирования для оценки безопасности полётов появились относительно недавно. К ним относятся проекты *SESAR MAREA* и *EMERGIA*, выполненные в Национальной аэрокосмической лаборатории *NLR* (Нидерланды) [33, 34], работы [35-37], а также работы [38, 39].

Следует отметить, что количество работ посвящённых аналитическому моделированию риска опасных событий, превышает количество работ посвящённых применению имитационного моделирования. Рассмотрим подробнее существующие аналитические и имитационные модели оценки уровня безопасности полетов.

1.1 Аналитические модели оценки уровня безопасности полетов

Первые аналитические модели появились в 60-х годах. К настоящему времени появилось множество моделей, предназначенных для оценки величины риска столкновений ВС в различных условиях полёта. Главной их задачей является поддержка принятия решений при планировании и развитии авиационных транспортных систем.

1.1.1 Модель Райха

Модель Райха [6] является одной из первых аналитических моделей. Она была разработана для оценки величины риска столкновения при длительных трансокеанических полётах ВС, который вызван навигационными ошибками ВС в определении собственного местоположения и скорости. В модели рассматриваются ВС, летящие на параллельных воздушных трассах или на одной трассе, на встречном или попутном курсах. Форма ВС аппроксимируется параллелепипедами с размерами $L_x \times L_y \times L_z$. Предполагаемое местоположение ВС согласно плану полета находится в точке А. Задача диспетчера состоит в

том, чтобы точка В, которая является предполагаемой позицией любого другого ВС, никогда не попала внутрь параллелепипеда $2L_x \times 2L_y \times 2L_z$, описанного вокруг первого ВС.

Из-за ошибок определения местоположения ВС, а также ошибок выдерживания плановой скорости, реальные позиции (А', В') каждого ВС будут отличаться от номинальных (А, В). Риск столкновения в этом случае – это вероятность того, что вектор [А', В'] сжимается настолько, что его длина станет меньше, либо равна длине одной из сторон параллелепипеда, описывающего размеры ВС.

1.1.2 Модель ИКАО

Модель, предназначенная для оценки риска столкновения при эшелонировании, основанном на расстоянии, для ВС, движущихся по одной трассе или на пересекающихся трассах, представлена в Руководстве ИКАО по методике планирования воздушного пространства для определения минимумов эшелонирования [4]. Модель базируется на допущениях, сделанных в модели Райха, однако не требует, чтобы оба ВС находились в горизонтальном полёте. Полагается, что 1-ое ВС представляется круговым цилиндром радиуса λ_{xy} и высотой $2\lambda_z$, который обозначим C , а 2-ое ВС – точкой, которую обозначим символом P . Для того чтобы имело место столкновение, необходимо, чтобы P проникла в C через боковую поверхность или через верх или низ. В Руководстве ИКАО приводятся варианты применения этой модели для нескольких случаев:

- полёт ВС на пересекающихся маршрутах на одной высоте;
- полёт ВС на одной трассе в одном направлении;
- полёт ВС на одной трассе на встречных маршрутах.

1.1.3 Комплексное моделирование риска столкновения

В НИИ Аэронавигации была предложена методика комплексного моделирования риска столкновения [18]. В модели рассматриваются две составляющие риска столкновения:

- риск при управлении воздушным движением (УВД) N_{Σ}^{ATC} , который обусловлен ошибками подсистемы наблюдения. При расчёте риска предполагается, что эшелонирование между ВС, оценённое подсистемой наблюдения, не нарушает установленных норм;
- риск при отсутствии УВД N_{Σ}^{NOATC} , который обусловлен ошибками текущего планирования и ошибками непосредственного УВД. При расчёте риска предполагается, что ВС нарушают нормы эшелонирования.

Риск опасного события Q_{oc} может быть записан как сумма:

$$Q_{oc} = P^{NOATC} \cdot N_{\Sigma}^{NOATC} + P^{ATC} \cdot N_{\Sigma}^{ATC}$$

P^{NOATC} – это вероятность отсутствия УВД в рассматриваемом ВП, которая определяется как

$$P^{NOATC} = P_{ош}^{Т.Пл.} \cdot P_{ош}^{дисп.}$$

где $P_{ош}^{Т.Пл.}$ – вероятность ошибки текущего планирования, а $P_{ош}^{дисп.}$ – вероятность ошибки при непосредственном УВД.

P^{ATC} – это вероятность присутствия УВД в рассматриваемом ВП, которая определяется как

$$P^{ATC} = (1 - P_{ош}^{Т.Пл.}) \cdot (1 - P_{ош}^{дисп.})$$

Расчёт значений P^{ATC} и P^{NOATC} возможен на основе моделей, предложенных в [19-21]. Значения рисков N_{Σ}^{NOATC} и N_{Σ}^{ATC} получают на основе комплексной модели, в которой рассчитываются риски для типовых элементов ВП. Для этого используются либо модель ИКАО, описание которой приведено выше, либо другие, как, например, предложенные в [19-21], где представлены аналитические выражения рисков столкновения ВС на пересечении воздушных трасс и занятых эшелонах при УВД, а также при ошибках службы движения.

1.1.4 Обобщенная модель Райха

Модель использует марковские процессы с гибридными состояниями, которые были разработаны для оценки безопасности в таких областях как ядерная энергетика и химическая промышленность. Приложение этих моделей к проблемам оценки безопасности полетов позволяет выявлять и оценивать угрозы для конкретного потока воздушного движения с помощью статистического моделирования на сетях Петри [15-17].

1.2 Имитационные модели и алгоритмы для оценки уровня безопасности полётов

В Западной Европе и США в последние десятилетия разработано несколько десятков средств ускоренного имитационного моделирования авиационных транспортных систем [40]. Однако результаты анализа материалов показали, что существуют аспекты функционирования этих систем, не реализованные или реализованные только в небольшом числе средств. Эти аспекты включают в себя следующие аспекты, важные для оценки безопасности полетов:

- связь, навигация, наблюдение и потоки информации;

- моделирование человека-оператора;
- динамические аспекты процессов ВД.

В обзорной работе [41], анализирующей 15 наиболее известных средств моделирования процессов УВД, отмечено, что:

- показатель «Количество эксплуатационных ошибок (как системы, так и персонала)» не реализован ни в одном из средств;
- показатель «Число передач от диспетчера к диспетчеру» реализован менее чем в половине средств, моделирование работы персонала в существующих средствах отсутствует;
- только в некоторых средствах учитывается работа диспетчеров, загрузка пилота, а также ошибки персонала;
- системные отказы и ошибки не моделируются ни в одном из средств;
- моделирование полета на маршруте соответствует нереально эффективному полету через сектора, поскольку не принимаются во внимание проблемы разрешения конфликта и обеспечения профилей снижения и набора высоты;
- в немногих средствах моделирования вычисляется нагрузка заданиями, но и в них нет механизма обеспечения обратной связи с системой. Например, если диспетчер выполняет первое задание, а появляется второе задание, более критичное, то выполнение первого задания будет отсрочено, пока не будет выполнено второе задание. Система будет функционировать в условиях отложенного первого задания. Для адекватного моделирования таких ситуаций необходимо эту гибкость предусмотреть в средствах моделирования;
- необходима имитация работы средств связи диспетчера с бортом.

Относительно моделирования человека в контуре отмечено, что моделирование человеческих качеств ещё недостаточно разработано. Требуются исследования для формирования моделей человеческой деятельности и/или представления поведения человека. Должны быть созданы модели от упрощенных математических моделей функционирования человека до детализированного представления человеческой деятельности. При этом

ускоренное моделирование требует соблюдения баланса между скоростью и адекватностью моделируемых процессов. Актуальными остаются следующие аспекты моделирования:

- проблемы безопасности, например, такие, как маловероятные события, связанные с ошибками человека;
- моделирование человеческого поведения во время разрешения конфликта;
- объединение математических моделей поведения человека-оператора с ускоренными операционными имитационными моделями.

Для имеющихся средств моделирования существует проблема имитации человеческих качеств и/или поведения в средствах ускоренного моделирования. Некоторые модели действительно обеспечивают детализированные оценки рабочей нагрузки на человека в системе, основанные на загрузке заданиями, но не исследуют, не моделируют «познавательные, понятийные» проблемы, с которыми встречается человек-оператор. Для анализа нагрузки заданиями в этих моделях используются решающие правила или алгоритмы. Однако концепции будущего требуют, чтобы именно с помощью моделирования можно было оценивать влияние человека на систему, например, необходимо моделировать множество участников ВД (пилотов и диспетчеров) и координацию между ними. Некоторые концепции предполагают тесную координацию и взаимодействие между диспетчерами. Если учесть, что сейчас роли и обязанности диспетчеров существенно пересматриваются, способность средств моделировать эти изменения является ключевой.

В настоящее время глубокую проработку имеют вопросы моделирования полета ВС, обеспечения эшелонирования ВС, обнаружения и разрешения конфликтов, моделирования функции предотвращения столкновения с земной поверхностью и препятствиями, моделирования ограничений в использовании воздушного пространства, моделирования динамического уменьшения пропускной способности, связанного с погодой.

Правила эшелонирования, наряду с обнаружением конфликта, обычно моделируются посредством реализации стандартного минимального расстояния между самолетами разных типов. Поскольку новые технологии направлены на снижение минимумов эшелонирования, оценка безопасности полета выходит на первый план. Большинство используемых в настоящее время моделей может имитировать уменьшенное эшелонирование и демонстрировать эффективность от этого уменьшения.

Большинство средств моделирования предусматривают то или иное обнаружение конфликта, и больше половины средств моделируют разрешение конфликта. В большинстве случаев разрешение конфликта основано на реализации правил разрешения конфликтов. Предусмотрена определенная гибкость и настройка этих правил, благодаря чему нет необходимости в изменении программного кода модели. Однако имеется потребность в реализации и согласовании гибких баз знаний по правилам разрешения конфликтов.

Относительно исходных данных имитационных моделей отмечается, что желателен дополнительный сбор данных по реальным характеристикам для различных типов самолетов. Ключевая группа данных для любого анализа - поток воздушного движения; таким образом, эти данные особенно важны. В большинстве исследований расписание ВД на будущий период формируется на основе существующей информации о текущем расписании ВД, поэтому предположения, принятые относительно существующего графика воздушного движения, переходят во все создаваемые потоки прогнозируемого ВД.

1.2.1 Моделирование разрешения конфликтов

Обнаружение и разрешение потенциальных конфликтов является одной из самых главных задач диспетчера УВД. Конфликтом называется ситуация, когда между двумя и более ВС нарушаются минимумы эшелонирования, как продольные, так и вертикальные. Таким образом, каждый ВС окружён защищённым объёмом пространства, в который не должны попадать другие ВС. Размеры этого объёма могут определяться как пространственными параметрами, так и временными. Действия диспетчера направлены на выявление ситуаций, которые могут привести к конфликтам, и своевременное принятие мер по их недопущению или же их скорейшему разрешению, в случае, если конфликт свершился.

В работе [42] представлен обзор 68 методов обнаружения и разрешения конфликтов. Для обнаружения конфликтных ситуаций необходимо определённым образом предсказывать траекторию движения ВС на определённую глубину вперёд по времени. Выделяются три метода решения этой задачи:

1. Номинальный метод предполагает, что прогноз траектории осуществляется только на основе текущего состояния ВС. Применение этого метода показывает хорошие результаты при горизонте планирования в несколько секунд.
2. Построение траектории для наихудшего случая производится в предположении, что ВС может выполнять любой манёвр из определённого набора. Если какой-либо из этих

манёвров может привести к конфликтной ситуации, то конфликт считается спрогнозированным.

3. Вероятностный подход предполагает моделирование различных случайностей для определения возможных изменений в траектории движения. Это делается либо с помощью добавления ошибки позиционирования ВС к номинальной траектории, либо с помощью формирования полного набора возможных будущих траекторий, каждая из которых имеет определённую вероятность реализации. Затем, эти траектории проверяются на наличие конфликтов с другими ВС.

Разрешение конфликтов также может производиться различными способами:

1. Предопределённые манёвры.
2. Оптимизационный подход предполагает совмещение кинематической модели с набором стоимостных показателей. Оптимальная стратегия определяется с помощью траекторий с минимальной стоимостью. В качестве параметра стоимости могут рассматриваться расход топлива, перегрузка, время, загрузка диспетчера. Некоторые модели используют элементы теории игр, генетические алгоритмы, экспертные системы, нечёткую логику.
3. Метод силовых полей. Каждый ВС представляется здесь в виде заряженной частицы. Для выработки решения о манёвре используются видоизменённые электростатические уравнения, при этом между ВС действуют силы отталкивания.

Для непосредственного разрешения конфликта каждому ВС вырабатывается команда на определённый манёвр. Это может быть изменение скорости, боковой, вертикальный или комбинированный манёвр.

1.2.2 Проект SESAR MAREA

В рамках европейской научно-исследовательской программы в области ОрВД *SESAR* в 2011-2013 годах проводилась работа *MAREA (Mathematical Approach towards Resilience Engineering in ATM)* [43-45].

В рамках проекта система ОрВД рассматривается как сложная социотехническая система, в которой функционируют большое количество взаимодействующих людей-операторов и технических систем, работающих в разных организациях, расположенных в разных местах. Важнейшим свойством такой системы является отказоустойчивость (способность противостоять ошибкам и нарушениям человека-оператора, отказам и погрешностям технических систем). Несмотря на то, что процедуры и регламентирующие правила в значительной степени определяют рабочие процессы в ОрВД, контроль со стороны человека-оператора остаётся важным для эффективности и безопасности операций в нормальных и

критических условиях. Целью проекта *MAREA* являлась разработка метода математического моделирования и анализа для перспективных исследований отказоустойчивости в ОрВД. Был доработан набор психологических и организационных моделей, используемых в настоящее время для исследований в области безопасности полётов и отказоустойчивого проектирования, посредством разработки реестра новых типов модельных концепций для агентного моделирования.

В проекте использовалась база данных из 525 угроз, которые определяют широкое разнообразие условий, событий и обстоятельств работы людей-операторов, технических систем, внешних условий и их взаимодействий. На основе этого набора угроз был выделен набор из 38 модельных концепций, таких как ситуационная осведомлённость, динамическая изменчивость, режимы системы, функциональное состояние оператора, доверие, плохая погода. Было показано, что с помощью разработанной библиотеки модельных концепций могут быть промоделированы более чем 98% угроз. Таким образом, почти все угрозы могут быть представлены в агентном моделировании и моделировании сценариев воздушного движения, и, соответственно, могут быть эффективно проанализированы эмерджентные эффекты взаимодействий между модельными концепциями.

1.2.3 Применение имитационного моделирования для оценки безопасности полетов для различных уровней планирования в ОрВД

В ряде работ рассматривается вопрос применения имитационного моделирования для оценки рисков для безопасности полетов для целей планирования в системе ОрВД на стратегическом, тактическом и операционном уровнях [35-37].

Для целей планирования ОВД на стратегическом уровне (с горизонтом планирования в один год) предлагается использовать аналитические модели для получения оценок риска конфликтов в анализируемом воздушном пространстве. В этом случае оценка осуществляется на основе плановых потоков воздушного движения (расписание полетов), а учет влияния человеческого фактора не производится. Такие оценки могут применяться для сравнения различных вариантов аэронавигационной структуры с точки зрения безопасности.

На тактическом уровне (с горизонтом планирования в один сезон) для получения оценок риска используются также параметры различных технических систем. Влияние человека не учитывается. На этом уровне предлагается применять уже имитационное моделирование. Полученные оценки могут быть использованы для сравнения различных вариантов секторизации ВП.

На операционном уровне (с горизонтом планирования в несколько дней) предлагается применять также имитационное моделирование с использованием сетей Петри. В полной мере должно учитываться «поведение» ВС в полете, а также различные характеристики технических систем навигации, наблюдения и связи. Такая модель может использоваться для различных операционных сценариев (различные правила эшелонирования, разделение ответственности между пилотами и диспетчерами ОВД).

1.2.4 Отечественный опыт имитационного моделирования процессов выполнения управляемых полетов с оценкой показателей безопасности

В 80-е годы в нашей стране вопросам моделирования процессов и систем ОрВД было посвящено множество работ. Часть из них рассмотрена в обзорном отчете [46].

В настоящее время это направление активно развивается в ФГУП «ГосНИИАС». Вопросы актуальности применения имитационного моделирования для систем ОрВД рассмотрены в [47, 48]. Рассматриваются вопросы подготовки данных для моделирования [49], алгоритмы моделирования полета ВС [50, 51], проблемы и способы формирования бесконфликтных траекторий полета ВС в процессе моделирования с целью получения оценок эффективности полетов [52].

Разработанные модели, алгоритмы и программные комплексы были применены при проведении ряда исследований:

- оценка эффективности предлагаемой структуры воздушного пространства с учетом внедрений сокращенных интервалов вертикального эшелонирования ВС (RVSM) (2011);
- исследования по оценке эффективности предложенных изменений трассовой структуры при обслуживании потоков воздушного движения в верхнем воздушном пространстве Московского района ЕС ОрВД (2012);
- оценка предложенных изменений структуры воздушного пространства при обслуживании потоков воздушного движения в зоне ответственности укрупненных центров ОВД, сопредельных с Московским районом ЕС ОрВД (2014), а также в Московском районе ЕС ОрВД (2016, 2017).

Что касается отечественных работ по оценке безопасности полётов с использованием имитационного моделирования, можно выделить работы [38,39], в которых рассмотрены области применения, комплексирование с другими методами и задачи, решаемые при использовании имитационного моделирования; предложены методы и алгоритмы

имитационного моделирования, применяемые при исследовании процессов оперативного управления воздушным движением (УВД) в секторе со сложной структурой, в том числе модель трассовой структуры сектора УВД, имитация входных потоков ВД через сектор, начальных отклонений при входе в сектор, учет ветра, алгоритмы имитации диспетчерского управления ВС, взаимодействия диспетчера с экипажами ВС и с диспетчерами смежных секторов, расчет загрузки диспетчера и задержек в прохождении сообщений.

1.3 Моделирование редких событий методом Монте-Карло

Опасными событиями, которые представляют интерес с точки зрения безопасности полетов, являются нарушения минимумов эшелонирования, опасные сближения, столкновения. Частота их возникновения может иметь порядок 10^{-6} - 10^{-12} на час полетного времени, то есть эти события являются редкими. Количество испытаний, требуемое для получения удовлетворительной оценки этой вероятности с помощью прямого статистического моделирования, может оказаться неприемлемым.

Для ускорения процесса получения результатов с помощью метода Монте-Карло могут применяться специальные методы уменьшения дисперсии: метод расщепления и метод существенной выборки [62, 63, 64, 65, 66]. Этот методы впервые начали применяться в телекоммуникационной сфере для расчета вероятностей переполнения буфера сообщений и других редких событий.

Идея метода существенной выборки заключается в изменении вероятностной меры, за счет чего редкое событие становится более вероятным. Эффективность метода напрямую зависит от выбора новой плотности $f(x)$. Для сложных систем использование метода не всегда приводит к уменьшению дисперсии.

Идея метода расщепления заключается в разделении пространства состояний системы на несколько вложенных подмножеств $D = D_m \subset \dots \subset D_1$. Тогда вероятность редкого события $P(D)$ является произведением условных вероятностей промежуточных событий, определяемых фактом достижения системой состояния $D_k, k = 1..m$.

$$P(D) = P(D_1) \cdot P(D_2|D_1) \dots P(D_m|D_{m-1})$$

где $P(D_1)$ - вероятность достижения системой подмножества D_1 , условная вероятность $P(D_m|D_{m-1})$ определяет вероятность достижения системой подмножества D_m при условии, что до этого система находилась в подмножестве D_{m-1} . Условные вероятности вычисляются с

помощью моделирования методом Монте-Карло, при этом для их получения требуется значительно меньшее количество вычислений, чем для вычисления вероятности $P(D)$.

Метод позволяет существенно сократить время, требуемое для получения оценки по сравнению с методом прямого моделирования Монте-Карло.

1.4 Недостатки существующих методов оценки безопасности полетов

Для аналитических моделей характерна полная формализация и сведение моделирования к решению замкнутой системы уравнений, решением которой являются оценки искомых показателей. Для этого приходится вносить ряд допущений и упрощений, которые снижают точность результатов и адекватность модели. Также аналитическое моделирование не способно в полной мере оценить влияние на процесс «человеческого фактора». Помимо этого аналитические модели требуют предварительного сбора большого объема статистических данных об интенсивностях потоков воздушного движения, о распределении навигационных ошибок и других параметров моделей.

Имитационное моделирование не предполагает создания единой системы уравнений. Процесс обслуживания воздушного движения (ОВД) представляется как совокупность ряда процессов, каждый из которых формализуется по отдельности. То есть формально модель процесса ОВД, подобно реальному прототипу, представляется как результат взаимодействия коррелирующих процессов. В этом смысле мы конструируем модель реальной системы для постановки экспериментов на этой модели.

Существующие имитационные модели обладают следующими недостатками:

- упрощенное моделирование разрешения конфликтов между воздушными судами (ВС), разрешение конфликтов производится, как правило, только в горизонтальной плоскости;
- упрощенное моделирование операций, выполняемых диспетчерами ОВД, не учитывается реальная технология работы диспетчера.

Однако применение имитационного моделирования для исследования процессов ОВД открывает широкие возможности по сравнению с аналитическим моделированием: возможность моделирования процессов, приближенных к реальным, получение в ходе моделирования большого объема данных для анализа, что позволяет понять причины возникновения различных событий в ходе моделирования, неограниченные возможности создания новых сценариев учета новых факторов.

1.5 Техническая постановка задачи

Объектом исследования в работе является система управления воздушным движением (СУВД), являющаяся 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 УВД, планирование воздушного движения, непосредственное управление отдельными воздушными судами (ВС) и совокупностями ВС в заданных зонах УВД [67]. 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 1.1 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 безопасность в СУВД. Поэтому в дальнейшем в работе будет проводиться анализ безопасности полетов с точки зрения функционирования такого контура.

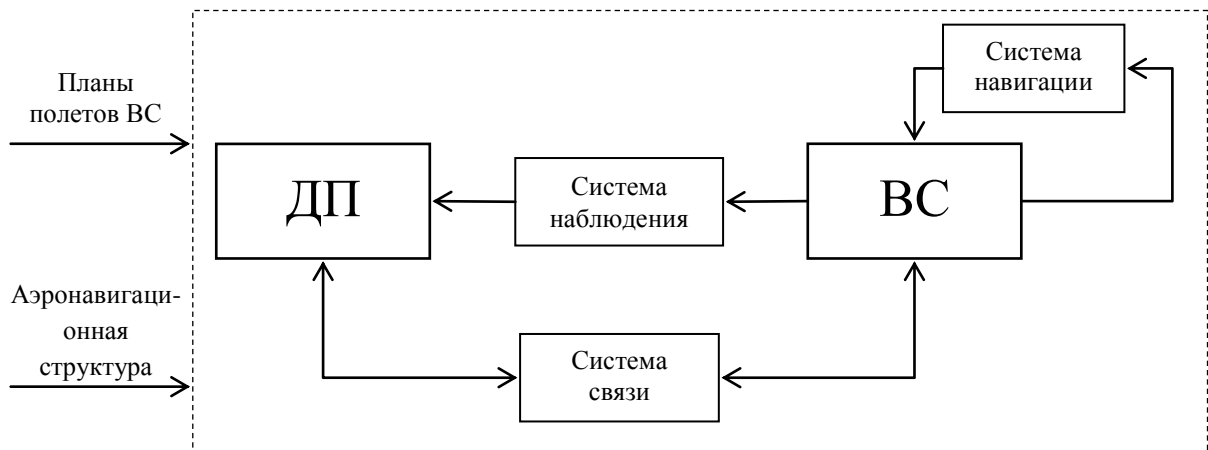


Рисунок 1.1 – Структурная схема контура непосредственного управления воздушным движением

На рисунке 1.1 ДП – это диспетчерская позиция, включающая в себя одного или несколько диспетчеров, осуществляющих непосредственное УВД в соответствии с технологией работы диспетчера. При этом учитываются данные о планах полета ВС, поступающие от плановой подсистемы СУВД. Диспетчеры обеспечивают регулирование и управление воздушным движением в границах своей ответственности, задачами которого являются

предотвращение столкновений между ВС, ускорение и поддержание упорядоченного потока ВД, предоставление консультаций и информации, необходимой для безопасного производства полетов. При необходимости диспетчер связывается с соседними диспетчерскими позициями для согласования условий приема на сопровождение ВС, влетающих в зону его ответственности или вылетающих из зоны ответственности.

При выявлении диспетчером потребности в предотвращении опасной ситуации между 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. В соответствии с этим выделяют фиксированную и подвижную авиационную электросвязь [68]. При построении системы фиксированной авиационной связи каналы речевой связи реализуются по принципу прямых или коммутируемых соединений с установкой на рабочих местах диспетчеров УВД аппаратуры оперативной связи. Авиационная воздушная связь обеспечивает бесперебойную передачу сообщений от ДП к экипажам ВС на всех этапах полета.

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. Также может производиться третичная обработка информации о ВС с целью объединения данных от разных источников. Все эти процессы позволяют идентифицировать ВС и осуществлять его сопровождение в процессе полета, что необходимо для выполнения задач непосредственного УВД.

Система навигации представляет собой совокупность технических средств, предназначенных для определения ВС положения своего центра масс и других параметров движения. Эти технические средства могут представлять собой как автономные системы, так и неавтономные. К первой группе относятся, например, бортовые инерциальные системы навигации, а также системы астронавигации. Ко второй группе относятся радиотехнические, спутниковые и светотехнические системы, которые включают в свой состав как бортовые, так и

наземные и спутниковые компоненты. Совокупность всех навигационных средств позволяет выполнить главную задачу воздушной навигации – обеспечение точного полета ВС по программной пространственно-временной траектории [69].

1.6 Математическая постановка задачи

БП зависит от множества факторов, детерминированных и случайных. За основной показатель, характеризующий БП в СУВД, примем частоту события Q_{oc} в системе за определенный период времени, приведенную к налету всех ВС в рассматриваемом воздушном пространстве за тот же период времени. Представим этот показатель следующим образом:

$$Q_{oc} = F(\bar{p}, \bar{x}), \quad (1.2)$$

где \bar{p} – вектор детерминированных факторов, влияющих на безопасность полётов, \bar{x} – вектор случайных факторов, влияющих на безопасность полётов, 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 [54]; \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, описание которых приводится в [55].

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 и между 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 , которые представляют существенную угрозу для безопасности полетов. Отказ линий передачи речевой информации (\bar{x}_4) выражается в отсутствии у диспетчера возможности передавать экипажам ВС речевые команды с целью предотвращения нарушений минимумов эшелонирования и столкновений. Аналогичные последствия могут возникнуть в случае выхода из строя автоматизированной системы управления ВД, либо в случае возникновения чрезвычайной ситуации в помещении, в котором ведется управление ВД (пожар, задымление). Отказ линий передачи траекторной информации (\bar{x}_5) выражается в отсутствии у диспетчера возможности визуально оценить местоположение ВС на карте друг относительно друга и произвести актуальные расчеты с целью определения возможности опасных ситуаций в воздухе. 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 (1.2) 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 выполняемым функциям, а также в невозможности строгой формализации некоторых факторов, влияющих на безопасность полётов, в особенности это касается «человеческого фактора». Цель исследования заключается в разработке методов, алгоритмов и моделей, которые позволят оценить уровень безопасности полетов Q_{oc} с помощью имитационного моделирования.

1.7 Выводы

В первой главе диссертации были рассмотрены методы оценки безопасности полетов. Система управления воздушным движением является сложной распределенной социотехнической системой, в состав которой входит большое количество технических систем и людей-операторов. Любые изменения в такой системе должны сопровождаться проведением анализом влияния этих изменений на безопасность полетов. Особенно эти вопросы актуальны при проектировании и анализе перспективных систем. Сложность системы обуславливает

большое количество методов оценки безопасности полетов. Все эти методы используют в том или ином виде аналитическое и имитационное моделирование.

В аналитической модели Райха рассматривается движение ВС по параллельным маршрутам. При этом риск столкновений обусловлен в основном навигационными погрешностями ВС. Модель была разработана для обоснования требований к нормам эшелонирования для трансатлантических перелетов. Дальнейшее развитие модели привело к появлению аналитических моделей ИКАО и обобщенной модели Райха. Применение аналитического моделирования имеет недостатки, связанные с большим количеством допущений, применяемых при построении моделей, ограниченной возможностью моделирования «человеческого» фактора, а также необходимостью обработки большого количества реальных данных.

Применение имитационного моделирования для оценки безопасности и эффективности систем ОрВД получило развитие относительно недавно. Его применение позволяет учесть большое количество угроз и факторов, влияющих на безопасность полетов, выявить последовательности событий, приводящих к опасным ситуациям, а также учесть влияние «человеческого» фактора. Важнейшей составляющей таких моделей являются алгоритмы обнаружения и предотвращения конфликтных ситуаций.

Имитационные модели, разработанные в рамках проекта SESAR MAREA, позволяют учесть при моделировании 525 угроз, которые определяют широкое разнообразие условий, событий и обстоятельств работы людей-операторов, технических систем, внешних условий и их взаимодействий. В других работах предлагается применять разные имитационные модели для разных уровней планирования в системах ОрВД – стратегического, тактического и операционного.

В нашей стране применение имитационного моделирования для оценки безопасности полетов недостаточно развито. Таким образом, актуальной является проблема разработки методов оценки безопасности полетов с применением имитационного моделирования, разработка имитационной модели, которая позволит решать такие задачи.

Другой актуальной проблемой является то, что оцениваемые опасные события имеют частоту возникновения порядка 10^{-6} - 10^{-12} на час налета. Для получения оценки вероятности таких событий методом Монте-Карло при анализе сложных систем необходимо применять метод уменьшения количества испытаний, заключающийся в рассмотрении вероятности

редкого события как произведения условных вероятностей менее редких событий, предшествующих рассматриваемому.

В разделе также выполнены техническая и математическая постановки задачи. Рассматривается сложная социотехническая система управления воздушным движением. Безопасность полетов в ней зависит от множества факторов – детерминированных и случайных и так же является случайной величиной. Оценка безопасности полетов с помощью имитационного моделирования является основной задачей исследования.

ГЛАВА 2 РАЗРАБОТКА МЕТОДОВ И АЛГОРИТМОВ АНАЛИЗА БЕЗОПАСНОСТИ ПОЛЕТОВ

2.1 Методы и алгоритмы имитационного моделирования для анализа безопасности полетов

Во второй главе приводится описание методов и алгоритмов, разработанных для решения поставленной в первой главе задачи анализа уровня безопасности полетов в системе управления воздушным движением.

Входные данные для разработанного процесса оценки БП обусловлены детерминированными и случайными факторами, влияющими на БП, которые были приведены в технической постановке задачи (§1.5).

Особенностью имитационного моделирования, используемого в решаемой задаче, является то, что предложено максимально подробно моделировать условия и процессы, происходящие 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. Такое подробное моделирование позволяет учесть в моделировании больше особенностей функционирования СУВД.

В качестве исходных планов полета могут использоваться реальные потоки ВД. В этом случае перед моделированием нам необходимо делать предположение о структуре этих потоков с учетом всех особенностей предлагаемой структуры ВП, проводить их перестроение. Проведение статистического моделирования для получения оценок БП требует формирования случайных длинных потоков ВД. Для этого был разработан алгоритм, который приводится в п. 2.5.5.

Для непосредственного проведения статистического моделирования были разработаны методы и алгоритмы, позволяющие сократить время моделирования. Для этого получение статистических данных производится посредством сохранения состояния моделирования в определенные моменты времени и дальнейшим проведением моделирования развития ситуации в тех или иных режимах функционирования системы (см. §2.3).

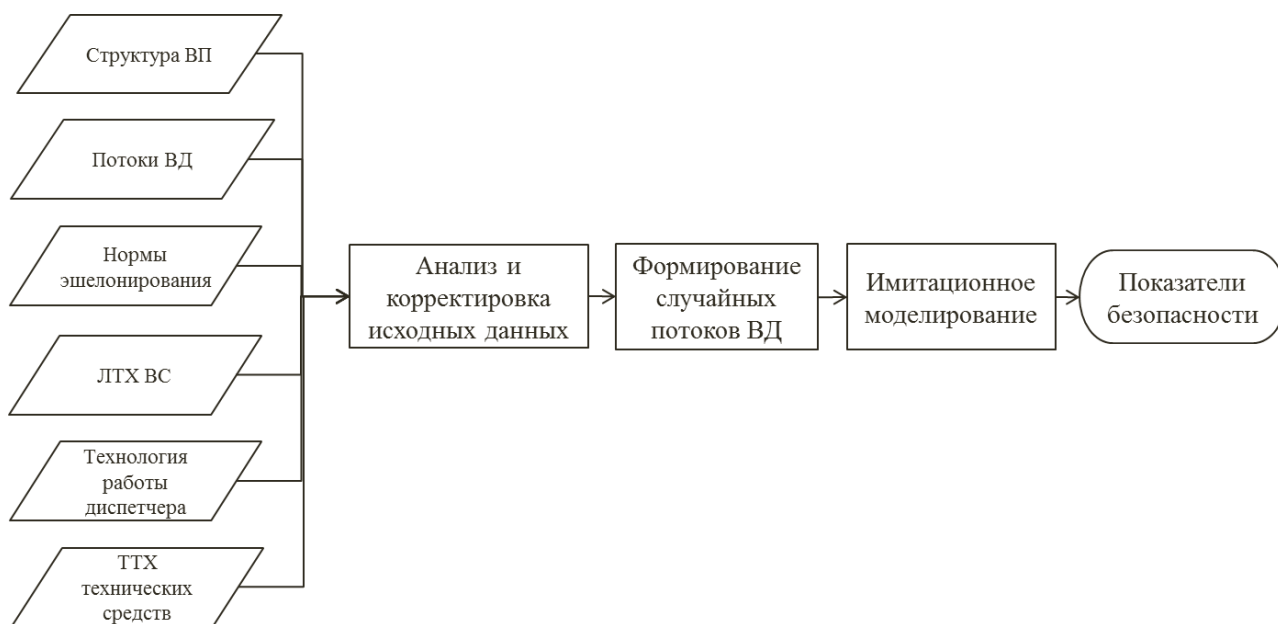


Рисунок 2.1 – Общая схема проведения имитационного моделирования с целью анализа безопасности полетов в СУВД

Общая схема проведения имитационного моделирования с целью анализа безопасности полетов в СУВД приведена на рисунке 2.1 и состоит из следующих этапов:

- анализ исходных данных и выполнение дополнительных процедур:
 - проверка корректности исходных данных по трассовой структуре и границам объемов ВП;
 - проверка соответствия планов полета ВС ограничениям трассовой структуры, выполнение оптимизационных процедур перестроения планов полета на новую структуру ВП;
 - выбор параметров моделей 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 при отказах систем связи и наблюдения. При этом для ускорения процесса при моделировании применяется метод сохранения состояний системы, функционирующей в обычном режиме и возврата в сохраненное состояние системы с целью моделирования функционирования в других режимах;
- получение оценок показателей безопасности полетов.

2.2 Метод анализа безопасности полетов

Безопасность полетов является интегральной характеристикой СУВД. Как было показано в §1.6, эта величина зависит от множества факторов, в том числе случайных. Среди случайных факторов можно выделить два фактора: \bar{x}_4 и \bar{x}_5 – отказы системы связи и системы наблюдения. При реализации этих событий происходит переход функционирования системы в нештатный режим работы. При этом вероятность возникновения опасных событий резко возрастает. Тогда уровень безопасности полетов 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:

$$P(A_1) + P(A_2) + P(A_3) = 1 \quad (2.1)$$

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

$$Q_{oc} = \frac{N_{oc/норм} + N_{oc/отк.св.} + N_{oc/отк.наб.}}{H} \quad (2.2)$$

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 (2.2) запишем следующим образом:

$$N_{oc/отк.св.} = \lambda_{отк.св.} \cdot T \cdot P(A_{oc} | A_{отк.св.}) \quad (2.3)$$

$$N_{oc/отк.наб.} = \lambda_{отк.наб.} \cdot T \cdot P(A_{oc} | A_{отк.наб.})$$

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,

$P(A_{ос}|A_{отк.наб.})$ – условная вероятность того, что произойдет опасное событие в результате отказа системы наблюдения.

Первое слагаемое в числителе из уравнения (2.2) запишем следующим образом:

$$N_{ос/норм} = Q_{ос/норм} \cdot H_{норм} \quad (2.4)$$

где $Q_{ос/норм}$ – 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.

$$H_{норм} = H - H_{отк.св.} - H_{отк.наб.} \quad (2.5)$$

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.

$$H_{отк.св.} = \lambda_{отк.св.} \cdot T \cdot \tilde{T}_{отк.св.} \cdot \frac{H}{T} \quad (2.6)$$

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 (2.2) – (2.6) запишем выражение для вычисления частоты опасных событий:

$$\begin{aligned} Q_{ос} = & Q_{ос/норм} \cdot (1 - \lambda_{отк.св.} \cdot \tilde{T}_{отк.св.} - \lambda_{отк.наб.} \cdot \tilde{T}_{отк.наб.}) + \\ & \lambda_{отк.св.} \cdot P(A_{ос}|A_{отк.св.}) \cdot \frac{T}{H} + \\ & \lambda_{отк.наб.} \cdot P(A_{ос}|A_{отк.наб.}) \cdot \frac{T}{H} \end{aligned} \quad (2.7)$$

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.

2.3 Получение статистических данных посредством сохранения состояния моделирования в моменты реализации опасных факторов и возврата к сохранённому состоянию

В процессе статистического моделирования нам необходимо в соответствии с (2.2) рассчитывать условную вероятность опасных событий, происходящих в различных режимах функционирования системы. Для ускорения процесса получения этих значений был разработан алгоритм сохранения состояний моделирования.

На рисунке 2.2 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, учитывая требования к надежности систем связи и наблюдения, а также учитывая последствие таких отказов на функционирование системы.

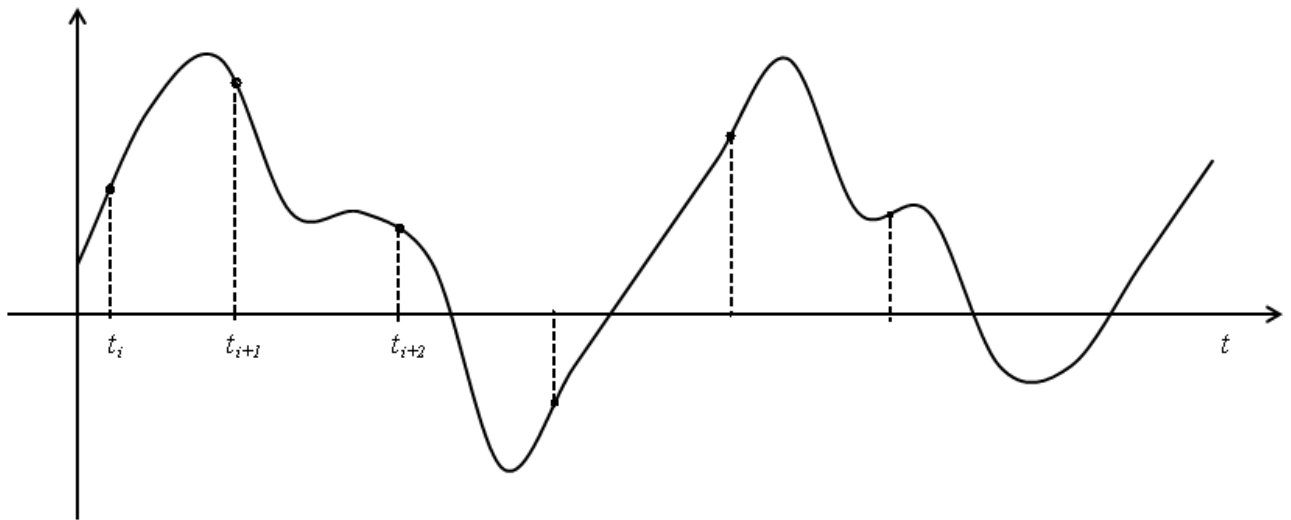


Рис. 2.2 – Моделирование функционирования системы в обычном режиме и моменты сохранения состояния системы

Таким образом, при моделировании функционирования системы в нестандартных режимах всегда учитывается «последствие» от предыдущих решений диспетчера, которое может иметь значение при потоках ВС высокой интенсивности. Также реализация такого алгоритма получения статистических данных позволяет экономить время, расходуемое на проведение моделирования, и, одновременно, в процессе моделирования получать другие данные, связанные с безопасностью полетов, например, налет ВС, количество потенциальных конфликтных ситуаций, временная загруженность диспетчерской позиции.

2.4 Определение фактов опасных событий в процессе имитационного моделирования

Расчет количества опасных событий производится в процессе имитационного моделирования. В качестве опасных событий рассматриваются нарушения минимумов эшелонирования (НМЭ) между парами ВС в воздухе.

Факты НМЭ определяются геометрическим способом как попадание центра масс первого ВС в цилиндрический объем, описанный вокруг центра масс второго ВС (рис. 2.3). К параметрам такой зоны безопасности относятся диаметр $D_{\text{НМЭ}}$ и высота цилиндра $h_{\text{НМЭ}}$. Определение факта НМЭ производится как попадание центра масс второго ВС в зону безопасности первого ВС.

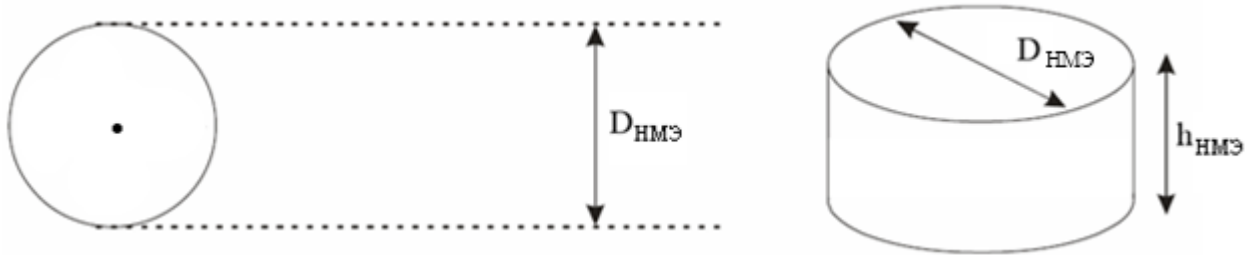


Рис. 2.3 – Зона безопасности ВС, посредством которой определяются факты нарушений минимумов эшелонирования между ВС

Параметры критического объема определяются минимумами эшелонирования, принятыми в рассматриваемом воздушном пространстве.

Таким образом, можно записать следующие условия возникновения НМЭ:

$$\begin{cases} L_{hor} < D_{\text{НМЭ}} \\ L_{vert} < h_{\text{НМЭ}} \end{cases} \quad (2.8)$$

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

2.4 Детерминированные факторы, влияющие на безопасность полетов

Далее приводится описание детерминированных факторов из уравнения (1.2), влияющих на безопасность полетов в СУВД.

2.4.1 Аэронавигационная структура воздушного пространства

Аэронавигационная структура воздушного пространства, определяемая вектором \bar{p}_1 , представляет собой совокупность ограниченных в вертикальной и горизонтальной плоскостях элементов ВП, предназначенных для организации его рационального использования [70]. ВП РФ делится на нижнее и верхнее ВП, границей между которыми является высота полета 8100 метров. К элементам структуры ВП относятся зоны и районы, секторы ОВД, воздушные трассы, районы аэродромов (аэроузлов, вертодромов), запретные и опасные зоны, зоны ограничения полетов (рис. 1.2).

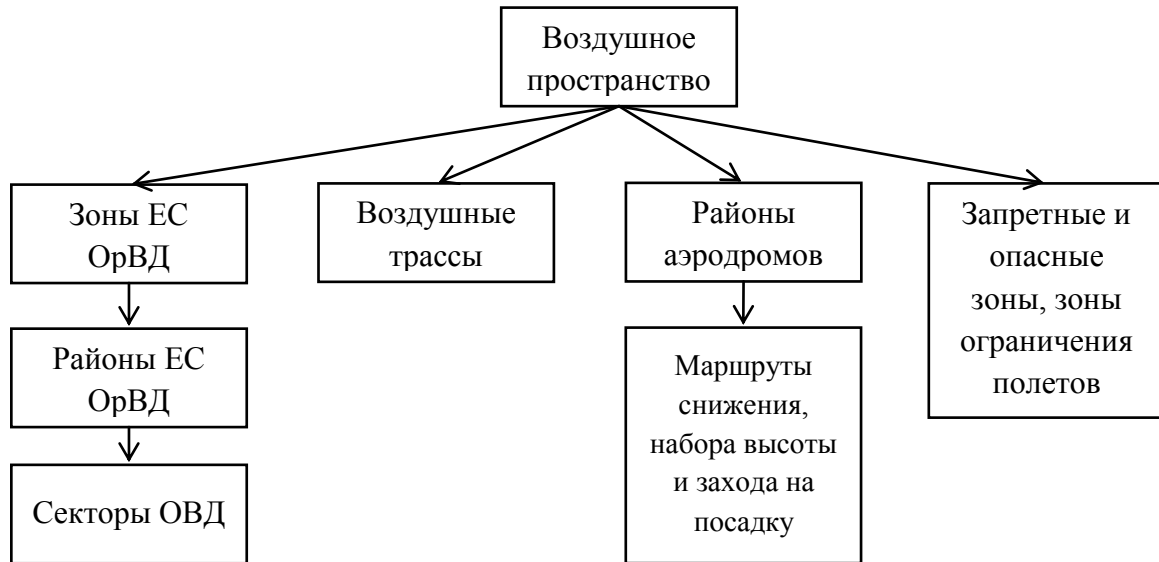


Рисунок 2.4 – Элементы структуры воздушного пространства

Зона единой системы организации воздушного движения (ЕС ОрВД) является наиболее крупным по площади и сложным по структуре элементом ВП, включающим в себя перечисленные выше компоненты. Планирование и использование ВП, организацию ВД в зоне ЕС ОрВД осуществляет зональный центр (ЗЦ). Зона ЕС ОрВД включает в себя несколько районов, в каждом из которых аналогичные функции осуществляет районный центр (РЦ) в собственном объеме ВП. В свою очередь районы делятся на секторы обслуживания воздушным движением (ОВД), которые являются ограниченными объемами ВП, в которых осуществляется непосредственное управление ВД одной диспетчерской позицией. Именно в секторах ОВД реализуется контур непосредственного УВД, приведенный на рис. 1.1.

Воздушные трассы – это установленные для полетов ВС области ВП, ограниченные по высоте и ширине, обеспеченные средствами навигации и обслуживания ВД. Ширина воздушной трассы устанавливается равной 10 км при использовании системы наблюдения ОВД. Расстояние между границами параллельных воздушных трасс в этом случае должно быть не менее 20 км.

Помимо этого ВП содержит в себе районы аэродромов, предназначенные для управления движением ВС на этапах посадки и вылета. В этом случае движение ВС осуществляется по специальным маршрутам снижения, набора высоты и захода на посадку.

2.4.2 Правила выполнения полетов

Правила выполнения полетов определены в Федеральных авиационных правилах «Подготовка и выполнение полетов в гражданской авиации Российской Федерации»[71]. Эксплуатанты воздушных судов обеспечивают использование ВП РФ в соответствии с Федеральными правилами использования ВП РФ [72]. В соответствии с правилами ВП РФ классифицируется следующим образом:

- класс «А» - разрешаются полеты, выполняемые только по правилам полетов по приборам, обязательным является эшелонирование и диспетчерское обслуживание, а также двусторонняя связь между экипажами и диспетчерскими позициями;
- класс «С» - разрешаются полеты, выполняемые по правилам полетов по приборам и правилам визуальных полетов, обязательным является диспетчерское обслуживание и наличие двусторонней связи между экипажами и диспетчерскими позициями, при эшелонировании полеты, выполняемые по правилам полетов по приборам, имеют приоритет;
- класс «G» - разрешаются полеты, выполняемые по правилам полетов по приборам и правилам визуальных полетов, эшелонирование не производится.

При выполнении полетов по правилам визуальных полетов установлены ограничения на допустимую видимость, а также на полеты внутри облаков. При выполнении полетов по правилам полетов по приборам командир воздушного судна обязан выдерживать установленные эшелоны полета и маршрут полета, обеспечивать информирование диспетчерских позиций о фактическом местоположении ВС, высоте и условиях полета, а также обязан выполнять указания диспетчеров.

2.4.3 Правила эшелонирования

Под эшелонированием понимается рассредоточение ВС в ВП на определенные интервалы в вертикальной и горизонтальной плоскостях с целью предотвращения опасных сближений. Вертикальное эшелонирование осуществляется по полукруговой схеме. При полетах по правилам полетов по приборам эта схема выглядит следующим образом:

- при истинном путевом угле полета от 0° до 179° (включительно) установлены эшелоны полётов: 300, 900, 1500, 2150, 2750, 3350, 3950, 4550, 5200, 5800, 6400, 7000, 7600, 8250, 8850, 9450, 10050, 10650, 11300, 11900, 12500, 13700, 14950 м. и т. д.;
- при истинном путевом угле полета от 180° до 359° (включительно) установлены эшелоны полётов: 600, 1200, 1850, 2450, 3050, 3650, 4250, 4900, 5500, 6100, 6700,

7300, 7900, 8550, 9150, 9750, 10350, 10950, 11600, 12200, 13100, 14350, 15550 м. и т. д.

Минимумы горизонтального эшелонирования при использовании системы наблюдения: при районном диспетчерском обслуживании и диспетчерском обслуживании подхода - не менее 10 км, при аэродромном диспетчерском обслуживании не менее 5 км.

2.4.4 Летно-технические характеристики типов воздушных судов

Летно-технические характеристики (ЛТХ) ВС определяет летные, массовые и габаритные параметры самолета, тяговые характеристики. Например, в базе данных ЛТХ ВС Eurocontrol BADA [73] приводятся следующие параметры для каждого типа самолета:

- тип самолета, количество двигателей, максимальная взлетная масса, вместимость топливных баков, количество пассажиров, положение центра масс самолета, максимальные скорость, высота полета, размах крыльев, длина, высота и площадь поверхности крыльев;
- типичные скорости на снижении, подъеме, при крейсерском полете в зависимости от высоты, скорость буксировки на поверхности аэродрома;
- скороподъемность, время, расход топлива, требуемые при наборе высоты и снижении.

Учет всех этих параметров в моделировании позволяет с большей точностью моделировать полет ВС по программным траекториям.

2.4.5 Планы полетов воздушных судов

Движение ВС в воздухе осуществляется по пространственно-временной траектории полета в соответствии с ЛТХ. Эта траектория должна быть максимально приближена к программной траектории, которая задается координатами центра масс ВС в функции времени в выбранной системе координат:

$$\eta_3 = \eta_3(t), \xi_3 = \xi_3(t), H_3 = H_3(t) \quad (2.9)$$

где η_3 , ξ_3 , H_3 – координаты центра масс ВС в выбранной системе координат.

В общем виде эти зависимости являются сложными и поэтому упрощаются следующим образом: программная траектория разделяется на горизонтальную и вертикальную составляющие. Горизонтальная составляющая представляет собой последовательность пунктов перемены маршрута (ППМ), над которыми происходит изменение направления

горизонтального движения, соединенных между собой линиями пути – кратчайшими расстояниями между двумя точками на сфере (ортодромиями). Вертикальная составляющая представляет собой профиль полета. Планы полетов ВС, определяемых таким образом (вектор \bar{p}_4), включают в себя следующие данные:

- тип воздушного судна;
- номер рейса или государственный и регистрационный опознавательные знаки;
- маршрут полета, включая поворотные пункты и пункты обязательного донесения, расстояния, время полета между ними, и заданные путевые углы на маршруте, включая полет на запасные аэродромы;
- запланированная крейсерская скорость и общее время полета, расчетное и фактическое время пролета указанных пунктов;
- запланированные высоты (эшелоны) полета;
- расчет топлива;
- необходимая метеорологическая информация.

Совокупность планов полетов за определенный период времени называется потоком воздушного движения за этот период времени.

2.4.6 Тактико-технические характеристики технических средств навигации, наблюдения и связи

К ТТХ навигационных средств, определяемых вектором \bar{p}_5 , относят зону действия средств, ограниченную в вертикальной и горизонтальной плоскостях, а также по дальности, количество одновременно обслуживаемых ВС, параметры передаваемого сигнала: диапазон частот, мощность импульса и др.

К ТТХ средств наблюдения, определяемых вектором \bar{p}_7 , относят разрешающую способность по азимуту и дальности, зону обзора радиолокаторов, количество одновременно обслуживаемых целей, темп обновления данных.

К ТТХ средств авиационной связи, определяемых вектором \bar{p}_9 , относят диапазоны используемых частот, выходную мощность передатчика и чувствительность приемника.

2.4.7 Технология работы диспетчера

Технология работы диспетчера определяет порядок работы диспетчера при выполнении задач по обслуживанию ВД. В технологии указаны пространственные границы обслуживаемой области ВП, рубежи передачи/приема обслуживания ВД, состав передаваемой информации при

взаимодействии с экипажами ВС и со смежными органами ОВД, а также порядок действий в нестандартных ситуациях.

В соответствии с правилами и порядком ведения радиосвязи между экипажами ВС и диспетчерами радиопереговоры должны быть краткими, вестись с соблюдением правил произношения отдельных слов, четкой дикцией. Скорость речи не должна превышать 100 слов в минуту. При общении необходимо придерживаться типовой фразеологии. В правилах также приведены различные ограничения, применяемые при радиообмене, как, например, выбор языка общения или запрет на ведение радиообмена на определенных этапах полета ВС. Приводятся правила радиообмена в аварийных ситуациях, например, в случае, когда экипаж ВС не может связаться с диспетчером.

2.5 Случайные факторы, влияющие на безопасность полетов

2.5.1 Ошибки и погрешности в работе системы воздушной радиосвязи

Рассмотрим случайный фактор, определяемый вектором \bar{x}_1 – ошибки и погрешности в работе системы воздушной радиосвязи. Звуковой сигнал, передаваемый по каналам связи, с одной стороны можно рассматривать как случайный процесс, описываемый своими вероятностными характеристиками, а с другой – как объект слухового восприятия, подчиняющийся законам психофизиологии слуха [74]. На качество передачи сигнала влияют технические аспекты функционирования каналов связи: помехи при передаче и приеме сигнала, атмосферные помехи, а также особенности звукоизвлечения и звуковосприятия речевых элементов человеком. Интегральной характеристикой качества передачи речевой информации является разборчивость и понятность [68]. Различают разборчивость звуков, слогов и фраз. Количественной характеристикой разборчивости речи является отношение:

$$P = \frac{n}{N} \quad (2.10)$$

где n – количество правильно принятых элементов речи; N – общее количество переданных элементов. В таблице 2.1 приведены нормированные показатели допустимых значений артикуляционных искажений в соответствии с нормативами, принятыми в гражданской авиации для электросвязи (ГОСТ 16600).

Таблица 2.1 – Нормированные показатели допустимых значений артикуляционных искажений

Артикуляция	Разборчивость речи, %			
	Слабая	Удовлетворительная	Хорошая	Отличная

Слоговая	25..40	40..55	55..80	80..100
Словесная	75..87	87..93	93..98	98..100
Фразовая	90..95	95..97	97..99	99..100

При моделировании ошибок и погрешностей в работе системы воздушной электросвязи предлагается моделировать факт неразборчивости конкретного элемента речи (например, фразы).

2.5.2 Ошибки и погрешности в работе системы наблюдения

Ошибки и погрешности в работе системы наблюдения, определяемые вектором \bar{x}_2 , имеют различные причины. Погрешности единичных измерений, производимых отдельными радиолокационными станциями, содержат быстроменяющиеся, медленноменяющиеся и систематические составляющие. Причинами быстроменяющейся составляющей погрешности являются шумы приемного устройства и флуктуации сигнала, отраженного от цели. Медленноменяющиеся и систематические обусловлены в основном изменениями параметров аппаратуры. Вследствие большого числа причин погрешность измерений распределена по нормальному закону. Это касается и параметров движения, полученных после комплексирования различных источников информации при третичной обработке информации. Важной характеристикой средств наблюдения является вероятность обнаружения ВС.

2.5.3 Точность самолетовождения

Точность самолетовождения (вектор \bar{x}_3) определяет близость фактической и заданной пространственно-временных траекторий полета ВС[69]. Несовпадение этих траекторий обусловлено погрешностями навигационных измерений, погрешностями выдерживания требуемого навигационного режима, инерционных свойств ВС, воздействия внешней среды. Величина погрешностей навигационных измерений параметров полета (угол курса, высота, воздушная скорость, пройденный путь) зависит от типов используемых навигационных устройств. Среднеквадратичная погрешность самолетовождения по соответствующей координате σ характеризует степень рассеяния случайных погрешностей самолетовождения (разброс фактической координаты ВС относительно заданной).

Качество воздушной навигации оценивается вероятностью нахождения ВС в пределах воздушной трассы. В соответствии с рекомендациями ИКАО экипажи ВС стремятся точно выдерживать линию заданного пути при полете по воздушным трассам. Тогда в общем виде вероятность выдерживания воздушной трассы

$$P_{\text{тр}} = \int_{-b}^{+b} f(z) dz \quad (2.11)$$

где b – половина ширины воздушной трассы, z – боковое отклонение ВС относительно осевой линии трассы, $f(z)$ – плотность распределения бокового отклонения.

Вид плотности бокового отклонения определяется на основе экспериментальных данных. Наиболее распространенными видами распределений, используемых для аппроксимации, являются нормальное и двойное экспоненциальное. Для нормального распределения $P_{\text{тр}}$ будет равно:

$$P_{\text{тр}} = \Phi\left(\frac{b}{\sigma_z}\right) \quad (2.12)$$

где $\Phi(x)$ – функция распределения Лапласа.

Для двойного экспоненциального распределения:

$$P_{\text{тр.т}} = 1 - e^{-\frac{\sqrt{2}}{\sigma_z} b} \quad (2.13)$$

При заданной ширине воздушной трассы $2 \cdot b$ и вероятности ее выдерживания $P_{\text{тр.т}}$ из соотношений (2.12) и (2.13) может быть получена требуемая среднеквадратичная погрешность $\sigma_{\text{здоп}}$. На основе этого в настоящее время ИКАО реализована концепция минимальных требуемых характеристик, в соответствии с которой все ВС, выполняющие полеты в определенном регионе, должны обеспечивать требуемую точность самолетовождения. На сегодняшний день принимается $P_{\text{тр.т}} = 0.95$.

2.5.4 Отказы системы связи и системы наблюдения

Случайные факторы \bar{x}_4 и \bar{x}_5 , связанные с отказами систем связи и наблюдения, увеличили свою значимость в результате появления укрупненных районных диспетчерских центров. За предыдущие годы было проведено создание Санкт-Петербургского, Самарского, Екатеринбургского и Хабаровского укрупненных районных диспетчерских центров (РДЦ) обслуживания воздушного движения (ОВД) [1]. В ходе такой реорганизации осуществлялось объединение небольших районных центров (РЦ) в один крупный и перенос всех диспетчерских позиций, входящих в состав объединяемых РЦ, в единый зал управления ВД. Такие изменения помимо преимуществ, связанных с организационной и экономической стороной вопроса, приносят негативное влияние: возникновение чрезвычайной ситуации (пожар или задымление) в едином зале приведет к полной потере управления воздушным движением

(УВД) в укрупненном центре на время перехода диспетчеров на резервный пункт. При полной потере УВД диспетчер не способен выдавать указания экипажам воздушных судов (ВС) с целью предотвращения конфликтных ситуаций в воздухе, что может привести к авиационным инцидентам и происшествиям. Другой особенностью ведения управления из единого зала является то, что передача радиолокационной и речевой информации от отдаленных источников в единый зал осуществляется централизованно, и поэтому, в случае выхода из строя системы связи, может произойти либо ситуация полной потери УВД, либо ситуация отсутствия информации от систем наблюдения. В последнем случае производится переход на процедурный режим УВД, когда при анализе воздушной обстановки диспетчеры ориентируются только на доклады экипажей ВС. Такой режим работы также создает риски возникновения опасных ситуаций в воздухе.

2.5.5 Интенсивность воздушного движения

Интенсивность воздушного движения, определяемая вектором \bar{x}_6 , является случайной величиной, поскольку ВС не всегда точно выполняют свои планы полетов. Это происходит из-за различных задержек в аэропорту вылета, задержек при полете на маршруте, точности самолетовождения экипажей ВС, а также от качества расчетов при составлении самих планов полета. В результате время входа ВС в рассматриваемое ВП отличается от планового. Таким образом, количество ВС под управлением диспетчера является случайной величиной, что может приводить к перегруженности диспетчерской позиции и соответственно к увеличению риска ошибок диспетчера при управлении воздушным движением. Для обеспечения нормального выполнения задач по обеспечению безопасности полетов диспетчер должен быть занят не больше доли времени 0.7. Если в процессе УВД прогнозируется рост интенсивности ВД, то принимаются специальные меры, предназначенные для уменьшения временной загруженности диспетчера: разъединение секторов ОВД, запрет на вход ВС в сектор.

Формирование случайной обстановки в момент реализации опасного фактора обеспечивается созданием случайных потоков ВД длиной в несколько лет. Далее в §2.9 будет показано, каким образом используются такие длинные потоки для проведения статистического моделирования. Эти потоки должны иметь ту же пространственно-временную структуру, что и у реальных потоков ВД, либо у потоков, пересчитанных для перспективной структуры ВП. Вопросы формирования случайных потоков рассматривались в работах [61, 68].

Предположим, что длина исходного потока равняется одним суткам. Известны времена входа ВС в рассматриваемое ВП, а также параметры пролёта пунктов перемены маршрута для каждого ВС: географические координаты, высота, скорость.

Идея предлагаемого алгоритма формирования случайных суточных потоков заключается в формировании случайных потоков ВД на основе следующих принципов:

1. Среднее количество входов ВС в рассматриваемое ВП в каждом часе суток должно быть равно количеству входов ВС в исходном потоке ВД в этом же часе.

2. Внутри каждого часа суток распределение ВС по маршрутам движения, высотам полета на маршруте, а также типам ВС в среднем должно соответствовать исходному потоку ВД в этом же часе.

Сделаем допущение о том, что если точка входа и точка выхода из ВП у двух ВС одни и те же, то и их двумерные маршруты тоже совпадают. Таким образом, траектория полета каждого ВС определяется набором параметров:

$$\{P_{in}, P_{out}, H, Type\}$$

где P_{in} – точка входа в ВП, P_{out} – точка выхода в ВП, H – высота полета, $Type$ – тип ВС.

Тогда решение задачи формирования случайного потока длиной K суток предлагается выполнять с помощью следующего алгоритма:

Шаг 1. Формируем массив часовой интенсивности исходного потока $M\{s\}$, $s = 1..24$. Каждый элемент этого массива определяет количество входов в ВП в течение s -го часа через все точки входа.

Шаг 2. Для каждого s -го часа в сутках на основе исходного суточного потока определяем частоты использования маршрутов $N_{s,j}$, $j = 1..t_s$, где t_s – количество маршрутов в s -м часе, определяемых параметрами $\{P_{in}, P_{out}, H, Type\}$.

Шаг 3. Разыгрываем времена входа ВС в сектор УВД t_i как нестационарный пуассоновский процесс. В соответствии с этим алгоритмом время между входами в моделируемое ВП двух ВС определяется независимыми и экспоненциально распределенными случайными величинами с изменяющимся во времени значением интенсивности $\lambda(t)$.

В качестве функции зависимости интенсивности от времени $\lambda(t)$ принимаем кусочно-постоянную функцию часовой суточной интенсивности $m(s)$, построенную на основе массива $M\{s\}$ (рисунок 2.5). В случае необходимости увеличения или уменьшения интенсивности формируемого случайного потока, необходимо каждое значение из массива $M\{s\}$ умножить на соответствующий коэффициент увеличения/уменьшения k_λ . Алгоритм розыгрыша времен входа ВС в ВП выглядит следующим образом [59]:

1. Определяем $\lambda^* = \max\{k_\lambda \cdot m(s)\}$ – максимальное значение функции интенсивности.
2. Производим розыгрыш величин U_1 и U_2 – независимых и одинаково распределенных значений с равномерным распределением на интервале $(0,1)$.
3. Производим сравнение: если $U_2 \leq \frac{k_\lambda \cdot m(t_i)}{\lambda^*}$, то

$$t_i = t_{i-1} - \frac{1}{\lambda^*} \cdot \ln U_1 \quad (2.14)$$

в противном случае возвращаемся к шагу 2.

4. Розыгрыш производится до тех пор, пока значение t_i не превысит заданное количество суток K .

Временной интервал, на котором происходит розыгрыш потока ВС может иметь длину несколько лет.

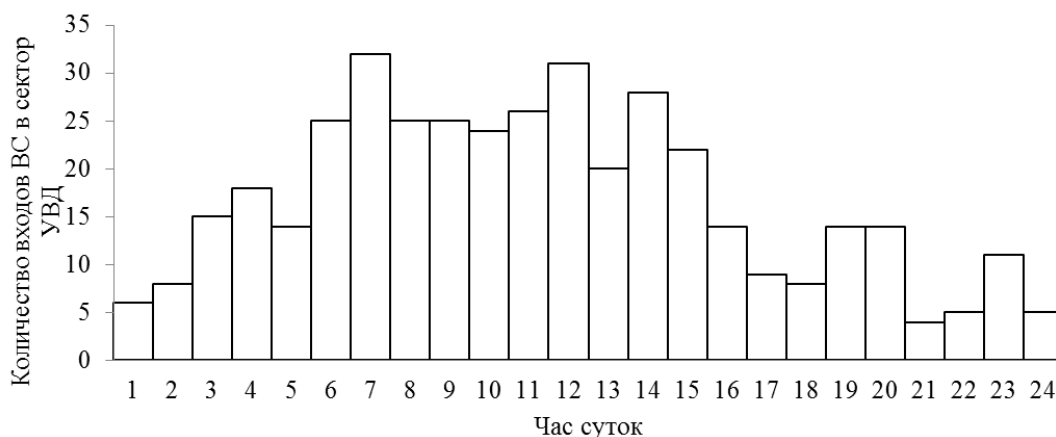


Рисунок 2.5 – Гистограмма суточной почасовой интенсивности воздушного движения в секторе ОВД

Шаг 4. На основе определенных на шаге 2 частот $N_{s,j}$ определяем двухмерный маршрут, высоту полета и тип каждого ВС, влетающего в ВП в момент времени t_i в соответствии с равномерным распределением. Для каждого s -го часа выполняем следующие действия:

1. Определяем, к какому часу суток s принадлежит разыгранный на 3-м шаге момент времени входа ВС t_i .
2. Производим розыгрыш величины U в соответствии с равномерным распределением на интервале $(0,1)$.
3. Производим сравнение, если

$$\sum_{j=1}^{n-1} N_{s,j} \leq U < \sum_{j=1}^n N_{s,j}, \quad n = 1..M \quad (2.15)$$

то назначаем ВС маршрут с набором параметров $\{P_{in}, P_{out}, H, Type\}$, соответствующих j -му маршруту.

Использование приведенного выше алгоритма формирования длинных потоков ВД позволяет производить длительное статистическое моделирование управляемого ВД в рассматриваемом объеме ВП.

2.5.6 Отказы авиационной техники

Отказы авиационной техники, определяемые вектором \bar{x}_7 , непосредственно влияют на безопасность полетов. Особую угрозу для безопасности полетов представляют отказы таких функциональных систем, как силовая установка, система управления, система электроснабжения и т.д. Опасность того или иного отказа определяется отдельно в каждом конкретном случае на основе расчетов, экспериментов, лабораторных и летных испытаний. По последствиям отказы можно классифицировать как отказы, изменяющие характеристики ЛА как объекта управления, и отказы, влияющие на параметры системы управления ЛА. К первой группе относятся отказы, приводящие к изменению сил и моментов, действующих на ЛА. Это изменение может быть быстрым или медленным, аperiodическим или периодическим, кратковременным или постоянным. Ко второй группе относятся отказы, нарушающие функционирование системы управления, что проявляется в неправильном формировании заданной траектории полета, в отклонении ЛА от правильно заданной траектории полета. Большая часть отказов и неисправностей выявляется на земле при контрольных осмотрах и проверках техники и устраняется силами инженерно-авиационной службы. Некоторая часть выявляется в воздухе и локализуется своевременными действиями экипажей ВС. Незначительная доля отказов приводит к авиационным происшествиям.

2.5.7 Ошибки диспетчеров и экипажей ВС при выполнении операций

Векторы \bar{x}_8 и \bar{x}_9 определяют ошибки людей операторов при выполнении операций при обслуживании воздушного движения. Под ошибочными действиями понимаются неправильные или несвоевременные действия по управлению ВС без наличия умысла действовать в нарушение установленных правил [53]. Процесс управления состоит из нескольких основных этапов. Первый этап – это получение, хранение и восприятие информации о целях, задачах управления и текущих параметрах движения ЛА. Вторым этапом является анализ, обработка полученной и хранящейся в памяти информации, выработка линии поведения и принятие решения. Третий этап заключается в исполнении решения. Каждому этапу соответствует свой тип ошибок: сенсорные, логические и моторные. В процессе полета ВС экипажами и диспетчерами выполняются определенные операции. Каждой операции/группе операций можно сопоставить вероятность появления ошибки при выполнении этой операции/группы операций. Оценка математического ожидания потока ошибок можно записать как

$$\lambda_i = \frac{n_i}{t} \quad (2.16)$$

где n_i – число допущенных ошибок при выполнении i -й операции, t – суммарное время полета при выполнении этой операции. Параметр λ зависит от физического и морального состояния оператора, уровня подготовленности и других факторов.

2.5.10 Неблагоприятные условия внешней среды

Под неблагоприятными условиями внешней среды (вектор \bar{x}_{10}) относятся неблагоприятные метеорологические условия (облачность, сдвиг ветра, гроза, туман, турбулентность), скопление в воздухе посторонних предметов (метеозонды, стаи птиц). Воздействие этих условий на полет различно: метеорологические условия вызывают возмущенное движение ЛА, затрудняют самолетовождение, а также побуждают принимать решение об изменении траектории полета. Столкновения с посторонними предметами приводят к разрушениям конструкции ВС. Для уменьшения влияния неблагоприятных условий внешней среды на безопасность полетов производится постоянный контроль метеообстановки, особенно в районе аэродромов, своевременное информирование экипажей ВС и диспетчеров ОВД о погодных условиях, а также непрерывный радиолокационный контроль ВП.

2.6 Выводы

Во второй главе приведены методы и алгоритмы, позволяющие с помощью имитационного моделирования анализировать влияние на безопасность полетов укрупнения районных диспетчерских центров.

Входные данные для разработанного процесса оценки БП обусловлены детерминированными и случайными факторами, влияющими на БП, которые были приведены в математической постановке задачи (§1.6):

- а) аэронавигационная структура (структура трасс, разрешенные направления и эшелоны полета на участках, структура секторов ОВД);
- б) предлагаемые к применению нормы и правила эшелонирования;
- в) тактико-технические характеристики систем навигации, наблюдения и связи;
- г) планы полетов ВС, которые будут использоваться в качестве основы для формирования исследовательских случайных потоков;
- д) летно-технические характеристики ЛТХ типов ВС.

Общая схема разработанного метода анализа влияния укрупнения РДЦ на БП состоит из следующих этапов:

- анализ исходных данных и выполнение дополнительных процедур:
 - проверка соответствия трассовой структуры и структуры объемов ВП;

- проверка соответствия планов полета ВС ограничениям трассовой структуры, при необходимости выполнение оптимизационной процедуры ремаршрутизации потока на новую структуру ВП;
 - выбор параметров моделей в соответствии с заданным уровнем технического оснащения.
- формирование длинных потоков ВД, предназначенных для моделирования длительных промежутков времени;
 - выполнение серии статистических моделирований с целью определения условных вероятностей опасных событий, происходящих при отказе систем связи и наблюдения. При этом для ускорения процесса моделирования при моделировании применяется метод сохранения/возврата в сохраненное состояние системы.
 - получение оценок показателей безопасности полетов.

В разделе также подробно описаны детерминированные и случайные факторы, влияющие на безопасность полетов в СУВД.

ГЛАВА 3 ОПИСАНИЕ ИМИТАЦИОННОЙ МОДЕЛИ УПРАВЛЯЕМОГО ВОЗДУШНОГО ДВИЖЕНИЯ

В предыдущих главах была рассмотрена задача анализа БП в СУВД, а также предложены методы и алгоритмы для ее решения. Для реализации этих методов и алгоритмов была разработана имитационная модель управляемого воздушного движения в секторе ОВД. В этой главе приводится описание этой модели, её состав и структура, описание ее компонентов и алгоритмов их функционирования.

3.1 Принципы моделирования, состав и структура имитационной модели управляемого воздушного движения в секторе ОВД

Разработанная имитационная модель моделирует управляемое воздушное движение в секторе ОВД. Сектор ОВД представляет собой ограниченный объём воздушного пространства, в котором управление воздушным движением осуществляется одной диспетчерской позицией. При этом технология работы диспетчерской позиции является вполне определенной. ВС, пролетающие сектор, движутся по одной или нескольким воздушным трассам (рисунок 3.1). На рисунке 3.1 точки А, Б, Г и Д – точки входа в сектор, точки В, Е, Ж – точки выхода из сектора. Точки 1 и 2 – это точки слияния и пересечения трасс. Стрелками указано направление движения ВС по трассам.

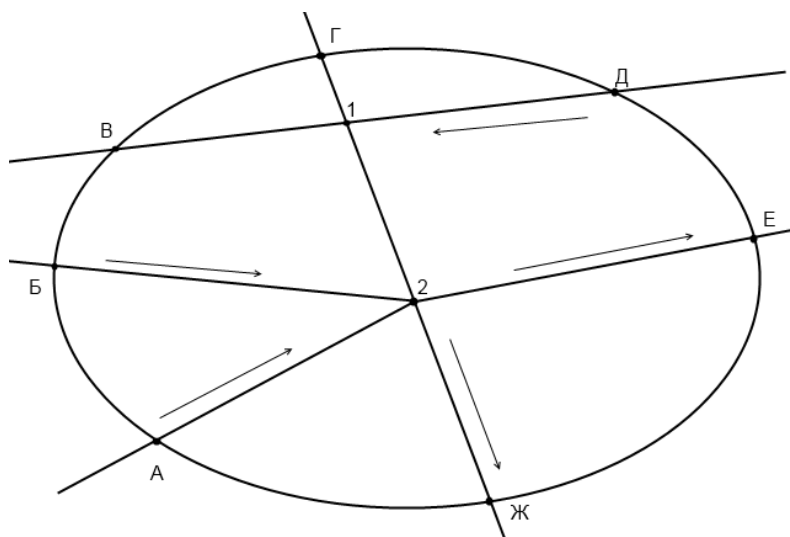


Рисунок 3.1 – Схематическое изображение аэронавигационной структуры сектора обслуживания воздушного движения

Моделирование производится динамически с постоянным шагом модельного времени одна секунда. Весь процесс моделирования осуществляется автоматически, без участия пользователя. При высокой подробности моделирования операций диспетчера достигнута

высокая скорость работы модели: один месяц полетов в воздушном пространстве сектора ОВД с высокой интенсивностью ВД моделируется в течение одного часа реального времени.

Модель состоит из следующих компонент: наиболее подробные модели воздушной обстановки (ВО) и диспетчерского обслуживания, модели системы наблюдения, системы связи, системы навигации. Также включены в модель модуль визуализации воздушной обстановки и модуль расчёта показателей. На рисунке 3.2 представлена информационная схема функционирования модели. Стрелки на рисунке соответствуют обмену данными между моделями.

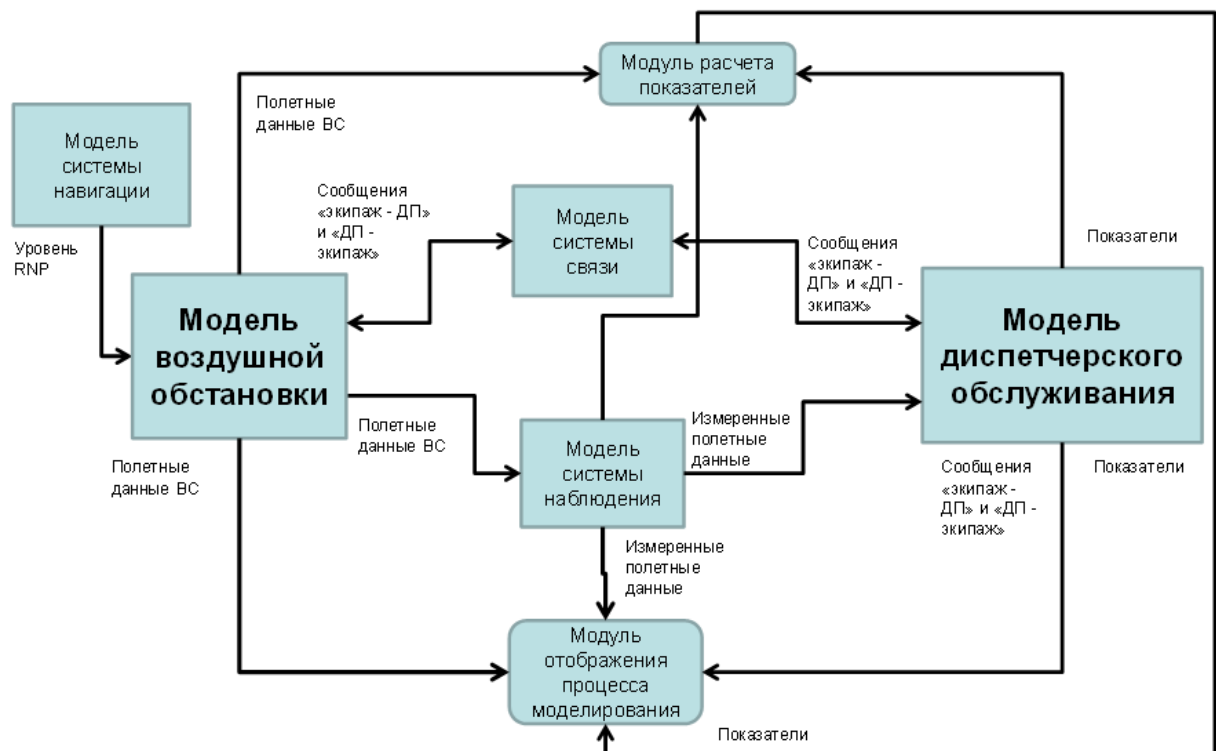


Рисунок 3.2 – Общая схема функционирования имитационной модели управляемого воздушного движения (стрелками показаны информационные потоки)

Далее приводится подробное описание перечисленных выше компонент.

3.2 Модель диспетчерского обслуживания

3.2.1 Выполняемые операции

Диспетчерское обслуживание – это обслуживание, предоставляемое в целях предотвращения столкновений между воздушными судами и столкновений воздушных судов с препятствиями на площади маневрирования, а также в целях регулирования ВД [54]. Разработанная модель диспетчерского обслуживания является дискретно-событийной моделью,

функционирование которой основано на правилах выполнения операций, разработка которых производилась в сотрудничестве с диспетчерами ОВД Московского центра автоматизированного управления воздушным движением. Имитируется выполнение всех штатных операций при сопровождении пролета ВС через сектор ОВД верхнего ВП (рисунок 3.3):

- согласование условий входа ВС в сектор;
- прием ВС на сопровождение при пролете рубежа УВД;
- сопровождение пролета пунктов обязательных донесений (ПОД);
- сопровождение при смене эшелона;
- сопровождение при нарушении условий полета по трассе;
- согласование выхода ВС из сектора;
- передача ВС на сопровождение диспетчеру смежного сектора;
- периодический анализ воздушной обстановки;
- обнаружение и разрешение конфликтов между ВС.

На рисунке 3.3 Сектор 2 – это сектор ОВД, работа которого моделируется, Секторы 1 и 3 – смежные секторы. ДП С1, С2, С3 – это диспетчерские позиции секторов С1, С2, С3. Работа диспетчерских позиций смежных секторов моделируется только в той части, которая влияет на моделирование ДП заданного сектора, а именно: согласование условий входа ВС с диспетчерами ДП заданного сектора; передача на сопровождение ВС диспетчерам ДП моделируемого сектора; согласование условий выхода ВС из моделируемого сектора; прием на сопровождение ВС диспетчерами смежного сектора. Смежными секторами могут быть как секторы районного центра (РЦ) ОВД, так и области диспетчерского обслуживания подхода и аэродромного обслуживания. Это накладывает свои особенности на действия ДП и, соответственно, учитывается при моделировании.

Таким образом, модель диспетчерского управления включает в себя модель диспетчерской позиции (ДП) сектора ОВД, выбранного для исследования, и имитатор работы диспетчерских позиций смежных с ним секторов (ДСС).

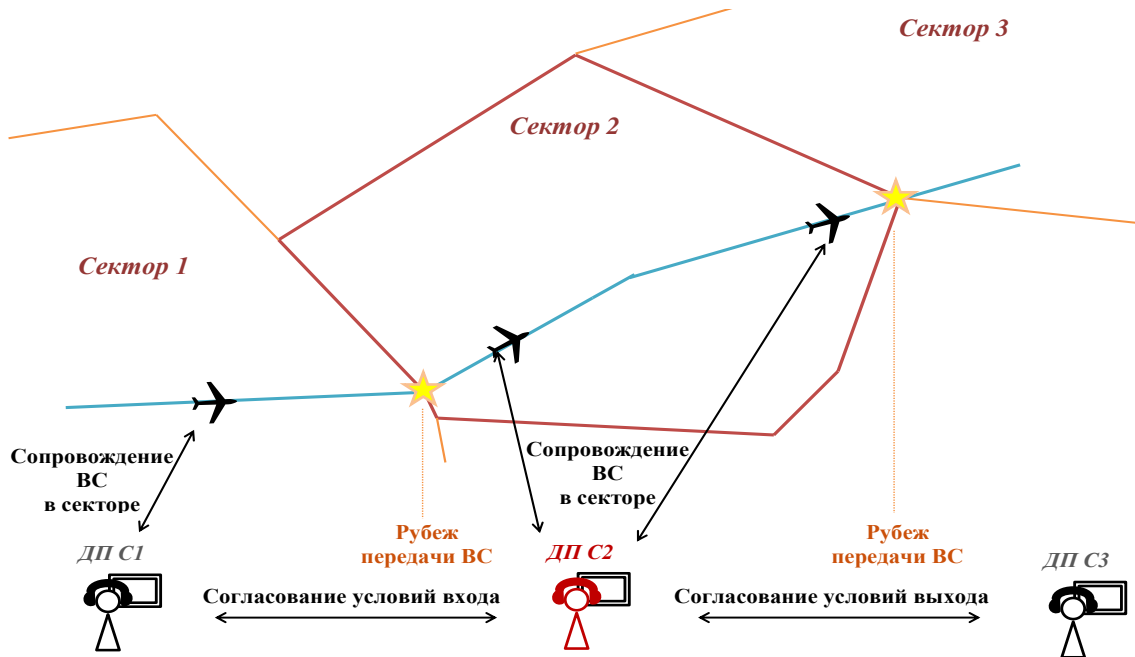


Рисунок 3.3 – Основные операции диспетчеров по управлению воздушным движением

Например, в операции сопровождения при смене эшелона модель ВС генерирует соответствующий запрос, а модель ДП:

- принимает запрос на смену эшелона;
- формирует с помощью данных системы наблюдения вектор ситуационной осведомленности обо всех ВС в воздухе внутри и вблизи области его ответственности;
- прогнозирует четырехмерные траектории полета этих ВС, при этом прогнозируемую траекторию сопровождаемого в данной операции ВС строит с учетом запрошенного эшелона;
- анализирует прогнозируемую воздушную обстановку на предмет обнаружения возможных ПКС;
- формирует решение о разрешении либо о запрете смены эшелона;
- формирует альтернативное решение о бесконфликтном полете на другой эшелон;
- передает решение экипажу ВС;
- контролирует смену высоты.

3.2.2 Алгоритмы обнаружения и разрешения ПКС

В штатном режиме ДП выполняет анализ воздушной обстановки, выявляет потенциальные конфликтные ситуации, вырабатывает решения по разрешению ПКС, передает команды экипажам ВС. Модель ДП имитирует эти действия. Здесь центральную роль играют процедуры обнаружения и разрешения ПКС, а также подготовительные алгоритмы

формирования прогнозируемой траектории ВС, находящихся под управлением ДП и в соседних секторах. Рассматриваются 9 типов ПКС, отличающихся геометрией в горизонтальной и вертикальной плоскости (рисунок 3.4): С1 – ПКС типа «пересечение», когда оба ВС совершают полет на одном и том же эшелоне; С2 – ПКС типа «пересечение», один ВС изменяет эшелон, другой ВС находится на «крейсере»; С3 – ПКС типа «пересечение», оба ВС изменяют эшелоны полета; С4 - ПКС типа «догон», оба ВС находятся на одном эшелоне; С5 – ПКС типа «догон», один ВС изменяет эшелон, другой ВС находится на «крейсере»; С6 – ПКС типа «догон», оба ВС изменяют эшелон; С7 – ПКС на встречных курсах, оба ВС на одном и том же эшелоне; С8 ПКС на встречных курсах, один ВС находится на этапе взлета или посадки, другой ВС находится на «крейсере»; С9 – ПКС на встречных курсах, оба ВС изменяют эшелоны полета. Их разрешение имитируется в модели ДП.

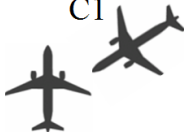


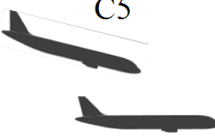
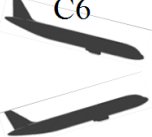

	На одном эшелоне	Один изменяет эшелон	Оба изменяют эшелоны
Пересечение	C1 	C2 	C3 
Догон	C4 	C5 	C6 
Встречный курс	C7 	C8 	C9 

Рисунок 3.4 – Типы потенциальных конфликтных ситуаций, рассматриваемых в модели диспетчерского управления

В модели реализованы два метода обнаружения ПКС: обнаружение среднесрочных конфликтов (Medium Term Conflict Detection, MTCD) и краткосрочных конфликтов (Short Term Conflict Alert, STCA). Помимо горизонта прогнозирования эти модели различаются принципами обнаружения ПКС и гипотезами об имеющейся информации о движении ВС. MTCD основывается на планах полёта ВС (4D-траектории), в то время как при прогнозировании конфликтных ситуаций в STCA используются только текущее положение и характеристики движения ВС (курс, вертикальная и горизонтальная скорости). По этим данным

в STCA строятся прогнозные векторы для каждого ВС, на основе которых и выносятся предупреждение о ПКС. Иногда MTCD относят к процедурам текущего планирования, а STCA – к тактическому регулированию ПКС [14]. Надо отметить, что методы обнаружения ПКС требуют максимальных вычислительных затрат, что объясняется необходимостью детального анализа прогнозируемых траекторий полета множества ВС.

Для разрешения ПКС применяются следующие меры регулирования:

- а) изменение или запрет смены эшелона полета;
- б) изменение горизонтальной скорости полета;
- в) изменение вертикальной скорости полета;
- г) боковое смещением воздушного судна.

Варианты применения этих мер в разных случаях, порядок пробных вариантов соответствуют технологии работы ДП сектора РЦ ОВД. Формирование варианта разрешения ПКС основано на следующих общих подходах:

- если ПКС обнаруживается при наборе самолетом высоты, надо остановить этот набор высоты на эшелоне ниже прогнозируемой точки ПКС;
- если ПКС обнаруживается при снижении, надо остановить снижение на эшелоне выше прогнозируемой точки ПКС;
- при прогнозировании ПКС в горизонтальном полете ВС должно подняться или опуститься на другой эшелон, чтобы обойти точку ПКС;
- регулирование скоростью применяется при догоне на одном эшелоне – делаются попытки увеличить скорость догоняемому, либо снизить скорость догоняющему, либо перераспределить разницу в скоростях ВС;
- регулирование вертикальной скоростью используется при наборе высоты; регулирование боковым смещением – как последний вариант при неудаче всех остальных вариантов.

На рисунке 3.5 представлена схема поиска решений при обнаружении ПКС для ВС в горизонтальном полете в соответствии со своим планом. Проверяются варианты: следующий эшелон выше текущего, эшелон ниже текущего, на два эшелона выше текущего – они приводят к новым ПКС (отмеченным на рисунке), и, наконец, на два эшелона ниже текущего. Последний вариант обеспечивает отсутствие ПКС в заданном временном интервале, и это решение отправляется экипажу ВС. После разведения конфликтующих ВС план полета возвращается к

исходному после соответствующего запроса (рисунок 3.6). Момент возврата определяется временем Δt , которое должно быть больше чем прогнозируемое время ПКС.

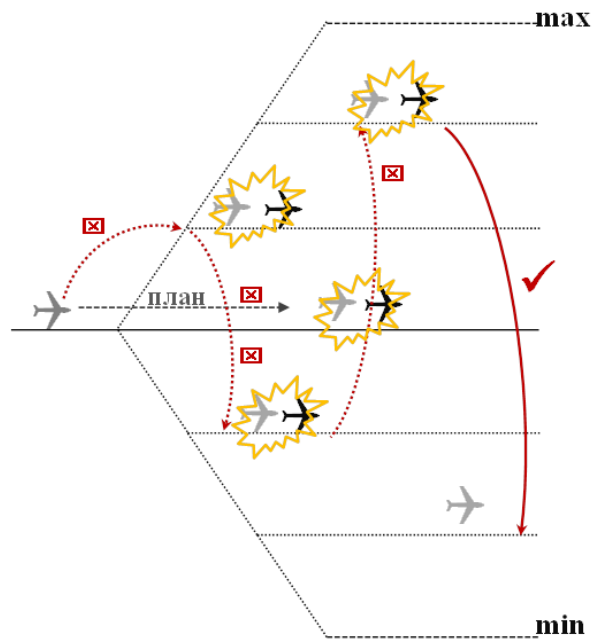


Рисунок 3.5 – Схематическое изображение алгоритма разрешения потенциальной конфликтной ситуации посредством изменения высоты полета воздушного судна

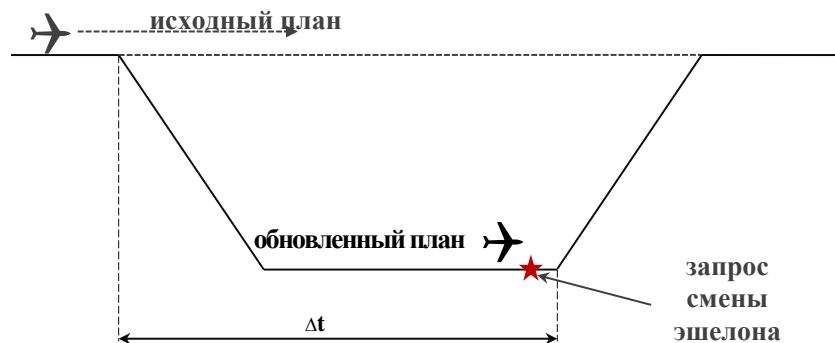


Рисунок 3.6 – Возврат ВС на исходную траекторию полета, после выполнения команды по изменению высоты полета (Δt – время выдерживания команды)

3.2.3 Определение временной загрузки ДП

Существенной стороной имитационной модели диспетчерского управления, как и вообще человека-оператора в сложной социотехнической системе является учет времени, затрачиваемого ДП на выполнение своих задач даже при штатной работе в нормальных условиях. ДП может оказаться загружен операциями высокого приоритета и не успеть выполнить операции более низкого приоритета. Так, при сложном интенсивном потоке ВС в некотором временном интервале и при множестве ПКС ДП может заниматься разрешением ПКС одного за другим, при этом оставляя не обработанными сообщения экипажей ВС и, тем более, сообщения ДСС об условиях предстоящего входа ВС в сектор ДП. По прошествии

некоторого времени те ВС, условия которых остались несогласованными, окажутся уже в секторе ДП, но могут быть все еще не принятыми им на сопровождение. В особо напряженных случаях они могут оказаться в состоянии потенциального конфликта с другими ВС.

На рисунке 3.7 представлена схема имитации последовательности действий ДП, когда ВС1 после входа в сектор посылает ДП запрос на смену эшелона в соответствии со своим планом полета (пунктирная линия). Однако ДП занята разрешением ПКС между ВС, заключенными в овалы на рисунке. В ожидании разрешения от ДП на смену эшелона ВС1 продолжает полет на своем эшелоне входа в сектор. Набор высоты в его плане полета сдвигается вперед. После завершения операций разрешения ПКС диспетчер обращается к анализу запроса высоты и сообщает соответствующее решение экипажу ВС. Результирующая траектория ВС будет отличаться от плановой.

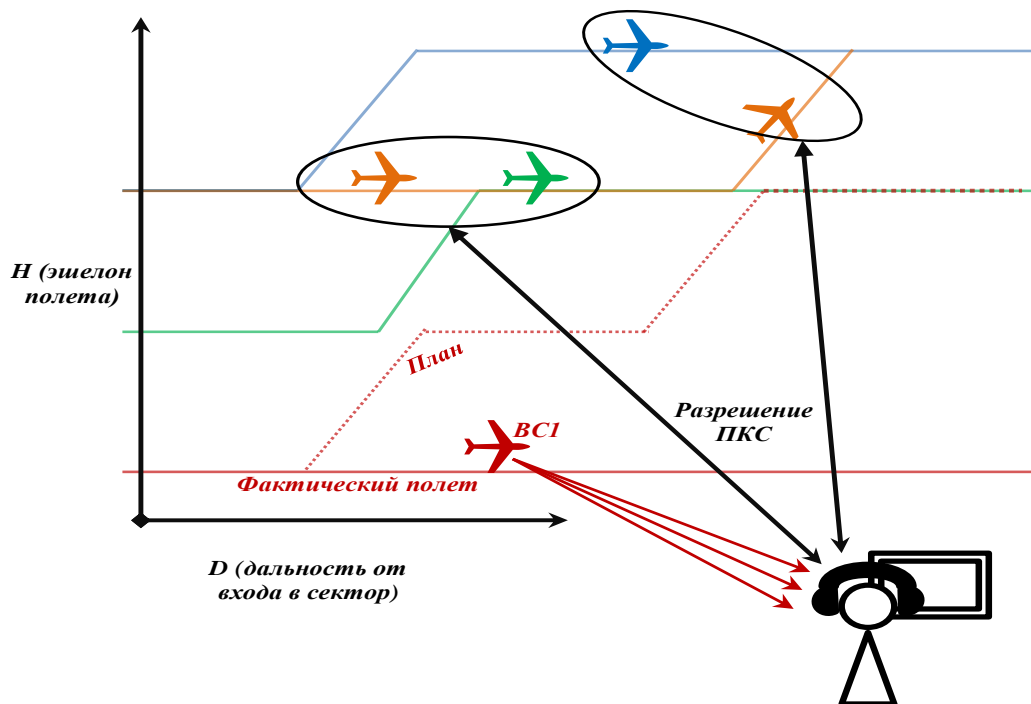


Рисунок 3.7 – Схема имитации последовательности действий диспетчерской позиции при запросе смены эшелона

Другой стороной учета временных затрат человека-диспетчера при имитационном моделировании его действий и операций является возможность оценки общей относительной временной загрузки ДП – доли времени, затрачиваемой им на выполнение работы. Согласно данным инженерной психологии, человек-оператор не может выполнять сложную работу, связанную с опасностями, непрерывно в течение нескольких часов. Для обеспечения нормального выполнения задач по обеспечению безопасности полетов диспетчер должен быть

занят не больше доли времени 0.55. Если диспетчерская позиция включает в себя двух диспетчеров – ДРЛУ и ДПК, – доля времени может быть увеличена до 0.7. Поэтому при имитации работы ДП контролируется оценка его временной загруженности, и если она превышает указанные нормы, это означает необходимость уделить большее внимание тем условиям ВД, в которых получено такое превышение. При моделировании реорганизации ВП это может показать, в каких именно секторах могут быть проблемы с перегруженностью ДП.

Значения временных затрат на выполнение каждой операции зависят прежде всего от технической оснащённости рабочих мест ДП. Временные затраты на выполнение операции, в том числе на разрешение ПКС, задаются исследователем по основным операциям ДП (таблица 3.1). Временные затраты на действия по разрешению конфликта зависят от типа ПКС, они задаются исследователем в качестве параметров. В имитационной модели предусмотрено задание различных наборов длительностей операций, что позволяет учитывать различный уровень технической оснащённости исследуемых СУВД.

Таблица 3.1 Операции диспетчерской позиции по управлению воздушным движением в секторе ОВД (нумерация операций приведена в соответствии с тем, как это реализовано в имитационной модели, некоторые номера пропущены)

Номер операции	Операция	Инициатор
1	Согласование условий входа в исследуемый сектор до пролета рубежа передачи УВД: -для ВС, следующих транзитом через зону ответственности; -для ВС, вылетевших с аэродромов зоны ответственности ЗЦ; -для ВС, прибывающих на аэродромы ответственности ЗЦ	ДСС
4	Прием на сопровождение при пролете ВС рубежа передачи УВД: -для ВС следующих транзитом через зону ответственности; -для ВС, вылетевших с аэродромов зоны ответственности ЗЦ; - для ВС, прибывающих на аэродромы ответственности ЗЦ	Экипаж ВС
7	Сопровождение при пролете ВС ПОД	Экипаж ВС
8	Сопровождение при достижении ВС заданного эшелона	Экипаж ВС
9	Сопровождение при изменении эшелона при полете ВС по трассе	Экипаж ВС
13	Согласование условий выхода из зоны до пролета рубежа передачи УВД со следующим диспетчером смежного сектора	ДП

Номер операции	Операция	Инициатор
14	Передача на сопровождение при пролете ВС рубежа передачи	Экипаж ВС
15	Сопровождение при нарушениях экипажем выданных условий полета	ДП
16	Разрешение ПКС (9 типов ПКС)	ДП

3.2.4 Алгоритм работы модели диспетчерского обслуживания

На вход модели подаются списки обнаруженных ПКС и пришедших сообщений от модели ВС и от модели ДСС. Эти списки упорядочены: первый - по прогнозируемому времени наступления ПКС, второй - по времени поступления сообщения.

Моделирование работы диспетчерской позиции осуществляется в соответствии с приоритетами выполнения операций: первый приоритет имеют операции по разрешению обнаруженных ПКС, второй приоритет – операции, инициированные экипажами ВС, третий приоритет – операции обмена информацией с диспетчерами соседних секторов.

Сначала проверяется, идет ли выполнение какой-либо операции: если это так, выполняется продолжение ее работы; если нет - анализируется очередь ПКС. Первый по времени элемент этой очереди поступает на обработку - разрешение ПКС в операции 16.

Если в данный момент, свободный от выполнения какой-либо операции, отсутствуют ПКС, проверяется очередь сообщений от ВС - при наличии сообщения, инициирующего операцию, начинается соответствующая операция сопровождения ВС. Отметим, что сообщения от ВС, служащие ответами на запросы и команды ДП, обрабатываются внутри операций сопровождения. Если же инициирующих сообщений от ВС нет, проверяется наличие инициирующих сообщений от ДСС, и при наличии их в очереди начинается операция согласования условий входа в сектор (операция 1 по инициирующему сообщению типа 1), либо заканчивается сопровождение ВС диспетчерской позицией исследуемого сектора (по сообщению типа 11 о приеме на сопровождение ВС ДСС-ом после выхода ВС из сектора).

При отсутствии ПКС в данный момент времени, свободный от выполнения какой-либо операции, а также инициирующих сообщений от ВС и от ДСС, выполняется операция проверки отклонения ВС от линии пути (операция 15).

Описанная схема действий представлена на рисунке 3.8.

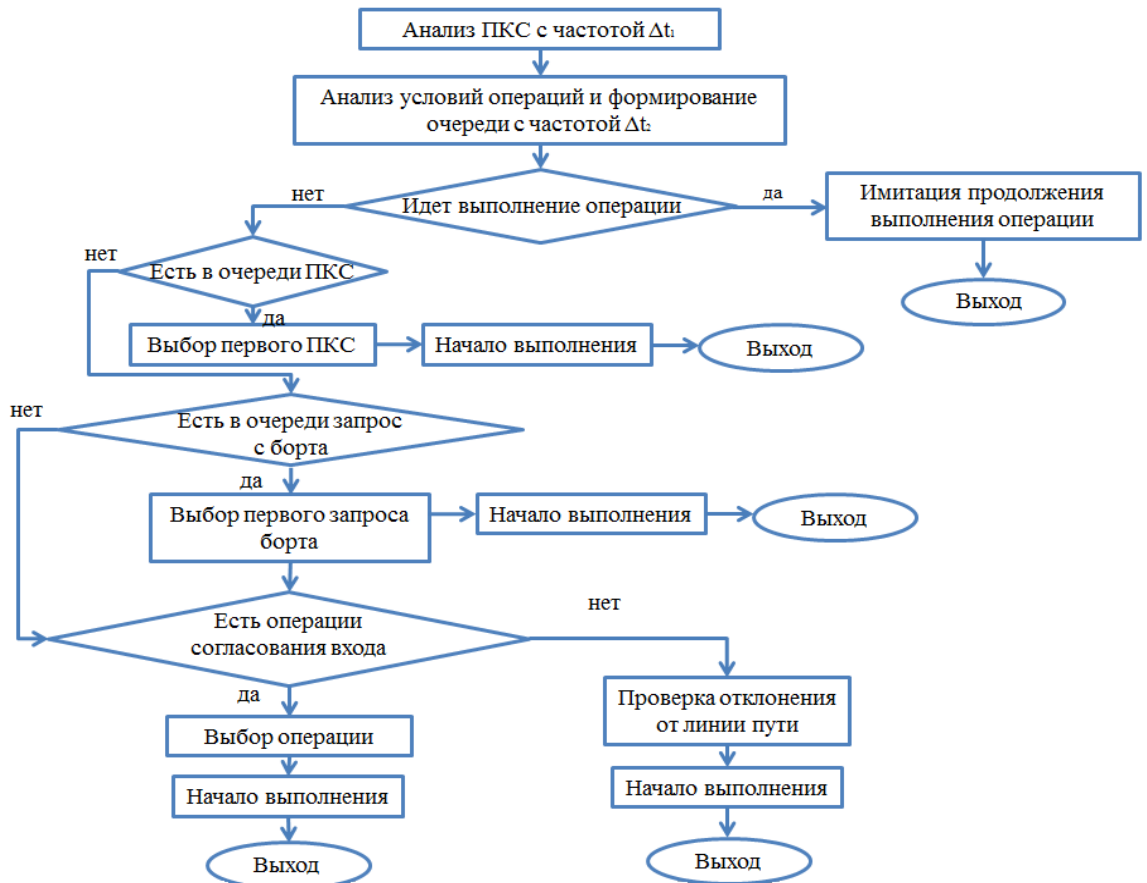


Рисунок 3.8 – Общий алгоритм функционирования модели диспетчерского управления

3.2.5 Алгоритм работы модели диспетчеров соседних секторов

В модели ДСС имитируются следующие операции (действия) (рисунок 3.9):

- анализ движения ВС (выбор для каждого ВС случайным образом времени для начала согласования условий входа в сектор, но не позже, чем за 5-6 минут до пролета рубежа передачи УВД);
- согласование условий входа в исследуемый сектор для ВС;
- согласование условий выхода из исследуемого сектора;
- передача на сопровождение ДП исследуемого сектора при пролете ВС рубежа передачи;
- прием на сопровождение от ДП при пролете ВС рубежа передачи;
- отправка управляющей команды экипажу ВС, находящегося под управлением ДСС, по рекомендации ДП, сформированной в процессе разрешения ДП ПКС внутри исследуемого сектора; прием ответа от ВС.

В процессе согласования условий входа ДСС также может действовать по рекомендации ДП, отправляя соответствующие команды экипажу ВС, участвующего в ПКС в ВП исследуемого сектора.

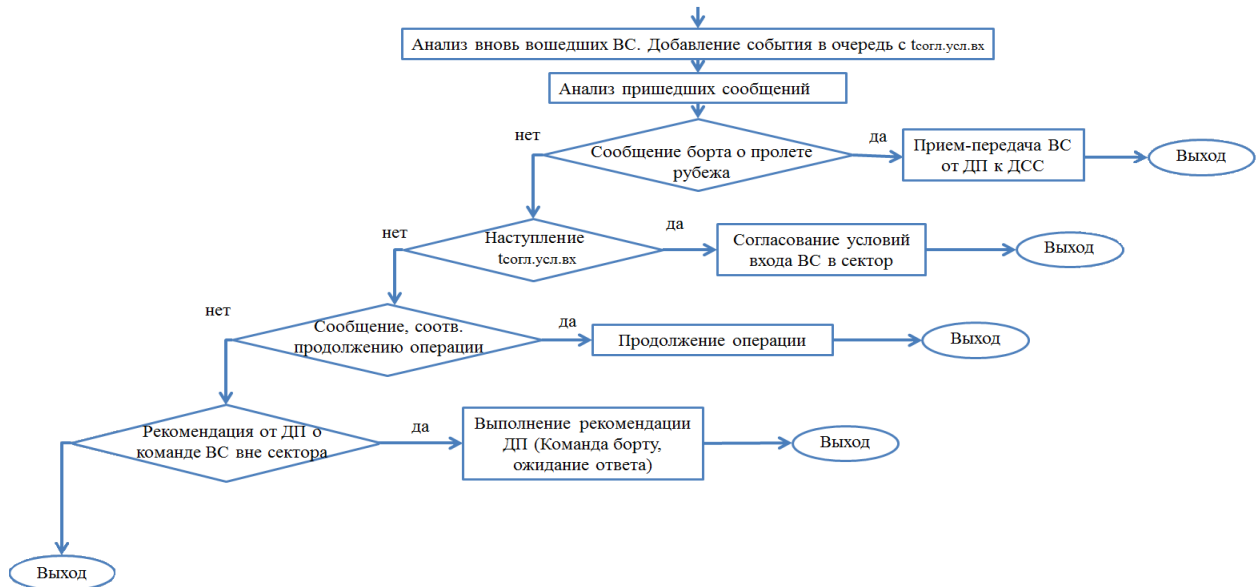


Рисунок 3.9 – Общий алгоритм функционирования модели диспетчеров соседних секторов

3.2.6 Алгоритмы моделирования отдельных операций

3.2.6.1 Операция 1. Согласование условий входа в исследуемый сектор до пролета рубежа передачи УВД

Проверка наличия ПКС в операции согласования выполняется ДП исследуемого сектора для первого участка после входа в сектор.

При наличии ПКС в операции согласования диспетчерская позиция исследуемого сектора формирует команды разрешения ПКС по общим правилам. Если команда должна быть дана ВС, который находится вне исследуемого сектора, ДП сообщает результат расчетов по разрешению ПКС диспетчеру смежного сектора (ДСС), который и передает это решение на борт ВС. Если команда должна быть дана ВС, который находится в исследуемом секторе, ДП сам передает ее на борт ВС и сообщает об этом ДСС.

Команда может быть дана ВС, которое находится в другом смежном секторе, чем согласуемое ВС. ДП всегда сам формирует решение и сообщает его тому ДСС, кому следует управлять ВС.

Если команда дается согласуемому ВС, ДСС сообщает ДП обновленные условия входа. Если команда дается другому ВС, ДСС сообщает о сохранении неизменными первоначальных условий входа.

Если команда дается другому ВС вне исследуемого сектора, ДСС сообщает ДП обновленные условия входа этого ВС. Это касается только тех ВС, которые уже прошли операцию согласования входа. Если согласования еще не было, то и обновления условий не делается.

Действия диспетчеров ДСС и ДП при выполнении операции согласования условий входа представлены в таблице 3.2.

Таблица 3.2 Действия диспетчеров при выполнении операции согласования условий входа

ДСС	ДП
<ol style="list-style-type: none"> 1) Анализ движения ВС (выбор для каждого ВС времени для начала согласования условий входа в сектор за 5-6 минут до пролета рубежа передачи УВД) 2) Передача сообщения о ВС (тип 1) 3) Прием ответа : <ul style="list-style-type: none"> • Нет ПКС - Конец действий; • Есть ПКС - Отправка подтверждения о приеме сообщения о наличии ПКС (тип 4) 4) Прием ответа ДП и разрешение ПКС (выполнение рекомендаций - отправка команды): 	<ol style="list-style-type: none"> 1) Прием сообщения от ДСС 2) Отправка сообщения о получении информации (тип 2) 3) Активация ФПЛ, обмен сообщениями между диспетчерами ДП 4) Анализ ВО, проверка наличия ПКС на входе и до ближайшего ПОД 5) Отправка сообщения о наличии ПКС в точке входа или на 1-м участке (тип 3) либо об отсутствии ПКС (тип 41) 6) Разрешение ПКС (формирование команды и ее адресата): <ul style="list-style-type: none"> • если адресат -согласуемый рейс, то отправка рекомендации (тип 54) • если адресат - другой рейс у ДП, то отправка команды ВС и сообщения 48; конец действий • если адресат - другой рейс у ДСС -

ДСС	ДП
<ul style="list-style-type: none"> • если адресат -согласуемый рейс, то отправка команды экипажу ВС (тип 5), отправка ДП сообщения 21 об изменении условий входа • если адресат - другой рейс у ДСС - отправка команды экипажу ВС (тип 5), отправка ДП сообщения 46 о новых условиях входа; сообщение прежних условий входа согласуемого рейса (тип 47) • если ПКС разрешен у ДП (пришло сообщение 48), то конец действий 	<p style="text-align: center;">отправка рекомендации (тип 45)</p> <p>7) Прием ответов о новых условиях входа - сообщений 21, 46 и о прежних условиях входа - сообщения 47</p>

Инициатором операции согласования условий входа в сектор служит наступление времени согласования, условно "назначенного" ДСС. При наступлении этого времени ДСС сообщает ДП характеристики рейса, точку входа и прогнозируемые параметры входа - время, эшелон входа, скорость (сообщение типа 1). Для ДП это сообщение служит инициатором его операции 1 по согласованию условий входа ВС. В соответствии с общим алгоритмом работы ДП, ДП приступает к этой операции при "наличии свободного времени", т.е. если он не занят другой операцией, отсутствуют ПКС, отсутствуют сообщения с борта ВС и "подошла очередь" обработки данного сообщения, т.е. обработаны все более ранние иницирующие операции от ДСС. Если ДП занят, иницирующее сообщение 1 от ДСС остается в очереди "ожидать своего часа". Соответствующая задержка в обработке иницирующего сообщения входит в формирование показателя "Количество операций в очереди ДП". В предельном случае при сверхбольшой занятости ДП может так и не приступить к операции согласования условий входа до вылета ВС из сектора, так как операция согласования имеет третий приоритет после разрешения ПКС и общения с бортом ВС - это соответствует реальной ситуации сильной загруженности диспетчера. В этом случае данная операция войдет в число невыполненных операций ДП, ее длительность - в суммарную длительность невыполненных операций.

При выполнении операции согласования ДП принимает и обрабатывает сообщение от ДСС и отправляет ответ о его получении (сообщение типа 2). После анализа воздушной обстановки результат анализа ДП сообщает ДСС: об отсутствии ПКС с данным рейсом на первом участке полета после входа в сектор - это сообщение 41, о наличии ПКС – это сообщение 3. ДП формирует разрешение ПКС по общим правилам, т.е. устанавливает, какому из двух рейсов дать команду и какую именно. При этом могут быть два варианта:

- команду надо дать согласуемому ВС - в этом случае ДП сообщает ДСС об этом в "рекомендации" - сообщении 54;
- команду надо дать другому, не согласуемому рейсу. В этом втором варианте опять могут быть два случая:
 - этот рейс находится под управлением ДП - тогда экипажу ДП и отправляет соответствующую команду (сообщения 5 для смены высоты, 16 - для смены скорости), о чем сообщает ДСС в сообщении 48;
 - этот рейс находится еще под управлением ДСС - тогда ДП отправляет ДСС "рекомендацию" дать команду этому ВС (сообщение 45) для разрешения ПКС с согласуемым рейсом.

На этом первый проход операции заканчивается.

При входе в следующие секунды в течение длительности операции согласования ДП ожидает ответа на посланные сообщения.

ДСС после сообщения ДП условий входа рейса при поступлении ответных сообщений от ДП продолжает выполнять свою часть операции согласования, а именно:

- при поступлении сообщения 41 об отсутствии ПКС ему проставляется признак завершения обработки, и на этом действия операции заканчиваются;
- при поступлении сообщения 3 о наличии ПКС ДСС сообщает о его приеме в сообщении 4 и продолжает ожидать дальнейших сообщений (54, 45, 48);
- при поступлении сообщения-рекомендации 54 о команде согласуемому рейсу ДСС отправляет рекомендуемую команду на борт ВС (сообщения 5,16) и сообщает ДП об изменении условий входа (сообщение 21)
- при поступлении сообщения-рекомендации 45 о команде другому, не согласуемому рейсу отправляет команду на борт ВС (сообщения), проверяет, согласовывались ли уже с ДП условия его входа, и, если согласовывались, сообщает ДП обновленные условия его входа (сообщение 47), а также подтверждает прежние условия входа согласуемого рейса (сообщение 46).

- при поступлении сообщения 48 - "уведомления" ДСС об уже выполненном самим ДП разрешении ПКС с согласуемым рейсом отдачей команды ВС внутри сектора - ДСС предоставляет сообщению признак завершения обработки, и на этом действия операции заканчиваются.

Возможные следующие действия по согласованию выполняются ДП после приема им сообщений: а) от борта ВС в ответ на посланную команду (сообщение 25) и б) от ДСС об обновлении условий входа согласуемого или другого рейса (сообщение 21 или 47) либо сохранении прежних условий входа (сообщение 46). Обработка сообщений 25 и 46 просто завершает действия операции. Обработка сообщений 21 и 47 заключается в коррекции соответствующих параметров рейсов у ДП. На этом все действия операции согласования условий входа в сектор заканчиваются, и после истечения времени операции она считается выполненной.

Таким образом, в операции согласования условий входа в сектор задействованы сообщения между ДП и ДСС, представленные в таблице 3.3. Горизонтальной жирной чертой отделены сообщения, которые можно считать относящимися к разрешению ПКС (нижняя часть таблицы), от сообщений собственно операции согласования условий входа. Сообщения экипажу ВС от ДП и ДСС и ответы ВС приведены в таблице 3.4

Таблица 3.3 Сообщения диспетчеров ДП и ДСС, передаваемые друг другу (здесь и далее нумерация операций приводится в соответствии с тем как это реализовано в модели)

Сообщение от ДСС к ДП	Сообщение от ДП к ДСС	Смысл сообщений
1		Согласование условий входа в сектор Инициатор Операции согласования у ДП
	2	Сообщение о приеме согласующего сообщения 1
	41	Нет ПКС. Завершающее действие
	3	Есть ПКС.
4		Ответ "Понял" на "Есть ПКС"
	54	Рекомендация дать команду согласуемому ВС
21		Новые условия входа согласуемого ВС после выполнения команды
	48	Оповещение о разрешении ПКС командой ДП другому ВС в секторе
	45	Рекомендация дать команду другому, не согласуемому

Сообщение от ДСС к ДП	Сообщение от ДП к ДСС	Смысл сообщений
		ВС
47		Новые условия входа другого, не согласуемого ВС
46		Прежние условия входа согласуемого ВС

Таблица 3.4 Сообщения от диспетчеров ДП и ДСС, передаваемые экипажам ВС

Сообщение от ДП к ВС	Сообщение от ВС к ДП	Сообщение от ДСС к ВС	Сообщение от ВС к ДСС	Смысл сообщений
5				Команда ВС по смене высоты
	25			Ответ ВС на команду по смене высоты
16				Команда ВС по изменению скорости
		5		Команда ВС по смене высоты
			25	Ответ ВС на команду по смене высоты
		16		Команда ВС по изменению скорости

3.2.6.2 Операция 4. Прием на сопровождение при пролете ВС рубежа передачи УВД

В операциях приема-передачи ВС на сопровождение при пролете рубежа активно задействованы три участника: экипаж ВС и диспетчерские позиции обоих секторов, рубеж которых пересекает ВС.

Операция 4 приема на сопровождение в сектор и операция 14 передачи ВС на сопровождение ДССу в реальности совершенно симметричны. Это проявляется и в сообщениях, которыми обмениваются участники операций при влете в сектор и при вылете из него. Однако алгоритмы этих операций не симметричны: достаточно заметить, например, что инициатором операций служат сообщения различных типов. Эта несимметричность объясняется тем, что выделен исследуемый сектор, операции в котором подвергаются анализу.

Операции 4 и 14 приема-передачи состоят каждая из двух частей:

- экипаж ВС сообщает диспетчеру, под управлением которого он находится, о готовности к пересечению рубежа передачи управления, это происходит примерно за 10 км до пролета самого рубежа; на что в ответ диспетчер сообщает экипажу о переходе на новую частоту общения со следующим диспетчером;
- экипаж ВС сообщает "новому" диспетчеру о пролете рубежа, т.е. входе в новый сектор; в ответ на это диспетчер выполняет все необходимые действия по приему ВС на сопровождение, в том числе сообщает "прежнему" диспетчеру о взятии ВС на сопровождение; тем самым "прежний" диспетчер освобождается от сопровождения ВС.

Инициатором первой части операции приема-передачи ВС служит сообщение ВС о готовности к пересечению рубежа; инициатором второй части - сообщение ВС о пролете рубежа. Однако в первой части операции приема-передачи инициирующее сообщение поступает к первому диспетчеру, во второй части операции - к новому диспетчеру. Поэтому в операции приема ВС на сопровождение диспетчером исследуемого сектора от диспетчера смежного сектора ДП выполняет только вторую часть общей операции, в первой же части он не задействован, инициатором операции 4 приема ВС служит сообщение ВС о пролете рубежа (сообщение 9). В операции передачи управления ВС от ДП к ДСС, когда ВС покидает исследуемый сектор, наоборот, ДП выполняет первую часть операции, а из второй части его касается только "конечное" сообщение ДСС о взятии ВС под свое сопровождение - оно означает конец сопровождения ВС для ДП, т.е. выполнение в модели определенных завершающих действий. Этим объясняется то, что эти две операции моделируются как отдельные операции 4 приема и 14 передачи ВС на сопровождение.

Инициатором операции 4 служит сообщение ВС о пролете рубежа (сообщение 9). Так же, как и в других случаях, ДП приступает к этой операции при "наличии свободного времени", т.е. если он не занят другой операцией, отсутствуют ПКС и "подошла очередь" обработки данного сообщения с борта ВС, т.е. обработаны все более ранние инициирующие сообщения от ВС. Если ДП занят, инициирующее сообщение 9 от ВС остается в очереди "ожидать своего часа". Соответствующая задержка в обработке инициирующего сообщения входит в формирование показателя "Количество операций в очереди у ДП" и показателя "Средняя задержка взятия ВС на сопровождение". В предельном случае при сверхбольшой занятости ДП может так и не приступить к операции приема ВС вплоть до вылета ВС из сектора, хотя этого практически не наблюдается - операция приема имеет второй приоритет после разрешения ПКС, для такой ситуации требуется непрерывная загруженность диспетчера разрешением ПКС в течение порядка 20 минут пролета через сектор, т.е. очень большой и сложный поток ВС. В этом случае

данная операция войдет в число невыполненных операций ДП, ее длительность - в суммарную длительность невыполненных операций.

Структурная схема алгоритма операции 4 представлена на схеме 3.10. Первые два блока относятся к действиям по передаче ВС на сопровождение, а остальные – к приему. Алгоритмы работы действий диспетчеров ДП, ДСС и экипажа ВС описаны отдельно для каждой из частей этих операций.

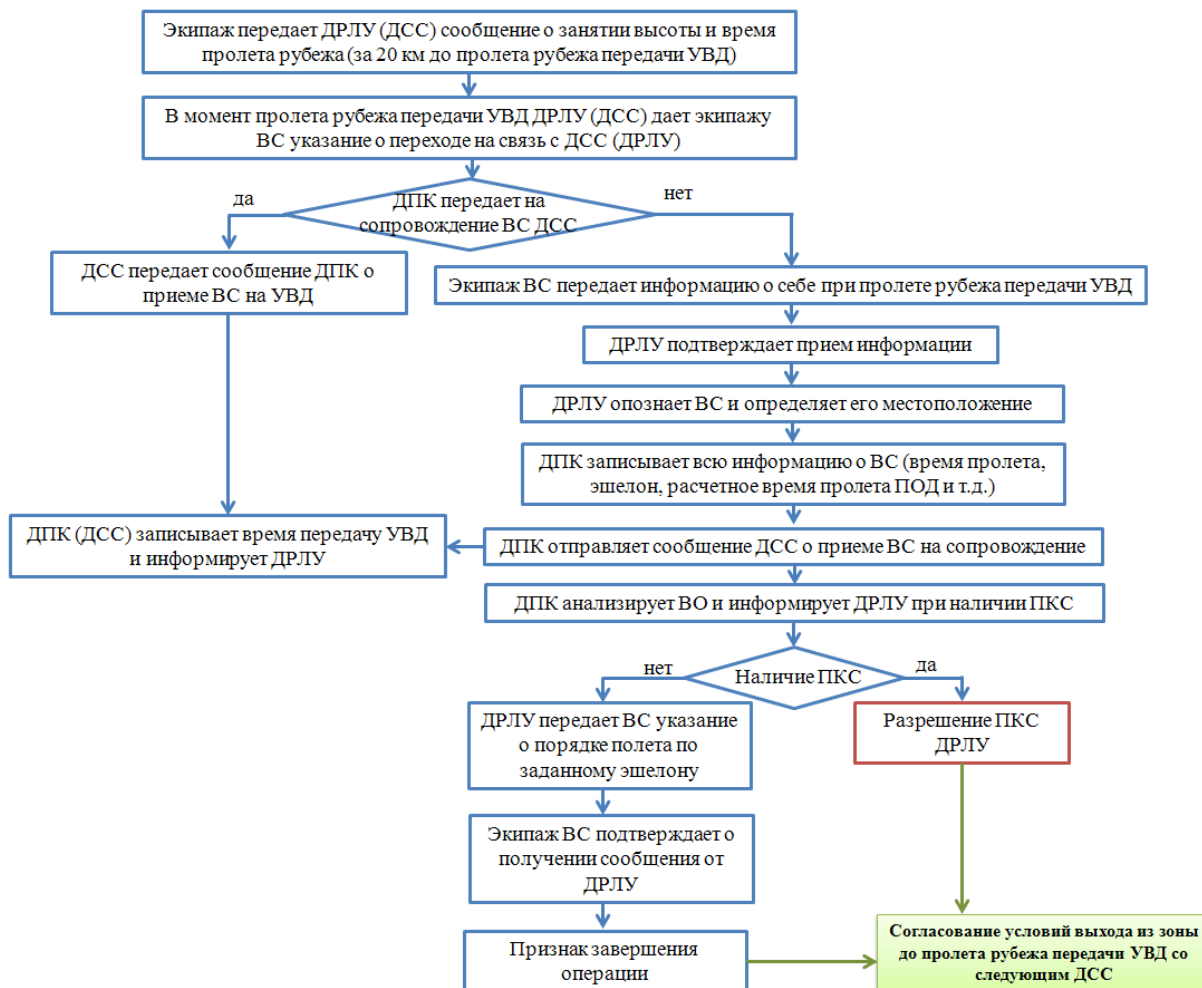


Рисунок 3.10 – Общая схема алгоритма операции приема на сопровождение при пролете ВС рубежа передачи УВД

При обнаружении ПКС в операции приема диспетчерская позиция исследуемого сектора формирует команды разрешения ПКС по общим правилам в случае, если ПКС прогнозируется на ближайшем участке маршрута ВС или, вернее, в течение заданного временного интервала Δt . Нахождение ПКС на участке маршрута заменено нахождением ПКС на временном интервале, чтобы исключить ситуацию, когда команды по разрешению ПКС приходят с опозданием, в случае, когда ПКС прогнозируется в самом начале участка.

Если команда должна быть дана ВС, который находится в исследуемом секторе, ДП сам передает ее на борт ВС и сообщает об этом ДСС. Это может быть принятый на сопровождение ВС либо второй ВС из ПКС, находящийся в секторе. Если команда должна быть дана ВС, который находится вне исследуемого сектора, ДП сообщает результат расчетов по разрешению ПКС диспетчеру смежного сектора (ДСС), который и передает это решение на борт ВС.

Таким образом, ДП при формировании способа разрешения ПКС устанавливает, какому из двух рейсов дать команду, и какую именно. При этом могут быть два варианта:

- команду надо дать принятому на сопровождение ВС - в этом случае ДП отправляет экипажу ВС соответствующую команду (сообщения 5 для смены высоты, 16 для смены скорости) и принимает ответ ВС, т.е. ДП полностью выполняет операцию разрешения ПКС;
- команду надо дать другому, не принятому в данный момент на сопровождение рейсу. В этом втором варианте опять могут быть два случая:
 - этот рейс находится под управлением ДП - тогда экипажу этого ВС ДП и отправляет соответствующую команду (сообщения 5 для смены высоты, 16 для смены скорости), принимает от него ответ, т.е. так же ДП полностью выполняет операцию разрешения ПКС;
 - этот рейс находится еще под управлением ДСС - тогда ДП отправляет ДСС "рекомендацию" дать команду этому ВС (сообщение 51) для разрешения ПКС с принятым рейсом. В модель ДСС для выполнения такой рекомендации включена новая операция - "Выполнение рекомендации ДП".

При следующих заходах в операцию 4 приема ВС на сопровождение ДП ожидает и обрабатывает ответы на команду от бортов ВС (сообщения 25), это выполняется в операции разрешения ПКС определенного типа.

Таким образом, действия по разрешению ПКС разделены между двумя диспетчерскими позициями - и ДП и ДСС: собственно команду по разрешению ПКС и ее адресата - одно из двух ВС, задействованных в ПКС, определяет всегда ДП, а отдавать команду может и ДП и ДСС в зависимости от того, под чьим управлением находится адресат этой команды. Отметим, что одно из ВС - только что принятое на сопровождение - находится всегда под управлением ДП. Для передачи сформированного решения от ДП к ДСС выполняется соответствующий обмен сообщениями. Обмен сообщениями между ДП и ДСС здесь существенно меньше, чем в операции согласования.

Сообщения, задействованные в операции 4 приема ВС на сопровождение, представлены в таблице 3.5. Горизонтальной жирной чертой отделены сообщения, которые можно считать

относящимися к разрешению ПКС (нижняя часть таблицы), от сообщений собственно операции приема ВС в сектор.

Таблица 3.5 Сообщения, передаваемые во время выполнения операции приема ВС на сопровождение

Сообщение от ДП к ВС	Сообщение от ВС к ДП	Сообщение от ДП к ДСС	Сообщение от ДСС к ВС	Сообщение от ВС к ДСС	Сообщение от ДСС к ДП	Смысл сообщений
	9					Пролет рубежа. Инициатор Операции приема ВС у ДП
112						Сообщение о получении информации
		11				О приеме ВС на сопровождение ДП (освобождение ДСС от ВС)
12						Нет ПКС. О порядке полета по плану
3						Есть ПКС.
5						Команда ВС по смене высоты
	25					Ответ ВС на команду
16						Команда ВС по изменению скорости
		53				Рекомендация от ДП дать команду по высоте другому, не вошедшему ВС
			5			Команда ВС по

Сообщение от ДП к ВС	Сообщение от ВС к ДП	Сообщение от ДП к ДСС	Сообщение от ДСС к ВС	Сообщение от ВС к ДСС	Сообщение от ДСС к ДП	Смысл сообщений
						смене высоты
				25		Ответ ВС на команду
					47	Обновленные условия входа по рейсу
		51				Рекомендация от ДП дать команду по скорости другому, не вошедшему ВС
			16			Команда ВС по изменению скорости
					52	Обновленные условия входа по рейсу

Включение в алгоритм имитации действий диспетчерской позиции сектора по разрешению ПКС возможностей управления ВС, находящимся не только под управлением ДП, но и в смежном секторе под управлением ДСС, посредством передачи от ДП к ДСС управляющих "рекомендаций" позволило справиться с ПКС в сложных случаях, когда внутри сектора ВС следуют на этапах набора высоты и снижения.

В операции приема ВС так же, как и в других операциях, разрешение ПКС разделилось на две части: выработка команды и ее адресата входит в процедуру разрешения ПКС ДП определенного типа, отправка же команды экипажу ВС и получение ответа включена в эту процедуру только в том случае, если ВС внутри сектора; в противном случае по "рекомендации" ДП команду отправляет ДСС, он же получает ответ ВС. Для этого служит операция ДСС "Выполнение рекомендации ДП".

3.2.6.3 Операция 7. Сопровождение при пролете ВС пункта обязательного донесения

Инициатором операции служит сообщение ВС о пролете ПОД (сообщение 9). Так же, как и в других случаях, ДП приступает к этой операции при "наличии свободного времени", т.е. если он не занят другой операцией, отсутствуют ПКС и "подошла очередь" обработки данного

сообщения с борта ВС, т.е. обработаны все более ранние иницирующие сообщения от ВС. Если ДП занят, иницирующее сообщение 9 от ВС остается в очереди "ожидать своего часа". Соответствующая задержка в обработке иницирующего сообщения входит в формирование показателя "Количество операций в очереди у ДП" или в предельном случае - в суммарную длительность невыполненных операций.

Структурная схема операции приведена на рисунке 3.11.

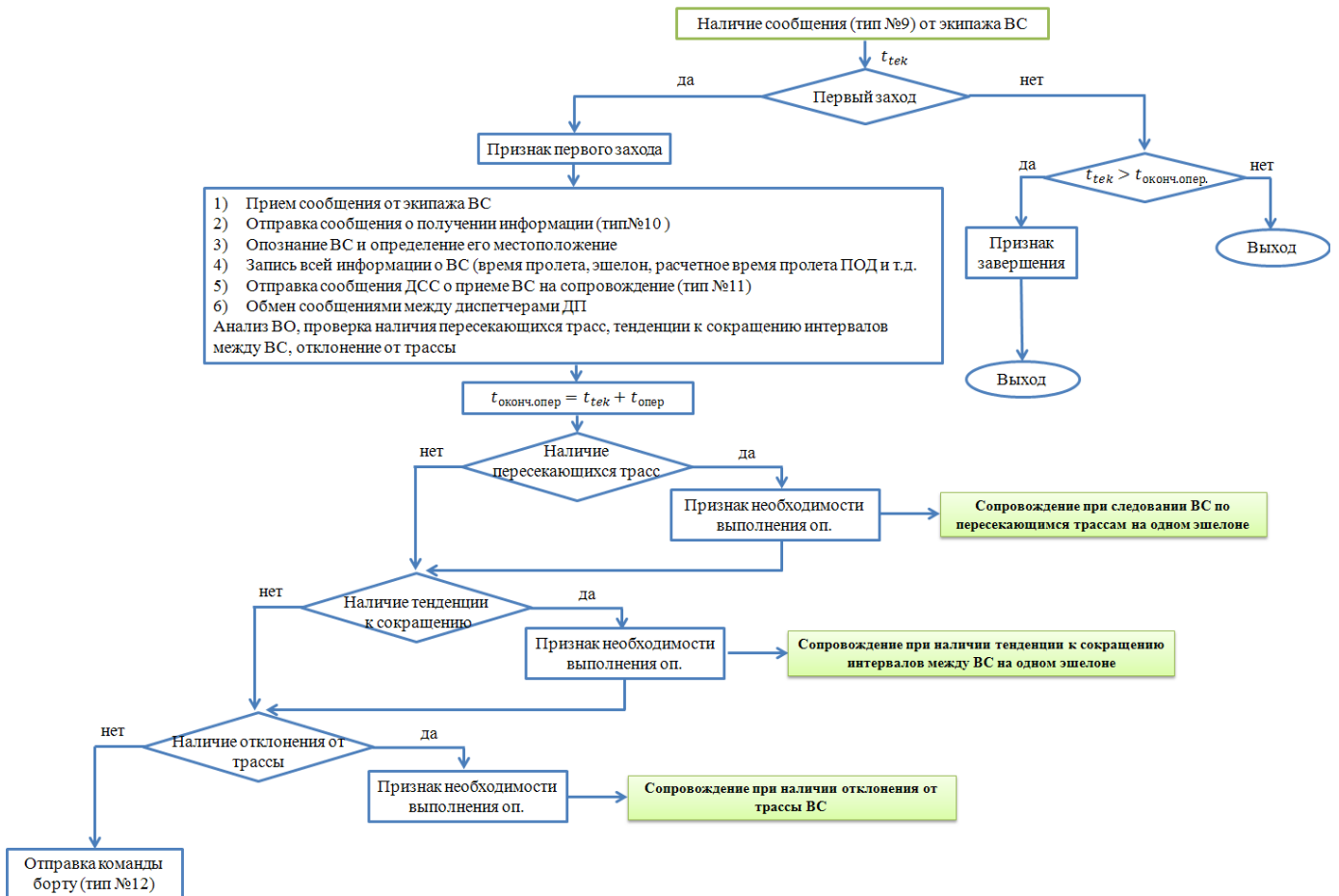


Рисунок 3.11 – Общая схема алгоритма операции сопровождения ВС при пролете пункта обязательного донесения

При обнаружении ПКС в операции сопровождения пролета ВС ПОД разрешение ПКС выполняется точно так же, как в операции 4 приема ВС на сопровождение в сектор.

Сообщения, задействованные в операции 7 сопровождения пролета ВС ПОД, представлены в таблице 3.6. Горизонтальной жирной чертой отделены сообщения, которые можно считать относящимися к разрешению ПКС (нижняя часть таблицы), от сообщений собственно операции сопровождения пролета ВС ПОД.

Нижняя часть таблицы 3.6, отображающая сообщения, участвующие в разрешении ПКС, в точности совпадает с нижней частью таблицы 3.5 для операции приема ВС на сопровождение.

Это отражает одинаковое распределение действий по разрешению ПКС в этих операциях. Верхние части таблиц Б и В различаются лишь тем, что в операции сопровождения пролета ВС ПОД отсутствует сообщение от ДП к ДСС о взятии ВС на сопровождение (сообщение 11) из операции приема ВС.

Так же, как в операции приема, при разрешении ПКС командой ВС, который еще не вошел в исследуемый сектор, используется операция ДСС "Выполнение рекомендации ДП".

Таблица 3.6 Сообщения, передаваемые во время выполнения операции сопровождения ВС при пролете пункта обязательного донесения

Сообщение от ДП к ВС	Сообщение от ВС к ДП	Сообщение от ДП к ДСС	Сообщение от ДСС к ВС	Сообщение от ВС к ДСС	Смысл сообщений
	9				Пролет ПОД. Инициатор Операции сопровождения пролета ВС ПОД
12					Сообщение о получении информации
12					Нет ПКС. О порядке полета по плану
3					Есть ПКС.
5					Команда ВС по смене высоты
	25				Ответ ВС на команду
16					Команда ВС по изменению скорости
		53			Рекомендация от ДП дать команду

Сообщение от ДП к ВС	Сообщение от ВС к ДП	Сообщение от ДП к ДСС	Сообщение от ДСС к ВС	Сообщение от ВС к ДСС	Смысл сообщений
					по высоте другому, не вошедшему ВС
			5		Команда ВС по смене высоты
				25	Ответ ВС на команду
		51			Рекомендация от ДП дать команду по скорости другому, не вошедшему ВС
			16		Команда ВС по изменению скорости

3.2.6.4 Операция 8. Сопровождение при достижении ВС заданного эшелона

Инициатором операции служит сообщение ВС о достижении заданного эшелона (сообщение 21).

В операции нет анализа воздушной обстановки и разрешения ПКС. Обмен сообщениями в операции между ДП и экипажем ВС соответствует таблице 3.7 и сводится к сообщению ДП о порядке дальнейшего выполнения полет и подтверждения ВС.

Таблица 3.7 Сообщения, передаваемые во время выполнения операции сопровождения ВС при достижении заданного эшелона

Сообщение от ДП к ВС	Сообщение от ВС к ДП	Смысл сообщений
	21	Сообщение о достижении заданного эшелона. Инициатор Операции 8
12		Сообщение о получении информации
12		О дальнейшем выполнении полета

3.2.6.5 Операция 9. Сопровождение при изменении эшелона при полете ВС по трассе

Моделирование операции сопровождения ВС при изменении эшелона выполняется при запросе бортом возможности смены эшелона и взаимодействия диспетчера и борта при смене эшелона.

Смена эшелона по инициативе экипажа ВС при пролете ВС исследуемого сектора РЦ может быть обусловлена следующими факторами:

- этапом набора высоты или снижения;
- предусмотренной в плане полета сменой высоты на крейсерском этапе полета; в этом случае в модели должна быть предусмотрена смена высоты, но не в тот момент, который предполагается в плане полета, а в случайно разыгранный момент в интервале пролета бортом моделируемого сектора (согласно Решению 3);
- если в маршруте полета через сектор есть участки с переменной направлением; в этом случае борт должен выйти на новый эшелон за 20 км до выхода на поворотный маршрут.

Инициатором операции служит запрос экипажем ВС на смену эшелона (сообщение 23).

Для определения бесконфликтного выполнения операции борт передает данные по вертикальной скорости набора эшелона, исходя из которой диспетчер рассчитывает траекторию.

При запросе бортом смены эшелона диспетчер проверяет, не возникнет ли ПКС в процессе занятия бортом запрашиваемого эшелона.

При отсутствии ПКС диспетчер:

- дает борту разрешение на занятие запрашиваемого эшелона (сообщение 555);
- получает от борта подтверждение о том, что экипаж принял команду на занятие запрашиваемого эшелона (сообщение 25);
- в дальнейшем получает от борта сообщение экипажа о занятии запрашиваемого эшелона (сообщение 21, иницирующее операцию 8).

Если в результате выполнения бортом операции по смене эшелона борт проходит ППМ или ПОД в режиме набора высоты, диспетчер, по умолчанию, дает разрешение на пролет данной точки не в горизонтальном положении. Это вызвано тем, что разыгранный момент начала смены эшелона может попасть в конец участка, или сам участок достаточно мал по длине, и борт не успевает набрать эшелон.

При наличии ПКС диспетчер запрещает ВС менять эшелон, то есть дает команду следовать на прежнем безопасном эшелоне. Дополнительно ДП проводит анализ воздушной

обстановки, и при наличии ПКС с участием данного рейса выполняется разрешение ПКС по общим правилам. При этом возможна команда другому ВС, который находится еще вне сектора - тогда команду ему отдает ДСС по "рекомендации" ДП.

Смена эшелона может выполняться также по инициативе диспетчера - при формировании и передаче на борт ВС команды с целью разрешения ПКС. В этом случае борт отправляет диспетчеру подтверждение того, что экипаж команду на занятие данного безопасного эшелона принял. В дальнейшем экипаж сообщает о занятии данного безопасного эшелона.

3.2.6.6 Операция 13. Согласование условий выхода из сектора до пролета рубежа передачи УВД со следующим ДСС

Согласование условий выхода ВС из сектора может начинаться после его приема в сектор и, если есть изменения в условиях выхода, при выполнении других операций по сопровождению ВС - при пролете ПОД, при смене высоты - не позднее, чем за 5-7 минут до пролета рубежа передачи управления. Сообщения, задействованные в операции 7 сопровождения пролета ВС ПОД, представлены в таблице 3.8.

Таблица 3.8 Сообщения, передаваемые во время выполнения операции согласования условий выхода ВС из сектора

Сообщение от ДП к ДСС	Сообщение от ДСС к ДП	Смысл сообщений
1		Отправка сообщения об условиях входа ВС в смежный сектор
	2	Сообщение о получении информации
	41	Нет ПКС. О порядке полета по плану
	3	Есть ПКС.
4		Подтверждение приема сообщения об наличии ПКС

3.2.6.7 Операция 14. Передача на сопровождение при пролете ВС рубежа передачи

Как отмечено выше при описании операций приема-передачи ВС при пролете рубежа между секторами, в операции передачи управления ВС от ДП к ДСС, когда ВС покидает исследуемый сектор, ДП полностью выполняет первую часть операции, инициатором которой служит сообщение ВС о занятии высоты и готовности к пересечению рубежа (сообщение 29) за 20 км до пролета рубежа передачи УВД. В ответном сообщении ДП дает экипажу ВС указание

о переходе на связь с ДСС в момент пролета рубежа передачи УВД (сообщение 30), в ответ на что экипаж отправляет подтверждение приема сообщения о переходе на связь с другим диспетчером (сообщение 31).

Вторая часть операции передачи УВД инициируется сообщением от ВС к ДСС о пролете рубежа (сообщение 9), в ответ на что ДСС отсылает экипажу ВС подтверждение о входе в смежный сектор (сообщение 12), выполняет необходимые действия операции приема и, что существенно для ДП исследуемого сектора, ДСС отсылает ДП сообщение 11 о взятии ВС на сопровождение - тем самым сопровождение ВС диспетчером исследуемого сектора заканчивается. Это последнее сообщение к ДП относительно данного ВС. По этому событию в модели диспетчерского управления выполняется анализ оставшихся необработанными сообщений по данному ВС и невыполненных операций из-за загруженности ДП, а также на основе этого анализа - подсчет соответствующих показателей - "Количество операций в очереди у ДП", "Число невыполненных операций разного типа", "Диаграмма загруженности ДП". В частности, при большой загруженности ДП часто остается невыполненной операция согласования с ДСС условий передачи ВС на сопровождение при вылете из сектора как имеющая третий уровень приоритета после разрешения ПКС и общения с бортом ВС. После этого все эти необработанные сообщения удаляются из рабочих массивов и списков.

3.2.6.8 Операция 16. Разрешение ПКС

Операция выполняется при обнаружении ПКС. По принятым правилам команды по разрешению ПКС формируются и отсылаются на борт ВС не раньше, чем за определенное время до прогнозируемого ПКС. Это правило соответствует традиционному условию разрешения ПКС на текущем участке, однако если ПКС прогнозируется в самом начале участка, то его разрешение должно начаться раньше, в конце предыдущего участка. Принятое правило позволяет учесть такие случаи. Интервал времени задается порядка 10 минут. Данное правило работает, если оба ВС из ПКС находятся в исследуемом секторе, и ПКС прогнозируется внутри сектора.

Если же ПКС прогнозируется при проверке ДП условий входа в сектор в операции согласования, то условием формирования команд по разрешению служит принадлежность времени прогнозируемого ПКС временному интервалу от влета в сектор вперед. Это условие соответствует традиционному правилу ПКС на первом участке маршрута после взлета.

В операции 16 выполняется проверка указанных условий и при их выполнении переход к формированию команд, их адресатов и отсылке сообщений.

3.3 Модель воздушной обстановки

3.3.1 Общая структура модели воздушной обстановки

Модель воздушной обстановки представляет собой совокупность моделей полета множества воздушных судов (ВС), пролетающих моделируемый сектор. Для каждого ВС, выполняющего полет в соответствии с собственным планом, моделируется полет к рубежу передачи его на управление диспетчерской позиции моделируемого сектора, пролет этого рубежа, транзитный пролет воздушного пространства сектора и пересечение рубежа передачи следующей диспетчерской позиции. В процессе полета имитируется обмен сообщениями экипажа ВС с диспетчерской позицией и выполнение команд диспетчера. Структура модели ВС представлена на рисунке 3.12.

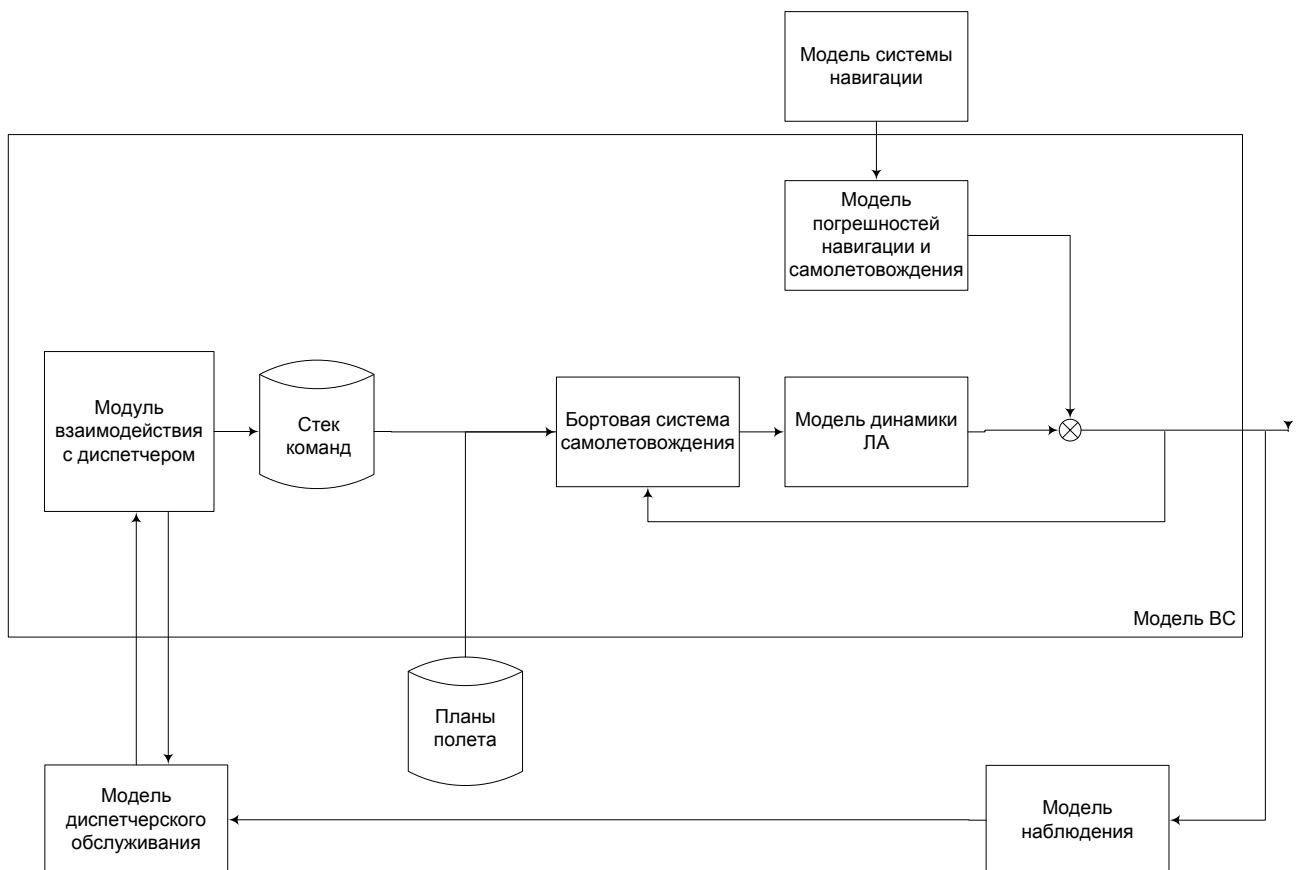


Рисунок 3.12 – Структура модели воздушной обстановки

Модуль взаимодействия с диспетчером отвечает за обеспечение взаимодействия между моделью ВС и моделью диспетчера. В модуле имитируется прием сообщений от диспетчера и ответная отправка сообщений диспетчеру. Стек команд предназначен для приема диспетчерских команд, их временного хранения и передачи для дальнейшего использования в модели бортовой системы самолетовождения. Бортовая система самолетовождения самолета (БССС) на основе плана полета и команд диспетчера вырабатывает команды управления для

модели динамики ЛА для выдерживания траектории полета ВС. Модель динамики летательного аппарата (МДЛА) имитирует движение воздушного судна по заданной траектории в соответствии с командами, поступающими от БССС. Модель погрешностей навигации и самолетовождения вырабатывает ошибки, имитирующие интегральные неточности в навигации и самолетовождении.

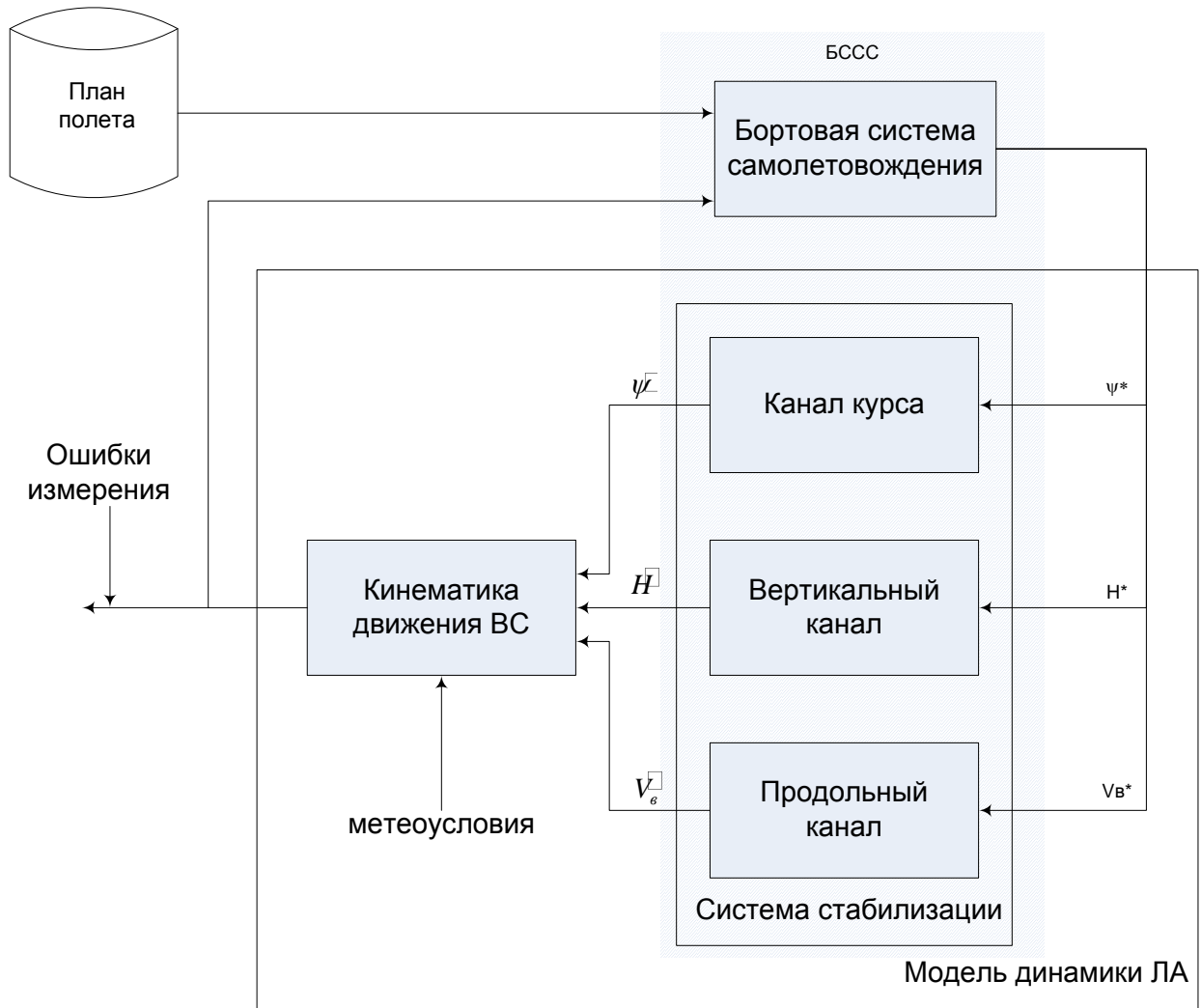


Рисунок 3.13 – Модель динамики летательного аппарата (воздушного судна)

Модель динамики ВС разбита на два блока (рисунок 3.13): система стабилизации и кинематика движения ВС. Модель системы стабилизации включает три канала управления:

- управление по направлению (канал курса);
- управление по высоте (вертикальный канал);
- управление по скорости (продольный канал).

Апериодическая модель регулятора канала курса задается следующими уравнениями:

$$\begin{aligned} \dot{\psi} &= D_k (\psi^* - \psi), \\ \text{если } \dot{\psi} > \dot{\psi}_m, \text{ то } \dot{\psi} &= \dot{\psi}_m, \\ \text{если } \dot{\psi} < -\dot{\psi}_m, \text{ то } \dot{\psi} &= -\dot{\psi}_m, \end{aligned} \quad (3.1)$$

где ψ - текущий угол курса, ψ^* - команда управления (заданный угол курса), D_k - добротность канала курса системы стабилизации, $\dot{\psi}_m$ - максимально возможная угловая скорость изменения курса при координированном развороте

$$\dot{\psi}_m = \left(\frac{g \cdot \operatorname{tg} \gamma_m}{V_g} \right) \quad (3.2)$$

где g - ускорение свободного падения, γ_m - максимальный угол крена при координированном развороте, V_g - текущая воздушная скорость ВС.

Апериодическая модель регулятора вертикального канала задается следующими уравнениями:

$$\begin{aligned} \dot{H} &= D_e (H^* - H), \\ \text{если } \dot{H} > \dot{H}_{\max}, \text{ то } \dot{H} &= \dot{H}_{\max}, \\ \text{если } \dot{H} < \dot{H}_{\min}, \text{ то } \dot{H} &= \dot{H}_{\min}, \end{aligned} \quad (3.3)$$

где H - текущая высота полета, H^* - команда управления (заданная высота полета), \dot{H}_{\max} и \dot{H}_{\min} - максимальные скорости подъема и снижения соответственно, D_e - добротность вертикального канала системы стабилизации.

Апериодическая модель регулятора вертикального канала задается следующими уравнениями:

$$\dot{V} = D_c (V^* - V),$$

$$\text{если } \dot{V} > \dot{V}_{\max}, \text{ то } \dot{V} = \dot{V}_{\max}, \quad (3.4)$$

$$\text{если } \dot{V} < \dot{V}_{\min}, \text{ то } \dot{V} = \dot{V}_{\min},$$

где V – текущая скорость полета, V^* – команда управления (заданная скорость полета), \dot{V}_{\max} и \dot{V}_{\min} – максимальные ускорение и торможение соответственно, D_c – добротность канала управления скоростью.

Кинематика движения ВС имитируется численным интегрированием дифференциальных уравнений, описывающих изменение во времени текущего состояния ВС. Численное интегрирование дифференциальных уравнений производится методом Эйлера первого порядка. Уравнения движения центра масс ВС в сферической системе координат:

$$\begin{aligned} \frac{dB}{dt} &= \frac{V_B \cdot \cos \psi}{(R_3 + H)} \\ \frac{dL}{dt} &= \frac{V_B \cdot \sin \psi}{(R_3 + H) \cdot \cos B} \end{aligned} \quad (3.5)$$

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

3.3.2 Моделирование погрешностей навигации и самолетовождения

В соответствии с [60] формируется модель суммарных ошибок и навигации и самолетовождения. Ошибки в горизонтальной составляющей определяются исходя из уровня требуемых навигационных характеристик ВП (RNP). Совокупность значений моделируемых случайных ошибок навигации, взятая по ансамблю либо по времени, должна иметь заданную плотность распределения. Для моделирования было выбрано двухмерное экспоненциальное распределение:

$$f(y) = \frac{1}{2 \cdot \lambda} e^{-\frac{|y|}{\lambda}} \quad (3.6)$$

где y – моделируемая величина бокового отклонения ВС. Параметр λ выбирается для удовлетворения требования

$$\int_{-k}^k f(y) dy = 0.95 \quad (3.7)$$

в соответствии с которым предполагается, что погрешности определения местоположения ВС, выполняющих полет по *RNP k*, составляют менее *k* морских миль в течение 95% их полетного времени. Таким образом, $\lambda = -\frac{k}{\ln(0.05)}$.

Для каждого ВС суммарная ошибка разыгрывается в начале его полета как боковое отклонение *Z* от осевой линии пути. Значение разыгранного горизонтально бокового отклонения *Z* от текущего участка с курсовым углом ψ добавляется к текущим координатам ВС с помощью стандартной процедуры, вычисляющей координаты точки в заданном направлении и на заданном расстоянии от исходной точки. В качестве направления отклонения выбирается значение $\psi + \pi/2$, при положительном отклонении ψ и $\psi - \pi/2$, при отрицательном.

3.3.3 Алгоритмы моделирования заданных диспетчером маневров

Ниже более описаны операции из числа приведенных в таблице 3.1, которые требуют маневрирования ВС, с пояснениями, каким образом модель ВС будет обрабатывать указанные в сообщениях маневры.

Операция ВС №1. При получении сообщения Типа №5 о занятии нового эшелона экипаж ВС вносит изменение в план полета. Изменяется высота пролета текущего участка до очередного ПОД. Измененный план подается на блок расчета программной траектории, осуществляется пересчет траектории, ВС начинает обрабатывать указанный маневр.

Операция ВС №3. При получении сообщения Типа №12 о порядке полета по заданному эшелону экипаж ВС выполняет действия, описанные в операции ВС №1.

Операция ВС №6. При получении положительного ответа на сообщение Типа №23 с информацией о времени пролета ППМ и запросом на смену высоты ВС приступает к изменению высоты с соблюдением указанных интервалов.

При отрицательном ответе ВС продолжает полет на текущей высоте до следующего ПОД, на котором, при необходимости, повторить запрос смены высоты. При этом в строки путевой таблицы до очередного ПОД вносится значение текущей высоты полета.

Операция ВС №7. При получении сообщения Типа №24 с разрешением на занятие нового эшелона экипаж не отправляет подтверждения о приеме сообщения.

Операция ВС №10. При получении сообщения Типа №16, определяющего расстояние между ВС и новые истинные скорости, экипаж ВС не вносит изменений в план полета и продолжает полет по плану.

3.4 Модели технических систем

Имитируется работа трех технических систем: наблюдения, навигации и связи.

Модель наземной системы навигации формирует и выдаёт данные о навигационном покрытии моделируемого воздушного пространства и проблемах с ним (отказах навигационного оборудования).

Модель системы связи имитирует качество прохождения сообщений между землей и бортом - с учетом ошибок и искажений, а также возможных пропусков и даже полных отказов системы связи. Имитируется только работа голосовой связи «борт-земля».

Модель наземной системы наблюдения получает на вход полётные данные о ВС от модели ВО и выдаёт «измеренные» полётные данные. Имитируются ошибки наблюдения, а также отказы системы наблюдения (в том числе и связанные с отказами систем передачи данных).

3.4.1 Модель системы наблюдения

Информация о положении ВС в воздушном пространстве, используемая в МДУ, должна формироваться с учетом средств наблюдения, обслуживающих моделируемый сектор. Таким образом, влияние наземных средств наблюдения сводится к моделированию ошибок определения МДУ местоположения ВС.

Характеристики наземной системы наблюдения задаются одинаковыми для всего моделируемого пространства. Они включают в себя:

- точность системы наблюдения (задаются СКО ошибки измерения координат в горизонтальной плоскости и по высоте);
- частоту обновления измерений.

Влияние модели наземной системы наблюдения на координаты, передаваемые в МДУ, должно обуславливаться следующими физическими причинами:

- ошибки определения координат, вызванные техническими средствами и средствами отображения, при проведении процесса наблюдения;
- отказ системы наблюдения.

Ошибки определения координат технических средств и средств отображения имитируются случайными отклонениями. Ошибки системы наблюдения в горизонтальной и

вертикальной плоскостях разыгрываются независимо по закону с нормальным распределением и заданным СКО. Ошибки некоррелированы для одного ВС между собой и для разных ВС и постоянны для одного ВС.

Отказ системы наблюдения имитируется в виде отсутствия передачи в МДУ траекторной информации обо всех ВС в имитируемом ВП. В данной модели имитируется отказ (потеря работоспособности) именно удаленных средств наблюдения и линий цифровой передачи данных, отказ системы связи имитируется в модели системы связи.

Время между отказами разыгрывается в соответствии с экспоненциальным распределением и соответствует заданной интенсивности. Также разыгрывается время восстановления системы наблюдения после отказа, оно определяется с использованием параметров среднего времени восстановления работоспособности и его СКО и разыгрывается в соответствии с нормальным распределением. При выпадении события отказа системы наблюдения с той же интенсивностью разыгрывается событие второго и дальнейших отказов с момента восстановления от предыдущего отказа.

3.4.2 Модель системы навигации

Цель моделирования системы навигации – учесть погрешности самолетовождения, возникающие в ходе навигационного процесса, которые приводят к неточному определению ВС своего текущего местоположения и могут влиять на действия экипажа ВС при выполнении команд диспетчера или при выполнении плана полета. Задача модели системы навигации (наземной и спутниковой компонент) заключается в определении в любой момент времени уровня *RNP*, предоставляемого для модели ВО в заданной точке ВП. Ошибки наземных навигационных средств и спутниковых навигационных средств не моделируются отдельно, они входят в состав комплексной ошибки системы самолетовождения, которая и определяется в модели ВО. Таким образом, влияние использования той или иной системы навигации сводится к моделированию ошибок выполнения полета. Характеристики наземной компоненты навигационной системы задаются упрощенно в виде системы, поддерживающей один заданный уровень требуемых навигационных характеристик во всем моделируемом секторе ОВД. Такой же уровень определяется для всех смежных секторов (в их воздушном пространстве, прилегающем к моделируемому сектору).

3.4.3 Модель системы связи

Цель моделирования системы связи «земля – борт» – учесть ошибки, возникающие в процессе связи диспетчера и ВС, которые приводят к временным задержкам или даже

искажению информации и могут влиять на правильность и своевременность действий диспетчера при контроле полета ВС или управлении им. Работа отдельных элементов оборудования систем связи не моделируется. Под системой связи подразумевается только голосовая связь между диспетчером и экипажем. В модели возможна имитация следующих событий, влияющих на работу модели ДП и модели ВС:

- неполучение диспетчером сообщения от ВС или наоборот;
- неразборчивость сообщения, что может привести к его неправильному пониманию;
- отказ системы связи.

Моделируются погрешности системы связи двух типов – неполучение сообщения и его неразборчивость. Они разыгрываются независимо по закону с нормальным распределением. Ошибки некоррелированные между собой для всех вариантов связи. Событие отказа разыгрывается как пуассоновское с заданной интенсивностью. Время восстановления работоспособности разыгрывается по нормальному закону. При этом задаются среднее время восстановления работоспособности и его СКО.

3.5 Моделируемые случайные факторы, влияющие на безопасность полета

В данном пункте приведем отдельно случайные факторы из уравнения (1.2), имитирование которых реализовано в модели:

1. Ошибки и погрешности в работе системы воздушной радиосвязи (\bar{x}_1)

Как было указано в п. 2.5.1, количественной характеристикой разборчивости речи является отношение количества правильно принятых элементов речи к общему количеству переданных элементов. Моделирование процесса общения между диспетчером и экипажами ВС в модели производится посредством передачи фраз, относящихся к конкретной операции. Неразборчивость фразы приводит к тому что, на выполнение операции будет потрачено больше времени, чем обычно, поскольку диспетчеру или экипажу ВС необходимо будет уточнять информацию, передаваемую в сообщении. В отдельных случаях сообщение может быть полностью неразборчиво, и это событие будем называть недоставкой сообщения.

Таким образом, согласно таблице 2.1, задаются два пороговых значения $u_{нр}$ и $u_{нд}$, характеризующие вероятность неразборчивости и недоставки сообщений соответственно. Моделирование искажений и недоставки сообщений производится посредством розыгрыша для каждого сообщения случайных величин в соответствии с непрерывным равномерным распределением. Далее производится сравнение величины X с пороговыми значениями $u_{нр}$ и $u_{нд}$:

$$X_{\text{нр}} \sim U(0,1)$$

$$X_{\text{нд}} \sim U(0,1)$$

$$X_{\text{нр}ij} > u_{\text{нр}} - \text{сообщение неразборчиво} \quad (3.7)$$

$$X_{\text{нд}ij} > u_{\text{нд}} - \text{сообщение не доставлено}$$

$X_{\text{нр}ij}$ – значение случайной величины, используемой для моделирования неразборчивости сообщений для i -го сообщения на j -м шаге моделирования, $X_{\text{нд}ij}$ – значение случайной величины, используемой для моделирования недоставки сообщений для i -го сообщения на j -м шаге моделирования.

В случае, если в результате розыгрыша для сообщения установлен статус «неразборчиво» или «не доставлено», то длительность операция, к которой относится данное сообщение, увеличивается на величины $\Delta t_{\text{нр}}$ и $\Delta t_{\text{нд}}$ соответственно.

2. Ошибки и погрешности в работе системы наблюдения (\bar{x}_2)

Ошибки и погрешности в работе системы наблюдения моделируются следующим образом: на каждом j -м шаге моделирования текущие географические координаты B, L каждого i -го ВС поступающие от модели воздушной обстановки подвергаются корректировке посредством добавления ошибок наблюдения, являющихся реализацией нормально распределенной случайной величины:

$$\begin{aligned} \Delta B_i &\sim N(0, \sigma_B^2) \\ \Delta L_i &\sim N(0, \sigma_L^2) \end{aligned} \quad (3.8)$$

где $\Delta B_i, \Delta L_i$ – погрешность измерения широты и долготы i -го ВС, σ_B^2 и σ_L^2 – дисперсия случайной величины, выбираемая исходя из технических характеристик связи моделируемой СУВД.

3. Ошибки и погрешности самолетовождения (\bar{x}_3)

Моделирование погрешностей самолетовождения 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:

$$f(y) = \frac{1}{2 \cdot \lambda} \cdot e^{-\frac{|y|}{\lambda}} \quad (3.9)$$

Параметр λ выбирается в соответствии с выражением (2.14), учитывая, что $P_{\text{тр.т}} = 0.95$:

$$\lambda = -\frac{k}{\ln(0.05)} \quad (3.10)$$

где k – уровень минимальных требуемых навигационных характеристик в рассматриваемом ВП, который задается пользователем перед началом моделирования.

4. 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:

$$T_{\text{отк.св.}} \sim \text{Exp}(\lambda_{\text{отк.св.}}) \quad (3.11)$$

Длительность отказа $\Delta t_{\text{отк.св.}}$ разыгрывается в соответствии с нормальным распределением:

$$\Delta t_{\text{отк.св.}} \sim N(D_{\text{отк.св.}}, \sigma_{\text{отк.св.}}^2) \quad (3.12)$$

где $D_{\text{отк.св.}}$ – средняя длительность отказа системы связи, $\sigma_{\text{отк.св.}}^2$ – величина, характеризующая разброс времени отказа относительно среднего значения. Оба значения могут быть заданы исходя из реальных статистических данных по отказам, либо могут быть выбраны ТТХ соответствующих технических средств. При моделировании отказа системы связи модель диспетчера не имеет возможности посредством имитации команд диспетчера изменять траектории полетов ВС и таким образом разрешать потенциальные конфликтные ситуации

5. Отказы системы наблюдения (\bar{x}_5)

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:

$$T_{\text{отк.св.}} \sim \text{Exp}(\lambda_{\text{отк.св.}}) \quad (3.13)$$

Длительность отказа $\Delta t_{\text{отк.св.}}$ разыгрывается в соответствии с нормальным распределением:

$$\Delta t_{\text{отк.св.}} \sim N(D_{\text{отк.св.}}, \sigma_{\text{отк.св.}}^2) \quad (3.14)$$

где $D_{\text{отк.св.}}$ – средняя длительность отказа системы связи, $\sigma_{\text{отк.св.}}^2$ – величина, характеризующая разброс времени отказа относительно среднего значения. Оба значения могут быть заданы исходя из реальных статистических данных по отказам, либо могут быть выбраны ГТХ соответствующих технических средств. При моделировании отказа системы наблюдения имитируется переход диспетчера на процедурное управление. В этом случае модель диспетчерского управления формирует управляющие команды по изменению траекторий полета ВС, основываясь на информации переданной через модель системы связи.

6. Интенсивность воздушного движения (\bar{x}_6)

Моделирование случайной интенсивности воздушного движения в секторе ОВД производится посредством розыгрыша поправок к плановому времени входа ВС в базовом плане полетов, и вычисления, таким образом, случайного времени входа ВС в сектор. Подробнее алгоритм формирования случайной воздушной обстановки приведен в п. 2.5.5.

3.6 Вычисляемые показатели безопасности полетов

3.6.1 Количество свершившихся нарушений минимумов эшелонирования

Нарушения фиксируются непосредственно при моделировании полета ВС. С заданным шагом определяется, не происходит ли нарушение зоны безопасности одного ВС зоной безопасности другого. Определяется общее количество нарушений минимумов эшелонирования по всему горизонту моделирования.

Информация о нарушениях минимумов эшелонирования сохраняется во время моделирования в базе данных (БД) и в дальнейшем используется для расчета других показателей безопасности.

3.6.2 Временная загруженность диспетчерской позиции

Временная загруженность ДП рассчитывается как доля времени, в течение которого диспетчеры ДП выполняли свои операции, к фиксированному интервалу времени. В качестве такого интервала предлагается использовать значение, выбираемое пользователем из следующего ряда: 20 минут, 30 минут, 1 час.

Временные затраты ДП на каждую операцию рассчитываются, исходя из заданной исследователем средней продолжительности такой операции, и временная загрузка – это сумма временных затрат на выполнение всех операций в интервале времени.

В усложненных случаях, когда моделируется нехватка или искажение отдельных сообщений в модели системы связи времени выполнения операций, связанных с этим сообщением, увеличиваются.

Показатель визуализируется в виде гистограммы с количеством интервалов заданной продолжительности (рисунок 3.14).

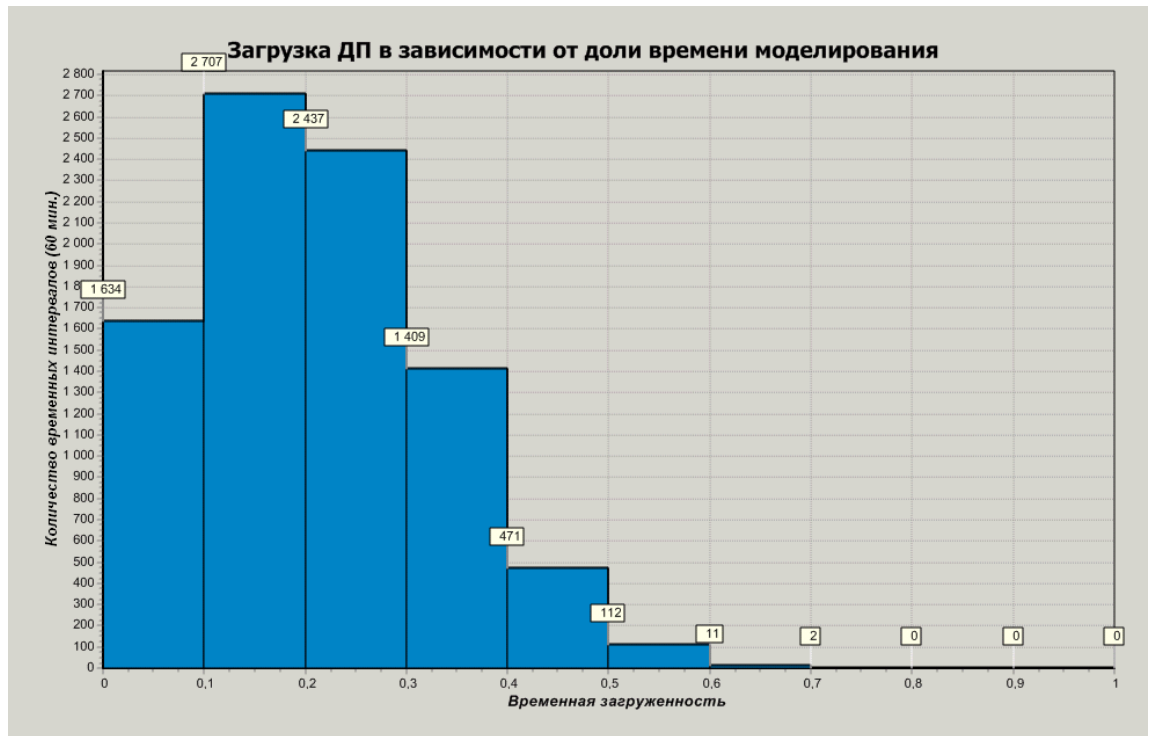


Рисунок 3.14 – Пример гистограммы временной загрузки диспетчерской позиции

3.6.3 Количество ВС одновременно под управлением

Показатель фиксирует число ВС, находящихся одновременно под управлением ДП. Показатель рассчитывается на основе фиксации событий двух типов:

- принятие ДП на сопровождение ВС от ДСС;
- передача ДП ВС на сопровождение ДСС.

Показатель визуализируется в виде гистограммы с процентом рабочего времени диспетчера в зависимости от числа ВС одновременно под управлением (рисунок 3.15).

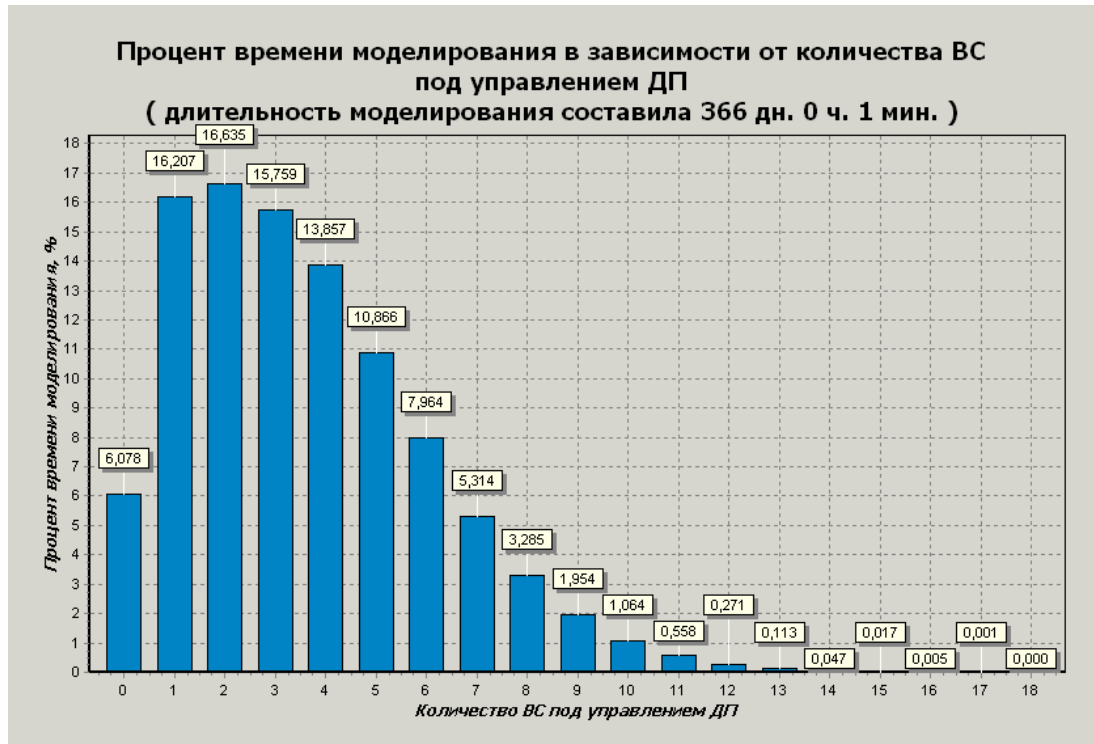


Рисунок 3.15 – Пример гистограммы количества воздушных судов на управлении диспетчерской позиции

3.6.4 Задержки в выполнении операций диспетчера

Под задержкой понимается интервал времени до начала отработки диспетчером очередной операции с момента наступления события, инициировавшего эту операцию.

В МДУ все события, требующие реакции диспетчера, поступают в модель последовательно. Если МДУ не закончила отработку предыдущей операции, то все последующие поступают в очередь на выполнение.

Таким образом, рассматриваемый показатель рассчитывается как сумма задержек выполнения всех операций. Зависимость конкретной операции от инициирующего ее события приведена в подразделе 3.2.6.

Задержки в выполнении операций диспетчера фиксируются в МДУ при моделировании и запоминаются в БД.

3.6.9 Количество выявленных ПКС

На основе рассчитанных в модели диспетчерского управления (МДУ) ПКС для среднесрочной глубины прогнозирования (15 минут) определяется количество ПКС по всему горизонту моделирования. Также определяются ПКС в краткосрочной перспективе на основе

текущих векторов состояния ВС с глубиной прогноза 3 минуты. ПКС фиксируются в МДУ при моделировании для всего горизонта моделирования и запоминаются в БД.

Визуализация показателя производится в табличном виде с делением по следующим параметрам:

- по точкам, где прогнозируется ПКС;
- по участкам, где прогнозируется ПКС;
- по типам конфликта.

3.6.10 Интенсивность ВД в секторе

Показатель показывает доли интервала моделирования, соответствующие числу входов ВС в ВП сектора. В качестве факта и времени входа в сектор используется время, когда МДУ имитирует прием ВС ДП сектора от ДСС на сопровождение. Определяется количество входов в сектор с разбивкой на часовые интервалы по всему горизонту моделирования (рисунок 3.16). Факт (и время) входа в сектор фиксируются в МДУ при моделировании и запоминаются в БД.



Рисунок 3.16 – Пример гистограммы интенсивности воздушного движения

3.6.11 Налет ВС в секторе

Для каждого ВС рассчитывается время полета в исследуемом секторе от момента его передачи от ДСС к ДП и до момента передачи от ДП к ДСС. Времена входов в сектор и выходов из сектора фиксируются в МДУ при моделировании и запоминаются в БД, затем определяется суммарный показатель налета в секторе по всем ВС.

3.7 Возможности по анализу моделируемой воздушной обстановки пользователем

На основе разработанных алгоритмов было реализовано программное средство (ПС) «Имитационная модель для оценки безопасности полетов». Главное окно ПС представлено на рисунке 3.17. 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*.

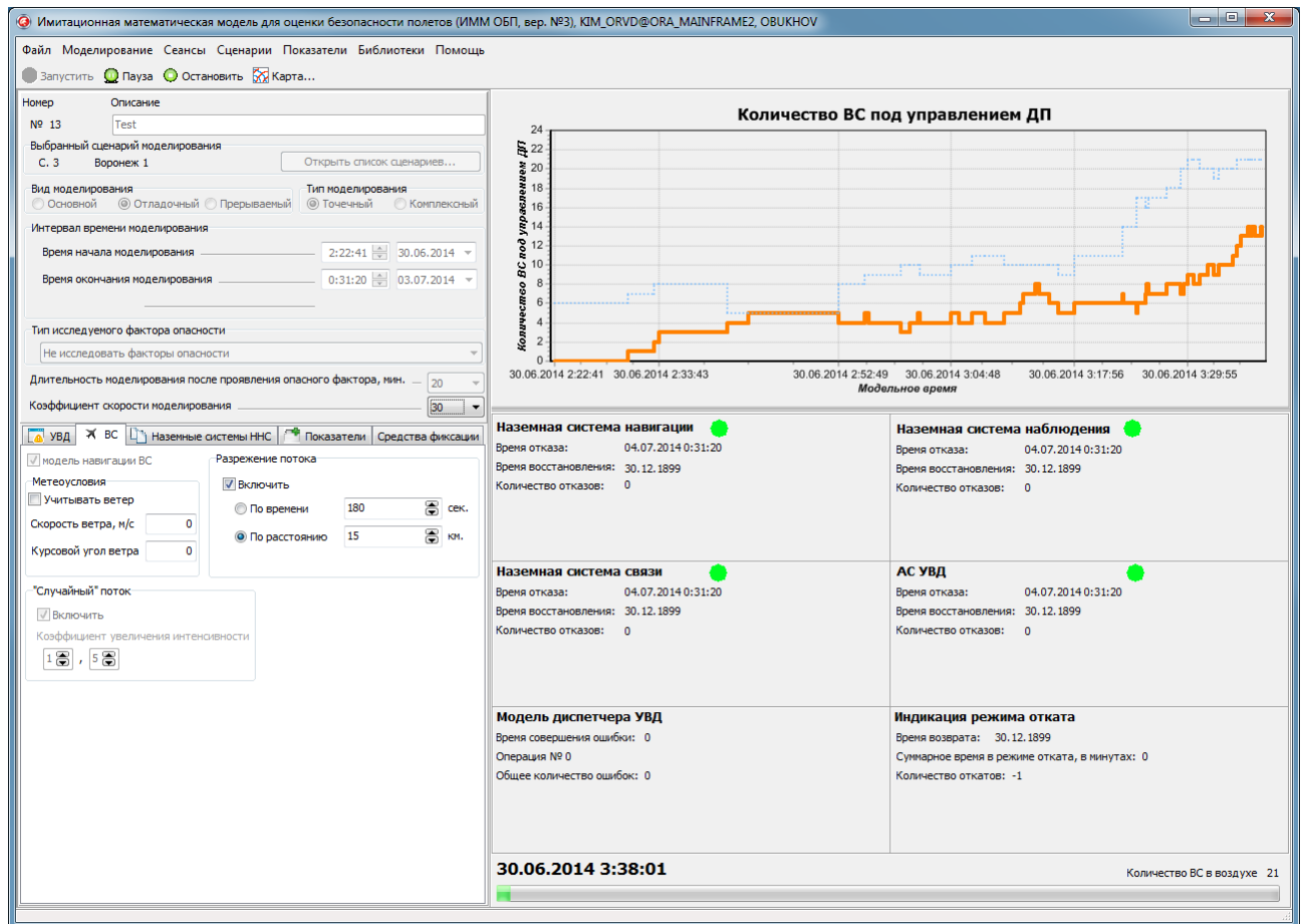


Рисунок 3.17 – Вид главного окна приложения

На рисунке 3.18 представлена форма создания варианта длительностей операций диспетчера. С помощью этой формы можно создать вариант длительностей операций, соответствующий определенному уровню технического оснащения СУВД. Созданные варианты сохраняются в БД приложения и могут быть в дальнейшем повторно использованы.

Управление вариантами времён длительностей выполнения операций ДП

Февраль 2017 для исследований

Операции согласования условий входа в зону до пролёта рубежа передачи УВД - для ВС, следующих транзитом через зону ответственности <input type="text" value="5"/> - для ВС, вылетевших с аэродромов зоны ответственности ЗЦ - для ВС, прибывающих на аэродромы ответственности ЗЦ	Операции приема на сопровождение при пролёте ВС рубежа передачи УВД - для ВС следующих транзитом через зону ответственности <input type="text" value="10"/> - для ВС, вылетевших с аэродромов зоны ответственности ЗЦ - для ВС, прибывающих на аэродромы ответственности ЗЦ	
Операции по сопровождению ВС При пролете ПОД <input type="text" value="5"/> При достижении заданного эшелона <input type="text" value="10"/> При изменении эшелона при полете по трассе <input type="text" value="11"/> При нарушениях экипажем выданных условий полёта <input type="text" value="25"/>	Операции по передаче ВС Согласование условий выхода из зоны до пролета рубежа передачи УВД со следующим диспетчером смежного сектора <input type="text" value="5"/> Передача на сопровождение при пролете ВС рубежа передачи <input type="text" value="10"/>	
Операции по разрешению ПКС		
1-й тип <input type="text" value="30"/>	4-й тип <input type="text" value="25"/>	7-й тип <input type="text" value="40"/>
2-й тип <input type="text" value="33"/>	5-й тип <input type="text" value="28"/>	8-й тип <input type="text" value="43"/>
3-й тип <input type="text" value="36"/>	6-й тип <input type="text" value="30"/>	9-й тип <input type="text" value="46"/>
Задержки Искажение сообщения <input type="text" value="10"/> Недоставка сообщения <input type="text" value="50"/>		
<input type="button" value="Выбрать вариант"/>		

Рисунок 3.18 – Форма определения длительностей операций диспетчера

Реализована возможность визуализации моделируемой воздушной обстановки, просмотра операций, выполняемых моделью диспетчерской позиции и разрешаемых ПКС для каждого рейса. Пример визуализации воздушной обстановки представлен на рисунке 3.19. Зеленым цветом обозначено местоположение моделируемых ВС, оранжевыми линиями – границы секторов ОВД, трассовая структура – фиолетовым цветом. Для каждого ВС выводятся в формуляре его текущие параметры: высота полета, скорость, тип ВС. При выборе ВС на карту синим цветом выводится его план полета с указанием высот и времен пролета точек ВТ.

БА9653(8), высота 7000 м., гор. скорость 143 м/с, верт. скорость 0 м/с, , устаревший тип нав. об.

Время	От кого	Кому	Сообщение
30.06.2014 2:22:47		2	1 Нет ПКС 8 Следуйте на эшелоне 7000м=эш.230, след.ПОД НАСНО t=2:30:35,
30.06.2014 2:30:35		1	2 БА9653 2:30:35 пролет ПОД НАСНО1 эш. 230, число Маха 0.46, истинная ско
30.06.2014 2:30:41		2	1 Подтверждение о пролете ПОД НАСНО БА9653 :Оп.7
30.06.2014 2:30:41		2	1 Нет ПКС 8 Следуйте на эшелоне 7000м=эш.230, след.ПОД 400ТС t=2:40:54,;
30.06.2014 2:30:46		2	3 Согласование условий входа для рейса БА9653 8 400ТС 2:40:54 эш. 230 :Оп
30.06.2014 2:30:47		3	2 Получена информация по рейсу для согласования БА9653 8 400ТС 2:40:53 эш
30.06.2014 2:30:47		3	2 Нет ПКС БА9653 8 :Оп.13
30.06.2014 2:38:36		1	2 Готовность к пролету точки выхода из сектора
30.06.2014 2:38:36		2	1 Перейдете на связь с ДСС 8,работайте с ДСС частота129.1 :Оп.14
30.06.2014 2:38:37		1	2 БА9653 с ДСС, частота
30.06.2014 2:40:55		1	3 Пролет рубежа выхода из сектора, h=7000, число Маха 0.46, истинная скор
30.06.2014 2:40:55		3	1 Подтверждение о входе в смежный сектор 8 Оп.14
30.06.2014 2:40:55		3	2 ДСС->ДП 8 работает :Оп.14
30.06.2014 2:40:55		3	1 Нет ПКС 8,следуйте по плану :Оп.14

Расшифровка полей "От кого/Кому": 1 - ВС, 2 - ДП, 3 - ДСС

Фразеология
 Вариант 1 Вариант 2

Рисунок 3.20 – Пример списка сообщений, передаваемых между диспетчерскими позициями и экипажем ВС

Кроме того, существует возможность просмотреть полный список всех сообщений между ВС и диспетчерскими позициями (рисунок 3.21).

Полный список сообщений

```
[ 30.06.2014 3:35:53] Борт 34(РЛУ556) --> Диспетчер ДП "РЛУ556 с ДСС, частота "
```

```
[ 30.06.2014 3:36:03] Диспетчер ДП --> Борт 37(АФЛ1634) "Получена информация о достижении эшелона АФЛ1634 37 210 :Оп.8"
```

```
[ 30.06.2014 3:36:14] Диспетчер ДП --> Борт 32(Н650GL) "Подтверждение о пролете ПОД 101VC N650GL :Оп.7"
```

```
[ 30.06.2014 3:36:14] Диспетчер ДП --> Борт 32(Н650GL) "Нет ПКС 32 Следуйте на эшелон 13700м=эш.450, след.ПОД НАСНО t=3:40:47,11768м=эш.386:0"
```

```
[ 30.06.2014 3:36:20] Борт 39(Н650GL) --> Диспетчер ДП "Пролет рубежа входа в сектор,5800= эш.190, число Маха 0.53, истинная скорость 168 м/с. Заг
```

```
[ 30.06.2014 3:36:20] Диспетчер ДП --> Борт 39(Н650GL) "Подтверждение о пролете рубежа ЖЕНЕЖ N650GL, 39 :Оп.4"
```

```
[ 30.06.2014 3:36:20] Диспетчер ДП --> ДСС "ДП->ДСС 39 работает :Оп.4"
```

```
[ 30.06.2014 3:36:20] Диспетчер ДП --> Борт 39(Н650GL) "39 Разрешен эш.410; Следуйте на эшелон 12500м=эш.410, след.ПОД 101VC t=3:42:10,10470м=
```

```
[ 30.06.2014 3:36:22] Борт 23(АФЛ1634) --> Диспетчер ДП "Готовность к пролету точки выхода из сектора"
```

```
[ 30.06.2014 3:36:31] Диспетчер ДП --> Борт 23(АФЛ1634) "Перейдете на связь с ДСС 23,работайте с ДСС частота129.1 :Оп.14"
```

```
[ 30.06.2014 3:36:32] Борт 23(АФЛ1634) --> Диспетчер ДП "АФЛ1634 с ДСС, частота "
```

```
[ 30.06.2014 3:36:34] Борт 28(Н650GL) --> Диспетчер ДП "N650GL 3:36:34 пролет ПОД НАСНО1 эш. 438, число Маха 0.76, истинная скорость 225 м/с след
```

```
[ 30.06.2014 3:36:35] Борт 27(CSA259) --> ДСС "Пролет рубежа выхода из сектора, h=10350, число Маха 0.78, истинная скорость 231 м/с"
```

```
[ 30.06.2014 3:36:35] Борт 40(РЛУ556) --> Диспетчер ДП "Пролет рубежа входа в сектор,9750= эш.320, число Маха 0.74, истинная скорость 221 м/с"
```

```
[ 30.06.2014 3:36:35] ДСС --> Борт 27(CSA259) "Подтверждение о входе в смежный сектор 27 Оп.14"
```

```
[ 30.06.2014 3:36:35] ДСС --> Диспетчер ДП "ДСС->ДП 27 работает :Оп.14"
```

```
[ 30.06.2014 3:36:35] ДСС --> Борт 27(CSA259) "Нет ПКС 27,следуйте по плану :Оп.14"
```

```
[ 30.06.2014 3:36:42] Диспетчер ДП --> Борт 28(Н650GL) "Подтверждение о пролете ПОД НАСНО N650GL :Оп.7"
```

```
[ 30.06.2014 3:36:42] Диспетчер ДП --> Борт 28(Н650GL) "Нет ПКС 28 Следуйте на эшелон 13700м=эш.450, след.ПОД на эшелоне: 400ТС t=3:42:29,13700
```

```
[ 30.06.2014 3:36:46] Борт 41(TSO228) --> ДСС "Готовность к пролету рубежа"
```

```
[ 30.06.2014 3:36:46] ДСС --> Борт 41(TSO228) "Перейдете на связь с ДП 41,работайте с ДП частота128.1 :Оп.14"
```

```
[ 30.06.2014 3:36:47] Борт 41(TSO228) --> ДСС "TSO228 с ДП, частота "
```

```
[ 30.06.2014 3:36:47] ДСС --> Диспетчер ДП "Согласование условий входа для рейса П0703 44 400ТЕ 3:43:47 9150м=эш. 300 Гориз.полет на эш.9150 :О
```

```
[ 30.06.2014 3:36:48] Диспетчер ДП --> Борт 40(РЛУ556) "Подтверждение о пролете рубежа 400ТЕ РЛУ556, 40 :Оп.4"
```

```
[ 30.06.2014 3:36:48] Диспетчер ДП --> ДСС "ДП->ДСС 40 работает :Оп.4"
```

```
[ 30.06.2014 3:36:48] Диспетчер ДП --> Борт 40(РЛУ556) "Нет ПКС 40 Следуйте на эшелоне 9750м=эш.320, след.ПОД УБОНА t=3:42:23,9750м=эш.320:Оп
```

```
[ 30.06.2014 3:36:58] Диспетчер ДП --> ДСС "Согласование условий входа для рейса РЛУ556 40 УБОНА1 3:42:23 эш. 320 :Оп.13"
```

```
[ 30.06.2014 3:36:59] ДСС --> Диспетчер ДП "Получена информация по рейсу для согласования РЛУ556 40 УБОНА1 3:42:23 эш. 320 :Оп.13"
```

```
[ 30.06.2014 3:36:59] ДСС --> Диспетчер ДП "Нет ПКС РЛУ556 40 :Оп.13"
```

```
[ 30.06.2014 3:37:02] Борт 34(РЛУ556) --> ДСС "Пролет рубежа выхода из сектора, h=9750, число Маха 0.74, истинная скорость 221 м/с"
```

```
[ 30.06.2014 3:37:02] ДСС --> Борт 34(РЛУ556) "Подтверждение о входе в снежный сектор 34 Оп.14"
```

```
[ 30.06.2014 3:37:02] ДСС --> Диспетчер ДП "ДСС->ДП 34 работает :Оп.14"
```

```
[ 30.06.2014 3:37:02] ДСС --> Борт 34(РЛУ556) "Нет ПКС 34,следуйте по плану :Оп.14"
```

```
[ 30.06.2014 3:37:04] Диспетчер ДП --> Борт 35(TCO2141) "35 Разрешен эш.350; Следуйте на эшелон 10650м=эш.350, след.ПОД 101VC t=3:38:53,7445м=
```

Рисунок 3.21 – Полный список сообщений между ВС и диспетчерскими позициями

По окончании моделирования пользователю выводятся результаты моделирования в графическом и текстовом виде. На рисунке 3.22 приведены гистограммы загруженности, интенсивности воздушного движения и другие, которые можно просмотреть после окончания моделирования.

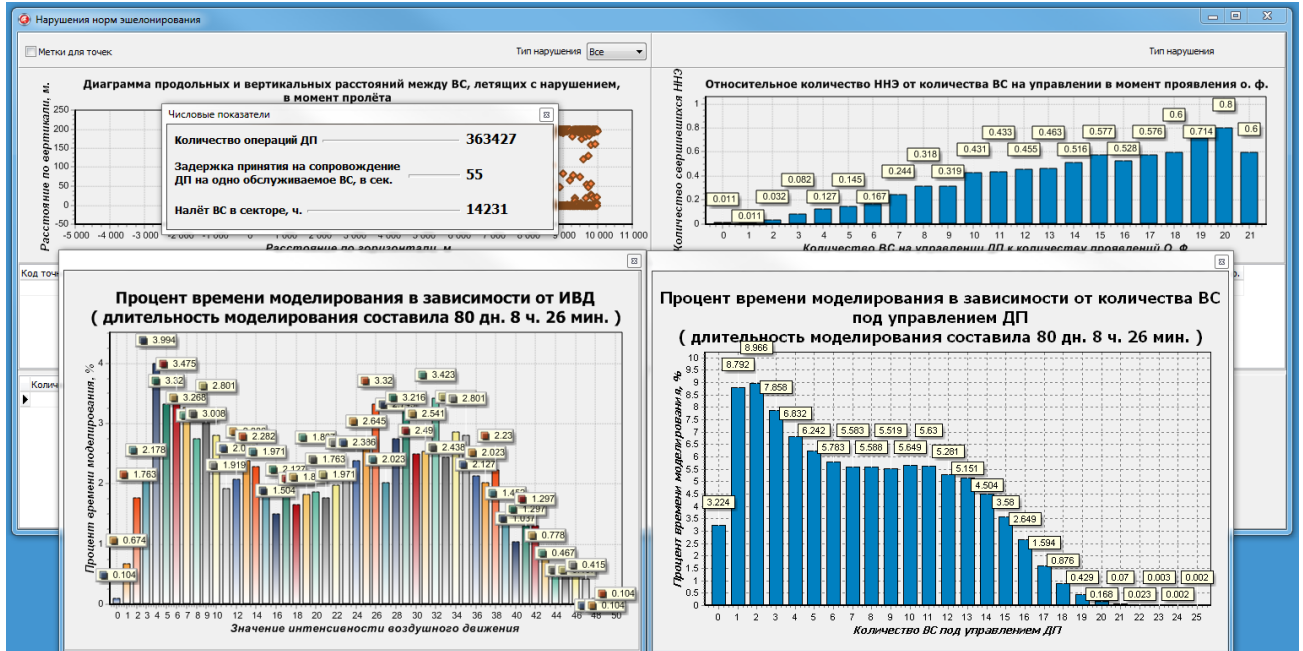


Рисунок 3.22 – Показатели, характеризующие функционирование модели

На рисунке 3.23 приведен пример текстового отчета о моделировании, содержащего статистические оценки вероятностей опасных событий.

```

Безымянный — Блокнот
Файл  Правка  Формат  Вид  Справка
Модельное время начала 30.06.2014 0:22:41
фактическое модельное время окончания 29.11.2015 2:49:57
Реальное время начала моделирования 27.12.2018 14:02:02
Реальное время окончания моделирования 29.12.2018 9:19:29
Длительность моделирования 43 ч. 17 мин. 26 сек.
Количество операций диспетчера 1645554
Налёт, ч. 63430
Количество часов модельного времени, ч. 12410
Коэффициент налёта 5.11120064464142
Задержка принятия ВС на сопровождение, с. 12
Количество проявлений угроз 36717
Количество зафиксированных НМЭ 7273
//-----
// Статистические данные по безопасности -----

НМЭ 5 мин.
Количество реализаций угроз при которых свершилось АП (инцидент) 73
Частота АП (инцидента) 0.00198817986218918
Вероятность попадания оценки в доверительный интервал 0.9
Нижняя граница для доверительного интервала 0.00164111053779274
Верхняя граница для доверительного интервала 0.00240847187250255

НМЭ 10 мин.
Количество реализаций угроз при которых свершилось АП (инцидент) 615
Частота АП (инцидента) 0.0167497344554294
Вероятность попадания оценки в доверительный интервал 0.9
Нижняя граница для доверительного интервала 0.0156843545803843
Верхняя граница для доверительного интервала 0.0178861666247823

Стр 13, столб 1

```

Рисунок 3.23 – Текстовый отчет о моделировании

3.8 Пример исследования

Имитационная модель, описание которой приводится в разделе 4, была реализована в среде программирования *Delphi*. Было проведено имитационное моделирование воздушного движения в секторе ОВД перспективной структуры Московской воздушной зоны, представленном на рисунке 3.24. Был задан поток ВС, параметры которого приведены в таблице 3.9.

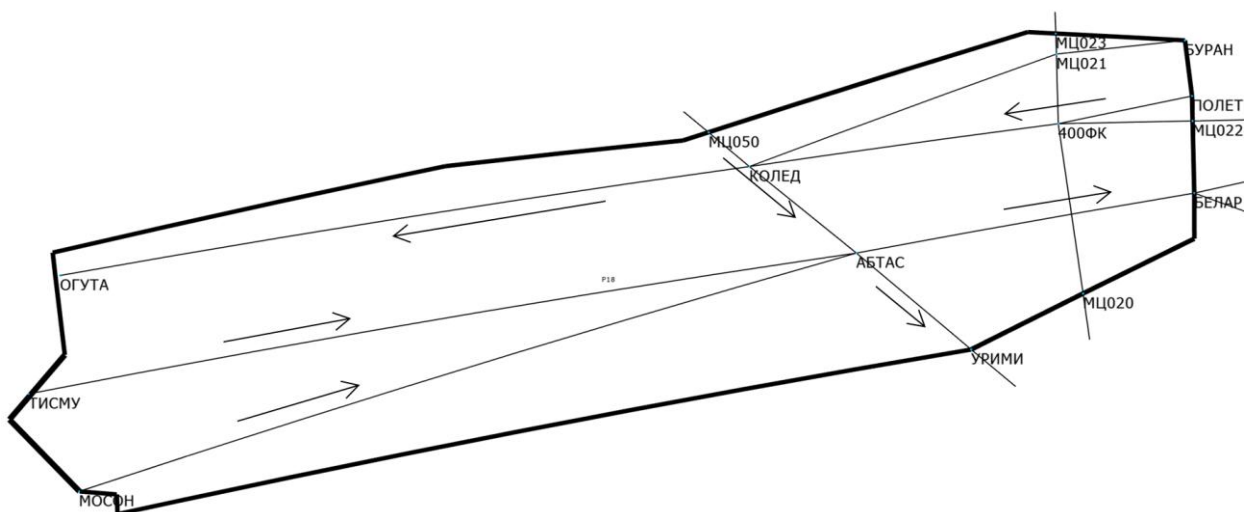


Рисунок 3.24 – Аэронавигационная структура одного из секторов ОВД перспективной структуры Московской воздушной зоны

Таблица 3.9 - Исходная интенсивность потоков воздушного движения

Маршрут	Тип ВС	Высота полета, м	Интенсивность, ВС/ч
МОСОН-АБТАС-БЕЛАР	Б-737	10650	2
ТИСМУ-АБТАС-БЕЛАР	Б-777	10650	2
МЦ050-КОЛЕД-АБТАС-УРИМИ	Б-777	10650	2
ПОЛЕТ-КОЛЕД-ОГУТА	Б-777	10350	2

В секторе присутствуют три трассы, которые пересекаются в одной точке (точка АБТАС). Весь поток ВС на этих трассах движется на одной высоте. Поэтому в точке пересечения планируется большое количество ПКС. На трассе ПОЛЕТ-КОЛЕД-ОГУТА высота полета ВС отличается от высоты полета на других трассах, однако наличие пересечения с трассой МЦ050-КОЛЕД-АБТАС-УРИМИ создает ограничения для диспетчера в возможностях регулирования движения по этим трассам. Среднее количество входов в час равно 8 ВС.

Времена входа ВС в сектор и распределение по маршрутам разыгрывалось в соответствии с алгоритмом, представленном в разделе 3. Для обеспечения бесконфликтности входящего потока ВС, влетающие в сектор, сдвигались назад по времени для обеспечения требуемого эшелонирования между ними.

При определении фактов нарушений минимумов эшелонирования использовались следующие параметры для цилиндрического объема (таблица 3.10):

Таблица 3.10 – Параметры зоны безопасности, используемые при определении фактов нарушений минимумов эшелонирования

Опасное событие	Диаметр цилиндра D , м.	Высота цилиндра h , м.
Нарушение минимумов эшелонирования	20000	540

На первом этапе определялась максимальная интенсивность потока ВС, при которой не наблюдается перегруженности диспетчерской позиции. Задача определения допустимой интенсивности представляется важной при проектировании новой структуры ВП. Необходимо определить, что проектируемая структура позволяет обеспечить требуемую пропускную способность с точки зрения временной загруженности диспетчера с учетом прогноза на увеличение интенсивности ВД в будущем. Решение этой задачи предполагает выполнение следующих действий: проводится имитационное моделирование управляемого ВД в рассматриваемом секторе с воздушными потоками увеличенной интенсивности.

Рассчитывается временная относительная загруженность диспетчерской позиции. В случае, если фиксируется факт превышения допустимого значения загруженности 0.7 (диспетчер перегружен), либо, если в результате моделирования фиксировались случаи НМЭ (диспетчер не справляется с потоком ВС), такая интенсивность ВД считается неприемлемой.

На рисунке 3.25 представлены результаты моделирования управляемого ВД в секторе УВД, представленном на рисунке 3.24. Моделирование проводилось с потоками ВД различной интенсивности.

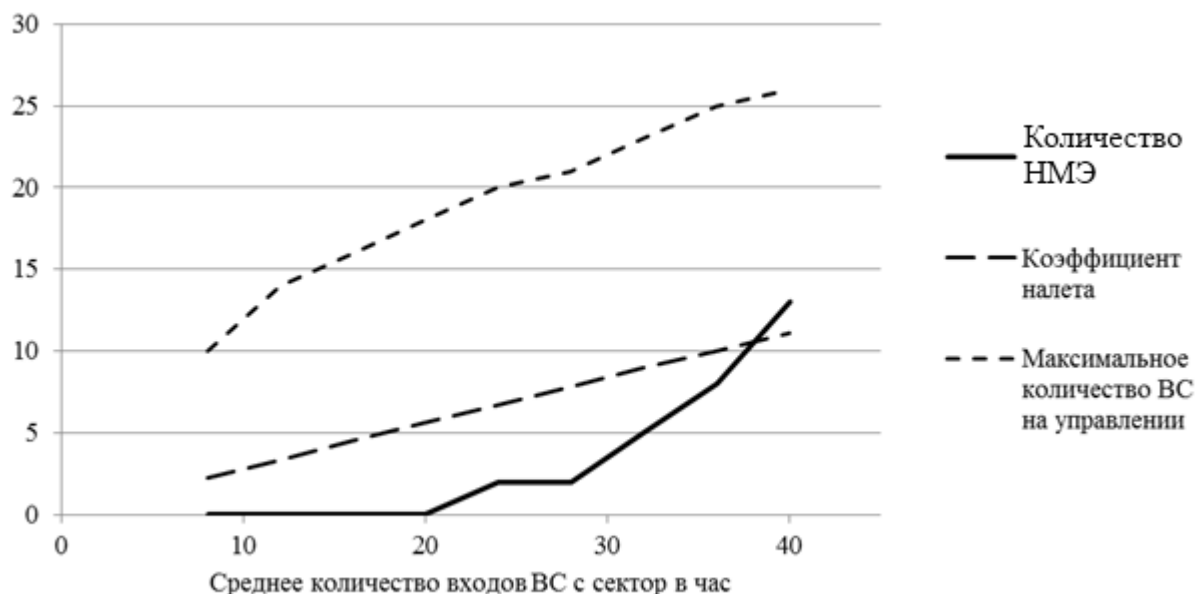


Рисунок 3.25 – Изменение количества зафиксированных нарушений минимумов эшелонирования в зависимости от интенсивности воздушного движения

Значение интенсивности равное 20 входов ВС в час является предельным, при котором не фиксируется НМЭ. Среднее количество ВС на управлении ДП в этом случае составляет 5.6 ВС. При этом максимальное значение количества ВС на управлении достигает 18 бортов. На рисунке 3.26 представлена гистограмма относительной временной загруженности диспетчерской позиции для интенсивности 20 входов ВС в час. Превышения предельно допустимого значения 0.7 для загруженности диспетчера не наблюдается. Поэтому наличие фактов НМЭ при увеличении интенсивности исходного потока до трех раз обусловлено не общим количеством ВС, а особенностями анализируемой структуры ВП (пересечение потоков ВС на одной высоте в точке АБТАС) и соответственно сложностью разрешения большого количества ПКС, возникающих в окрестности точки пересечения потоков АБТАС.

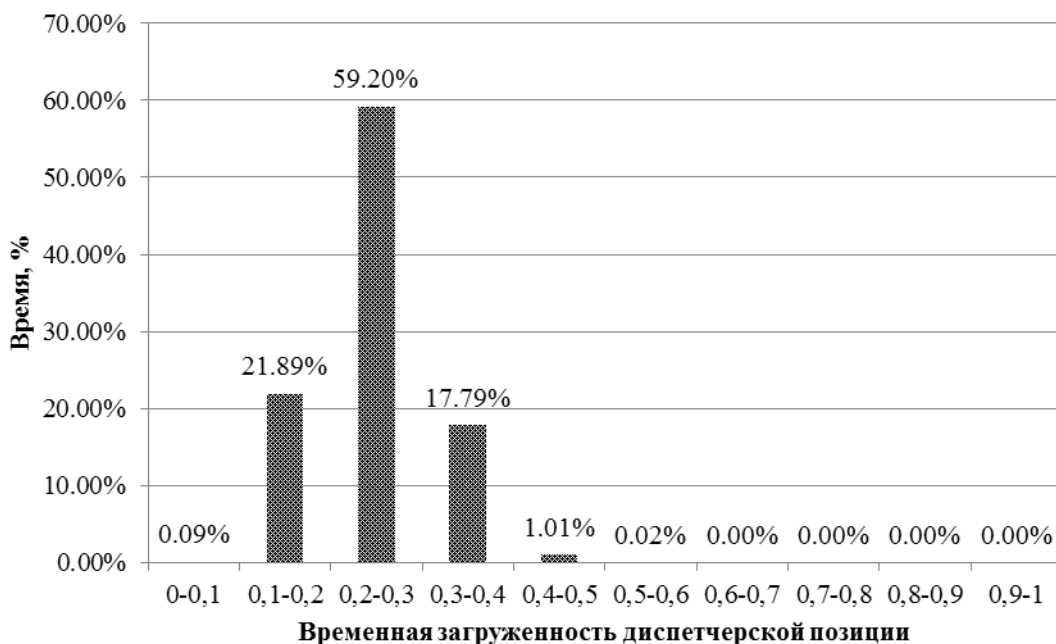


Рисунок 3.26 – Временная загруженность диспетчерской позиции при интенсивности воздушного движения 20 ВС/час

Второй этап исследований заключался в проведении статистического моделирования с имитацией фактов отказа систем связи и наблюдения в рассматриваемом секторе УВД. В случае отказа линии передачи речевой информации диспетчер не имеет возможности управлять воздушным движением, и ВС двигаются по своим траекториям в соответствии с планами их полета, при этом высота полета остается неизменной. Имитируется отказ связи длительностью 10 минут. В течение этого времени фиксируются факты НМЭ в секторе.

На рисунке 3.27 представлены график сходимости оценки значения условной вероятности НМЭ при отказах систем связи и наблюдения, а также границы доверительных интервалов. Расчет доверительных интервалов производился после каждой имитации отказа системы связи или наблюдения по формулам, приведенным в п. 4.5.1.

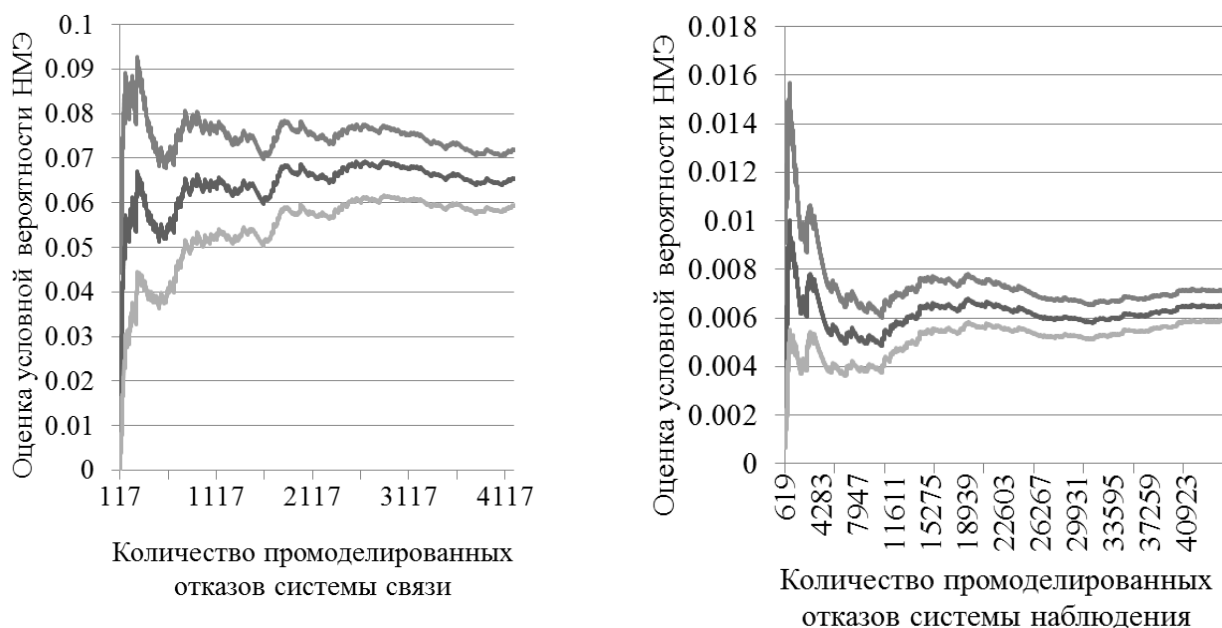


Рисунок 3.27 – Сходимость оценки значения условной вероятности НМЭ при отказах систем связи и наблюдения

Оценка условной вероятности НМЭ при отказе системы наблюдения значительно меньше чем при отказе системы связи, поскольку в этом случае не происходит полной потери управления потоком ВС. Однако это требует моделирования значительно большего количества реализаций, поскольку частота возникновения НМЭ в случае отказа системы наблюдения значительно меньше.

3.9 Выводы

В третьей главе были рассмотрены разработанные состав и структура имитационной модели, предназначенной для оценки безопасности полетов в секторе ОВД. Модель предназначена для моделирования всех штатных операций диспетчера по управлению воздушным движением с учетом случайных факторов, влияющих на БП. На основе разработанной структуры модели и алгоритмов имитации управляемого ВД в секторе ОВД, было реализовано программное средство, позволяющее проводить исследования по анализу безопасности полетов в секторе ОВД. На примере показана возможность получения таких оценок с помощью имитационного моделирования.

ГЛАВА 4 ОЦЕНКА БЕЗОПАСНОСТИ ПОЛЁТОВ В НОВОЙ СТРУКТУРЕ МОСКОВСКОГО РАЙОННОГО ЦЕНТРА

4.1 Анализ структуры воздушного пространства

Разработка перспективной структуры воздушного пространства Московской зоны ЕС ОрВД, включая верхнее воздушное пространство и терминальную зону, была начата в 2009 году. За 10 лет было разработано несколько концептуальных проектов структуры воздушного пространства, направленных на повышение эффективности выполнения полетов, увеличение пропускной способности, повышение уровня безопасности выполнения полетов. В 2016 году было принято решение о выборе концептуального проекта структуры воздушного пространства версии 8.5.2 к дальнейшей разработке и внедрению в Московской зоне ЕС ОрВД. Концептуальный проект структуры версии 8.5.2 был разработан, в первую очередь, в интересах пользователей и направлен на повышение эффективности выполнения полетов. Повышение эффективности заключается в сокращении протяженности маршрутов, уменьшении налета, расхода топлива на трассовой части полета и на маршрутах прилета/вылета.

Исходные данные по структуре включают в себя:

- данные по маршрутам ОВД;
- маршруты вылета, прилета, захода на посадку;
- зоны ожидания;
- границы секторов РДЦ;
- рубежи передачи управления;
- разрешенные диапазоны эшелонов.

Для проведения моделирования полетов ВС в перспективной структуре воздушного пространства был выбран поток воздушного движения за один из загруженных дней 2017 года. Поток был выбран за наиболее интенсивный летний период времени.

Основной критерий проектирования перспективной структуры воздушного пространства Московской зоны ЕС ОрВД – это повышение уровня безопасности выполнения полетов. В части маршрутов ОВД, в структуре заложен принцип однонаправленных участков воздушных трасс. Таким образом, почти полностью исключаются конфликты на встречных курсах («пересечение встречного эшелона»), что в свою очередь, снижает загруженность диспетчера и повышает уровень безопасности выполнения полетов. В связи с тем, что основная доля полетов в зоне – это прилеты и вылеты для трех основных аэродромов Московского узлового диспетчерского района (Шереметьево, Домодедово, Внуково), большое внимание при

проектировании структуры уделено формированию бесконфликтных потоков прилетающих и вылетающих рейсов. Хотя маршруты прилета находятся уже в зоне ответственности диспетчеров аэродромного диспетчерского центра (АДЦ), формирование потоков воздушных судов начинается еще на участках ВТ в зоне ответственности диспетчеров РДЦ. Маршруты прилета начинаются на границе зон ответственности диспетчеров РДЦ и АДЦ. Для каждого аэродрома на прилет выделен свой диапазон эшелонов, с которых начинается маршрут прилета. Такой принцип проектирования дает возможность формировать бесконфликтный поток воздушных судов на каждый аэродром, что, в свою очередь, снижает загруженность диспетчера АДЦ, повышает пропускную способность, предсказуемость прилетов. С другой стороны, это приводит к дополнительной нагрузке на диспетчера РДЦ, которому требуется обеспечивать эшелонирование воздушных судов в условиях переменного профиля и жестких ограничений в структуре воздушного пространства.

РДЦ Московской зоны ЕС ОрВД состоит из 22 секторов.

4.2 Анализ исследовательских потоков воздушного движения

Одним из элементов сценария для имитационного моделирования является поток воздушных судов. Был проведен анализ исходного потока воздушного движения по количеству операций прилета/вылета в аэропортах и структуре потока по направлениям.

Суточное количество ВПО для аэродрома Шереметьево равно 734, для Домодедово – 884, для Внуково – 481. На рисунке 4.1 изображена диаграмма с процентным соотношением рейсов по направлениям в Московской зоне ЕС ОрВД.

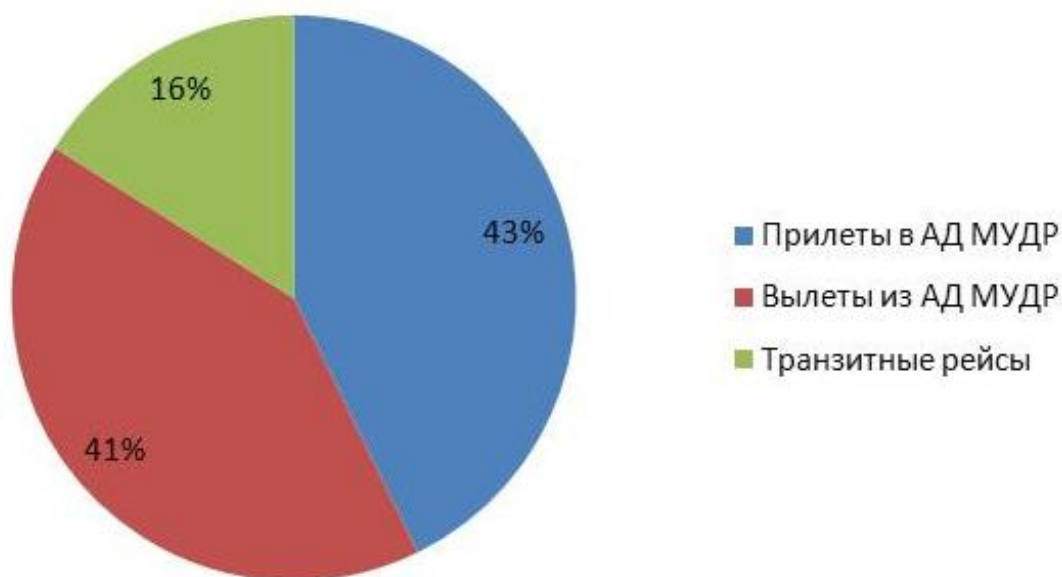


Рисунок 4.1 – Процентное соотношение рейсов в Московской зоне ЕС ОрВД (АД МУДР – аэродромы Московского узлового диспетчерского района)

Основная доля рейсов приходится на прилет и вылет из основных аэродромов– 84%. Для исследований целесообразно использовать весь суточный план, включая транзитные рейсы, рейсы с вылетом и прилетом в аэродромы Шереметьево, Внуково, Домодедово. В таблице 4.1 приведены значения процентных соотношений прилетающих и вылетающих рейсов относительно общего количества по секторам.

Таблица 4.1 – Процент полетов с переменным профилем

Сектор	Процент полетов с переменным профилем	Процент полетов с переменным профилем на этапе набора	Процент полетов с переменным профилем на этапе снижения
Воронеж 1	80.2	69.2	7
Воронеж 2	20.8	0	0
Воронеж 3	88.6	15.1	63.5
Воронеж 4	34.3	0	0
Горький 2	86	2.3	83.3
Горький 3	89.6	3.6	83.3
Горький 4	85.3	51.3	30.2
Горький 5	81.1	77.5	0
Горький 6	75.1	42.1	27.9
Запад 1	66.4	46.4	18.3
Запад 2	8	7.3	0
Запад 3	59.8	13.4	45.2
Киев 1	83.8	72.5	9.6
Киев 2	42.3	40.3	0
Ленинград 1	52.2	19.7	30.8
Пенза 1	65.5	60.2	0
Пенза 2	91.3	0	88.3
Север 1	78.4	29.2	39.6
Транзит	9.8	0	0
Харьков 1	91	0	88.8
Харьков 2	85.3	26.5	46.5
Харьков 3	86.6	40.3	26.9

На основании приведенного выше предварительного расчетного моделирования структуры воздушного пространства для исследования были выбраны следующие секторы: Воронеж 1, Воронеж 2, Горький 2, Горький 5, Запад 1, Запад 2, Запад 3, Киев 1, Киев 2, Ленинград 1, Транзит, Харьков 1. На рисунке 4.2 изображена схема Московская зона ЕС ОрВД, на которой голубым цветом выделены выбранные для проведения исследований секторы. Выбор большинства секторов обусловлен высоким уровнем суточной интенсивности ВД. Также был выбран сектор Транзит, так как он отличается от остальных секторов: через него пролетают только транзитные рейсы. Сектор Горький 2 характерен большой долей полетов с переменным профилем на этапе снижения и набора высоты.

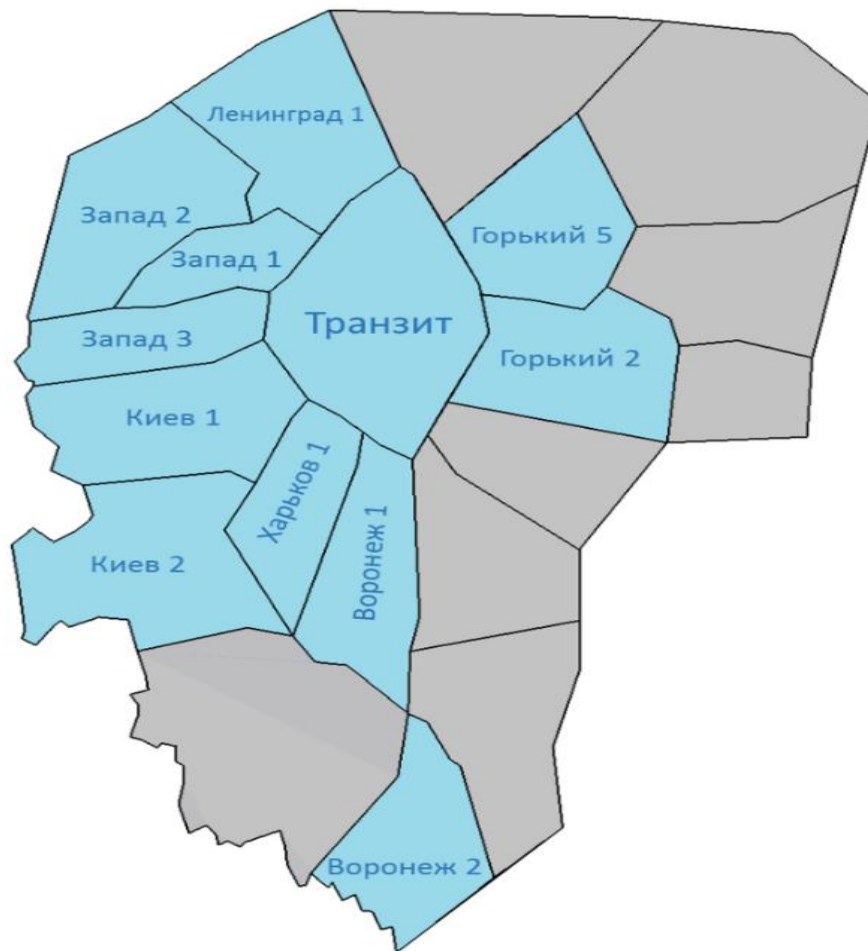


Рисунок 4.2 – Вариант перспективной структуры секторов ОВД Московской зоны ЕС ОрВД

4.4 Определение рисков для безопасности полетов, связанных с временной загруженностью диспетчерской позиции

Оценка связанных с внедрением новой структуры ВП рисков для БП требует анализа относительной временной загруженности диспетчерских позиций секторов и возможного превышения ее предельно допустимых значений. Относительная временная загруженность

определяется как доля времени, в течение которого диспетчер был занят управлением ВД, к общему времени работы. Как правило, этот параметр рассчитывается для часовых интервалов.

Допустимым значением относительной загруженности диспетчерской позиции (ДП) является значение 0.7. Превышение этих значений может приводить к усталости диспетчера и увеличению вероятности ошибок при управлении ВД, что в конечном счете может привести к возникновению опасных ситуаций.

Разработанная имитационная модель управляемого воздушного движения в секторе ОВД позволяет рассчитывать временную загруженность диспетчерской позиции (см. п. 3.2.3). Если по результатам моделирования будут выявлены факты превышения предельно допустимого значения часовой загрузки ДП, то это будет означать необходимость дальнейшего анализа, и, возможно, принятия решения о внесении изменений в аэронавигационную структуру с целью уменьшения риска перегруженности ДП.

В Приложении 1 на рисунках П1.1–П1.12 приведены гистограммы относительной временной загруженности исследуемых секторов для исходной интенсивности ВД, на рисунках П1.13–П1.24 приведены гистограммы временной загруженности для увеличенной в полтора раза интенсивности ВД. Кроме этого для каждого сектора определялся коэффициент налета $k_n = \frac{H}{T}$ (таблица 4.2), необходимый в дальнейшем для расчетов уровня безопасности полетов по формуле (2.7) и определяемый как количество часов налета всех ВС, пролетевших рассматриваемое ВП за время моделирования отнесенное к времени моделирования. Длительность моделирования для наиболее загруженных секторов достигала одних суток реального времени.

Таблица 4.2 Коэффициенты налета для секторов ОВД Московского укрупненного РДЦ

Сектор ОВД	Коэффициент налета k_n	
	Исходная интенсивность	Увеличенная интенсивность
Воронеж 1	5.1112	7.407145
Запад 1	4.5764	6.755729
Воронеж 2	3.8822	5.797416
Киев 1	3.8173	5.630521
Запад 2	3.7142	5.627789
Горький 2	3.5526	5.281664
Транзит	2.9526	4.41291
Ленинград 1	2.7025	4.041783
Запад 3	2.5441	3.785064
Киев 2	2.538	3.711277
Харьков 1	1.9434	2.900615

Сектор ОВД	Коэффициент налета k_n	
	Исходная интенсивность	Увеличенная интенсивность
Горький 5	1.909	2.945981
Сумма	39.2435	58.29789

В таблице 4.3 приведены секторы, в которых есть превышение значения 0.7 загрузки ДП, а также приведено значение в процентах времени работы, в течение которого регистрировалось это превышение.

Таблица 4.3 – Секторы с превышением допустимой временной загрузки значения 0.7 у диспетчерской позиции

Сектор	Процент времени в течение которого регистрировалось превышение допустимого уровня загрузки ДП, %
Исходная интенсивность ($k=1$)	
Воронеж 1	1.11
Горький 2	0.01
Горький 5	0.01
Запад 3	0.01
Киев 2	0.01
Харьков 1	0.01
Увеличенная интенсивность ($k=1.5$)	
Воронеж 1	16.32
Воронеж 2	1.58
Горький 5	0.63
Запад 1	0.05
Запад 2	0.28
Запад 3	0.01
Киев 1	0.07
Киев 2	0.19
Ленинград 1	0.04
Харьков 1	0.68

Для увеличенной интенсивности недопустимые риски с точки зрения загрузки ДП наблюдаются в секторе Воронеж 1.

4.5 Расчет вероятности нарушений минимумов эшелонирования в результате отказов систем связи и наблюдения

В разделе представлены результаты расчёта требований к надёжности технических систем наблюдения и связи, проведённого в соответствии с методикой, представленной в разделе 2.1.

Проводилось моделирование управляемого воздушного движения в 12 секторах, принадлежащих Московской воздушной зоне, в исследуемой структуре ВП: Воронеж-1, Воронеж-2, Горький-2, Горький-5, Запад-1, Запад-2, Запад-3, Киев-1, Киев-2, Ленинград-1,

Транзит, Харьков-1. Для каждого сектора выполнялось моделирование с потоком ВС фактической интенсивности и с потоком прогнозной интенсивности с коэффициентом увеличения $k=1.5$. Время моделирования после отказа было задано равным 20 минутам. В течение этого интервала моделировалась работа диспетчерской позиции в условиях отказа системы наблюдения, либо моделировался полёт ВС в секторе без диспетчерского управления в случае отказа системы связи, и регистрировались факты НМЭ в течение 5 и 10 минут после отказа. После этого состояние системы возвращалось в момент перед отказом, и далее моделирование проводилось в обычном режиме до следующего момента отказа (см. §2.5). Таким образом, методом статистического моделирования выполнялся расчёт условных вероятностей вышеперечисленных событий в случае отказа системы связи или наблюдения.

4.5.1 Определение достаточности количества статистических испытаний

Условная вероятность НМЭ является случайной величиной, которая определяется в процессе статистического моделирования. При определении математического ожидания этой величины, необходимо задаться определенной точностью для ограничения количества проводимых испытаний. Необходимо задать критерий, позволяющий определить, что дисперсия получаемой оценки для нас приемлема. Будет производиться эту оценку посредством определения математического ожидания этой величины и ее доверительных интервалов.

Введем обозначение $P_{\text{ос|отк}} = \frac{n_{\text{ос}}}{N_{\text{м.отк}}}$. Необходимо после каждой реализации опасного фактора производить расчет границ доверительного интервала $[P_{\text{ос|отк,1}}, P_{\text{ос|отк,2}}]$ для величины $P_{\text{ос|отк}}$ [56]:

$$P_{\text{ос|отк,1}} = \frac{P_{\text{ос|отк}} + \frac{1}{2} \frac{t_{\beta}^2}{N_i} - t_{\beta} \cdot \sqrt{\frac{P_{\text{ос|отк}}(1-P_{\text{ос|отк}})}{N_i} + \frac{1}{4} \frac{t_{\beta}^2}{N_i^2}}}{1 + \frac{t_{\beta}^2}{N_i}} \quad (4.1)$$

$$P_{\text{ос|отк,2}} = \frac{\tilde{P}_{\text{ос}} + \frac{1}{2} \frac{t_{\beta}^2}{N_i} + t_{\beta} \cdot \sqrt{\frac{P_{\text{ос|отк}}(1-P_{\text{ос|отк}})}{N_i} + \frac{1}{4} \frac{t_{\beta}^2}{N_i^2}}}{1 + \frac{t_{\beta}^2}{N_i}} \quad (4.2)$$

$$t_{\beta} = \text{arg}\Phi^*\left(\frac{1+\beta}{2}\right) \quad (4.3)$$

где β - выбранная доверительная вероятность, Φ^* - нормальная функция распределения.

При этом должно соблюдаться условие применимости нормального закона распределения:

$$P_{\text{ос|отк}} \cdot N_i > 4 \quad (4.4)$$

$$(1 - P_{\text{отк}}) \cdot N_i > 4 \quad (4.5)$$

Условием окончания статистических испытаний примем неравенство:

$$\frac{P_{\text{отк},2}}{P_{\text{отк}}} \leq 1.1 \quad (4.6)$$

Таким образом, после каждого испытания необходимо производить расчет оценки условной вероятности опасного события и рассчитывать верхнюю границу ее доверительного интервала. При выполнении условия (4.6) моделирование прекращается.

4.5.2 Моделирование отказов систем связи и наблюдения

В Приложении 2 на рисунках П2.1-П2.2 приведены рассчитанные по результатам имитационного моделирования значения условной вероятности НМЭ $P(A_{\text{ос}}|A_{\text{отк.наб.}})$ при отказе системы наблюдения для потоков ВС исходной и увеличенной интенсивностей.

При исследовании возникновения опасных событий при отказе системы наблюдения было промоделировано количество отказов, достаточное для получения удовлетворительного доверительного интервала в соответствии с п. 4.5.1. При увеличенной интенсивности воздушного движения вероятность возникновения опасных событий увеличивается в среднем в 1.5-2 раза. Наибольшая вероятность опасных событий наблюдается в секторе Воронеж 1, наименьшая – в секторе Транзит.

В Приложении 2 на рисунках П2.3-П2.4 приведены рассчитанные по результатам имитационного моделирования значения условной вероятности НМЭ $P(A_{\text{ос}}|A_{\text{отк.св.}})$ при отказе системы связи для потоков ВС исходной и увеличенной интенсивностей.

4.6 Расчет уровня безопасности полетов

Был проведен расчет уровня безопасности полетов в соответствии с формулой (2.2).

4.6.1 Определение риска нарушений минимумов эшелонирования в нормальном режиме функционирования

Расчет вероятности НМЭ теоретически возможно с использованием разработанной имитационной модели. Однако, учитывая уровень подробности модели, эта задача трудновыполнима. В соответствии со статистическими данными [75-78], частота НМЭ в России имеет порядок 10^{-6} на час полета ВС. Для примера, рассмотрим сектор Воронеж 1, имеющий коэффициент налета $k_n = \frac{H}{T} = 5.1112$ для исходной интенсивности ВД (см. таблицу 4.2). Для того чтобы зафиксировать при моделировании хотя бы одно НМЭ, в среднем необходимо провести моделирование длительностью 22.9 лет модельного времени. Для получения удовлетворительных интервалов время моделирования должно быть в несколько раз больше.

Разработанная имитационная модель не позволяет произвести моделирование такой длительности в разумные сроки. Выходом будет либо упрощение модели, либо использование специальных методов уменьшения количества испытаний, о которых было сказано в §1.3.

В данном случае в качестве оценки вероятности НМЭ в нормальном режиме функционирования системы примем усредненное за четыре года значение числа НМЭ на час полета, не связанных с отказами систем связи или наблюдения. В таблице 4.4 приведены значения количества НМЭ, не связанных с отказами систем связи или наблюдения, и значения налета за последние четыре года в соответствии с [75-78].

Таблица 4.4 – Количество нарушений минимумов эшелонирования в России за 2015, 2016, 2017, 2018 годы

Год	Количество НМЭ, не связанных с отказами систем связи и наблюдения	Налет, 10^6 часов налета	Частота, 10^{-6} на час налета
2015	24	2.82	8.5
2016	18	2.7	6.6
2017	13	2.96	4.39
2018	22	3.18	6.9

Среднее значение частоты НМЭ за последние четыре года составило $Q_{ос/норм} = 6.5975 \cdot 10^{-6}$ на час налета.

4.6.2 Определение рисков, связанных с отказами систем связи и наблюдения

Определение вероятностей нахождения системы в состоянии с неработающими линиями передачи данных $P(A_2)$ и $P(A_3)$ из уравнения (2.2) является сложной задачей ввиду отсутствия в открытом доступе сведений о таких отказах. В первом приближении будем использовать ТТХ современных отечественных средств наблюдения и связи, применяемых в России, а также требования международных стандартов. В таблице 4.5 приведены ТТХ, связанные с надежностью систем связи и наблюдения.

Таблица 4.5 – Тактико-технические характеристики средств наблюдения и связи, связанные с надежностью

Наименование	Средняя наработка на отказ, ч.	Среднее время восстановления, мин.	Общее время нахождения в нерабочем состоянии, часов в год
Автоматизированный приемопередающий центр ОВЧ и УВЧ-	40000		

Наименование	Средняя наработка на отказ, ч.	Среднее время восстановления, мин.	Общее время нахождения в нерабочем состоянии, часов в год
связи TRS-2000			
Радиопередатчик TX 2300Н ВЧ диапазона	10000	30	
Радиоприемник RX-2000Н ВЧ диапазона	30000	15	
Наземная станция передачи данных ОБЧ диапазона AGS 2300V	20000		
Маршрутизатор AGR 2300	65000		
Стандарт Евроконтроля к системам наблюдения на маршруте (SUR.ET1.ST01.1000-STD-01-01)		10	9

Основываясь на данных, приведенных в таблице 4.5, были выбраны следующие параметры расчета:

- 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.

4.6.3 Расчет вероятности нарушений минимумов эшелонирования

В таблице 4.6 приведены значения уровня безопасности полетов $Q_{\text{ос}}$ для секторов перспективной структуры Московского районного диспетчерского центра, рассчитанные в соответствии с формулой (2.7):

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

Значения $\frac{T}{H}$ являются обратными значениями коэффициентов налета $k_{\text{н}}$ в секторах ОВД из таблицы 4.2. Условные вероятности $P(A_{\text{ос}}|A_{\text{отк.св.}})$ и $P(A_{\text{ос}}|A_{\text{отк.наб.}})$ для секторов ОВД были выбраны из Приложения 2 для десятиминутных отказов.

Таблица 4.6 – Рассчитанный уровень безопасности полетов $Q_{\text{ос}}$ для секторов ОВД перспективной структуры Московского районного диспетчерского центра

Сектор	$Q_{ос}, 10^{-6}$ на час полета		$Q_{ос} - Q_{ос/норм}, 10^{-8}$ на час полета	
	Исходная интенсивность ВД	Увеличенная интенсивность ВД	Исходная интенсивность ВД	Увеличенная интенсивность ВД
Воронеж 1	6.73846	6.93256	14.0959	33.5057
Запад 1	6.6787	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	6.6305	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 1	6.62153	6.63993	2.40278	4.24269
Транзит	6.6088	6.6125	1.13027	1.50078

По результатам расчета можно сделать вывод, что в целом более высокая частота НМЭ наблюдается для секторов ОВД с наибольшей интенсивностью воздушного движения (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, прилетающих в аэродромы МВЗ).

В процентном соотношении относительный вклад в уровень безопасности полетов факторов, связанных с отказами систем связи и наблюдения, является невысоким и изменяется в диапазоне от 0.17% для исходной интенсивности в секторе Транзит до 4.83% для увеличенной интенсивности в секторе Воронеж 1.

Проведенные расчеты показывают, что существуют дальнейшие перспективы развития разработанной модели управляемого воздушного движения с целью учета большего количества случайных факторов, а также применения специальных методов уменьшения количества испытаний, которые позволят получать уровень безопасности полетов в нормальном режиме.

4.7 Выводы

В четвертом разделе представлены результаты исследования по анализу безопасности полетов для перспективной структуры воздушного пространства Московской воздушной зоны. Для проведения моделирования полетов ВС был выбран поток за наиболее интенсивный летний период времени. После анализа потоков ВД для моделирования были выбраны 12 секторов ОВД, в которых потоки ВС представляют интерес с точки зрения сложности их пространственно-временной структуры. Исследование проводилось для потоков с актуальной интенсивностью и с увеличенной в 1.5 раза интенсивностью ВД.

Был произведен расчет относительной временной загруженности диспетчерских позиций. Был выявлен сектор Воронеж 1, для которого фиксируется превышения допустимого уровня загруженности 0.7. По результатам статического моделирования были получены значения условных вероятностей нарушений минимумов эшелонирования при отказах систем связи и наблюдения. На основе этих данных, а также с использованием статистики по нарушениям минимумов эшелонирования в России и ТТХ технических систем связи и наблюдения были получены значения уровня безопасности полетов для секторов ОВД Московской воздушной зоны.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В диссертационной работе решена актуальная задача анализа безопасности полетов в системах управления воздушным движением с помощью имитационного моделирования. С помощью статистического имитационного моделирования рассчитывается условная вероятность опасных событий при отказах технических систем связи и наблюдения. Эти значения затем используются для расчета уровня безопасности полетов в системе. В работе получены следующие основные результаты и выводы:

1. Выполнен анализ методов и моделей, предназначенных для оценки безопасности полетов. Обоснована актуальность применения имитационного моделирования для решения задачи анализа безопасности полетов в системах управления воздушным движением.

2. Разработан комплекс методов и алгоритмов оценки безопасности полетов с применением статистического имитационного моделирования управляемого воздушного движения, позволяющий получать показатели, характеризующие уровень безопасности полетов.

3. Разработаны состав и структура имитационной модели управляемого воздушного движения в секторе ОВД районного диспетчерского центра. Разработаны алгоритмы имитации операций диспетчера по управлению потоком ВС, обнаружения и предотвращения конфликтов. Разработанная модель позволяет рассчитывать загруженность диспетчерской позиции и, таким образом, оценивать риски связанные с перегрузкой диспетчера.

4. Разработано программное средство, реализующее разработанные модели и алгоритмы. Показана возможность решения задачи анализа безопасности полетов на примере исследований

в перспективной аэронавигационной структуре воздушного пространства Московского укрупненного районного диспетчерского центра.

Дальнейшее развитие темы исследования заключается в учете в модели большего количества случайных факторов, влияющих на БП. Также необходимо рассмотреть применение специальных методов, позволяющих уменьшить количество испытаний при использовании метода Монте-Карло для расчета вероятностей опасных событий.

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

СПИСОК СОКРАЩЕНИЙ И УСЛОВНЫХ ОБОЗНАЧЕНИЙ

ВАДА	base of aircraft data (база данных ЛТХ ВС)
RNP	required navigation performance (требуемые навигационные характеристики)
АДЦ	аэродромный диспетчерский центр
БД	база данных
БП	безопасность полетов
ВД	воздушное движение
ВО	воздушная обстановка
ВП	воздушное пространство
ВС	воздушное судно
ДП	диспетчерская позиция
ДПК	диспетчер процедурного контроля
ДРЛУ	диспетчер радиолокационного управления
ДСС	диспетчер соседнего сектора
ЕС ОрВД	Единая система организации воздушного движения
ИКАО	Международная организация гражданской авиации
ИМ	имитационное моделирование
ЛПД	линии передачи данных
ЛТХ	летно-технические характеристики
МДЛА	модель динамики летательного аппарата
МДУ	модель диспетчерского управления
НИР	научно-исследовательская работа
НМЭ	нарушение минимумов эшелонирования
ОВД	обслуживание воздушного движения
ОрВД	организация воздушного движения
ПКС	потенциально конфликтная ситуация
ПОД	пункт обязательного донесения
ППМ	пункт перемены маршрута
ПС	программное средство
РДЦ	районный диспетчерский центр
РЦ	районный центр
СКО	среднеквадратичное отклонение

СУБД	система управления базой данных
СУВД	система управления воздушным движением
ТТХ	тактико-технические характеристики
УВД	управление воздушным движением

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Косолапов Д.С. Методика выявления и анализа факторов риска для безопасности полетов, связанных с организацией воздушного движения при создании укрупненных центров ОВД, Научный вестник «НИИ Аэронавигации», №12, 2013 г.
2. Safety Management Manual (SMM) Doc 9859 AN/474. ICAO, Third Edition, 2013.
3. Программы модернизации систем ОрВД Европы и США SESAR и NextGen. Аналитический обзор по материалам зарубежной информации. Составители: О. В. Дегтярёв, И. Ф. Зубкова./ ГосНИИАС, 2011 г.
4. Руководство по методике планирования воздушного пространства для определения минимумов эшелонирования (Doc 9689-AN/953), ИКАО, 1998.
5. Руководство по системе управления безопасностью полётов при АНО ФГУП "Госкорпорация по ОрВД", ФГУП "Госкорпорация по ОрВД", 2014.
6. Reich, P.G. Analysis of long-range air traffic systems – separation standards. Part I, II, III // The Journal of Institute of Navigation, 1966, vol.19, p.88,169,331.
7. Hsu, D. A. The Evolution of Aircraft Collision Probabilities at Intersection Air Routes. The Journal of Navigation (U. K.), Vol. 34, 1981.
8. Broker P., Lloyd D. E. Collision risk and longitudinal separation standarts for North Atlantic air traffic system. DORA Communication 7801, Civil Aviation Authority, London, 1978.
9. Lloyd D. E., Mathematical Studies on Separation Standarts, Journal of Navigation, Vol. 24, Issue 04, October 1971, pp 456-458.
10. Broker P. Lateral Collision Risk In Air Traffic Track Systems, Journal of Navigation, Vol. 56, 2003, pp 399-409.
11. Broker P. Radar Inaccuracies and Mid-Air Collision Risk: Part 1 A Dynamic Mthodology, Journal of Navigation, Vol. 57, 2004, pp 25-37.
12. Broker P. Radar Inaccuracies and Mid-Air Collision Risk: Part 2 En Route Radar Separation Minima, Journal of Navigation, Vol. 57, 2004, pp 39-51.

13. Broker P. Longitudinal Collision Risk for ATC Track Systems: A Hazardous Event Model, *Journal of Navigation*, Vol. 59, 2006, pp 55-70.
14. Anderson D., Lin X. G. A Collision Risk Model for a Crossing Track Separation Methodology, *Journal of Navigation*, Vol. 49, Issue 03, September 1996, pp. 337-349.
15. Bakker G. J., Blom H. Air Traffic Collision Risk Modeling // in 32nd IEEE Conference on Decision and Control, 1993, pp 1404-1409.
16. Blom H. Accident Risk Assessment for advanced Air Traffic Management, *Air Transportation Systems Engineering, AIAA, Progress in Astronautics and Aeronautics*, 2001, Vol. 193, pp 463-480.
17. Blom H., Bakker G. J., Mariken Everdij, Marco van der Pakr Stochastic analysis background of accident risk assessment for Air Traffic Management, HYBRIDGE, 2003.
18. Спрысков В. Б., Исаакян К. Л. Моделирование риска столкновения ВС в системах организации воздушного движения. *Научный вестник МГТУ ГА*, № 52, 2002 г.
19. Спрысков В. Б., Демидов О. М. Оценка вероятности потери управления воздушным движением в системах с различным уровнем оснащения, *Научный вестник МГТУ ГА*, № 52, 2002 г.
20. Спрысков В. Б. Оценка риска столкновения ВС на пересечении воздушных трасс и занятых эшелонах при радиолокационном контроле, *Научный вестник МГТУ ГА*, № 32, 2000 г.
21. Спрысков В. Б., Исаакян К. Л. Анализ безопасности воздушного движения на пересечении воздушных трасс и занятых эшелонов. *Научный вестник МГТУ ГА*, № 32, 2000 г.
22. Кузнецов В. Л., Марковская модель оценки риска катастроф на воздушном транспорте. *Научный вестник МГТУ ГА*, №90(8), 2005 г.
23. Грибков И. М., Спрысков В. Б., Щербаков Л. К. Модель оценки риска катастроф ВС при движении по одной трассе на одной высоте, *Научный вестник МГТУ ГА*, № 90(8), 2005 г.
24. Грибков И. М., Спрысков В. Б., Щербаков Л. К. Модель оценки риска катастроф ВС при движении по пересекающимся воздушным трассам на одной высоте, *Научный вестник МГТУ ГА*, № 90(8), 2005 г.

25. Исаакян К. Л., Кузнецов С. В., Спрысков В. Б. Модель оценки безопасности полётов при движении воздушных судов по пересекающимся маршрутам. Научный вестник ГосНИИ «Аэронавигация», № 1, 2012 г.
26. Спрысков В. Б., Исаакян К. Л., Кузнецов С.В. Оценка риска катастроф в воздушном пространстве зоны ответственности диспетчера управления воздушным движением при обслуживании воздушных судов по информации системы наблюдения. Научный вестник МГТУ ГА, №10, 2015 г.
27. Компанцева Е. И. Вероятность опасного сближения воздушных судов, вызванного их продольными отклонениями (ситуация «догон»). Научный вестник МГТУ ГА, № 87(5), 2004 г.
28. Компанцева Е. И. Динамическая модель опасного сближения воздушных судов при конфликтной ситуации типа «пересечение». Научный вестник МГТУ ГА, № 87(5), 2004 г.
29. Компанцева Е. И. Динамическая модель опасного сближения воздушных судов при конфликтной ситуации типа «догон». Научный вестник МГТУ ГА, № 87(5), 2004 г.
30. Компанцева Е. И. Вероятность опасного сближения воздушных судов, вызванного их боковыми отклонениями (ситуация «догон»). Научный вестник МГТУ ГА, № 90(8), 2005 г.
31. Габринович, А. Д. Вероятностная оценка уровня безопасности полётов в зонах ответственности центров управления воздушным движением: дис. ... канд. тех. наук: 05.13.01 / Габринович Анна Даниловна. – СПб, 2009. – 144 с.
32. Рухлинский В.М., Хаустов А.А., Молотовник А.С. Оценка риска в области безопасности полетов на основе байесовской сети доверия, Научный вестник МГТУ ГА, №3, 2017 г.
33. Stroeve S., Blom H., Marco van der Park Multi-Agent Situation Awareness Error Evaluation in Accident Risk Modelling, 5th USA/Europe Air Traffic Management R&D Seminar, 2003.
34. Stroeve S., Everdij M., Blom H. Studying hazards for resilience modeling in ATM, First SESAR Innovation Days, 29th November – 1st December 2011.
35. Netjasov F. Framework for airspace planning and design based on conflict risk assessment Part 1: Conflict risk assessment model for airspace strategic planning, 14th Air Transport Research Society Conference, Porto, Portugal, July 6-9, 2010.

36. Netjasov F. Framework for airspace planning and design based on conflict risk assessment Part 2: Conflict risk assessment model for airspace tactical planning, *Transportation Research Part C*, 24, 2012, 213-226.
37. Netjasov F. Framework for airspace planning and design based on conflict risk assessment Part 3: Conflict risk assessment model for airspace operational and current day planning, *Transportation Research Part C*, 32, 2013, 31-47.
38. Болтачев В.Ю. Имитационное моделирование управляемого воздушного движения. *Научный вестник МГТУ ГА. Серия «Эксплуатация ВТ и ремонт АТ. Безопасность полетов»*. № 63, 2004 г.
39. Болтачев В.Ю. Некоторые алгоритмы имитационного моделирования управления воздушным движением. *Вестник МГТУ ГА. Серия «Эксплуатация ВТ и ремонт АТ. Безопасность полетов»*. № 63, 2004 г.
40. Ускоренное моделирование процессов организации потоков и управления воздушным движением: современные и будущие возможности. Аналитический обзор по материалам зарубежной информации. Составители: О.В.Дегтярев, И.Ф.Зубкова/ГосНИИАС, 2008.
41. FAA/Eurocontrol Cooperative R&D Action Plan 5 and Action Plan 9 “Capability Assessment of Various Fast-Time Simulation Models and Tools with Analysis Concerns”. October, 2004.
42. James K. Kuchar, Lee C. Yang A Review of Conflict Detection and Resolution Modeling Methods, *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, Vol. 1, No. 4, December 2000, pp. 179-189.
43. Sybert H. Stroeve, Mariken H. C. Everdij, Henk A. P. Blom Studying hazards for resilience modeling in ATM, *First SESAR Innovation Days*, 29th November – 1st December 2011.
44. Tibor Bosse, Alexei Sharpanskykh, Jan Treur, Henk A. P. Blom, Sybert H. Stroeve Agent-based modeling of hazards in ATM, *Second SESAR Innovation Days*, 27-29 November 2012.
45. De Santis E, Di Benedetto MD, Pezzuti D, Pola G, Scarciallo L, Everdij M. Safety criticality analysis of air traffic management systems: A compositional bisimulation approach. *Third SESAR Innovation Days*, 26-28 November 2013.
46. Разработка концепции, принципов исследования и структурного облика системы математических моделей функционирования элементов системы УВД с использованием

спутниковых технологий: отчет о НИР. Отв. исполн.: Б.В.Пучков, Л.К.Тихомиров / ГосНИИАС, 1996 г.

47. Дегтярев О.В., Зубкова И.Ф. Методы и особенности математического моделирования систем организации воздушного движения // Известия российской академии наук. Теория и системы управления, т.51, №4, 2012.

48. Вишнякова Л.В., Сикачев В.Ю., Попов А.С., Имитационное моделирование системы организации воздушного движения, Седьмая всероссийская научно-практическая конференция «Имитационное моделирование. Теория и практика» (ИММОД-2015). Труды конференции. Ин-т проблем упр. Им. В.А. Трапезникова. Рос. Акад. Наук, под общ. ред. С.Н. Васильева, Р.М. Юсупова. 2015, С.23-24.

49. Стороженко С.Р., Попов А.С. Формирование случайных потоков воздушного движения прогнозной интенсивности для моделирования полетов воздушных судов в верхнем воздушном пространстве и в терминальной зоне аэродрома (аэроузла), сборник докладов конференции «Авиационные системы в XXI веке», 2017, с. 303-310.

50. Суслов Д.Д., Попов А.С., Сикачев В.Ю. Особенности моделирования 4D траекторий полётов воздушных судов на всех этапах полёта в составе комплекса имитационного моделирования (КИМ ОрВД), сборник докладов конференции «Авиационные системы в XXI веке», 2017, с. 311-317.

51. Людомир А.В., Орлов В.С. Имитационное моделирование динамической воздушной обстановки в управляемом воздушном пространстве. Прикладная информатика, 2014, №5(53), С.89-97.

52. Попов А.С., Скавинская Д.В. Формирование бесконфликтных потоков воздушного движения для оценки эффективности полетов воздушных судов районе аэроузла// Труды ГосНИИАС, Серия: Вопросы авионики, №2(35), 2018, С. 18-38.

53. Жулев, В. И., Иванов, В. С. Безопасность полётов летательных аппаратов: (Теория и анализ). – М.: Транспорт, 1986. – 224 с.

54. Ахмедов Р.М., Бибутов А.А., Васильев А.В. Автоматизированные системы управления воздушным движением: Новые информационные технологии в авиации: Учеб. пособие / Под ред. Пятко С.Г. и Красова А.И. – СПб.: Политехника, 2004 – 456 с.

55. Федеральные авиационные правила «Порядок осуществления радиосвязи в воздушном пространстве Российской Федерации»: утв. приказом Минтранса от 26 сентября 2012 года №362.
56. Вентцель Е.С. Теория вероятностей: Учеб. для вузов. М.: Высш. шк., 2001.
58. Filenkova E. Universal algorithm and program tools of 4D flight plan synthesis under conditions of dynamic special use airspace, The International Conference of the European Aerospace Societies (CEAS), Venice, Italy, 2011.
59. Кельтон В., Лоу А. Имитационное моделирование. Классика CS. 3-е изд. - СПб.:// Питер, 2004, - 847 с.
60. Единые принципы моделирования риска столкновения в обоснование Руководства по методике планирования воздушного пространства для определения минимумов эшелонирования (Doc 9689). Cir 319, AN/181, ИКАО, 2009.
61. Попов А.С., Стороженко С. Ф. Формирование случайных потоков воздушного движения с использованием бета-распределения для имитационного моделирования полетов воздушных судов, Труды ГосНИИАС, №1(34), с.23-40, 2018.
62. Villen-Altamirano M., Villen-Altamirano J. RESTART: A method for accelerating rare event simulations. 13th Int. Teletraffic Congress, Copenhagen, pp. 71-76, 1991.
63. Krystul J., Blom H.A.P. Sequential Monte Carlo Simulation Of Rare Event Probability In Stochastic Hybrid Systems, 16th Triennial World Congress, Prague, 2005.
64. Borodina A., Morozov E. Simulation of rare events with speed-up techniques: Splitting and RESTART. Proceedings of Finnish Data Processing Week at the Petrozavodsk State University (FDPW'2005), 2006, vol. 7, pp. 152-173.
65. Glasserman P., Heidelberger P., Shahabuddin P. and Zajic T. Multilevel Splitting for estimating rare event probabilities. Operations Research 47(4), pp. 585-600 ,1999.
66. Cerou F., Moral P., Lezaud L. and P. Genetic Genealogical Models in Rare Event Analysis, Alea 1, pp. 181-203, 2006.
67. Дарымов Ю. П., Крыжановский Г. А., Солодухин В. А., Кивько В. Г., Киров Б. А. Автоматизация процессов управления воздушным движением, Учеб. пособие для вузов гражд. авиации / Под ред. Крыжановского Г. А. – М.: Транспорт, 1981 – 400 с.

68. Силяков В.А., Красюк В. Н. Системы авиационной радиосвязи, Учеб. пособие/ Под ред. В.А.Силякова. -СПбГУАП. СПб, 2012. -160 с.
69. Белкин А. М., Миронов Н. Ф., Рублев Ю. И., Сарайский Ю. Н. Воздушная навигация: справочник / – М.: Транспорт, 1988, 303 с.
70. Ахмедов Р.М., Бибутов А.А., Васильев А.В. Автоматизированные системы управления воздушным движением: Новые информационные технологии в авиации: Учеб. пособие / Под ред. Пятко С.Г. и Красова А.И. – СПб.: Политехника, 2004 – 456 с.
71. Федеральные авиационные правила «Подготовка и выполнение полетов в гражданской авиации Российской Федерации» : утв. приказом Минтранса от 31 июля 2009 года №128.
72. Федеральные правила использования воздушного пространства Российской Федерации : Утв. постановлением Правительства РФ от 11 марта 2010 года №138.
- 73 Poles D. Base Of Aircraft Data (BADA) Aircraft Performance Modelling Report, EEC Technical/Scientific Report №2009-009, Eurocontrol Experimental Center, 2009.
74. Рихтер С. Г. Кодирование и передача речи в цифровых системах подвижной радиосвязи. Учеб. пособие для вузов. – М.: Горячая линия – Телеком, 2011. – 304 с.
75. Анализ состояния безопасности полетов в гражданской авиации Российской Федерации в 2015 году, Федеральное агентство воздушного транспорта, 2016. URL: <http://szfavt.ru/wp-content/uploads/2016/05/Анализ-по-БП-2015-год.pdf> (дата обращения: 01.02.2019).
76. Анализ состояния безопасности полетов в гражданской авиации Российской Федерации в 2016 году, Федеральное агентство воздушного транспорта, 2017. URL: <http://vsmtu.ru/images/DOK/OIBP/oibp-ASBP-GA-2016.pdf> (дата обращения: 01.02.2019).
77. Анализ состояния безопасности полетов в гражданской авиации Российской Федерации в 2017 году, Федеральное агентство воздушного транспорта, 2018. URL: http://szfavt.ru/wp-content/uploads/2018/06/analyz_po_bp_2017.pdf (дата обращения: 01.02.2019).
78. Анализ состояния безопасности полетов в гражданской авиации Российской Федерации в 2018 году, Федеральное агентство воздушного транспорта, 2019. URL: <http://vsmtu.ru/images/DOK/OIBP/oibp-ASBP-GA-2018.pdf> (дата обращения: 20.05.2019).

**ПРИЛОЖЕНИЕ 1. РЕЗУЛЬТАТЫ РАСЧЕТА ВРЕМЕННОЙ ЗАГРУЖЕННОСТИ
ДИСПЕТЧЕРСКИХ ПОЗИЦИЙ МОСКОВСКОГО УКРУПНЕННОГО РАЙОННОГО
ДИСПЕТЧЕРСКОГО ЦЕНТРА**

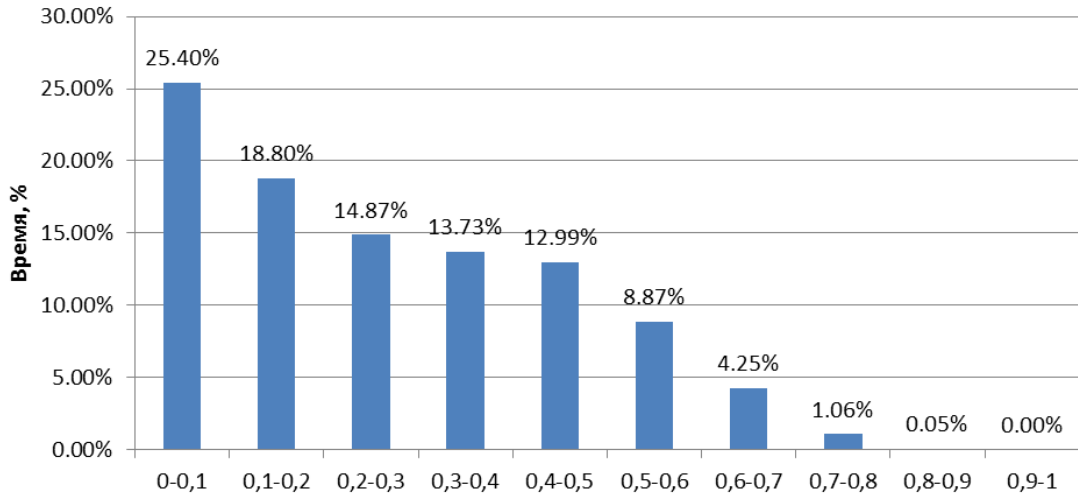


Рисунок П1.1 Временная загрузка диспетчера сектора Воронеж 1 для исходной интенсивности ВД.

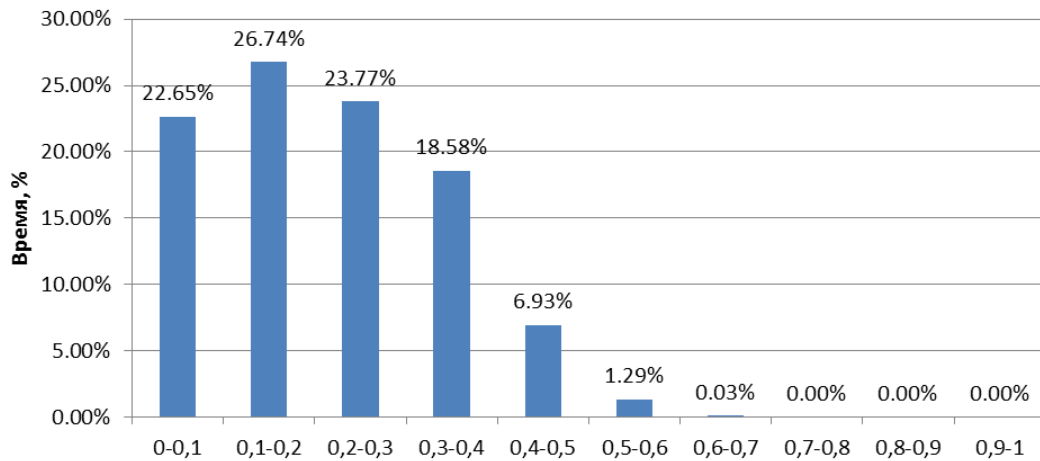


Рисунок П1.2 Временная загрузка диспетчера сектора Воронеж 2 для исходной интенсивности ВД.

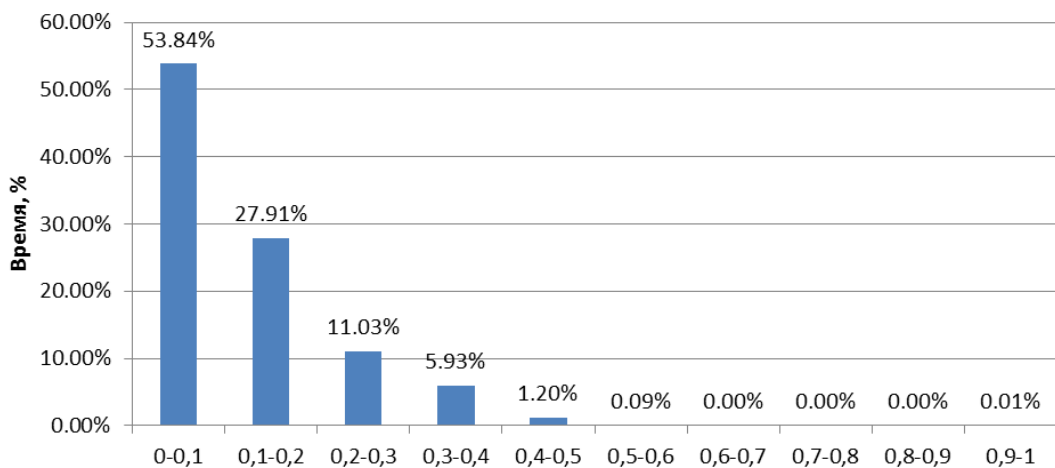


Рисунок П1.3 Временная загрузка диспетчера сектора Горький 2 для исходной интенсивности ВД.

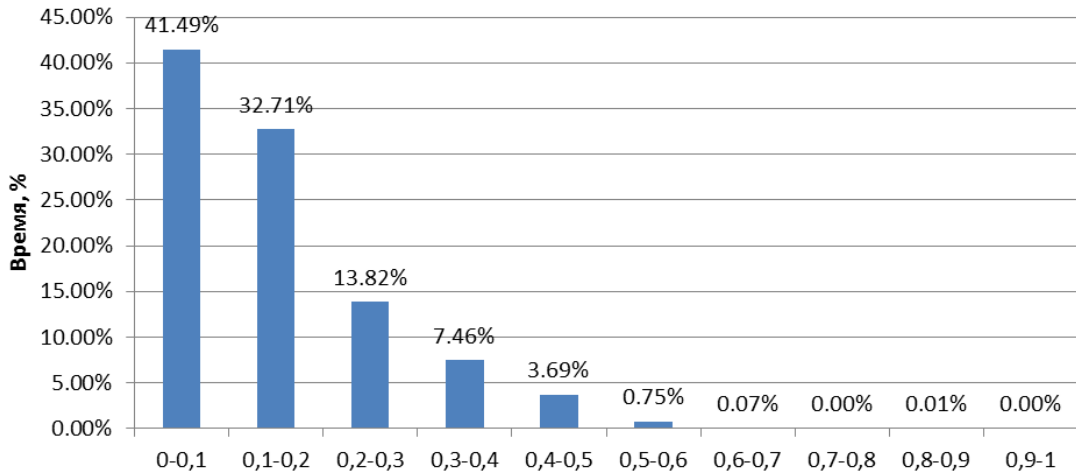


Рисунок П1.4 Временная загруженность диспетчера сектора Горький 5 для исходной интенсивности ВД.

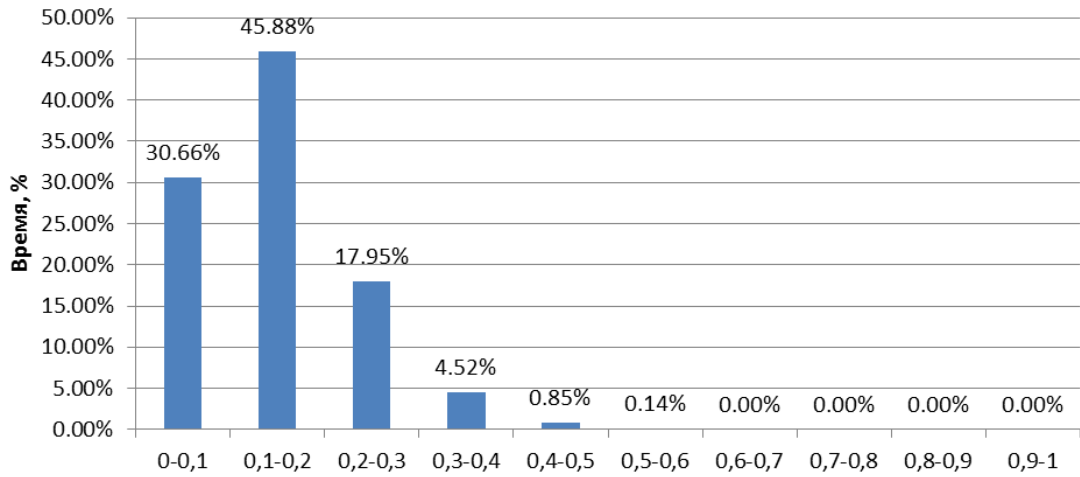


Рисунок П1.5 Временная загруженность диспетчера сектора Запад 1 для исходной интенсивности ВД.

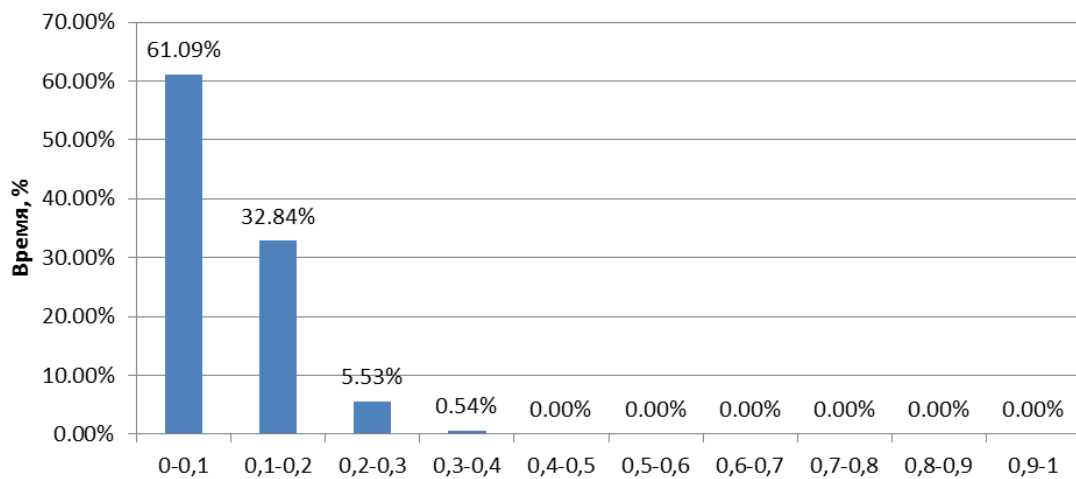


Рисунок П1.6 Временная загруженность диспетчера сектора Запад 2 для исходной интенсивности ВД.

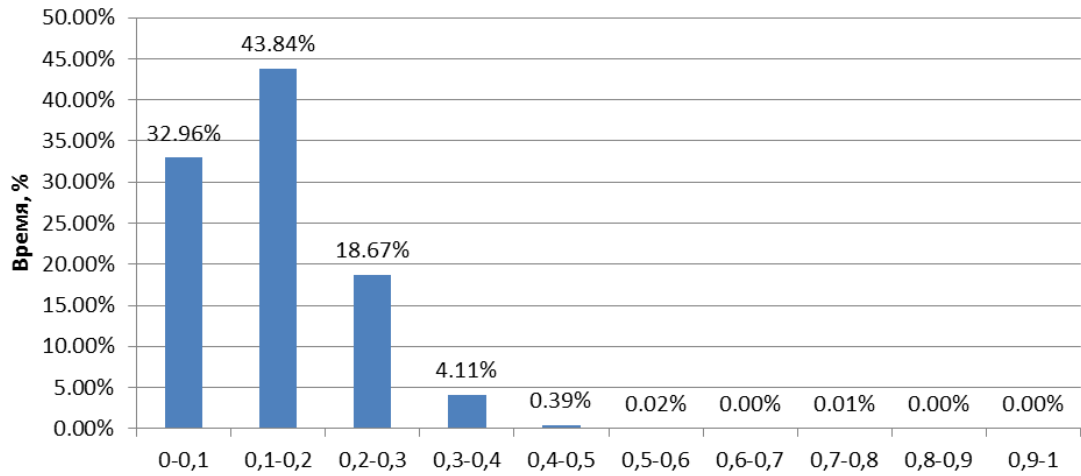


Рисунок П1.7 Временная загруженность диспетчера сектора Запад 3 для исходной интенсивности ВД.

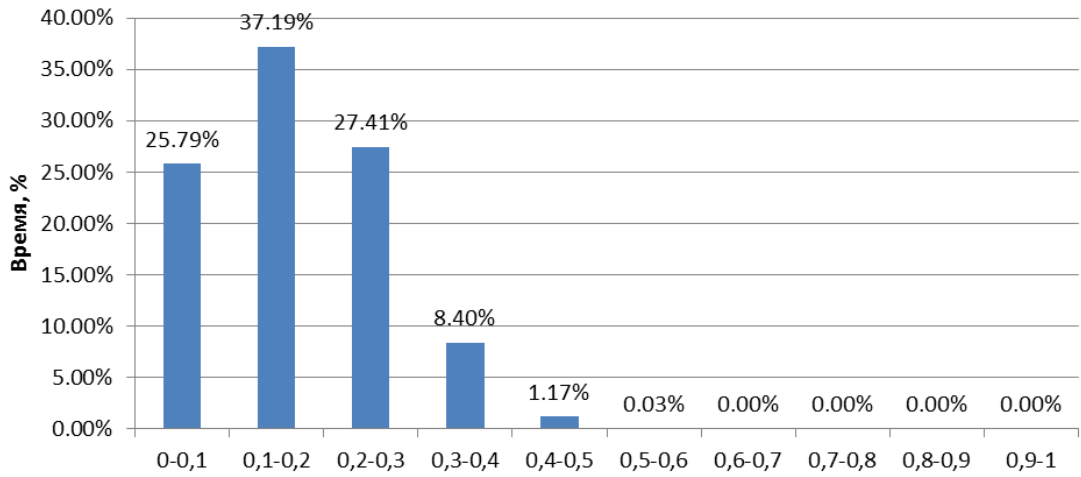


Рисунок П1.8 Временная загруженность диспетчера сектора Киев 1 для исходной интенсивности ВД.

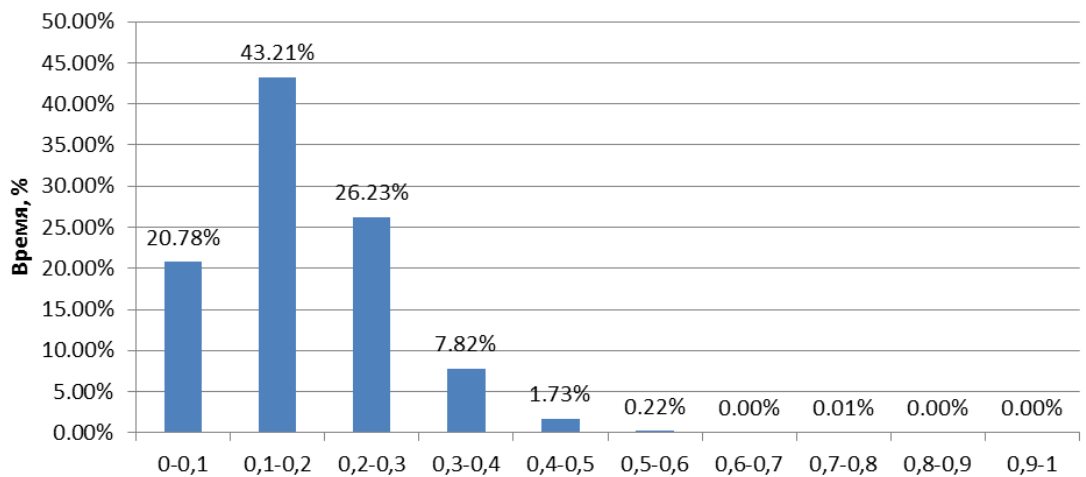


Рисунок П1.9 Временная загруженность диспетчера сектора Киев 2 для исходной интенсивности ВД.

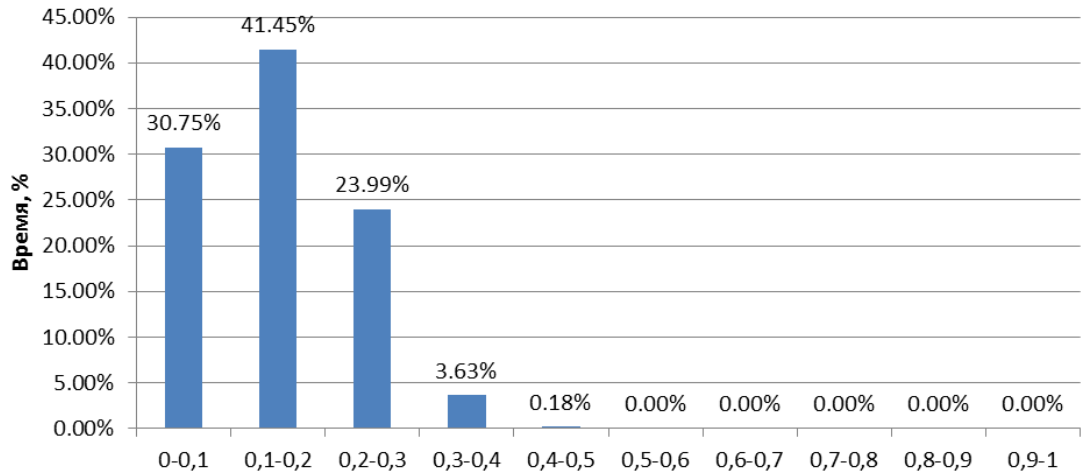


Рисунок П1.10 Временная загруженность диспетчера сектора Ленинград 1 для исходной интенсивности ВД.

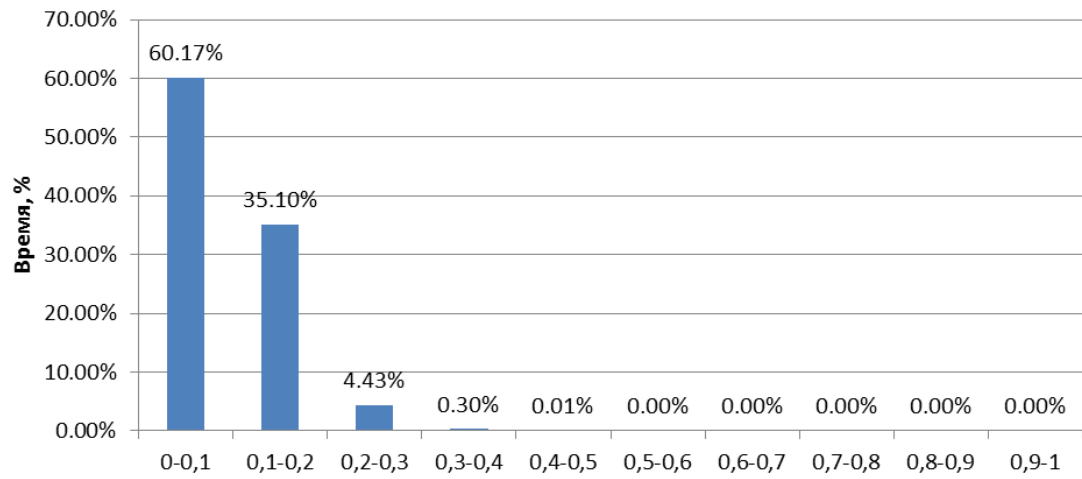


Рисунок П1.11 Временная загруженность диспетчера сектора Транзит для исходной интенсивности ВД.

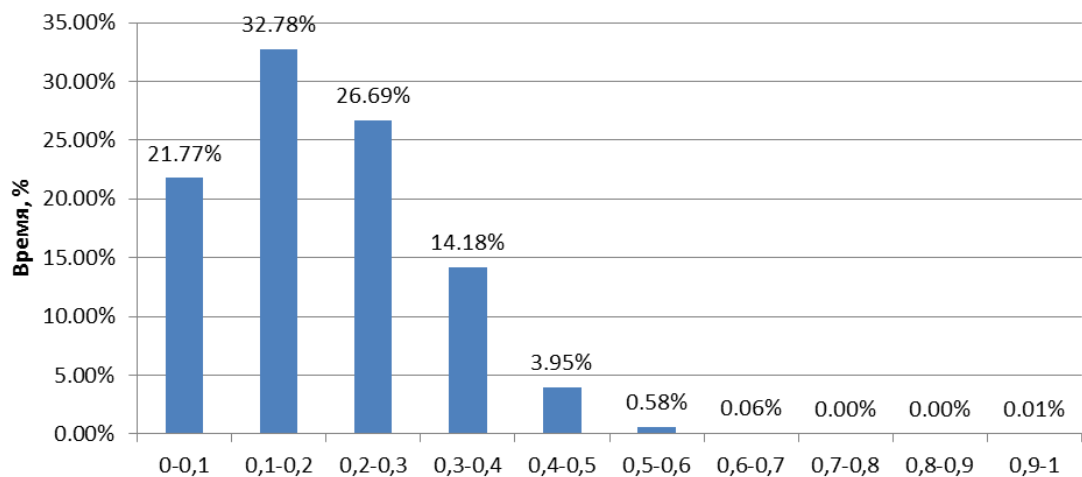


Рисунок П1.12 Временная загруженность диспетчера сектора Харьков 1 для исходной интенсивности ВД.

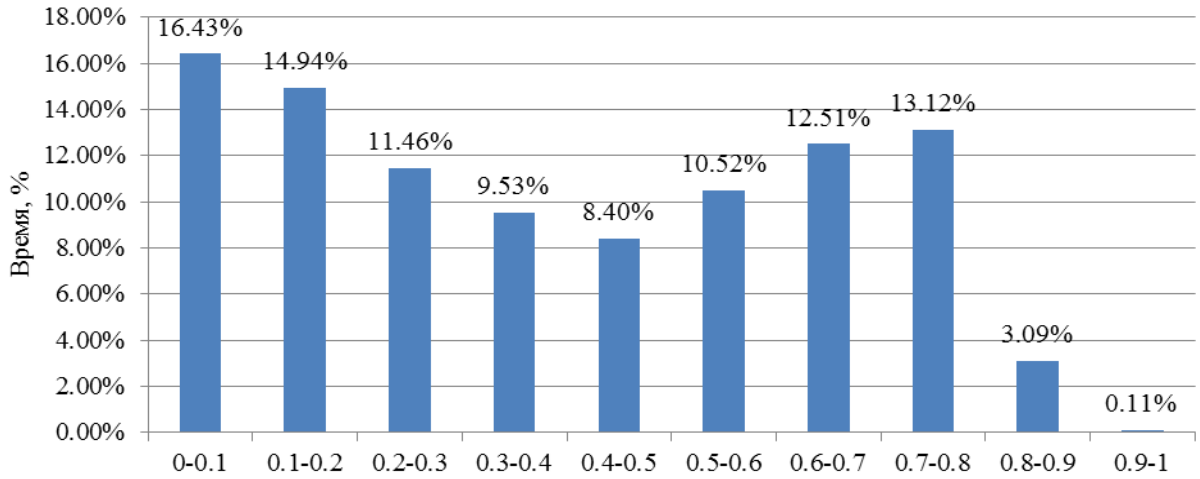


Рисунок П1.13 Временная загруженность диспетчера сектора Воронеж 1 для увеличенной интенсивности ВД.

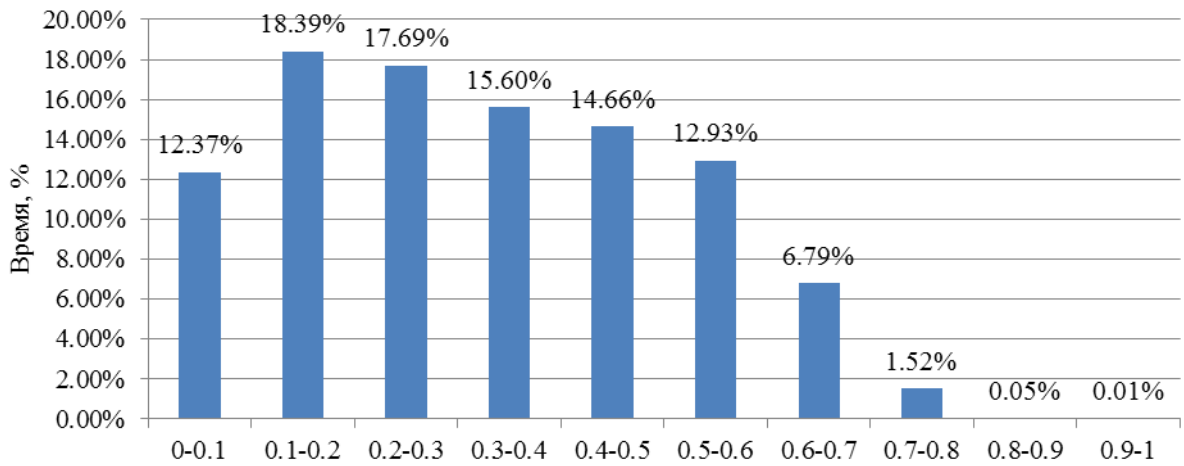


Рисунок П1.14 Временная загруженность диспетчера сектора Воронеж 2 для увеличенной интенсивности ВД.

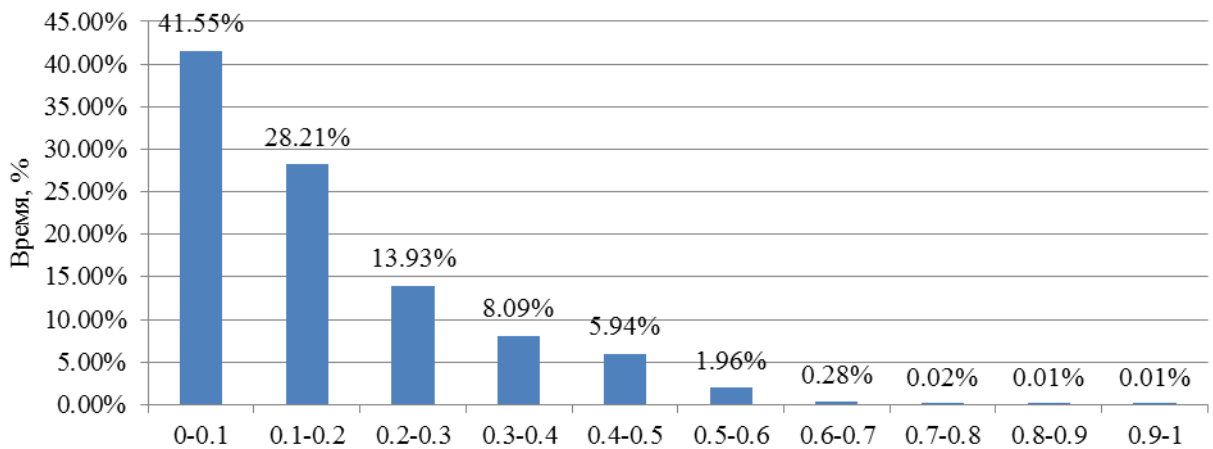


Рисунок П1.15 Временная загруженность диспетчера сектора Горький 2 для увеличенной интенсивности ВД.

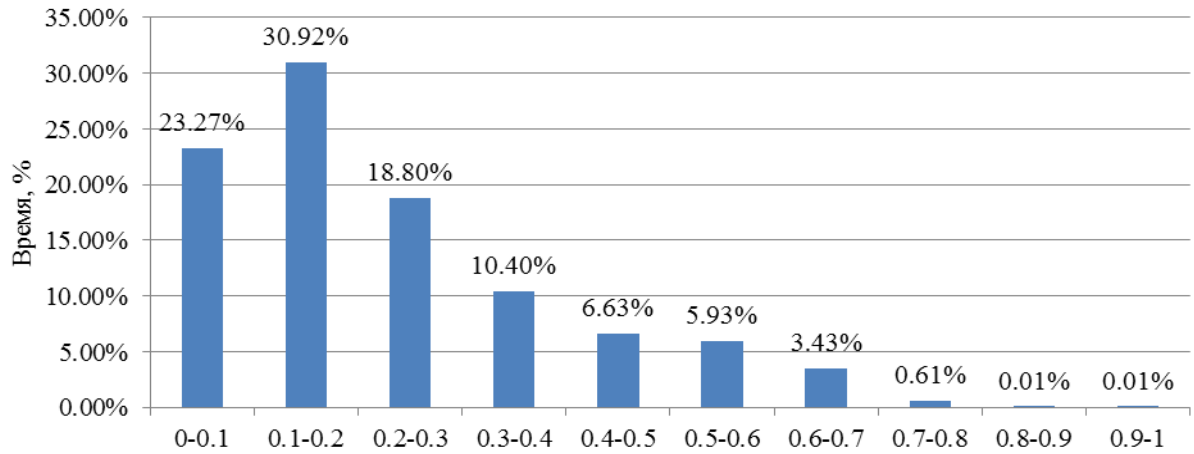


Рисунок П1.16 Временная загруженность диспетчера сектора Горький 5 для увеличенной интенсивности ВД.

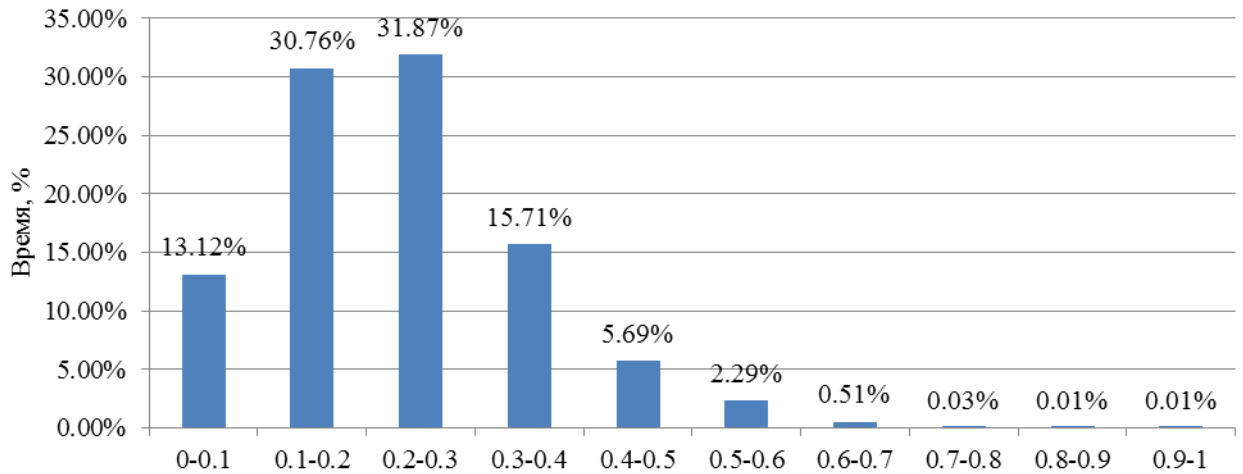


Рисунок П1.17 Временная загруженность диспетчера сектора Запад 1 для увеличенной интенсивности ВД.

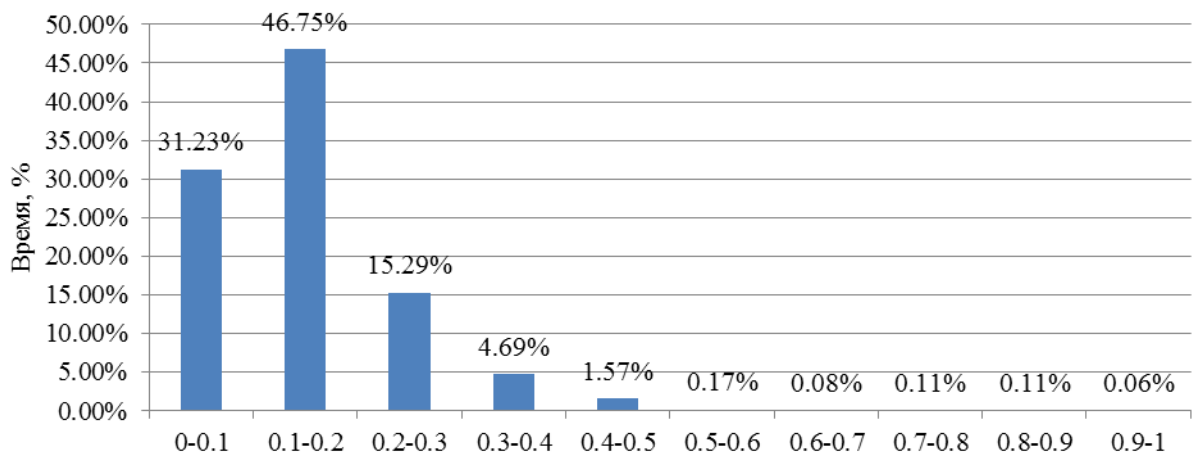


Рисунок П1.18 Временная загруженность диспетчера сектора Запад 2 для увеличенной интенсивности ВД.

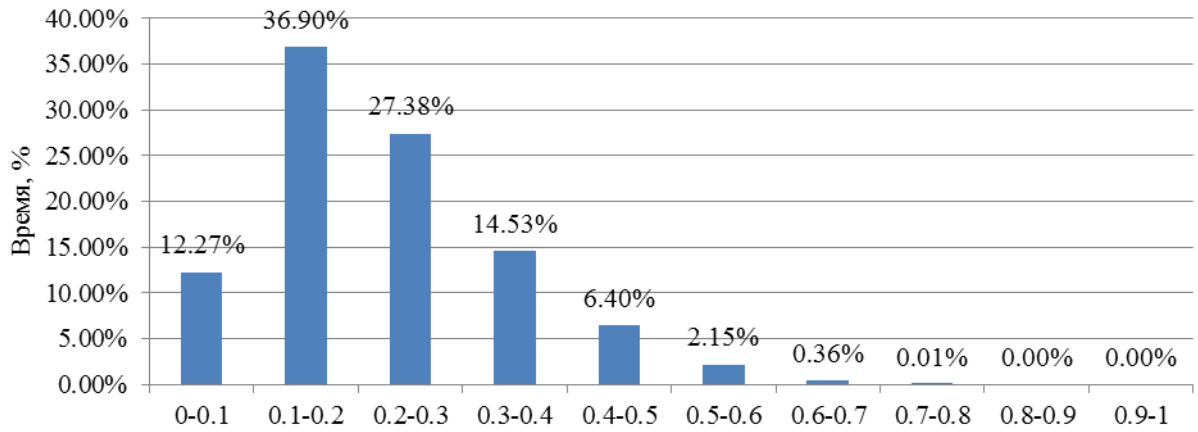


Рисунок П1.19 Временная загрузка диспетчера сектора Запад 3 для увеличенной интенсивности ВД.

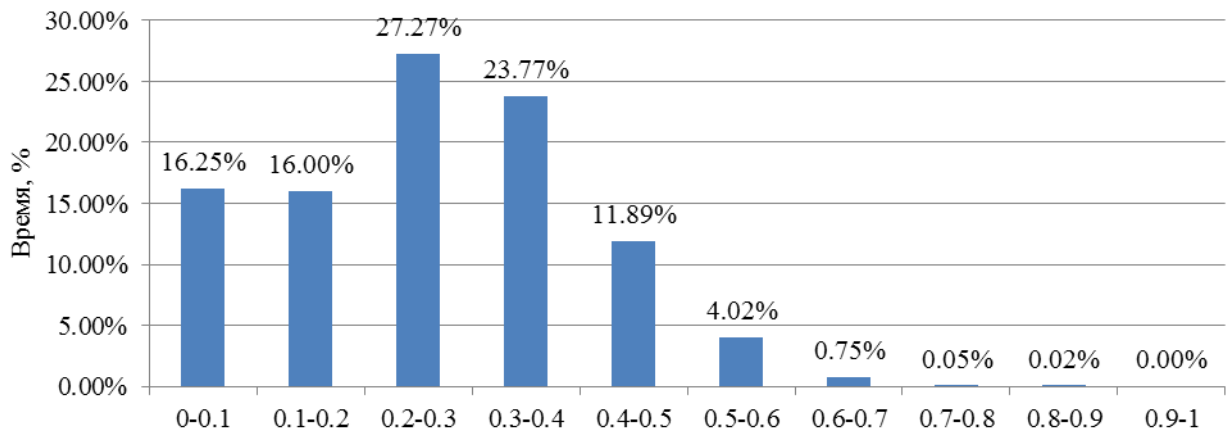


Рисунок П1.20 Временная загрузка диспетчера сектора Киев 1 для увеличенной интенсивности ВД

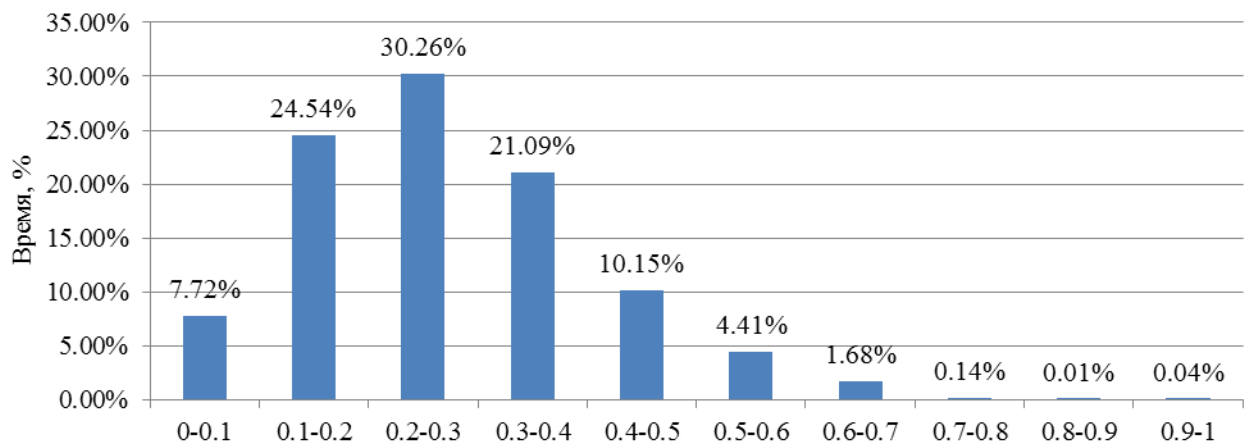


Рисунок П1.21 Временная загрузка диспетчера сектора Киев 2 для увеличенной интенсивности ВД.

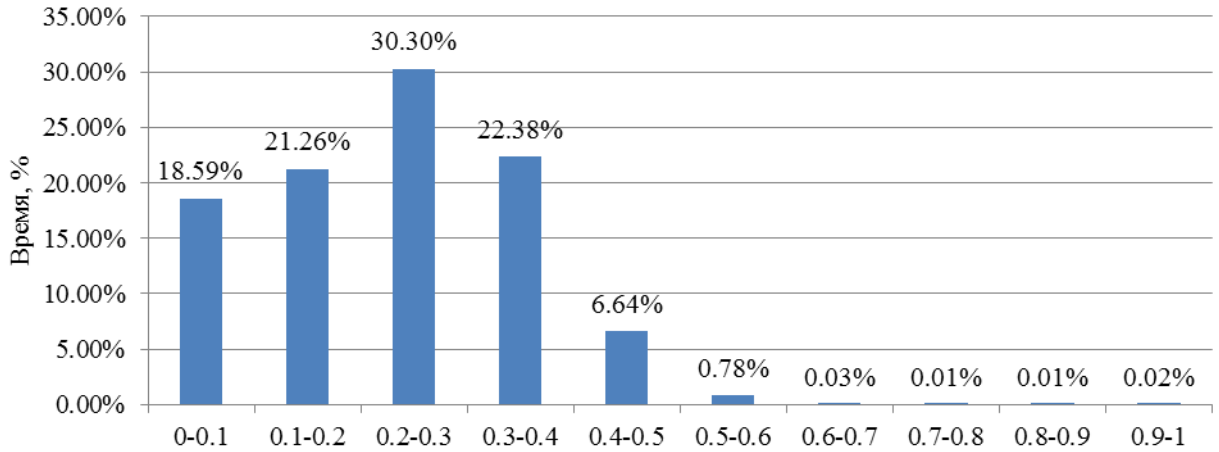


Рисунок П1.22 Временная загруженность диспетчера сектора Ленинград 1 для увеличенной интенсивности ВД.

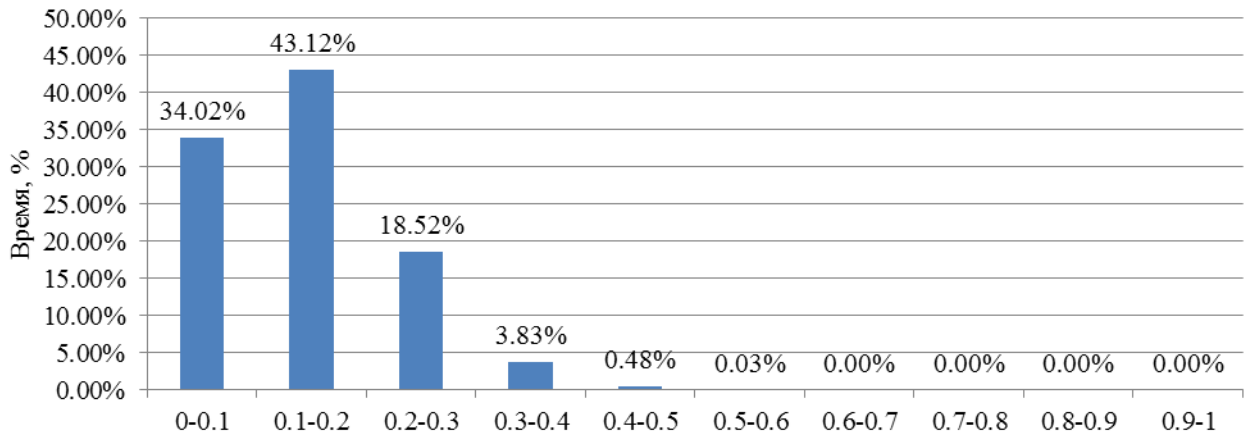


Рисунок П1.23 Временная загруженность диспетчера сектора Транзит для увеличенной интенсивности ВД.

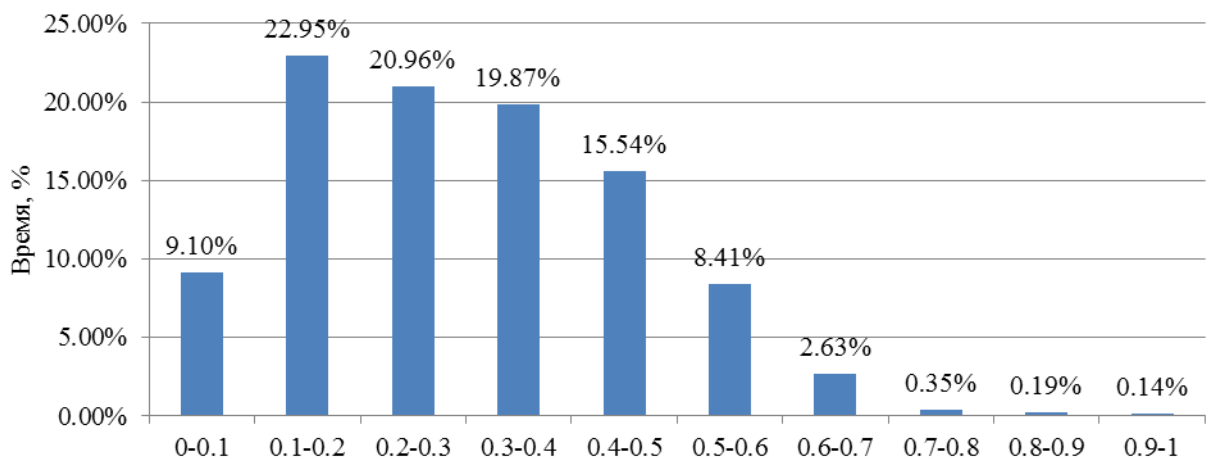


Рисунок П1.24 Временная загруженность диспетчера сектора Харьков 1 для увеличенной интенсивности ВД

**ПРИЛОЖЕНИЕ 2. РЕЗУЛЬТАТЫ РАСЧЕТА УСЛОВНЫХ ВЕРОЯТНОСТЕЙ
ОПАСНЫХ СОБЫТИЙ ПРИ ОТКАЗАХ СИСТЕМ СВЯЗИ И НАБЛЮДЕНИЯ**

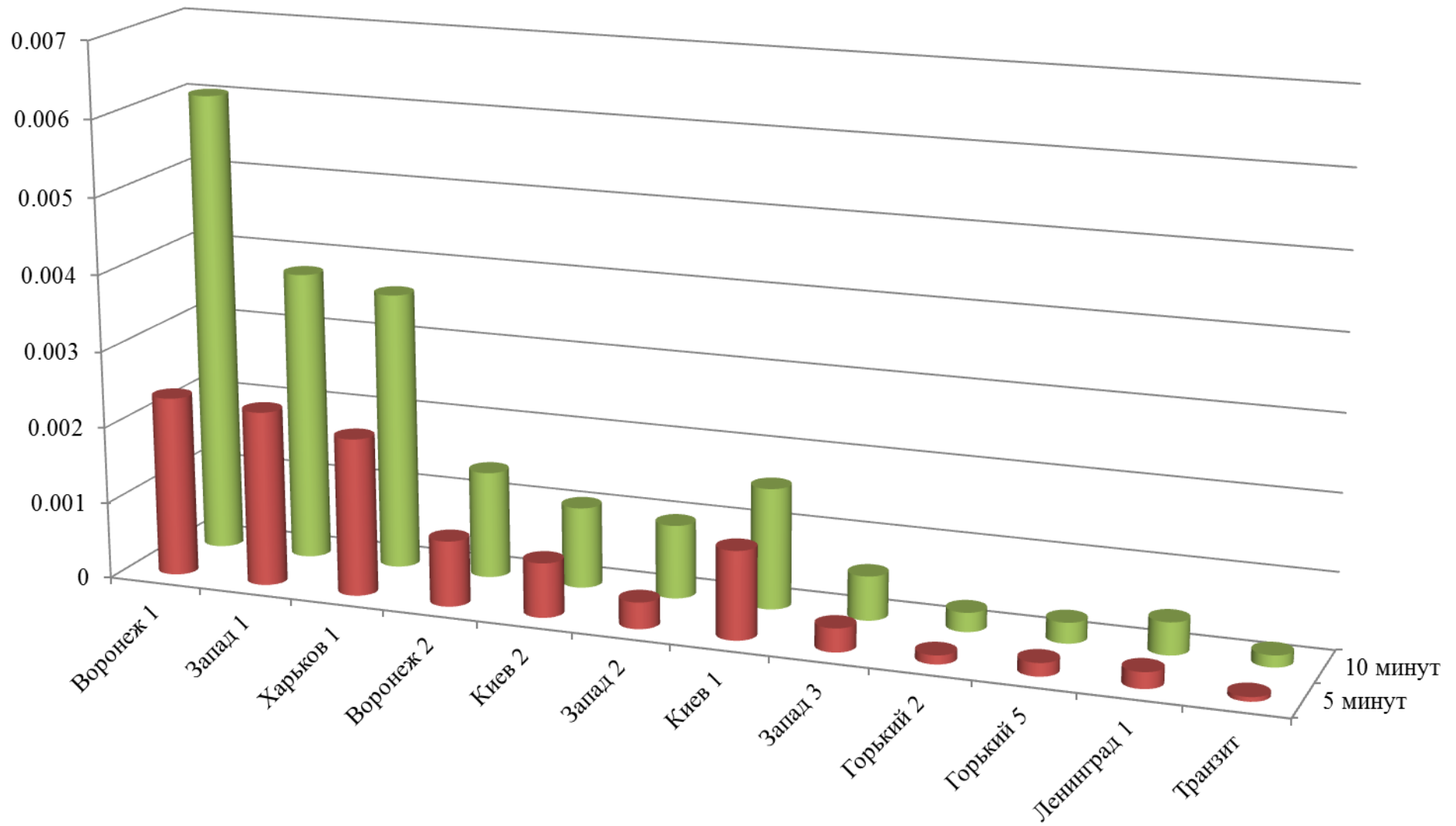


Рисунок П2.1 Оценка условной вероятности НМЭ при отказе системы наблюдения для исходной интенсивности потока ВД

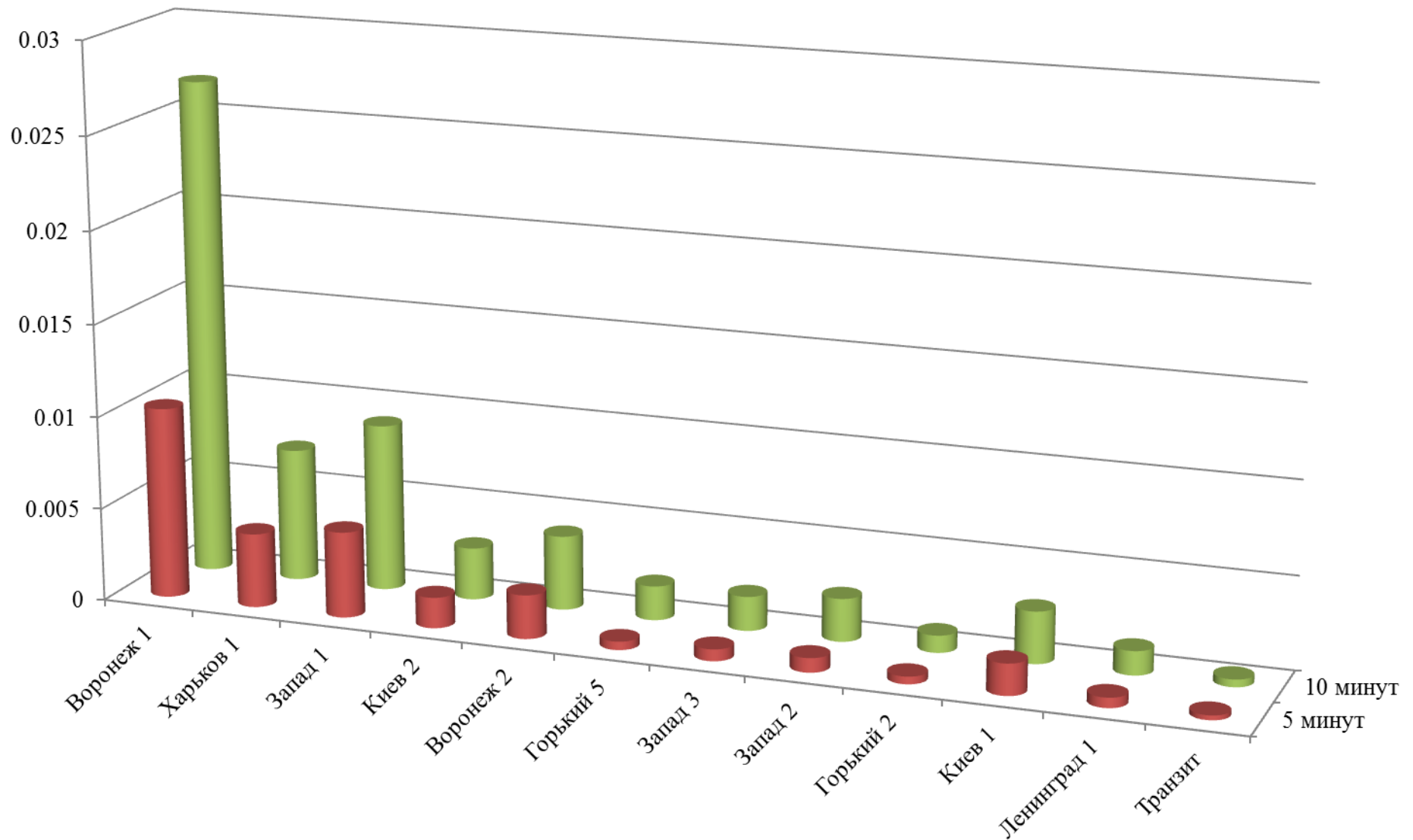


Рисунок П2.2 Оценка условной вероятности НМЭ при отказе системы наблюдения для увеличенной интенсивности потока ВД

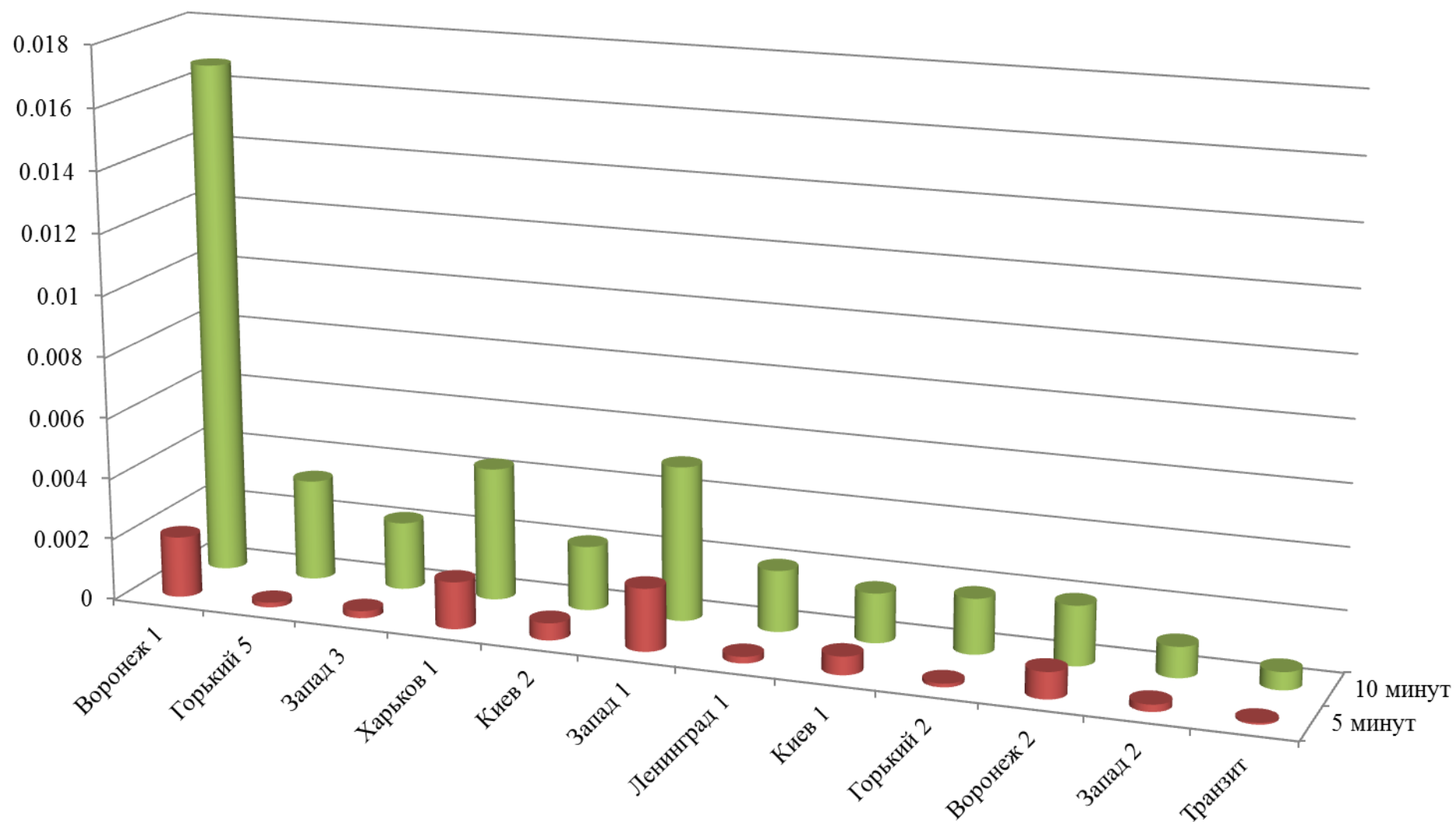


Рисунок П2.3 Оценка условной вероятности НМЭ при отказе системы связи для исходной интенсивности потока ВД

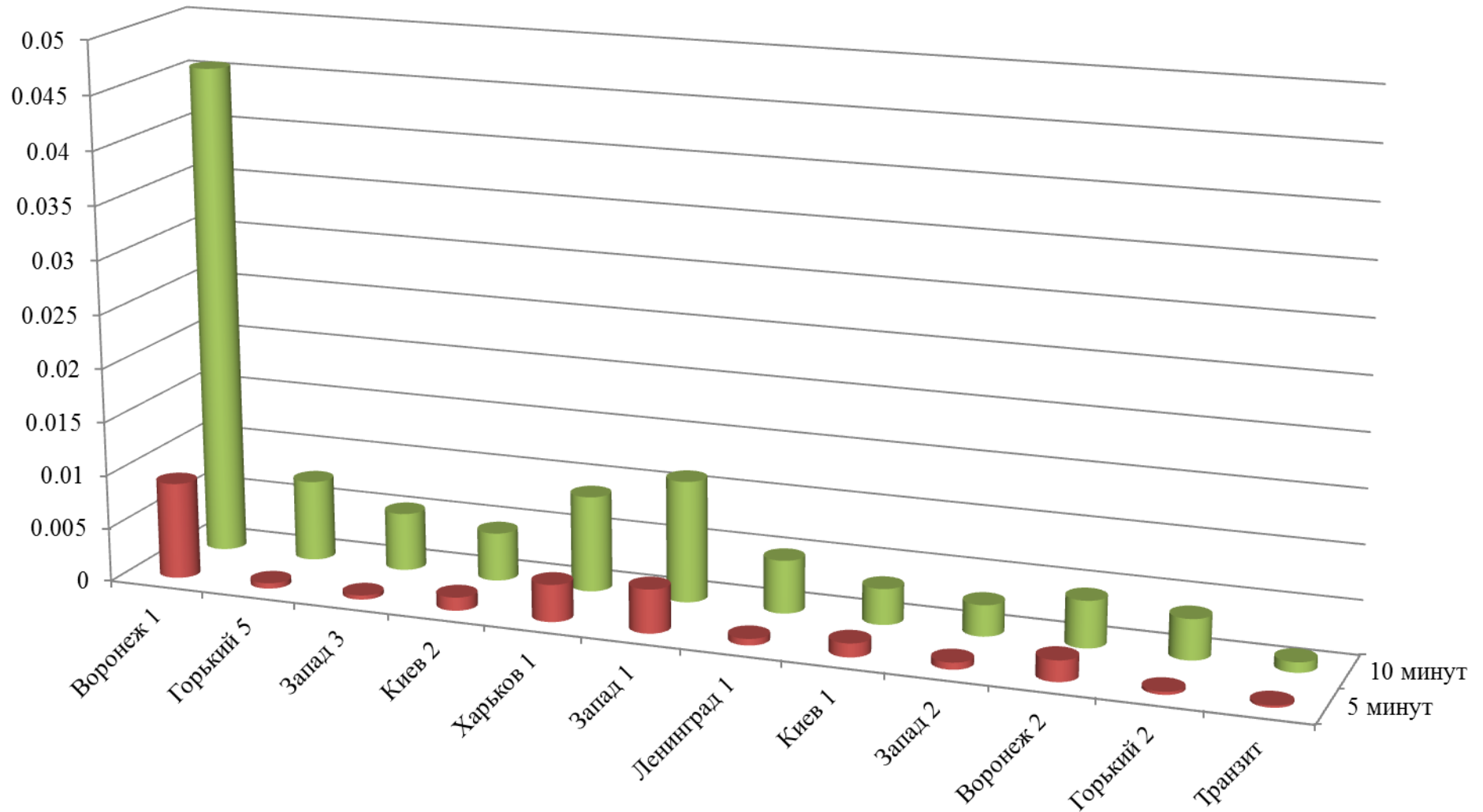


Рисунок П2.4 Оценка условной вероятности НМЭ при отказе системы наблюдения для увеличенной интенсивности потока ВД