

ФЕДЕРАЛЬНОЕ АГЕНТСТВО ВОЗДУШНОГО ТРАНСПОРТА
(РОСАВИАЦИЯ)

ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ
УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
«САНКТ-ПЕТЕРБУРГСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ
ГРАЖДАНСКОЙ АВИАЦИИ ИМЕНИ ГЛАВНОГО
МАРШАЛА АВИАЦИИ А.А. НОВИКОВА»

На правах рукописи

Торосян Анатолий Анатольевич

**МЕТОД ДИНАМИЧЕСКОЙ КОРРЕКТИРОВКИ НОРМАТИВОВ
ПРОПУСКНОЙ СПОСОБНОСТИ СЕКТОРОВ ОБСЛУЖИВАНИЯ
ВОЗДУШНОГО ДВИЖЕНИЯ НА ОСНОВЕ ГИБРИДНОЙ НЕЧЁТКОЙ
МОДЕЛИ**

Специальность 2.9.6 – Аэронавигация и эксплуатация авиационной техники

Диссертация на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Научный руководитель:
доктор технических наук, доцент
Костин Геннадий Александрович

Санкт-Петербург – 2026

ОГЛАВЛЕНИЕ

ВВЕДЕНИЕ	5
ГЛАВА 1. ПРОБЛЕМА НОРМИРОВАНИЯ ПРОПУСКНОЙ СПОСОБНОСТИ В СИСТЕМАХ ОРГАНИЗАЦИИ ВОЗДУШНОГО ДВИЖЕНИЯ – СОВРЕМЕННОЕ СОСТОЯНИЕ И ПОДХОДЫ К РЕШЕНИЮ	15
1.1. Обеспечение эффективного использования пропускной способности воздушного пространства на основе требований Глобального аэронавигационного плана ИКАО	15
1.2. Анализ современного состояния проблемы нормирования пропускной способности	23
1.3. Обзор существующих методов и подходов определения пропускной способности	31
1.3.1. Подходы, основанные на данных и машинном обучении.....	34
1.3.2. Обзор методик оценки пропускной способности сектора ОВД на основе загруженности диспетчера.....	36
1.3.3. Современные мировые практики нормирования пропускной способности.....	40
1.3.4. Сравнительный анализ методик нормирования пропускной способности	44
1.4. Обоснование выбора математического аппарата нечёткой логики.....	50
Выводы по главе 1	55
ГЛАВА 2. РАЗРАБОТКА МЕТОДА ДИНАМИЧЕСКОЙ КОРРЕКТИРОВКИ ПРОПУСКНОЙ СПОСОБНОСТИ СЕКТОРОВ ОВД НА ОСНОВЕ ГИБРИДНОЙ НЕЧЁТКОЙ МОДЕЛИ	58
2.1. Формальная постановка задачи и формализация системы нечёткого вывода	58
2.2. Детальное описание входных лингвистических переменных.....	73
2.2.1. Переменная объём воздушного движения (V).....	73

2.2.2. Переменная индекс структурной сложности воздушной обстановки (C)	76
2.2.3. Переменная коэффициент доступности воздушного пространства (R)..	79
2.3. База нечётких правил и механизм вывода.....	82
2.3.1. Структура модели и анализ топологии базы знаний	83
2.3.2. Математический аппарат логического вывода.....	85
2.4. Анализ базы правил и ключевые стратегии управления	88
2.5. Постановка задачи параметрической адаптации	91
Выводы по Главе 2	95
ГЛАВА 3. ПРОГРАММНАЯ РЕАЛИЗАЦИЯ МЕТОДА, ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ И АНАЛИЗ РЕЗУЛЬТАТОВ.....	98
3.1. Архитектура программного комплекса поддержки принятия решений	98
3.2. Алгоритм оценки структурной сложности воздушной обстановки сектора ОВД.....	102
3.2.1. Экспертная калибровка весовых коэффициентов структурной сложности воздушной обстановки	104
3.2.2. Метод расчёта индекса структурной сложности сектора ОВД по данным потенциально конфликтных ситуаций	109
3.2.3. Метод расчёта коэффициента доступности воздушного пространства	119
3.3. Алгоритм экспертной калибровки параметров функций принадлежности нечёткой модели.....	124
3.4. Численное моделирование и топологический анализ поверхностей решений	131
Выводы по Главе 3	137
ГЛАВА 4. РАСЧЁТНАЯ АПРОБАЦИЯ, ЭКСПЕРТНАЯ ОЦЕНКА И ПАРАМЕТРИЧЕСКАЯ АДАПТАЦИЯ НЕЧЁТКОЙ МОДЕЛИ ДИНАМИЧЕСКОЙ КОРРЕКТИРОВКИ ПРОПУСКНОЙ СПОСОБНОСТИ СЕКТОРОВ ОВД.....	139
4.1. Расчётная апробация модели на сценариях РДЦ Санкт-Петербург	139
4.2. Экспертная оценка результатов нечёткой модели.....	148

4.3. Алгоритм параметрической адаптации функций принадлежности по результатам экспертной классификации сценариев.....	153
4.4. Сравнительный анализ с нормативной Методикой.....	157
4.5. Рекомендации по практическому внедрению	160
Выводы по главе 4.....	163
ЗАКЛЮЧЕНИЕ	165
СПИСОК СОКРАЩЕНИЙ И УСЛОВНЫХ ОБОЗНАЧЕНИЙ.....	169
СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ.....	173
ПРИЛОЖЕНИЯ.....	191

ВВЕДЕНИЕ

Актуальность темы исследования. Одним из ключевых приоритетов, определенных «Транспортной стратегией Российской Федерации до 2030 года с прогнозом на период до 2035 года», является стратегическое развитие транспортного комплекса [1]. Основополагающими принципами стратегии предусмотрено повышение уровня безопасности и экономичности полётов, внедрение современных технологий в авиацию, укрепление национальной безопасности и обороноспособности РФ, снижение негативного воздействия на окружающую среду.

В условиях роста интенсивности воздушного движения (ВД), расширения практики гибкого использования воздушного пространства (ВП), внедрения элементов свободной маршрутизации и повышения требований к предсказуемости аэронавигационного обслуживания особую значимость приобретает задача оценки и нормирования пропускной способности секторов органов обслуживания воздушного движения (ОВД). В отличие от аэродромных задач, где ограничения в значительной степени определяются конфигурацией взлётно-посадочных полос, рулёжных дорожек и технологией обслуживания, в маршрутной среде секторов ОВД пропускная способность формируется под воздействием распределённых во времени и пространстве факторов. К ним относятся геометрия сектора, структура потоков воздушных судов (ВС), уровень конфликтности ВС, интенсивность координаций со смежными органами ОВД, наличие временных и постоянных ограничений использования ВП, метеорологические условия, состояние смежных секторов, доступность средств наблюдения и автоматизации, а также человеческий фактор [2, 3].

Вследствие этого одинаковое количество ВС в секторе может соответствовать принципиально различной загруженности сектора ОВД и различному уровню риска возникновения потенциально конфликтных ситуаций (ПКС). Следовательно, пропускная способность сектора ОВД не может

рассматриваться только как фиксированное количество ВС, обслуживаемых в единицу времени. В реальных условиях она представляет собой динамическую, многокритериальную и нелинейную характеристику, зависящую от совокупности количественных и качественных параметров воздушной обстановки (ВО).

Актуальность исследования подтверждается также международными тенденциями развития аэронавигационной системы [4-14]. В логике Глобального аэронавигационного плана ИКАО пропускная способность рассматривается как один из ключевых результатов функционирования системы организации воздушного движения, тесно связанный с задержками, предсказуемостью, эффективностью использования ВП и безопасностью полётов [4]. Это означает, что совершенствование методов её оценки и нормирования является не только прикладной, но и стратегически значимой научной задачей.

В отечественной практике расчёт нормативов пропускной способности (НПС) диспетчерских пунктов и секторов традиционно базируется на детерминированных методиках, использующих усреднённые параметры ВД и типовые условия работы диспетчера [15, 16]. Вместе с тем внедрение новых процедур использования ВП, повышение изменчивости эксплуатационных условий и необходимость учёта динамической сложности ВО приводят к методологическому разрыву между действующими нормативными подходами и фактическими условиями функционирования секторов ОВД. «Концепция научно-технологического развития транспортного комплекса Российской Федерации на период до 2035 года» закрепляет приоритет цифровизации, развития технологий больших данных и искусственного интеллекта, а также развитие методов расчёта пропускной способности и предиктивной аналитики для управления потоками и инфраструктурой [17]. Указанные направления непосредственно связаны с задачами организации воздушного движения (ОрВД), где качество решений определяется полнотой данных и адекватностью моделей.

В этих условиях возникает необходимость разработки методов динамической оценки и коррекции пропускной способности секторов ОВД, ориентированных на комплексный учёт изменяющихся условий функционирования аэронавигационной

системы и обеспечивающих интерпретируемость получаемых результатов, возможность их экспертной оценки и согласованность с действующими нормативными подходами.

Поставленная в диссертации научная задача соотносится с направлениями, закреплёнными в паспорте научной специальности 2.9.6 «Аэронавигация и эксплуатация авиационной техники», и соответствует пунктам 9 – «Аэронавигационное обеспечение полётов, закономерности процессов навигации, управления движением отдельных воздушных судов и их потоков», и 10 – «Совершенствование методов использования воздушного пространства, средств радиосвязи, навигации и наблюдения для решения задач управления воздушным движением».

Степень разработанности научной проблемы. Общие подходы к оценке пропускной способности элементов аэронавигационной системы, управлению потоками воздушного движения, обеспечению безопасности полётов и повышению эффективности обслуживания воздушного движения нашли отражение в документах ИКАО, FAA, EUROCONTROL, а также в трудах отечественных и зарубежных исследователей.

Теоретические и методологические проблемы обеспечения безопасности полетов при ОВД, развития системы ОрВД, в том числе нормирования пропускной способности зон ОВД отражены в трудах различных видных деятелей науки: Алешина В.И., Анодиной Т.Г., Богданова С.М., Брызгалова В.М., Дарымова Ю.П., Демьянчука В.С., Кейна А.Н., Кизько В.Г., Красова А.И., Крыжановского Г.А., Кузнецова В.Л., Липаева В.В., Михальчевского Ю.Ю., Новикова П.П., Пятко С.Г., Пантелея В.Г., Плясовских А.П., Радченко С.И., Рудельсона Л.Е., Сабо Д., Соколова Е.С., Соколова Н.Н., Унгурияна С.Г., Цепляева Ю.Ф., Шапиро Д.И., Шутко Н.А., Шутова В.Г. и других.

Среди зарубежных исследователей, работы которых связаны с оценкой пропускной способности воздушного пространства, сложностью воздушной обстановки, загруженностью диспетчера, управлением потоками воздушного движения и безопасностью ОрВД, следует выделить I.V. Laudeman, R.H. Mogford,

C.R. Wanke, A.J. Masalonis, M.B. Callaham, P. Kopardekar, E. Feron, A. Pritchett, K. Lee, J. Krozel, J.S.B. Mitchell, V. Polishchuk, J. Prete, M. Prandini, J. Hu, V. Putta, H. Erzberger, R. Paielli, B. Sridhar, S. Grabbe, J.P. Clarke, K. Bilimoria, D. Delahaye, P. Brooker, B. Hilburn, M.R. Endsley, C.D. Wickens, R. Parasuraman и других.

Методологические основы нечёткой логики, лингвистических переменных, нечёткого вывода, мягких вычислений и гибридных интеллектуальных моделей разработаны в трудах L.A. Zadeh, R.E. Bellman, E.H. Mamdani, S. Assilian, T. Takagi, M. Sugeno, H. Tanaka, H.-J. Zimmermann, D. Dubois, H. Prade, R.R. Yager, W. Pedrycz, B. Kosko, J.-S.R. Jang, D. Nauck, F. Klawonn, R. Kruse, L. Rutkowski и других исследователей. В отечественной научной литературе вопросы применения нечёткой логики, интеллектуальных систем, принятия решений в условиях неопределённости и моделирования сложных человеко-машинных систем рассматривались в работах Аронова И.З., Гипича Г.Н., Евдокимова В.Г., Зубкова Б.В., Куклева Е.А., Леоненкова А.В., Орловского С.А., Поспелова Д.А., Ротштейна А.П., Хорошевского В.Ф. и других специалистов.

Вместе с тем, несмотря на значительный объём исследований в области оценки пропускной способности, рабочей нагрузки диспетчера УВД и интеллектуальных методов поддержки принятия решений, проблема динамического нормирования пропускной способности диспетчерских секторов ОВД в условиях маршрутной среды не имеет завершённого решения. В существующих подходах недостаточно разработаны методы, обеспечивающие комплексный учёт изменяющихся условий функционирования аэронавигационной системы. Кроме того, отсутствуют решения, позволяющие осуществлять переход от статической нормативной пропускной способности к её динамической коррекции при сохранении интерпретируемости результатов и возможности их применения в оперативном контуре ОВД.

Следовательно, решение научной задачи разработки метода динамической коррекции пропускной способности сектора ОВД, учитывающего изменчивые параметры воздушной обстановки и основанного на интерпретируемом математическом аппарате, является актуальным.

Объект исследования. Система организации воздушного движения, процессы обслуживания воздушного движения и методы нормирования пропускной способности секторов ОВД.

Предмет исследования. Методы динамической оценки и корректировки нормативной пропускной способности секторов ОВД.

Цель и задачи исследования.

Целью диссертации является повышение эффективности функционирования системы ОрВД посредством разработки нового научно обоснованного метода динамической корректировки пропускной способности секторов ОВД в рамках положений Глобального аэронавигационного плана ИКАО.

В соответствии с целью исследования были поставлены и решены следующие задачи:

1. Анализ факторов, влияющих на пропускную способность и загруженность секторов ОВД, и обосновать их представление в виде совокупности входных параметров модели.
2. Разработка математической модели динамической корректировки пропускной способности сектора ОВД на основе аппарата нечёткой логики.
3. Разработка метода количественной оценки структурной сложности ВО на основе параметров взаимодействия ВС.
4. Разработка метода учёта ограничений использования ВП при оценке пропускной способности секторов ОВД.
5. Разработка метода корректировки нормативной пропускной способности секторов ОВД.
6. Разработка программного комплекса системы поддержки принятия решений (СППР), реализующего разработанную модель, и выполнение функциональной проверки корректности расчёта коэффициента динамической корректировки НПС на наборе расчётных сценариев.

Научная новизна работы заключается в следующем:

- раскрыты несоответствия действующих методик нормирования пропускной способности особенностям состояния секторов ОВД в современных условиях;

- предложен новый подход к динамической корректировке пропускной способности секторов ОВД;

- введён коэффициент коррекции нормативной пропускной способности секторов ОВД;

- разработан метод количественной оценки структурной сложности ВО на основе прогнозируемых ПКС, формируемых средствами среднесрочного обнаружения конфликтов MTCD;

- разработан метод учёта ограничений ВП на основе коэффициента доступности ВП, позволяющий формализовать влияние погодных, режимных и иных ограничений на пропускную способность секторов ОВД в рамках единой модели корректировки пропускной способности.

Теоретическая значимость диссертации заключается в развитии методов нормирования пропускной способности секторов ОВД за счёт формализации влияния изменяющихся условий ВО на допустимую загрузку секторов ОВД. Полученные результаты расширяют методологические основы оценки пропускной способности секторов ОВД и развивают интерпретируемые интеллектуальные методы, применяемые в задачах ОрВД. В теоретическом отношении предложенный подход позволяет учитывать совокупное влияние интенсивности ВД, структурной сложности потоков ВС и ограничений использования ВП в рамках единой модели динамической корректировки пропускной способности секторов ОВД.

Практическая значимость диссертации заключается в разработке метода динамической корректировки нормативов пропускной способности секторов ОВД и программного комплекса СППР, реализующего соответствующие алгоритмы. Практически значимыми результатами являются:

- повышение адекватности оценки пропускной способности секторов ОВД в изменяющихся условиях ВО;

- возможность учёта структуры потока ВС и ограничений ВП при принятии оперативных решений;

- возможность использования разработанного подхода в СППР для старших диспетчеров и руководителей полётов (РП);
- возможность адаптации модели к особенностям конкретных секторов ОВД;
- использование результатов диссертационной работы в практике тренажерной подготовки действующих и будущих диспетчеров управления воздушным движением в тренажерных центрах регионального центра ЕС ОрВД (Санкт-Петербург) филиала «Аэронавигация Северо-Запада» ФГУП «Госкорпорация по ОрВД» и ФГБОУ ВО СПбГУ ГА им. А.А. Новикова.

Методология и методы исследования. Для решения поставленных в диссертации задач использовались методы математического моделирования, теории нечётких множеств и нечёткой логики, теории графов, математической статистики, регрессионного анализа, оптимизации, а также методы компьютерного моделирования и программной реализации алгоритмов.

При выполнении исследования применялись:

- теория нечётких множеств и нечёткого вывода – для формализации качественных критериев и построения базы правил;
- теория графов – для моделирования взаимодействий ВС и оценки структурной сложности ВО;
- методы математической статистики и регрессионного анализа – для обработки результатов экспертного оценивания и калибровки параметров модели;
- методы оптимизации, в том числе градиентные методы, – для настройки параметров нечёткой модели;
- компьютерное моделирование и программная реализация алгоритмов – для создания и проверки программного прототипа СППР.

Основные положения, выносимые на защиту:

1. Метод динамической корректировки нормативной пропускной способности секторов ОВД на основе аппарата нечёткой логики, позволяющий обеспечить формирование коэффициента коррекции НПС $K_{кор}(t)$ с учётом относительного объёма ВД, структурной сложности ВО и доступности ВП.

2. Метод количественной оценки структурной сложности воздушной обстановки на основе прогнозируемых ПКС, формируемых средствами среднесрочного обнаружения конфликтов (MTCD), позволяющий учитывать типы взаимодействия ВС, геометрию их конфликтных связей и вертикальную динамику.

3. Метод учёта ограничений использования ВП на основе коэффициента доступности ВП, обеспечивающий корректировку пропускной способности секторов ОВД с учётом метеорологических, режимных и иных ограничений ВП.

4. Алгоритм динамической корректировки нормативной пропускной способности, реализующий возможное адаптивное управление допустимой загрузкой секторов ОВД.

Достоверность полученных результатов.

Достоверность полученных результатов подтверждается корректным использованием апробированного математического аппарата, применением современных методов обработки данных и моделирования, согласованностью теоретических положений с результатами экспертного оценивания, расчётной апробацией на сценариях районного диспетчерского центра (РДЦ) Санкт-Петербург, а также апробацией результатов исследования в научных публикациях и докладах.

Апробация результатов.

Основные результаты диссертационной работы докладывались и обсуждались на научных и научно-практических конференциях, семинарах и отраслевых мероприятиях, посвящённых вопросам аэронавигации, организации воздушного движения, безопасности полётов и интеллектуальных методов поддержки принятия решений:

1. Международной молодежной научно-практической конференции «Состояние и основные тенденции развития гражданской авиации», Санкт-Петербург, 2023 г.

2. Международной научно-практической конференции «Цифровизация: новые тренды и опыт внедрения», Уфа, 2025 г.

3. III Международной молодежной научно-практической конференции «Актуальные вопросы гражданской авиации: наука, техника и общество», Санкт-Петербург, 2025 г.

4. II Всероссийской научно-практической конференции с международным участием «Актуальные вопросы авиационной науки и технологий», Ульяновск, 2025 г.

5. Международном Авиационном Инновационном форуме (МАИФ-2025), 30 сентября -03 октября, Санкт-Петербург, 2025 г.

6. III Всероссийской научно-практической конференции с международным участием «Современные тенденции и проблемы подготовки специалистов транспорта», Ульяновск, 2025 г.

7. II Международной молодежной научно-практической конференции аспирантов и молодых ученых «Гражданская авиация в условиях глобальных изменений: наука и практика», Москва, 2026 г.

8. Международной научно-технической конференции, посвященной 55-летию МГТУ ГА «Гражданская авиация на современном этапе развития науки, техники и общества», Москва, 2026 г.

Публикации результатов. Основные результаты диссертационного исследования отражены в 10 научных трудов, в том числе 4 – в научных журналах из Перечня рецензируемых научных изданий ВАК при Минобрнауки России и приравненных к ним: [31, 116, 118, 123], в том числе 2 свидетельства о государственной регистрации программ для ЭВМ (Приложение Б) и в 6 публикациях, индексируемых в РИНЦ.

Связь работы с крупными научными программами.

Работа непосредственно связана с направлениями развития аэронавигационной системы, определяемыми Глобальным аэронавигационным планом ИКАО [4, 8-11], а также с задачами цифровизации и повышения эффективности транспортного комплекса Российской Федерации [17].

Личный вклад автора.

Личный вклад автора состоит в постановке научной задачи, разработке структуры и математической модели динамической оценки пропускной способности сектора ОВД, формировании базы правил нечёткого вывода, разработке метода оценки структурной сложности ВО, организации и проведении экспертного исследования, статистической обработке полученных результатов, разработке программного прототипа и выполнении численного моделирования.

Содержание диссертационной работы и опубликованных по теме исследований результатов являются полученными автором научными решениями, обоснованными теоретическими исследованиями и результатами моделирования, а также личным опытом автора по ОВД.

Реализация результатов работы. Результаты диссертационного исследования были апробированы в технологической деятельности тренажерного центра и могут быть использованы при решении задач нормирования пропускной способности в РДЦ регионального центра ЕС ОрВД (Санкт-Петербург) филиала «Аэронавигация Северо-Запада» ФГУП «Госкорпорация по ОрВД», при обосновании динамической корректировки пропускной способности секторов ОВД, а также используются в учебном процессе при подготовке специалистов по ОВД на диспетчерском тренажере ФГБОУ ВО СПбГУ ГА им. А.А. Новикова, что подтверждено соответствующими актами (представлены в Приложении В).

Структура и объем диссертационной работы.

Диссертация состоит из введения, четырёх глав, заключения, перечня сокращений и списка литературы. Общий объём диссертации составляет 197 страниц текста. Работа содержит 20 рисунков, 21 таблицу, приложения. Список литературы включает 154 наименования.

ГЛАВА 1. ПРОБЛЕМА НОРМИРОВАНИЯ ПРОПУСКНОЙ СПОСОБНОСТИ В СИСТЕМАХ ОРГАНИЗАЦИИ ВОЗДУШНОГО ДВИЖЕНИЯ – СОВРЕМЕННОЕ СОСТОЯНИЕ И ПОДХОДЫ К РЕШЕНИЮ

1.1. Обеспечение эффективного использования пропускной способности воздушного пространства на основе требований Глобального аэронавигационного плана ИКАО

Современный этап развития глобальной аэронавигационной системы характеризуется ростом требований к безопасности полётов, пропускной способности, предсказуемости и устойчивости воздушного движения [2, 4-7, 18-23]. В этих условиях совершенствование ОрВД должно рассматриваться не как совокупность разрозненных технических решений, а как согласованный процесс модернизации, основанный на единых стратегических ориентирах, измеримых показателях эффективности и поэтапном внедрении операционных улучшений. Методологическую основу такого развития на международном уровне формирует Международная организация гражданской авиации, определяющая общие направления эволюции глобальной системы CNS/ATM.

Ключевое место в данной системе занимает Глобальный аэронавигационный план ИКАО (Global Air Navigation Plan, GANP) [4], представляющий собой основной стратегический документ ИКАО в области аэронавигации. Его назначение состоит в согласовании развития глобальной аэронавигационной системы на основе единых концептуальных принципов, рамки эффективности и согласованных механизмов внедрения. GANP поддерживается официальным порталом GANP Portal, на котором представлены его стратегические и технические компоненты, включая рамку эффективности, базовые строительные блоки и элементы блочной модернизации аэронавигационной системы.

В методологическом отношении GANP не является изолированным документом. Он развивает положения Глобальной эксплуатационной концепции ОрВД (Global Air Traffic Management Operational Concept) [5] и опирается на руководящие материалы по системным требованиям к ОрВД (Doc 9882) [6] и глобальной эффективности аэронавигационной системы (Doc 9883) [7]. Тем самым GANP образует центральный элемент согласованной концептуальной рамки, в пределах которой рассматриваются вопросы безопасности, интероперабельности, эффективности и пропускной способности аэронавигационной системы.

Для исследований, посвящённых оценке и нормированию пропускной способности, GANP имеет принципиальное значение по нескольким основаниям. Во-первых, он задаёт международно признанную систему целевых ориентиров развития ОрВД, что позволяет соотносить исследовательские результаты с глобальной практикой. Во-вторых, он связывает показатели эффективности с конкретными организационными и техническими механизмами модернизации через Basic Building Blocks (BBB) и Aviation System Block Upgrades (ASBU) [8-14]. В-третьих, GANP реализует подход, основанный на характеристиках, в рамках которого состояние и развитие аэронавигационной системы оцениваются по достигаемым результатам, а не только по факту внедрения отдельных технологий.

Существенной особенностью GANP является его многоуровневая организация. В официальной архитектуре плана выделяются глобальный стратегический, глобальный технический, региональный и национальный уровни. Такая структура обеспечивает согласование долгосрочных целей развития с прикладными механизмами их реализации и позволяет увязать глобальные ориентиры ИКАО с региональными и государственными планами. Практическая ценность многоуровневой архитектуры состоит в обеспечении сквозной прослеживаемости от стратегической цели до конкретного мероприятия по модернизации аэронавигационной системы. Именно эта логика делает GANP особенно значимым для задач повышения пропускной способности, поскольку позволяет рассматривать соответствующие меры не изолированно, а в контексте общей стратегии развития ОрВД.

Рисунок 1.1 иллюстрирует четыре уровня GANP и их назначение [4]:

Level 1 (Глобальный стратегический) – стратегические направления и концептуальная дорожная карта;

Level 2 (Глобальный технический) – технический контент (ASBU и Performance Framework, Basic Building Blocks и др.);

Level 3 (Региональный) – региональные планы, согласованные с глобальными целями;

Level 4 (Национальный) – национальные планы и оценка выгод/затрат.

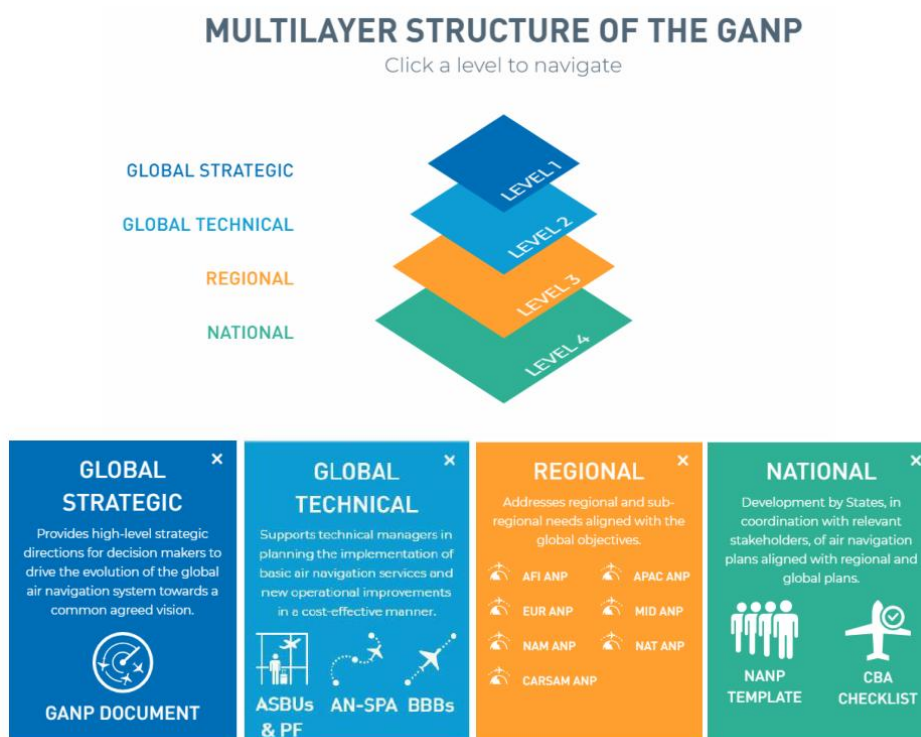


Рисунок 1.1 – Многоуровневая структура GANP [4]

Принципиальной методологической основой GANP является подход, основанный на характеристиках. В его рамках развитие аэронавигационной системы рассматривается как управление по измеримым результатам, отражающим ожидания авиационного сообщества. В официальной логике GANP используются ключевые области эффективности (Key Performance Areas, КРА), в пределах которых формируются соответствующие показатели, целевые ориентиры и процедуры оценки. Для тематики настоящего исследования это особенно важно,

поскольку пропускная способность выступает не как изолированный параметр, а как один из существенных результатов функционирования аэронавигационной системы, тесно связанный с задержками, предсказуемостью, устойчивостью планирования и эффективностью использования воздушного пространства.

Особого внимания заслуживает то обстоятельство, что рамки показателей эффективности GANP ориентирует государства и поставщиков аэронавигационного обслуживания (АНО) не на формальное внедрение отдельных технологий, а на достижение конкретных эксплуатационных эффектов. В этом состоит одно из ключевых отличий современного подхода ИКАО от более ранних технологически ориентированных моделей развития: приоритет отдается не самой технологии, а её вкладу в безопасность, регулярность, устойчивость и пропускную способность системы. Следовательно, оценка эффективности развития ОрВД должна строиться через анализ достигнутых результатов, а не только через перечень реализованных мероприятий.

Для задач нормирования пропускной способности данный подход имеет принципиальное значение. Он показывает, что пропускная способность должна рассматриваться как управляемый показатель эффективности, отражающий способность системы обеспечивать обслуживание воздушного движения при заданных ограничениях безопасности и качества обслуживания. При этом её изменение связано не только с числом воздушных судов, но и с организацией потоков, зрелостью процедур совместного принятия решений (CDM), качеством обмена данными, уровнем автоматизации и совершенством инструментов поддержки принятия решений.

Достижение требуемого уровня эффективности предполагает принятие непростых решений и закрепление чётких обязательств. Исходя из имеющихся представлений о будущем, связанных с ним возможностях и вызовах, аэронавигационная система должна быть ориентирована на достижение заранее определённых одиннадцати ключевых направлений деятельности (КРА) (рисунок 1.2) [4].

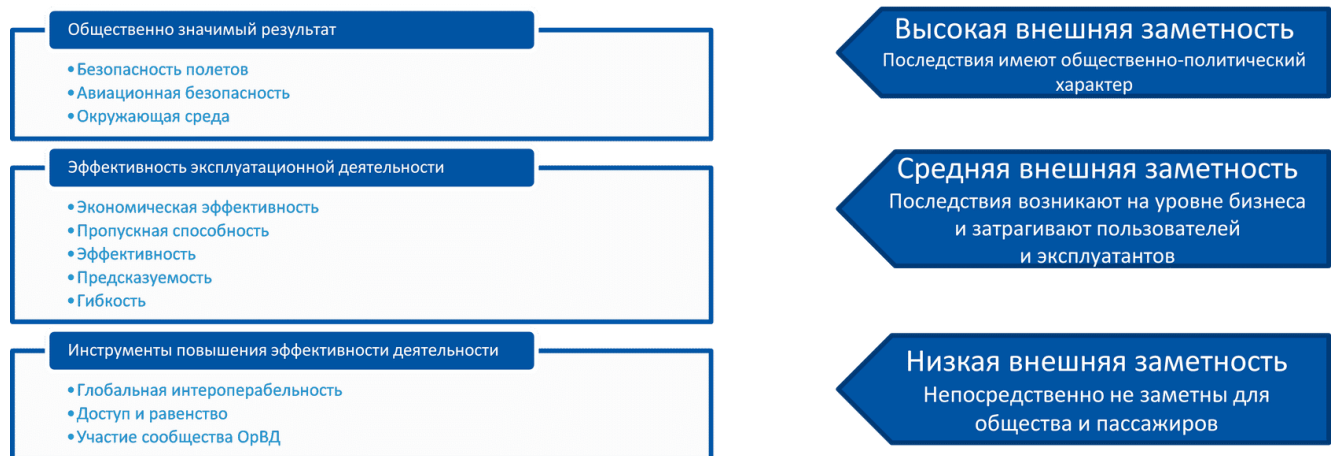


Рисунок 1.2 – Ключевые показатели эффективности (КПА) GANP [4]

Перспективные ориентиры развития, закрепляемые в GANP, также представляют интерес для рассматриваемой тематики, поскольку позволяют оценивать задачу повышения пропускной способности не как локальную технологическую цель, а как часть более широкого процесса эволюции аэронавигационной системы. В документах ИКАО и материалах GANP Portal развитие системы рассматривается в долгосрочной перспективе, в том числе через целевые уровни эффективности, достижение которых должно обеспечиваться поэтапным внедрением организационных и технических преобразований. Для исследования пропускной способности это важно в том отношении, что позволяет соотнести предлагаемые методические решения не только с текущим состоянием практики, но и с общим вектором развития глобальной аэронавигационной системы.

Концепцией GANP в перспективе до 2040 года заложен комплекс преобразований, которые необходимы для достижения 11 КПА (рисунок 1.3).

КРА	Желательный показатель эффективности
ДОСТУП И РАВЕНСТВО	Ни один член авиационного сообщества не должен быть исключен или подвергнут несправедливому обращению
ПРОПУСКНАЯ СПОСОБНОСТЬ	Номинальная пропускная способность, которая легко масштабируется в зависимости от спроса
	Негативные события не должны прерывать предоставление обслуживания и не должны оказывать существенного влияния на производительность системы
ЭФФЕКТИВНОСТЬ ЗАТРАТ	Отсутствие увеличения общих прямых затрат на аэронавигационное обслуживание при сохранении безопасности полетов и качества обслуживания
	Значительное увеличение производительности аэронавигационного обслуживания независимо от спроса
ЭФФЕКТИВНОСТЬ	Сокращение разрыва между достигнутой эффективностью полета и оптимальной траекторией, к которой стремятся пользователи воздушного пространства
ОКРУЖАЮЩАЯ СРЕДА	Недостатки, связанные с аэронавигационным обслуживанием, должны постепенно устраняться, чтобы способствовать достижению глобальных желательных целей ИКАО в отношении эмиссии CO ₂
	Использование преимуществ, полученных благодаря повышению эффективности полетов
ГИБКОСТЬ	Способность обеспечивать внесение требуемых изменений в траектории конкретных полетов
ИНТЕРОПЕРАБЕЛЬНОСТЬ	Совместимость систем на оперативном и техническом уровне
УЧАСТИЕ СООБЩЕСТВА ОРВД	Предварительно согласованный уровень участия для максимального совместного использования аэронавигационных ресурсов
ПРЕДСКАЗУЕМОСТЬ	Не повышение вариативности предоставления аэронавигационного обслуживания, включая наличие соответствующих активов
БЕЗОПАСНОСТЬ ПОЛЕТОВ	Полное отсутствие авиационных происшествий, связанных с аэронавигационным обслуживанием, и значительное (50%) сокращение серьезных инцидентов, связанных с аэронавигационным обслуживанием
АВИАЦИОННАЯ БЕЗОПАСНОСТЬ	Отсутствие существенных сбоев, вызванных киберинцидентами

Рисунок 1.3 – Информация о желательных показателях эффективности GANP до 2040 года [4]

Практическим механизмом реализации стратегических ориентиров GANP выступают BBB и ASBU. Базовые строительные блоки задают минимально необходимую основу функционирования аэронавигационной системы и определяют набор базовых услуг и возможностей, без которых последующее развитие невозможно. В свою очередь, ASBU представляют собой структурированную систему операционных усовершенствований,

ориентированных на достижение измеримых результатов в заранее определённых направлениях. Такая логика означает, что модернизация рассматривается не как внедрение разрозненных технологий, а как целенаправленный процесс повышения эффективности аэронавигационной системы.

В контексте пропускной способности наибольшее значение имеют те направления развития, которые обеспечивают повышение точности планирования, снижение неопределённости и более согласованное использование ресурсов ВП. К ним относятся совершенствование управления потоками ВД, развитие совместного принятия решений, расширение цифрового обмена аэронавигационной информацией, переход к траекторному управлению и развитие средств автоматизированной поддержки диспетчерских решений. Их совокупное влияние проявляется в снижении избыточных защитных интервалов эшелонирования, повышении предсказуемости ВД и увеличении фактической эффективности использования ВП без снижения установленного уровня безопасности.

С методологической точки зрения это означает, что пропускная способность в логике GANP трактуется не как фиксированное свойство отдельного сектора или аэродрома, а как результат взаимодействия множества факторов: структуры ВП, процедур обслуживания, качества информационного обмена, уровня автоматизации, зрелости процессов управления потоками ВД и наличия соответствующих сервисов CNS/ATM. Поэтому повышение пропускной способности в международной практике достигается, как правило, не единичной мерой, а комбинацией процедурных, организационных, информационных и технологических решений.

Важнейшее значение для рассматриваемой тематики имеет связь GANP с управлением потоками ВД (ATFM). В официальных положениях ИКАО [24-28] управлением потоками ВД рассматривается как средство поддержания безопасного, упорядоченного и эффективного потока ВД за счёт максимально возможного использования доступной пропускной способности и согласования спроса с возможностями системы. Отсюда следует, что пропускная способность в международной нормативной логике выступает не только как расчётная

характеристика, но и как объект оперативного управления, непосредственно связанный с задержками, предсказуемостью и устойчивостью функционирования сети.

Для задач настоящего исследования это имеет принципиальное значение. Если пропускная способность рассматривается в GANP как один из ключевых результатов функционирования аэронавигационной системы и одновременно как объект управленческого воздействия, то её оценка не может ограничиваться только статической нормой, выраженной числом воздушных судов в час. Необходимым становится учёт факторов, определяющих реальную достижимую способность сектора обеспечивать обслуживание воздушного движения в конкретных условиях. Иными словами, международная логика развития ОрВД уже сама по себе подводит к необходимости перехода от исключительно фиксированных нормативных представлений к более гибким моделям, учитывающим динамику воздушной обстановки.

В прикладном смысле «пропускная способность» проявляется в двух связанных формах:

- заявленная пропускная способность сектора/аэродрома/узла, определяемая с учётом требований безопасности, процедур и доступных ресурсов;
- эффективная пропускная способность, зависящая от текущих условий (погода, конфигурация ВПП, ограничения использования ВП, отказ оборудования, нештатные ситуации, нестабильность расписаний).

Таким образом, анализ положений Глобального аэронавигационного плана ИКАО показывает, что современная международная концепция развития ОрВД основана на трёх взаимосвязанных принципах: управлении по измеримым характеристикам эффективности, поэтапной модернизации аэронавигационной системы и согласовании спроса с доступной пропускной способностью. В этой логике пропускная способность выступает не как фиксированная константа, а как результат взаимодействия процедурных, организационных, технологических и информационных факторов. Для исследования, посвящённого нормированию пропускной способности сектора ОВД, это означает методологическую

обоснованность перехода от исключительно статических нормативных представлений к более гибким моделям, учитывающим изменчивость условий воздушного движения и состояния воздушного пространства. Россия активно участвует в реализации GANP, адаптируя международные стандарты и технологии к особенностям своего воздушного пространства, что позволяет интегрироваться в глобальную авиационную систему и поддерживать высокий уровень безопасности и эффективности ОВД.

1.2. Анализ современного состояния проблемы нормирования пропускной способности

В условиях устойчивого роста интенсивности ВД, усложнения структуры маршрутов ОВД и расширения практики гибкого использования ВП пропускная способность секторов ОВД становится ключевым параметром, определяющим эффективность функционирования аэронавигационной системы. При этом пропускную способность следует рассматривать не только как количественную характеристику потока ВС, но и как интегральный показатель способности сектора обеспечивать безопасное и устойчивое ОВД в конкретных условиях функционирования.

Современное состояние рассматриваемой проблемы характеризуется наличием противоречия между, с одной стороны, необходимостью использования нормативно закреплённых, воспроизводимых и удобных для практического применения методик, а с другой – объективной изменчивостью факторов, определяющих фактическую способность обеспечивать безопасное ОВД в секторе ОВД. Иными словами, действующие подходы к нормированию пропускной способности в значительной степени ориентированы на типовые или усреднённые условия работы, тогда как реальная воздушная обстановка носит динамический, неоднородный и во многом неопределённый характер. Пропускная способность

определяется как максимальное количество ВС, которые могут быть безопасно обслужены в данном объеме ВП или на данном аэродроме за определенный период времени [2, 3, 15-17, 29].

Для анализа данной проблемы целесообразно выделить два класса ограничений, определяющих предельную пропускную способность сектора ОВД.

Первый класс образуют пространственно-операционные ограничения, обусловленные геометрией сектора, конфигурацией маршрутов ОВД, числом и характером пересечений потоков ВС, наличием временно недоступных для полетов зон, ограничений использования ВП, а также воздействием опасных метеорологических явлений. Формально объём ВП может быть значительным, однако реальная доступная для ОВД часть этого объёма в каждый конкретный момент времени может существенно сокращаться. Следовательно, фактическая пропускная способность сектора ОВД определяется не только его номинальными границами, но и текущей степенью доступности ВП.

Второй класс составляют эргатические ограничения, связанные с психофизиологическими и когнитивными возможностями диспетчера УВД как центрального элемента системы управления. Даже при неизменной геометрии сектора и постоянном количестве ВС характер загруженности диспетчера может различаться в зависимости от структуры потока ВС, частоты их конфликтных взаимодействий, наличия вертикальных манёвров, необходимости координаций со смежными органами ОВД и влияния внешних факторов. Следовательно, ограничивающим ресурсом в задаче нормирования пропускной способности выступает не только физическая доступность ВП, но и допустимый уровень рабочей нагрузки диспетчера (сложность ВО).

В действующей российской практике основой нормирования пропускной способности диспетчерских пунктов и секторов, является Приказ ФАВТ России от 07.11.2012 № 757 «Об утверждении Методики определения нормативов пропускной способности диспетчерских пунктов (секторов) органов обслуживания воздушного движения» [15] (далее – Методика). Данная Методика строится на детерминированном алгебраическом подходе, который рассматривает процесс

ОВД как стационарный процесс массового обслуживания. В Методике учитываются «типичные» условия работы диспетчера, для рассматриваемого объема ВП (диспетчерского пункта или сектора), то есть такие условия, которые превалируют в данном объеме ВП и являются нормальными для него.

Особенностью Методики является использование количественных характеристик воздушного движения как: интенсивность воздушного движения, пропускная способность органов ОВД, для определения которых используется коэффициент загрузки диспетчера (K_3), который является статичной характеристикой, учитывающий показатели $K_3 = 0,55$ – для допустимого значения и $K_3 = 0,70$ – для предельно допустимого. В последнем случае НПС увеличивается на 20%.

Стоит отметить, что в Методике пропускная способность диспетчерских пунктов представляет собой количество ВС, которые могут быть обслужены в воздушном пространстве (ВП) за час. Рассмотрим пример, когда в определенном объеме ВП заявленный НПС является 30 ВС в час. В течение 5 минут в сектор входят 30 ВС, и одновременно на управлении ВС находятся все 30 самолетов, таким образом загрузка диспетчера возрастает в разы. Во втором примере по 10 ВС входят в сектор через каждые 20 минут, при таких условиях загрузка диспетчера будет существенно ниже. В рассматриваемых примерах рассматривался простейший объем воздушного пространства без учета влияния метеорологических явлений и ограничений ВП, сложность потока (количество точек схождения, профиль полета ВС) были одинаковы в каждом примере.

Несмотря на то, что Методикой предусмотрен учет дополнительных факторов, влияющих на НПС, существуют динамические факторы, которые не существуют статично, а могут появляться и исчезать, оказывая влияние на пропускную способность. Следовательно, для более качественного учета пропускной способности определенного объема ВП, учитывающего такие факторы как интенсивность ВД (объем ВД), сложность ВО, ограничения ВП необходимо использовать более гибкий показатель, который будет учитывать все изменения в рассматриваемом объеме ВП. Наименьшая пропускная способность отдельного

сектора или элемента простейшего контура системы ОВД определяется [29]:

$$\mu(t_k) = N_{\phi s} / (t_2 - t_1), \quad (1.1)$$

где $\mu(t_k)$ – функция, характеризующая пропускную способность рассматриваемого сектора или элемента простейшего контура системы ОВД в период t_k ; $t_2 - t_1$ – отрезок времени, включающий t_k , за который определяется пропускная способность; $N_{\phi s}$ – функция, определяющая фактическое число ВС, обслуживаемых в рассматриваемом секторе в период t_k .

Ключевым уравнением Методики является формула расчета НПС [15]:

$$\text{НПС} = 37,1 - 0,1 \cdot t_{\text{свв}} + 0,03 \cdot \text{РТ} - 0,22 \cdot N_{\text{пер}} - 1,5 \cdot N_{\text{кр}}, \quad (1.2)$$

где НПС – типовой НПС диспетчерского пункта (сектора) органа ОВД; $t_{\text{свв}}$ – средневзвешенное время пребывания ВС в границах зоны ответственности диспетчерского пункта (сектора) органа ОВД (мин.); РТ – процент ВС в потоке ВД, идущих по разведенным воздушным трассам; $N_{\text{пер}}$ – количество точек пересечения между однонаправленными значимыми потоками ВД; $N_{\text{кр}}$ – количество узловых точек пересечения потока ВД с повышенной сложностью работы диспетчера УВД.

Достоинство такого подхода состоит в его нормативной определённости, технологической воспроизводимости и удобстве для регламентированного применения. Методика позволяет формировать единый базовый ориентир для планирования и сопоставления возможностей различных секторов ОВД, а также использовать унифицированный аппарат расчёта при установлении заявленной нормативной пропускной способности. Именно поэтому она является практически значимым инструментом для стратегического и предтактического уровня планирования использования ВП [30].

Вместе с тем анализ современного состояния проблемы показывает, что при переходе от стратегического планирования к оперативному ОВД выявляются существенные ограничения чисто детерминированного подхода. Эти ограничения обусловлены тем, что фактическая пропускная способность сектора зависит не только от усреднённых структурных характеристик, но и от текущего состояния ВО, которое может быстро изменяться под воздействием ряда факторов.

Прежде всего, ограниченность существующего подхода проявляется в том, что он опирается на усреднённое время пребывания ВС в секторе и на усреднённые характеристики потока ВС. Однако в реальной эксплуатации время обслуживания ВС не является постоянной величиной. Оно зависит от конфигурации движения ВС, числа потенциальных конфликтных ситуаций, количества координаций со смежными диспетчерскими пунктами, необходимости изменения траекторий ВС и других факторов, включая активные ограничения использования ВП. В реальности время обслуживания $t_{\text{ср}}$ является случайной величиной, зависящей от вектора состояния среды $S(t)$:

$$t_{\text{ср}} = f(V(t), C(t), R(t)), \quad (1.3)$$

где $V(t)$ – объём ВД (интенсивность и загрузка сектора); $C(t)$ – структурная сложность ВО; $R(t)$ – ограничения использования ВП (доступность определенного объема ВП для выполнения полетов).

С практической точки зрения это означает, что использование усреднённого значения времени ОВД может приводить к завышению расчётной пропускной способности в условиях, когда диспетчер УВД фактически вынужден тратить существенно больше времени на ОВД каждого ВС. Особенно явно данное противоречие проявляется при наличии множественных пересечений потоков ВС, их встречных курсов, интенсивных вертикальных перестроений, обходов зон ограничений и неблагоприятных метеообразований. В этих условиях формально неизменный норматив перестаёт адекватно отражать реальную трудоёмкость ОВД.

Второе существенное ограничение связано с фиксированным характером коэффициента загруженности диспетчера УВД. Использование постоянных нормативных значений допустимой загрузки удобно для расчёта и регламентирования, однако не учитывает адаптивный характер деятельности человека-оператора. В относительно простой ВО, при благоприятных погодных условиях, низкой конфликтности и устойчивой структуре потока ВС диспетчер УВД способен безопасно предоставлять ОВД при загрузке, близкой к предельным нормативным значениям пропускной способности. Напротив, в условиях высокой неопределённости, интенсивного маневрирования ВС, ограничений по

использованию ВП, отказов технических средств или необходимости обхода опасных метеоявлений даже формально допустимый уровень загрузки может оказаться критическим. Следовательно, один и тот же коэффициент загруженности не может универсально характеризовать состояние сектора ОВД при принципиально разных условиях его функционирования.

Третье ограничение состоит в том, что действующая Методика в своей основе ориентирована на количественное выражение потока через показатель «воздушные суда в час», тогда как реальный ограничивающий фактор определяется не только числом ВС, но и структурой нагрузки, формируемой отношениями между ВС. При одинаковой интенсивности входящего потока ВС два сектора ОВД могут радикально различаться по степени конфликтности, числу пересечений ВС, вертикальной неоднородности потока ВС и необходимости вмешательств диспетчера. Следовательно, величина потока ВС сама по себе не является достаточным индикатором фактической сложности ОВД.

Таким образом, анализ показывает, что существующая нормативная логика опирается преимущественно на усреднённые, стационарные и структурно упрощённые представления о воздушном движении. Однако в реальной деятельности сектора ОВД на пропускную способность одновременно воздействуют три класса факторов.

Первый класс – **объём ВД $V(t)$** , характеризующий масштаб текущей или прогнозируемой нагрузки на сектор. В прикладном смысле этот фактор может описываться через интенсивность входящего потока ВС, занятость сектора, плотность воздушного движения или их комбинацию.

Второй класс – **структурная сложность ВО $C(t)$** , определяемая геометрией взаимодействия траекторий ВС, числом и типом потенциально конфликтных взаимодействий ВС (ПКС), долей их вертикальных манёвров, неоднородностью скоростей и эшелонов ВС, а также необходимостью координаций и управляющих воздействий диспетчера УВД.

Третий класс – **ограничения доступности воздушного пространства $R(t)$** , включающие активные зоны ограничений ВП, временно закрытые участки

маршрутов ОВД, неблагоприятные метеоявления, отказ оборудования и иные факторы, уменьшающие рабочий объём сектора ОВД или затрудняющие его использование.

Иллюстрация совокупного влияния указанных факторов на формирование пропускной способности сектора ОВД приведена на рисунке 1.4.

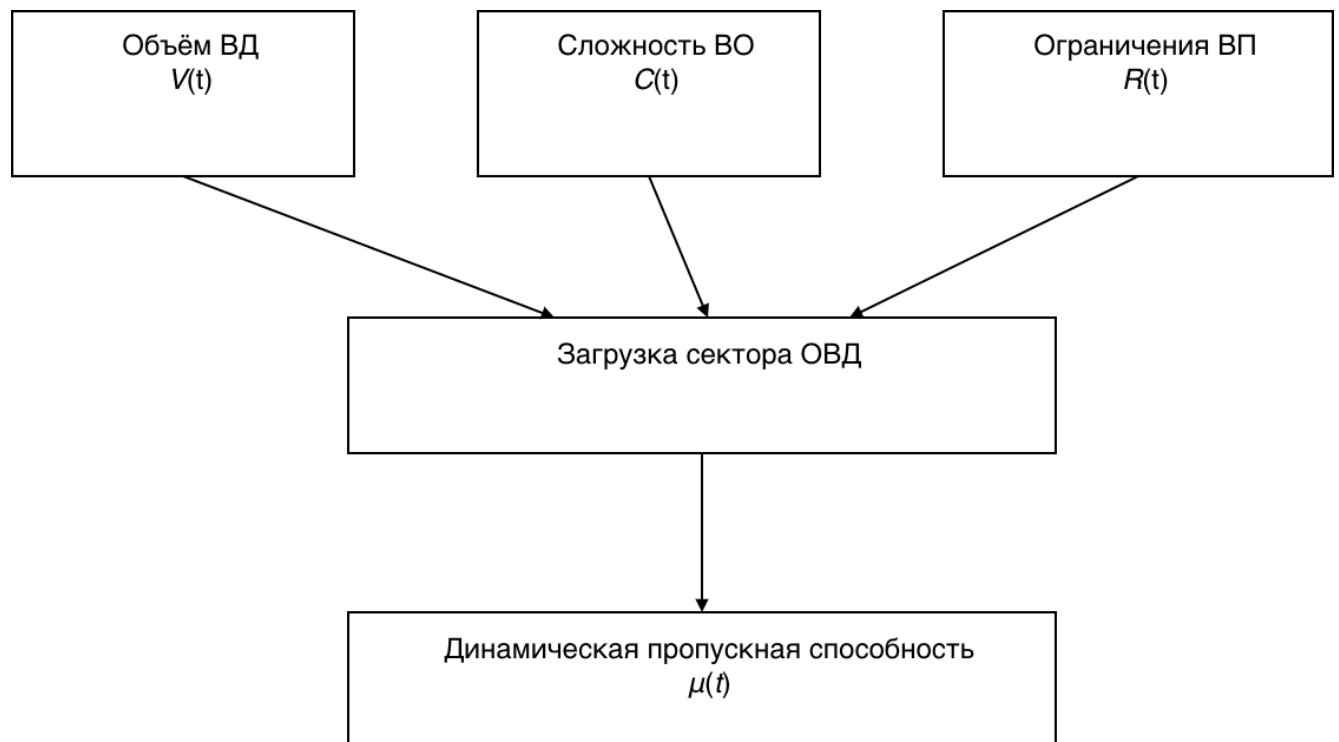


Рисунок 1.4 – Факторы, определяющие динамическую пропускную способность сектора ОВД

Следовательно, современное состояние проблемы можно охарактеризовать следующим образом. С одной стороны, система ОрВД нуждается в нормативно определённой, прозрачной и воспроизводимой базе расчета пропускной способности. С другой стороны, фактическая способность обеспечивать безопасное ОВД в секторе является переменной величиной, зависящей от текущих условий. В этом и заключается основное научно-практическое противоречие: жёстко фиксированная нормативная пропускная способность необходима для регламентации, но недостаточна для адекватного оперативного ОВД в условиях изменяющейся ВО.

Из этого противоречия вытекает принципиально важный вывод. Перспективным направлением совершенствования существующего подхода является не отказ от нормативной Методики как таковой, а её развитие за счёт введения механизма динамической коррекции, позволяющего согласовать заявленную нормативную пропускную способность сектора ОВД с его фактическим состоянием. Такой подход сохраняет преимущества действующей нормативной базы, но одновременно делает возможным учет оперативно изменяющихся факторов, определяющих реальную трудоёмкость ОВД и допустимую загрузку диспетчера УВД.

В этой связи пропускную способность сектора ОВД целесообразно рассматривать как двухуровневую величину. На первом уровне задаётся нормативная пропускная способность как базовая, регламентированная характеристика сектора ОВД. На втором уровне вводится оперативная корректировка, отражающая влияние текущего объёма ВД, структурной сложности ВО и ограничений ВП.

С методологической точки зрения это означает переход от представления о пропускной способности как о фиксированной норме к её трактовке как о контекстно-зависимом параметре, который должен уточняться в зависимости от состояния среды. Такой переход не противоречит действующей нормативной базе, а, напротив, позволяет повысить её прикладную ценность применительно к задачам тактического использования ВП и поддержки принятия решений в реальном времени. В этой связи целесообразно рассматривать её в виде зависимости [31]:

$$\mu_{\text{динам}}(t) = \mu_{\text{норм}} \cdot K_{\text{кор}}(V, C, R), \quad (1.4)$$

где $\mu_{\text{динам}}(t)$ – функция, определяющая динамический НПС; $\mu_{\text{норм}}$ – заявленный НПС, определяемый по Методике, $K_{\text{кор}}$ – определяемый коэффициент, на который нужно умножить существующий статический НПС, учитывающий влияние факторов (V, C, R) .

Таким образом, проведённый анализ современного состояния проблемы нормирования пропускной способности показывает:

- во-первых, существующая нормативная методика обеспечивает регламентируемость и сопоставимость расчётов, однако в основном ориентированы на типовые условия функционирования сектора ОВД;
- во-вторых, фактическая пропускная способность сектора ОВД определяется не только интенсивностью ВД, но и структурной сложностью ВО, а также ограничениями доступности ВП;
- в-третьих, использование усреднённых характеристик и фиксированных порогов загруженности диспетчера УВД не позволяет в полной мере учитывать динамику реальной рабочей среды;
- в-четвёртых, требуется развитие существующего нормативного подхода в направлении введения динамической коррекции, основанной на учёте текущего состояния сектора ОВД.

1.3. Обзор существующих методов и подходов определения пропускной способности

Проблема определения и нормирования пропускной способности сектора ОВД является одной из ключевых в теории и практике ОрВД. В мировой практике разработан широкий спектр методов, отличающихся как используемыми исходными данными, так и принятыми допущениями относительно природы пропускной способности [2, 32-75].

Анализ существующих подходов показывает, что они могут быть систематизированы по признаку базовой модели, лежащей в основе оценки пропускной способности. В этом случае целесообразно выделить следующие классы методов:

- нормативно-статические;
- мониторинговые (на основе потоковых показателей);

- методы, основанные на оценке загруженности и рабочей нагрузки диспетчера;
- методы, основанные на структурной сложности воздушной обстановки;
- имитационные и оптимизационные подходы;
- методы, основанные на данных и машинном обучении.

Такое представление позволяет провести сопоставимый анализ достоинств и ограничений различных подходов, а также выявить их применимость к задачам оперативного управления пропускной способностью.

Нормативно-статистические подходы опираются на исторически установленную «номинальную» пропускную способность сектора ОВД для типовой конфигурации и условий работы. Такие значения могут закрепляться регламентами и использоваться как базовый ориентир при планировании пропускной способности. Преимущество подхода – высокая внедряемость и объяснимость для операционного персонала, недостаток – слабая чувствительность к фактической структуре потоков и динамическим ограничениям.

Характерным примером является действующая в Российской Федерации Методика определения нормативов пропускной способности диспетчерских пунктов (секторов) органов ОВД. В методике пропускная способность выражается количеством ВС в час и увязывается со среднестатистическим уровнем загруженности диспетчера [15].

Преимуществом нормативного подхода является его высокая внедряемость, регламентируемость и однозначность интерпретации. Вместе с тем, его основным недостатком является слабая чувствительность к текущим условиям функционирования, включая изменения структуры потоков, наличие ограничений и динамику воздушной обстановки.

Мониторинговые подходы основываются на использовании непосредственно измеряемых параметров воздушного движения, таких как [2, 4, 8, 18, 19]:

- число ВС в секторе;

- интенсивность входного потока;
- среднее время пребывания;
- число координаций и передач управления.

Решение о допустимой пропускной способности в данном случае принимается на основе пороговых значений указанных параметров [28, 52].

Достоинством данных методов является их оперативность и простота реализации. Однако они обладают принципиальным ограничением: количественные показатели не отражают структуру ВД [40, 42]. При одинаковом числе ВС уровень сложности может существенно различаться в зависимости от характера взаимодействия траекторий ВС, их доли вертикальных манёвров и конфигурации потоков.

Таким образом, нормативно-статические и мониторинговые методы целесообразно рассматривать как базовый уровень оценки пропускной способности, требующий уточнения с использованием более сложных моделей.

Методы, основанные на оценке загруженности диспетчера УВД, выводят допустимую пропускную способность из ограничений по времени занятости диспетчера выполнением технологических операций. Ключевая идея состоит в том, что суммарное время на коммуникации, координации, планирование, анализ и разрешение конфликтов не должно превышать допустимую долю интервала оценивания, оставляя резерв на восстановление после пиков нагрузки и на обработку непредвиденных событий. В ряде методик различают workload (когнитивная нагрузка и субъективное ощущение сложности) и task-load (время на выполнение наблюдаемых действий и процедур) [7, 34, 40, 44, 45, 49, 53, 54].

Примером простого нагрузочного нормирования является методология, применяемая FAA при установлении базовой секторной пропускной способности: практический ориентир «25 воздушных судов за 15 минут» соответствует 36 секундам рабочего времени диспетчера на одно ВС ($900/25 = 36$ сек) [55]. Тогда ориентировочная оптимальная пропускная способность может оцениваться через среднее время нахождения ВС в секторе T (мин): $C_{opt} = \frac{60 \cdot T}{36}$, (ВС/час), где C_{opt} – ориентировочная оптимальная пропускная способность сектора; T – среднее время

пребывания ВС в секторе, мин; 36 – норматив «рабочего времени на одно ВС», с/ВС. На практике базовая оценка уточняется с учётом структуры потоков, процедур, уровня автоматизации и ограничений по мониторингу (например, через параметры Monitor Alert/MAP) [56].

Имитационные методы применяются для исследования пропускной способности в заданной конфигурации ВП при контролируемых сценариях воздушного движения и ограничений. Имитационное моделирование в ускоренном масштабе времени (fast-time simulation - FTS) обеспечивает быстрый расчёт траекторий и проверку сценариев на соблюдение ограничений, позволяя оценивать технологические показатели и загруженности диспетчера для большого числа вариантов [38, 57]. Имитационное моделирование в реальном масштабе времени (real-time simulation - RTS) включает в себя экспериментальную оценку на диспетчерском тренажёре с привлечением диспетчеров [58], псевдопилотов (операторов) и комплекса средств УВД, поэтому лучше воспроизводит человеческий фактор и стратегии решения конфликтов.

Сочетание FTS (для массового перебора вариантов) с точечной валидацией RTS и экспертными интервью обычно обеспечивает приемлемый баланс между безопасностью и достоверностью [38, 58], особенно при проектировании новой секторизации или при анализе влияния изменений маршрутов и процедур ОВД.

1.3.1. Подходы, основанные на данных и машинном обучении

Подходы, основанные на данных, предсказывают ожидаемую пропускную способность или вероятность перегрузки сектора ОВД по набору признаков, включающих параметры ВД, метеообстановку, конфигурацию секторов, ограничения ВП и состояние смежных секторов [59-62]. Классические методы включают регрессионные модели и деревья решений, современные – ансамбли и нейросетевые архитектуры [60-63].

Способность улавливать нелинейности и взаимодействия факторов, потенциально высокая точность при наличии больших и качественных наборов данных являются преимуществом данных методик [60-63]. Ограничениями является риск «чёрного ящика», сложность объяснимости и принятия в операционной среде, а также применимость в различных системах УВД [63-65]. Поэтому на практике подходы, основанные на данных целесообразно комбинировать с интерпретируемыми уровнями – формализованными правилами, нормативными ограничениями и физически обусловленными соотношениями [64-66].

Нормирование пропускной способности тесно связано с процессами управления потоками ВД и пропускной способности (Air Traffic Flow and Capacity Management – ATFCM) [2, 24, 67]. В документах ICAO [2, 24] подчёркивается, что оценка ограничений пропускной способности должна поддерживать совместное принятие решений (CDM), обеспечивая прозрачность и прогнозируемость для участников ВД.

В европейской практике операции ATFCM регламентируются руководствами EUROCONTROL, где определяются процедуры объявления ограничений, применения регулирований и координации мер регулирования пропускной способности [38, 67]. В этом контексте модель пропускной способности должна обеспечивать воспроизводимость, возможность оперативной корректировки при снижении эффективности среды секторов ОВД (неблагоприятная погода, ухудшение инфраструктуры) и интерпретируемость причин изменения пропускной способности [38, 67, 68].

1.3.2. Обзор методик оценки пропускной способности сектора ОВД на основе загрузки диспетчера

Оценка пропускной способности сектора ОВД в современных подходах рассматривается как задача определения такого уровня интенсивности ВД (например, ВС/ч), при котором обеспечивается устойчивое обслуживание потока ВС при допустимой загрузке диспетчера и наличии необходимого временного резерва для компенсации неопределённости и внештатных ситуаций [69-71]. В материалах ICAO по оценке пропускной способности подчёркивается, что в приложении (Appendix C) Doc. 9426 представлены две техники определения пропускной способности сектора/позиции: DORATASK и MBV [2, 3, 68-83].

Методика DORATASK основана на декомпозиции деятельности диспетчера на набор типовых задач (tasks) и оценке совокупной загрузки диспетчера, как суммы временных затрат на выполнение этих задач в заданном временном интервале (как правило, 1 час) [69-71]. При этом учитываются как наблюдаемые действия, фиксируемые по речевому обмену и операционным действиям, так и ненаблюдаемые когнитивные процессы (обнаружение конфликтов, прогнозирование, планирование разрешений) [71, 72], а также выделяется необходимое время восстановления/резерва.

Формализация нагрузки. Нагрузка по задачам за час может быть представлена в виде [69-72]:

$$TL(\lambda) = \sum_{i=1}^m n_i(\lambda)t_i, \quad (1.5)$$

где t_i – средняя длительность выполнения i -й задачи; $n_i(\lambda)$ – ожидаемое число выполнений i -й задачи при интенсивности движения λ (ВС/ч), определяемое по наблюдениям/хронометражу или по данным имитации.

Для учёта резерва вводится требование наличия доли времени, свободной от задач, например [69-72]:

$$WL(\lambda) = TL(\lambda) + RT(\lambda), \quad (1.6)$$

где $WL(\lambda)$ – workload, суммарная рабочая нагрузка диспетчера при интенсивности λ . Это оценка того, какую долю рабочего времени диспетчер занят обслуживанием движения (или сколько секунд/минут занятости приходится на заданный интервал), с учётом не только основных задач, но и необходимого резерва; $TL(\lambda)$ – нагрузка по задачам (taskload): суммарное время, которое требуется на выполнение набора диспетчерских действий при интенсивности λ ; RT – время резерва/восстановления (recovery/reserve time) (может задаваться как минимально допустимая доля часа либо как надбавка/коэффициент к TL).

В презентационных материалах ICAO подчёркнуто, что оценка пропускной способности в DORATASK выполняется с учётом требуемого времени резерва/восстановления и факторов сложности, влияющих на частоты/длительности задач [69-72].

Пропускная способность λ^* определяется как максимальная интенсивность ВД, при которой выполняется критерий допустимой загруженности (например, $WL(\lambda) \leq WL_{lim}$) либо сохраняется минимально требуемый резерв времени $RT(\lambda) \geq RT_{lim}$. На практике зависимости $WL(\lambda)$ могут строиться по серии наблюдений или получаться на основе имитационного моделирования с последующей статистической аппроксимацией (регрессией) для получения устойчивой оценки λ [18, 71, 72].

DORATASK отличается высокой интерпретируемостью (видно, какие именно операции формируют загруженность), а также удобен для анализа влияния изменений процедур/технологий (изменяются n_i , t_i и структура задач) [69-72]. Ограничение связано с трудоёмкостью сбора данных и чувствительностью к корректности классификации задач и оценок времени.

Методика MBV (measurement-based approach) ориентирована на измерение наблюдаемых действий диспетчера, сгруппированных по категориям (например, радиосвязь, координация, работа с планами полетов/метками и т.п.), и на расчёт нагрузки как суммарного времени, затрачиваемого на такие категории в течение рабочего интервала [69,70]. Данная методика опирается на измерение времени по

категориям наблюдаемых действий и учёт особенностей структуры сектора и характеристик воздушного движения.

Процедура применения методики, следующая [68]:

1. задаётся объект оценки (сектор ОВД/диспетчерский пункт), конфигурация укомплектованности (1 или 2 диспетчера) и репрезентативный интервал наблюдения;
2. определяется набор категорий наблюдаемых действий $k = 1 \dots K$;
3. выполняется хронометраж/наблюдение и формируется оценка суммарного времени по категориям T_k ;
4. устанавливается связь между суммарной наблюдаемой нагрузкой $T = \sum_k T_k$ и интенсивностью движения λ , после чего пропускная способность определяется по критерию предельной допустимой загруженности диспетчера с необходимым резервом времени.

МВВ затруднительно применять для прогнозных оценок при будущих изменениях (новая организация ВП, новая техника/процедуры, иная укомплектованность), поскольку методика «привязана» к наблюдаемому текущему процессу и слабо переносима на сценарии «как будет» [71, 72].

Методика CAPAN, разработанная EUROCONTROL, представляет собой имитационно-статистический подход, в котором пропускная способность сектора ОВД оценивается через загруженность диспетчера, формируемую на основе быстрой имитации (FTS) [38, 73, 74]: дискретные события в симуляции порождают задачи диспетчера, для которых задаются временные параметры, суммарная загруженность агрегируется за час и сопоставляется с интенсивностью входа ВС в сектор.

В CAPAN задачи группируются по категориям (например, управление ВС, поиск конфликтов, координация, стандартная радиосвязь), модель допускает настройку под конкретные процедуры, оснащение и режимы укомплектованности (1 диспетчер/2 диспетчера и др.). В данной методике используется пороговая интерпретация нагрузки: теоретическая пропускная способность сектора соответствует состоянию, при котором загруженность диспетчера достигает 70%

«абсолютного» рабочего времени (≈ 42 мин из 60 мин), что интерпретируется как граница, обеспечивающая наличие резерва времени на неформализуемые/неучтённые действия и восстановление [73].

Результаты серии «прогонов» симуляции агрегируются, после чего применяются регрессионные зависимости между загруженностью диспетчера и характеристиками ВД (в частности, интенсивностью) для получения численной оценки пропускной способности, а также для анализа различий по периодам суток и структуре потоков [73, 74].

SARAN требует подготовки данных о ВД, структуре ВП, характеристиках ВС, процедурных и операционных параметрах, а также обязательной проверки сценария с участием экспертов – действующих диспетчеров для обеспечения соответствия модели реальным операциям. По сравнению с чисто измерительными подходами, SARAN обладает преимуществом для сценариев «что если» (изменение секторизации, маршрутов, процедур, CNS/ATM), поскольку позволяет сравнивать альтернативные конфигурации в единой имитационной рамке, сохраняя связь с критерием допустимой нагрузки.

В бразильской методологии используется коэффициент доступности диспетчера φ – доля времени, которая может быть выделена на планирование и выполнение процедур эшелонирования. При отсутствии наблюдения φ может быть порядка 0,40, а при наличии наблюдения – порядка 0,60 [2]. Тогда оценка одновременного контролируемого количества ВС задаётся выражением [2, 75]:

$$N = \varphi \cdot T / (\eta \cdot \tau_m), \quad (1.7)$$

где N – число ВС, которые могут одновременно контролироваться одним диспетчером; T – среднее время пребывания ВС в секторе; η – число диспетчер–пилот коммуникаций на одно ВС; τ_m – средняя длительность одной коммуникации.

Данная методика показательна тем, что связывает пропускную способность с технологией обслуживания и параметрами связи, но требуют калибровки параметров (η , τ_m , φ) под конкретную организацию работы, средства УВД и языковую среду радиосвязи.

1.3.3. Современные мировые практики нормирования пропускной способности

Современная практика нормирования пропускной способности секторов ОВД у различных провайдеров АНО, как правило, опирается на двухуровневую логику: планируемая/заявленная пропускная способность (пороговые параметры перегрузки секторов и т.п.), операционная реализация этих ограничений через меры управления потоками (ATFM/TFM/TMI, регулирования по интенсивности, сценарии перераспределения спроса, совместное планирование и др.) [2, 76-78]. Такой подход позволяет отделить «нормативную величину» - пропускная способность от набора процедур, обеспечивающих удержание спроса в допустимых пределах.

Европейская модель (EUROCONTROL Network Manager): планируемая/заявленная пропускная способность и ATFCM-регулирования. В европейской системе сетевого управления потоками (ATFCM) ключевым элементом является механизм планируемой (ожидаемой) и заявленной пропускной способности [76, 77]. В ATFCM Operations Manual [77] пропускная способность рассматривается как параметр, предоставляемый в рамках стратегического/предтактического планирования: планируемая пропускная способность публикуется в Network Operations Plan [76], а заявленная пропускная способность трактуется как более детализированное значение, доступное на стратегическом и предтактическом уровнях планирования [77]. На тактическом уровне эти значения используются для формирования и применения ATFM и иных мер управления загрузкой ВП, обеспечивая защиту секторов от перегрузки посредством ограничения входного потока ВС [77].

Внутри этой модели значимую роль играют центры управления потоками ВС, которые обеспечивают мониторинг, планирование и координацию ATFM мер в зоне ответственности. Показателен пример Испании, провайдер АНО ENAIRE организует работу пяти центров управления потоками ВД (Flow Management

Positions - FMP) при региональных центрах управления ВД и позиционирует себя как локального провайдера АТФМ сервиса, обеспечивающего ВД [78].

Таким образом, европейская практика демонстрирует формализованную схему «планируемая/заявленная пропускная способность → регулирование потоков ВД», где нормирование пропускной способности и её применение встроены в единый контур управления потоками.

Помимо классических мер регулирования, ряд провайдеров АНО развивает предтактические коллаборативные механизмы, направленные на снижение необходимости жестких ограничений. Во Франции (DSNA) используется CAP (Collaborative Advanced Planning) как предтактическая мера разгрузки ожидаемо перегруженных секторов ОВД. [79] CAP представляет собой динамическую предтактическую меру регулирования потоков ВД, нацеленную на снижение загруженности ожидаемо перегруженных секторов. В рамках CAP авиакомпаниям предлагаются варианты планирования (например, изменение эшелонов полета) для выбранных рейсов с последующей переподачей планов полета с целью перераспределения спроса относительно «узких» мест ВП [79].

Методологически CAP иллюстрирует класс мер, где «нормирование» пропускной способности дополняется механизмами управления спросом через изменение планов/профилей (а не только через задержки) [79], что особенно актуально при прогнозируемых локальных ограничениях и перегрузке секторов.

Провайдер АНО Великобритании (NATS) регулирует рост пропускной способности через инструменты поддержки диспетчера (iFACTS) [80]. В ряде случаев пропускная способность повышается не столько за счет более «жесткого» нормирования, сколько через снижение рабочей нагрузки (загруженности диспетчера УВД) и повышение предсказуемости ВД. Показателен пример NATS, iFACTS был внедрен как продвинутое средство автоматизации СППР и вводился для увеличения пропускной способности и повышения безопасности полетов в районе полётной информации Лондона [80].

С практической точки зрения такие инструменты как прогнозирование, идентификация конфликтов, подсказки по их разрешению выступают фактором,

меняющим «эффективную ёмкость» сектора через управляемость и стабильность тактических решений.

Для задач исследования это важно тем, что пропускная способность становится функцией не только «объем ВД – сложность – ограничения», но и уровня автоматизированной поддержки, влияющей на допустимый уровень загруженности.

В США (FAA) в задачах управления потоками ВД используется показатель Monitor Alert Parameter (МАР), представляющий собой числовой порог-триггер, который применяется в функции Monitor Alert системы регулирования потоков ВС для информирования персонала ОВД о том, что в определённые периоды эффективность обслуживания сектора или аэропорта может снижаться при росте спроса на использование ВП [56].

Исторически расчёт МАР в значительной степени базировался на упрощённой пороговой логике, где порог задавался преимущественно через среднее время пребывания ВС в секторе и соответствующую табличную/нормативную привязку к допустимому числу обслуживаемых ВС [81]. Достоинство такого подхода заключается в его простоте, единообразии применения и низких требованиях к данным. Вместе с тем, подход, основанный на времени пребывания ВС в секторе обладает принципиальными ограничениями: он не отражает сектор-специфическую рабочую нагрузку и характеристики сложности ВД, слабо учитывает изменчивость структуры потоков и сценарные факторы, а также ограниченно применим к режимам комбинирования секторов.

В качестве развития методологии FAA внедряет подход, основанный на загруженности диспетчера, в котором МАР формируется исходя из модели рабочей загруженности диспетчера [56, 81] при осуществлении ОВД, т.е. порог связывается не только с интенсивностью ВД, но и с ожидаемыми затратами времени/усилий на выполнение задач управления и координации при данном профиле ВД. В соответствии с этой логикой базовые значения МАР рассчитываются на национальном уровне, далее допускаются локальные корректировки, а также предусмотрена возможность оперативного (динамического) изменения МАР при

воздействии внешних факторов (например, погоды, ограничений инфраструктуры или ухудшения средств ОВД), влияющих на фактическую способность сектора обеспечивать обслуживание.

Таким образом, смысловое различие подходов состоит в следующем: пороговый MAP трактует пропускную способность, как относительно стабильный норматив, зависящий главным образом от «средних» характеристик сектора, тогда как подход, основанный на загруженности диспетчера MAP, интерпретирует предельные значения как функцию операционной трудоёмкости обслуживания и допускает систематическую адаптацию к условиям, определяющим загруженность. При этом функциональная роль MAP в контуре управления потоков ВД сохраняется неизменной – он остаётся инструментом раннего предупреждения и запуска управленческих воздействий (инициирование мер регулирования потока), но его численное значение становится более чувствительным к сложности и реальной нагрузке потока ВС, что повышает обоснованность решений по управлению спросом и снижает риск некорректной оценки «узких мест» при анализе эффектов и планировании мер.

В Канаде (NAV CANADA) управление дисбалансом «спрос–пропускная способность» реализуется в рамках процедур Air Traffic Flow Management (ATFM) посредством набора Traffic Management Initiatives (TMI) [82, 83] – операционных мер регулирования спроса, применяемых при прогнозируемом или фактическом снижении доступной ёмкости сектора из-за метеоусловий, ограничений инфраструктуры или иных факторов. Цель таких мер – обеспечить упорядоченный поток и совместимость объёма ВД с объявленной/фактической пропускной способностью обслуживаемых элементов системы.

Ключевым инструментом TMI в NAV CANADA назван Ground Delay Program (GDP) [82, 83]. GDP определяется как мера управления спросом, при которой рейсы временно удерживаются на аэродроме вылета в заданный период, чтобы «растянуть» и упорядочить поток прибытия и тем самым привести число прибывающих ВС в соответствие с доступной пропускной способностью ограниченного аэропорта/аэроузла. В частности, NAV CANADA подчёркивает, что

GDP применяется в ситуациях, когда из-за нарушений (например, неблагоприятной погоды) возникает «накопленный» объём движения, превышающий текущую пропускную способность, и требуется обеспечивать интервалы для прибывающих ВС через задержку вылетающих [82].

В более поздних разъяснительных материалах NAV CANADA дополнительно фиксируется практический критерий применения GDP: если ожидаемые задержки на земле в рамках управления потоком могут продлиться более двух часов [83]. Национальное подразделение управления ВД может вводить GDP как механизм удержания вылетов, обеспечивая поступление в пункт назначения «ограниченного» числа прибытий во времени [83].

Смысловое отличие GDP от «локальных» тактических мер состоит в том, что GDP переводит задержку в предтактическую/тактическую меру распределения спроса, смещая задержку в более управляемую стадию (на земле) и снижая вероятность чрезмерных очередей на прибытие/ожидание в воздухе. NAV CANADA использует GDP как инструмент согласования спроса с динамически доступной пропускной способностью: когда доступная пропускная способность снижается, вводится TMI (GDP), которая уменьшает эффективный входной поток к ограниченному элементу системы и тем самым стабилизирует работу при заданном уровне безопасности и качества ОВД.

1.3.4. Сравнительный анализ методик нормирования пропускной способности

Сравнительный анализ методик нормирования пропускной способности целесообразно выполнять по следующим критериям:

- состав и доступность входных данных;
- принятая интерпретация пропускной способности: интенсивность входного потока, занятость сектора либо ограничение по рабочей нагрузке диспетчера УВД;

- степень учёта структурной сложности воздушного движения и внешних ограничивающих факторов;
- интерпретируемость результатов и возможность регламентированного применения;
- пригодность для оперативного применения и переносимость на новые условия функционирования [2, 15, 56, 71-73, 75, 81].

Таблица 1.1 представляет сопоставление наиболее распространённых классов методик.

Таблица 1.1 – Сравнение классов методик нормирования пропускной способности

Класс методик	Основная идея и выход	Требуемые данные	Преимущества	Ограничения
Нормативно-статистические [2, 15]	Фиксированная (заявленная) номинальная пропускная способность для заданной конфигурации (ВС/ч) на основе регламентов и/или исторических оценок	Исторические значения; регламенты; конфигурации секторов/аэродромов.	Простота; высокая внедряемость; однозначность трактовки.	Слабый учёт структуры потоков, краткосрочной динамики и ограничений среды; требуется периодическая актуализация.
Occupancy / entry rate (пороговые и мониторинговые) [56, 67]	Нормирование через пороговые правила по занятости сектора (число ВС) и/или входному потоку за интервал (entry count/rate).	Треки/планы; счётчики входов; время пребывания; базовые метрики потоков.	Оперативность; простота измерения и контроля; пригодность как «сигнал перегрузки».	Занятость не эквивалентна сложности; возможны пороговые «скачки» решений; пороги часто являются monitoring-триггерами, а не универсальной оценкой пропускной способности.

Продолжение таблицы 1.1

Класс методик	Основная идея и выход	Требуемые данные	Преимущества	Ограничения
Основанные на загрузенности диспетчера (workload / task-time) [71, 73, 75, 81]	Пропускная способность определяется как такое значение интенсивности λ , при котором суммарная рабочая нагрузка $WL(\lambda)=TL(\lambda)+RT(\lambda)$ не превышает допустимого уровня (порог загрузки с резервом времени).	Оценка задач/времени (task-time), частоты/длительности действий; параметры связи/координации; наблюдения или модель.	Прямая связь с технологией обслуживания; объяснимость; возможность учёта резерва (recovery time).	Нужна калибровка под сектор/процедуры; трудность явного учёта когнитивной составляющей и параллельных действий.
Основанные на сложности [84-87]	Пропускная способность рассматривается как функция индекса сложности (конфликтность, пересечения потоков, вертикальные манёвры, вариативность скоростей/эшелонов и др.).	Треки; конфликтные пары/события; геометрия маршрутов; структура потоков; (опционально) данные ограничений.	Лучше отражает природу нагрузкообразующих факторов при одинаковом объёме; пригодно для прогнозирования.	Выбор индекса и весов влияет на результат; требуется валидация и калибровка; переносимость между регионами ограничена.
Имитационные (FTS/RTS) [73, 75, 81]	Оценка пределов обслуживания по сценариям: моделирование потоков и процедур, выявление перегрузки; в RTS — с участием диспетчеров.	Модели ВД, процедур, структуры секторов, оборудования и ограничений; для RTS — протоколы эксперимента и участие персонала.	Высокая достоверность при корректной постановке; возможность «проигрывания» будущих сценариев.	Высокая стоимость и трудоёмкость; сложность тиражирования; результаты чувствительны к предположениям модели.

Окончание таблицы 1.1

Класс методик	Основная идея и выход	Требуемые данные	Преимущества	Ограничения
Управление потоками ВД ATFM/TFM (Demand–Capacity Balancing) [2, 67, 76, 81, 82]	Нормирование реализуется через согласование спроса с доступной пропускной способностью (demand–capacity balancing) с применением мер управления спросом и перераспределения потоков (слоты/CTOT, GDP, rerouting, MIT и др.).	Прогноз спроса; declared/available capacity; ограничения (метео, инфраструктура); правила приоритизации; координационные данные.	Практическая применимость в оперативном контуре; управляемость задержек (перенос задержек «на землю»); коллаборативность.	Качество решений зависит от точности прогнозов и согласованности процедур; повышенные требования к координации и информационному обмену.
Регламентированная НПС (РФ) [15]	Норматив пропускной способности: типовое значение НПС _{тип} по структурным факторам (время пребывания, упорядоченность, сложные точки) с последующей корректировкой системой коэффициентов k_i .	Статистика времени пребывания; структура/упорядоченность потоков; перечень факторов оснащения/условий; коэффициенты методики.	Регламентируемость и сопоставимость; привязка к факторам организации рабочего места; пригодность для планирования.	Ограниченная динамичность; необходимость актуализации при изменении процедур/автоматизации; слабая чувствительность к краткосрочным изменениям сложности и локальным ограничениям при неполных данных.

Сопоставление (таблица 1.1) выполнено на основе анализа нормативно-методических документов ICAO, EUROCONTROL, FAA, действующей российской Методики НПС, а также публикаций, посвящённых связи сложности воздушной обстановки, рабочей нагрузки диспетчера и пропускной способности сектора ОВД [25-83].

Анализ практик различных провайдеров АНО различии организационных контуров и наборов инструментов (ATFSCM в Европе, TFM в США, национальные ATFM-сервисы) [2, 56, 67, 76, 83] общий принцип нормирования пропускной

способности региональных диспетчерских центров сохраняется: пропускная способность сектора определяется не только количеством ВС, но и характеристиками управляемости движения при заданной структуре потоков и внешними факторами, уменьшающими доступные ресурсы обслуживания [2, 81, 84-87]. Это позволяет представить задачу нормирования пропускной способности в виде компактной, интерпретируемой декомпозиции на три взаимодополняющих компонента:

1. **Объём ВД.** Компонент характеризует «масштаб» нагрузки и может задаваться через занятость (число ВС в секторе/в зоне ответственности), интенсивность входящего потока или их комбинацию [56, 67]. В прикладных системах управления потоками данный компонент соответствует базовым нормативам/порогам (заявленная пропускная способность, мониторинговые пороги перегрузки), используемым для первичной оценки соответствия спроса доступным возможностям ОВД [2, 56, 67].

2. **Сложность ВО.** Компонент отражает структурные характеристики потока ВС, определяющие трудоёмкость обслуживания: частоту и «плотность» потенциальных конфликтов, пересечения/сближения траекторий, долю наборов и снижений, неоднородность скоростей и эшелонов, интенсивность координаций, необходимость в управляющих воздействиях [80, 81, 84-87]. Практические примеры применения средств поддержки (прогнозирование конфликтов, рекомендации по разрешению, инструменты упорядочивания) подтверждают, что при одинаковом объёме движения сектор может обладать различной эффективной (достижимой) пропускной способностью в зависимости от сложности и уровня автоматизации/поддержки принятия решений.

3. **Ограничения.** Компонент объединяет факторы, снижающие доступную пропускную способность независимо от текущего объёма движения: неблагоприятные метеоусловия, активные зоны ограничений, временно закрытые районы, военная активность, ухудшение средств наблюдения/связи/навигации, изменения в конфигурации секторов и др. [2, 56, 67, 76, 82]. В рамках управления потоками это проявляется через необходимость снижать заявленные значения

пропускной способности, вводить ограничения на входной поток или применять специальные меры регулирования.

Предложенная трёхкомпонентная структура удобна тем, что сохраняет интерпретируемость для оперативного персонала ОВД, позволяет агрегировать широкий спектр разнородных факторов в управляемое число входных параметров модели, исключает избыточную детализацию нормирования, оставляя возможность уточнения компонент «сложность» и «ограничения» через внутренние индексы/подмодели и специализированные расчётные процедуры.

Предлагаемый в исследовании подход корректировки НПС на основе аппарата нечёткой логики [88, 89] обеспечивает нормирование пропускной способности при сохранении регламентируемой базы НПС [15]. Ключевые преимущества состоят в следующем: 1) интеграция разнородных факторов в единую корректировку, согласованную с декомпозицией «объём–сложность–ограничения»; 2) устойчивость к неопределённости и неполноте данных за счёт использования лингвистических переменных и функций принадлежности; 3) плавность изменения результата без пороговых скачков, характерных для жёстких правил; 4) интерпретируемость вывода на уровне правил [31, 90], пригодная для объяснения и регламентирования; 5) адаптивность к изменению условий (процедур, структуры потоков ВС, средств поддержки диспетчера) посредством настройки термов и правил без полной перестройки нормативной методики.

Приведённые примеры демонстрируют, что в практике современных провайдеров аэронавигационного обслуживания нормирование пропускной способности, как правило, реализуется не в виде единственного показателя, а как совокупность взаимосвязанных механизмов, функционирующих на различных горизонтах управления (стратегическом, предтактическом и тактическом). На уровне прикладных процедур это выражается в использовании [2, 56, 67, 75, 80, 82]:

1. заданных (заявленных) значений пропускной способности элементов системы ОВД (секторов, аэродромов, узлов), применяемых как базовые ориентиры планирования и мониторинга;

2. мер управления спросом и перераспределения потоков ВД, направленных на согласование ожидаемого спроса с доступной пропускной способностью (регулирование интенсивности, сценарии маршрутизации, коллаборативные процедуры и т.п.);

3. технологических и организационных факторов, повышающих устойчиво достижимую пропускную способность за счёт снижения трудоёмкости обслуживания и повышения предсказуемости движения (включая средства поддержки диспетчера: прогнозирование конфликтов, подсказки по разрешению, инструменты упорядочивания потоков и др.).

В контексте исследования данный вывод обосновывает целесообразность перехода от трактовки пропускной способности как фиксированной «нормы» к контекстно-зависимому нормированию, при котором пропускная способность сектора рассматривается как функция параметров текущего/прогнозируемого ВД, сложности его структуры, внешних ограничивающих факторов и условий функционирования (в том числе доступности инструментов поддержки принятия решений).

1.4. Обоснование выбора математического аппарата нечёткой логики

Указанные ограничения обусловлены попыткой описать сложную эргатическую систему (человек-машина-среда) языком четкой бинарной логики [29, 91-93]. Возможности человека-оператора (диспетчера УВД) достаточно ограничены при быстроменяющейся динамической обстановке по прогнозированию и безошибочности [58, 91, 94, 95]. В таких системах использование только жёстких пороговых правил не позволяет в полной мере описать переходные состояния между нормальной, напряжённой и предельно допустимой загруженностью диспетчера УВД.

Решение сложных задач при динамично меняющейся воздушной обстановке,

в условия воздействия динамических факторов, возможно в процессе долгих тренировок и опыта, такие решения принимаются интуитивно [58, 91-94]. Например, при введении ограничений на использование ВП (ИВП) в секторе ОВД старший диспетчер или РП может принять решение об ограничении количества ВС, которым может быть предоставлено безопасное ОВД в данном объеме ВП.

В настоящее время внедрение искусственного интеллекта происходит повсеместно во все сферы деятельности, существуют целые направления исследований в кибернетике и теории управления [93]. Возможность автоматизации процессов обеспечивается математическим моделированием таких процессов посредством четко выраженного описания [95-99]. Извлечение логического вывода для автоматизации процессов ОВД, создание сложных суждений на основе простых, а также способность к обучению не может решаться без использования моделирования и логического вывода [97-102].

Принятие решений человеком на основе опыта и интуитивного распознавания ситуации на первый взгляд трудно поддается формальному описанию. Однако в работах по ситуационному управлению, инженерии знаний и автоматизации поддержки принятия решений показано, что отдельные элементы интеллектуальной деятельности – классификация ситуации, построение логического вывода, выбор альтернативы и обучение на основе опыта – могут быть представлены в форме моделей знаний, правил и процедур вывода [93, 94, 96, 99-102].

С целью моделирования ситуаций на компьютере (ЭВМ), необходимо создать такую модель оценки динамической пропускной способности, пригодную для алгоритмической реализации на ЭВМ. Для этого необходимо перечислить все возможные динамические факторы, снижающие пропускную способность ВП, и определить сценарии, в соответствии с которыми будет распознаваться фактор, снижающий пропускную способность [32, 84, 86, 87]. Для динамических факторов определяется ряд признаков, способствующих их определению, воздействующих на динамическую пропускную способность. Однако сложно точно описать факторы, влияющие на пропускную способность ВП. То есть использование

точных категорий, например, 10 ВС в определенном воздушном пространстве (секторе) – это много или мало, или достаточно. Все зависит от различных факторов: особенностей структуры ВП, погодных условий, ограничений ВП и т.д.

Фундаментальной проблемой при формализации процессов принятия решений в эргатических системах «человек-машина» является корректное представление знаний о состоянии среды и динамике системы. В контексте управления воздушным движением знания диспетчера обладают гетерогенной природой, включающей различные классы неопределенности, которые невозможно свести исключительно к вероятностным характеристикам [88, 89, 103-106]:

- Неточность. Ошибки наблюдения и измерения физических параметров, обусловленные, например, ошибками человека или техническими возможностями радиолокационного оборудования.

- Незнание. Отсутствие априорной информации о параметрах на начальном этапе планирования (например, точная масса ВС или намерения экипажа до выхода на связь).

- Неопределенность. Недостаточность семантической информации для однозначной классификации ситуации (например, нечеткие границы грозового фронта).

- Субъективная вероятность. Индивидуальная экспертная оценка частоты наступления событий, базирующаяся на профессиональном опыте, а не на статистических выборках.

- Неполнота. Отсутствие части данных, необходимых для детерминированного расчета (например, отсутствие данных о ветре на эшелоне).

- Расплывчатость. Качественная характеристика объектов или процессов, которая не может быть адекватно выражена в иной форме, кроме лингвистической (например, категория «сложная воздушная обстановка»).

Сложность задач описания реального мира на естественном языке потребовала внедрения формальных методов, способных оперировать приближенными рассуждениями. Введенная Л. Заде теория нечётких множеств

(Fuzzy Sets Theory) [88, 89] предоставляет необходимый математический аппарат для обработки «расплывчатых» категорий [104], позволяя сохранить семантическую насыщенность экспертных оценок при их алгоритмизации.

Центральным понятием предлагаемой модели является «лингвистическая переменная» – переменная, значениями которой являются не числа, а слова или предложения естественного или искусственного языка [103]. Использование лингвистических переменных позволяет преодолеть «барьер сложности», возникающий при попытке описать гуманитарные аспекты принятия решений языком дифференциальных уравнений.

В рамках исследования учитываются следующие ключевые свойства лингвистических переменных, выявленные в ходе анализа предметной области:

- Проблемная ориентированность. Семантика термина зависит от контекста задачи. Например, понятие «высокая скорость» имеет различные числовые эквиваленты для этапа руления (30 узлов) и этапа полета на эшелоне (450 узлов).
- Профессиональная ориентированность. Специалисты различных профилей характеризуют одни и те же физические величины по-разному. Восприятие интервалов эшелонирования у пилота и диспетчера может различаться в силу специфики их задач.
- Ситуационная адаптивность. Значения переменных обладают ситуационными особенностями. Понятие «безопасный интервал» («далеко» – «близко») варьируется в зависимости от динамики сближения: оно различно для ВС, следующих параллельными курсами, и для ВС, находящихся на встречно-пересекающихся курсах.
- Индивидуальность. Функции принадлежности могут отражать субъективный стиль работы конкретного диспетчера, позволяя системе адаптироваться под уровень квалификации и психофизиологическое состояние диспетчера.

Таким образом, переход от количественных шкал к лингвистическим переменным позволяет создать адаптивную модель, которая «рассуждает» в терминах, изоморфных профессиональному мышлению авиадиспетчера.

В предлагаемом исследовании выбран аппарат нечёткой логики (Fuzzy Logic), предложенный Л. Заде [88, 89] и развитый в работах Е. Мамдани [90, 107]

Выбор обусловлен следующими факторами:

1. Формализация лингвистической неопределенности. Диспетчеры УВД оперируют качественными категориями: «плотный поток ВС», «ситуация сложная», «погода плохая», однако восприятие данных категорий зависит от конкретного человека, его профессиональных качеств, опыта и т.д. Нечёткая логика позволяет перевести эти экспертные знания в математические функции принадлежности без потери смысловой нагрузки.

2. Плавный и нелинейный характер модели. Переход от состояния «норма» к состоянию «перегрузка» имеет плавный и нелинейный характер. Гибридные функции принадлежности (сочетание линейных и гауссовых форм) позволяют приближенно описывать такие переходы [104, 105].

3. «Мягкие» вычисления. В отличие от жестких пороговых алгоритмов, нечеткий вывод обеспечивает гладкую поверхность управления и снижает чувствительность результата к малым флуктуациям входных параметров [90, 104, 105, 107], что критически важно для обеспечения стабильности и безопасного ОВД.

Таким образом, предлагаемый метод не отменяет действующую Методику [15], а дополняет ее модулем динамической коррекции, трансформируя статический норматив $\mu_{\text{статич}}$ в адаптивную функцию времени (формула 1.4).

Следствием рассмотренного обзора является формирование набора требований к модели нормирования пропускной способности секторов ОВД. Во-первых, модель должна обеспечивать контекстность: одинаковый объём ВД при разной структуре потоков и разных ограничениях ВП должен приводить к различным рекомендациям по корректировке пропускной способности.

Во-вторых, требуется устойчивость к неопределённости прогнозов (по ВД и ограничениям) и к неполноте информации, что исключает жёстко пороговые схемы как единственный механизм.

В-третьих, в силу высокой значимости безопасности ОВД принципиально важны интерпретируемость и возможность объяснить причину снижения/повышения нормируемой пропускной способности, а также возможность экспертной валидации и последующей калибровки.

При использовании трёх входных переменных (объём ВД в процентах от норматива, индекс сложности и индекс ограничений) математический аппарат должен уметь:

1. агрегировать разнородные факторы и неопределённые оценки;
2. задавать плавные переходы между состояниями «нормально/напряжённо/перегруз»;
3. предоставлять прозрачную логику формирования результата («какие условия привели к снижению пропускной способности»).

Этим требованиям в наибольшей степени соответствует нечёткий вывод, который позволяет формализовать экспертные знания в виде правил ЕСЛИ-ТО и совместить их с вычисляемыми индексами сложности и ограничений. Таким образом, обзор практик провайдеров АНО логически подводит к обоснованию выбора нечёткой логики (fuzzy logic) как аппарата, обеспечивающего баланс между формализацией, адаптивностью и интерпретируемостью.

Выводы по главе 1

1. Проведённый анализ показал, что в международной практике пропускная способность трактуется не как фиксированная характеристика отдельного элемента системы (сектора, аэродрома), а как результат взаимодействия множества факторов, включая структуру ВП, организацию

потоков, уровень автоматизации, качество информационного обмена и наличие ограничений, что определяет необходимость комплексного подхода к её оценке.

2. Анализ действующих нормативных методик показал, что используемые в них подходы основаны на детерминированных зависимостях и усреднённых характеристиках ВД, что обеспечивает их регламентируемость и практическую применимость, однако ограничивает их адекватность при использовании в условиях динамически изменяющейся ВО.

3. Установлено, что фактическая пропускная способность сектора ОВД определяется не только объёмом ВД, но и структурной сложностью ВО, а также ограничениями использования ВП, влияние которых в существующих методиках учитывается недостаточно или косвенно.

4. Проведённая систематизация методов определения пропускной способности показала, что существующие подходы ориентированы на различные аспекты функционирования системы и не обеспечивают комплексного учёта всех факторов, определяющих пропускную способность.

5. Установлено, что в современных системах управления воздушным движением реализуется переход от статического нормирования пропускной способности к её динамическому управлению, основанному на балансировании спроса и доступной пропускной способности с использованием процедур АТФМ и CDM.

6. На основании проведённого анализа обосновано представление пропускной способности сектора ОВД в виде функции трёх ключевых факторов: объёма ВД, структурной сложности ВО и ограничений использования ВП, что формирует основу для построения модели динамического нормирования.

7. Установлено, что существующие методы не обеспечивают одновременного учёта разнородных факторов, неопределённости и нелинейного характера их влияния, что приводит к необходимости применения математического аппарата, способного агрегировать количественные и качественные показатели.

8. Обосновано, что теория нечётких множеств и аппарат нечёткого вывода в наибольшей степени соответствуют требованиям к модели динамического нормирования пропускной способности, поскольку обеспечивают формализацию экспертных знаний, учёт лингвистической неопределённости, нелинейность зависимости и интерпретируемость результатов.

Таким образом, результаты проведённого анализа позволяют сформулировать научную задачу исследования, заключающуюся в разработке модели динамической оценки и коррекции пропускной способности сектора ОВД на основе интеграции факторов объёма движения, сложности ВО и ограничений ВП с использованием аппарата нечёткой логики.

ГЛАВА 2. РАЗРАБОТКА МЕТОДА ДИНАМИЧЕСКОЙ КОРРЕКТИРОВКИ ПРОПУСКНОЙ СПОСОБНОСТИ СЕКТОРОВ ОВД НА ОСНОВЕ ГИБРИДНОЙ НЕЧЁТКОЙ МОДЕЛИ

2.1. Формальная постановка задачи и формализация системы нечёткого вывода

Разрабатываемая система поддержки принятия решений (СППР) формализуется как система нечеткого вывода (Fuzzy Inference System – FIS) типа Мамдани [90, 107]. Данный выбор обусловлен необходимостью сохранения интерпретируемости модели «Белый ящик» («White Box AI»), поскольку в задачах, связанных с безопасностью полётов, алгоритм должен допускать верификацию логики принятия решения, экспертную проверку правил и прослеживаемость связи между входными факторами и выходной рекомендацией [108, 109].

Под «белым ящиком» в настоящей работе понимается модель, внутренняя логика которой может быть представлена в форме понятных человеку правил, функций принадлежности и процедур вывода [108-111]. Нечёткая модель Мамдани обладает указанным свойством при условии явного задания термов, функций принадлежности и базы правил, что позволяет использовать её как интерпретируемый алгоритм поддержки принятия решений [90, 107].

В отличие от непрозрачных моделей, система нечёткого вывода позволяет выполнить формализацию результата: определить активированные правила, степени принадлежности входных переменных соответствующим термам и вклад каждого правила в агрегированный выход. Благодаря этому итоговая рекомендация может быть объяснена в терминах исходных факторов: текущей загрузки сектора, структурной сложности ВО и ограничений ИВП.

Модели глубокого обучения способны обеспечивать высокую точность при наличии больших обучающих выборок, однако их применение в задачах,

связанных с безопасностью, осложняется ограниченной объяснимостью и трудностью формальной проверки причинно-следственной логики принятия решения (являются «черными ящиками» - «black box») [108-111]. Поэтому в авиационных автоматизированных системах УВД (АС УВД), особенно на ранних этапах внедрения интеллектуальных СППР, предпочтение часто отдаётся интерпретируемым или гибридным моделям, допускающим экспертную проверку и валидацию [108, 109, 112].

В документах EASA и FAA, посвящённых применению искусственного интеллекта в авиации, подчёркивается необходимость обеспечения доверенности, контролируемости, объяснимости и безопасности AI-приложений, особенно если они используются в задачах, связанных с безопасностью полётов [108-110]. В материалах ICAO также отмечается необходимость выработки согласованных подходов к безопасному и эффективному внедрению AI-ассистентов в авиации [111]. В связи с этим для разрабатываемой СППР принципиально важна возможность объяснения результата и проверки логики работы модели экспертами ОВД.

Математическая модель рассматриваемой системы задаётся упорядоченным кортежем из пяти элементов [31]:

$$FIS = \langle X, Y, T, B, M \rangle, \quad (2.1)$$

где X – множество входных переменных; Y – множество выходных переменных; T – совокупность лингвистических термов и соответствующих функций принадлежности; B – база продукционных правил; M – механизм нечёткого вывода.

Рассмотрим содержание каждого элемента данного кортежа более подробно.

Представление системы нечёткого вывода в виде совокупности взаимосвязанных функциональных компонентов является распространённым способом формального описания нечётких и интеллектуальных систем управления [88, 89, 90, 107]. Такой способ описания позволяет формализовать структуру системы как совокупность взаимосвязанных компонентов, каждый из которых выполняет строго определённую функцию в процессе обработки информации и

выработки управляющего решения.

В рамках данной структуры выделяются следующие функциональные компоненты.

Интерфейс взаимодействия с объектом управления (X, Y). Данный компонент определяет состав входных и выходных переменных системы, то есть устанавливает, какие параметры внешней среды и состояния объекта подлежат наблюдению, а также какие управляющие воздействия или рекомендации формируются системой.

Семантическое ядро ($\mathcal{J}$). Указанный элемент задаёт лингвистическое описание предметной области, обеспечивая переход от количественных значений параметров к их качественной интерпретации в терминах, используемых экспертом. Иными словами, именно на этом уровне числовые данные соотносятся с лингвистическими переменными, их терм-множествами и соответствующими функциями принадлежности [88, 89].

Логическое ядро ($\mathcal{B}$). Данный компонент включает базу продукционных правил, отражающих экспертные знания о закономерностях функционирования системы. Правила вида «ЕСЛИ–ТО» обеспечивают формализованное представление логики принятия решений, характерной для специалиста в рассматриваемой предметной области.

Вычислительное ядро ($\mathcal{M}$) базируется на алгоритме Мамдани и включает совокупность математических процедур и алгоритмов, используемых для фаззификации входных данных, реализации механизма нечёткого вывода и последующей дефаззификации результатов [90, 107].

Представленная декомпозиция обеспечивает структурную прозрачность модели и создаёт предпосылки для независимой верификации её отдельных компонентов. В частности, она позволяет отдельно выполнять настройку функций принадлежности, анализ полноты и непротиворечивости базы правил, а также оценку корректности используемого механизма вывода.

Далее вектор входных переменных X рассматривается как совокупность лингвистических переменных, характеризующих текущее состояние сектора ОВД:

$$X = \{x_1, x_2, x_3\}, \quad (2.2)$$

где $x_1 = V$, $x_2 = C$, $x_3 = R$.

Выбор именно этих трех переменных обусловлен принципом необходимой и достаточной информативности для оценки рабочей нагрузки диспетчера и текущего состояния сектора ОВД:

- x_1 (обозначается как V , volume) характеризует объем ВД, то есть текущую интенсивность функционирования сектора. Данный параметр выступает базовым количественным индикатором нагрузки и традиционно используется в Методике НПС [15]. Вместе с тем в рамках предлагаемой модели указанная переменная рассматривается не в абсолютном, а в относительном выражении – как доля от нормативной пропускной способности сектора, выраженная в процентах. Такой подход обеспечивает универсальность модели, позволяя применять её к секторам с различными установленными нормативами без необходимости изменения общей структуры нечёткого аппарата.

- x_2 (обозначается как C , complexity) представляет собой индекс структурной сложности ВО. Необходимость её введения обусловлена тем, что фактическая загруженность диспетчера определяется не только количеством ВС, находящихся в секторе, но и характером их пространственно-временного взаимодействия. Результаты исследований в области оценки загруженности диспетчера [84, 113-115] показывают, что одинаковое число ВС может соответствовать принципиально различным уровням когнитивной и операционной сложности в зависимости от конфигурации потоков, числа потенциальных конфликтных ситуаций, направлений движения, вертикальных эволюций и степени концентрации конфликтных взаимодействий в ограниченной области пространства [116]. Следовательно, введение переменной C позволяет устранить одно из ключевых ограничений линейных методик, состоящее в игнорировании топологии потока ВД и его конфликтной структуры.

- x_3 (обозначается как R , restrictions) отражает коэффициент доступности ВП, характеризующий степень доступности ВП в пределах рассматриваемого сектора [23, 67, 117-118]. В отличие от переменных V и C ,

описывающих состояние ВД, параметр R учитывает влияние внешних факторов, изменяющих фактически доступный объём ВП и, как следствие, условия обеспечения безопасного ОВД. К числу таких факторов относятся активизация зон ограничения полётов, метеорологические явления, а также эксплуатационные и технические ограничения, связанные, например, с отказами оборудования или изменением конфигурации использования ВП. Введение переменной R обеспечивает адаптацию модели к изменяющимся условиям функционирования сектора и позволяет корректно учитывать снижение его операционных возможностей, обусловленное не субъективными характеристиками деятельности диспетчера, а объективным уменьшением доступного ВП для безопасного ОВД.

Таким образом, выбранная совокупность входных переменных (V, C, R) формирует логически завершённую систему факторов, описывающих соответственно интенсивность ВД, структурную сложность ВО и влияние внешних ограничений на доступность ВП сектора. Их совместное использование позволяет перейти от упрощённой одномерной оценки загрузки к более адекватному и практически значимому представлению об операционном состоянии сектора ОВД, что особенно важно в условиях высокой динамичности ВО и неоднородности факторов, воздействующих на пропускную способность. Следовательно, вектор входных переменных модели может быть представлен в следующем виде: $X = \{V, C, R\}$.

Вектор выходных переменных (Y) и терм-множества ($\mathcal{T}$). В отличие от входного вектора, включающего совокупность параметров, характеризующих текущее состояние сектора ОВД, выход модели представлен одной переменной, отражающей итоговое управляющее воздействие, формируемое системой нечёткого вывода:

$$Y = \{y\} = K_{\text{кор}}, \quad (2.3)$$

где $y = K_{\text{кор}}$ – коэффициент коррекции НПС сектора ОВД.

Содержательно данная переменная характеризует результат комплексного учёта интенсивности ВД, его структурной сложности ВО и действующих ограничений ВП. Иными словами, выход нечёткой системы представляет собой не

абстрактную оценку состояния сектора, а практико-ориентированный управляющий параметр, предназначенный для корректировки установленного статического норматива пропускной способности.

Использование такой выходной переменной позволяет перейти от фиксированного нормативного значения к его динамической интерпретации, учитывающей текущую аэронавигационную обстановку. При этом динамический норматив пропускной способности определяется посредством умножения статического норматива на вычисленный системой коэффициент коррекции. В общем виде данное соотношение может быть представлено согласно формуле 1.4.

Семантическое содержание выходной переменной определяется соответствующим терм-множеством. Для выходной переменной y введено следующее множество лингвистических термов, отражающих различные уровни управляющего воздействия на пропускную способность сектора (рисунок 2.1):

$$T(y) = \{\text{закрытие, уменьшенная, сниженная, максимальная}\} \quad (2.4)$$

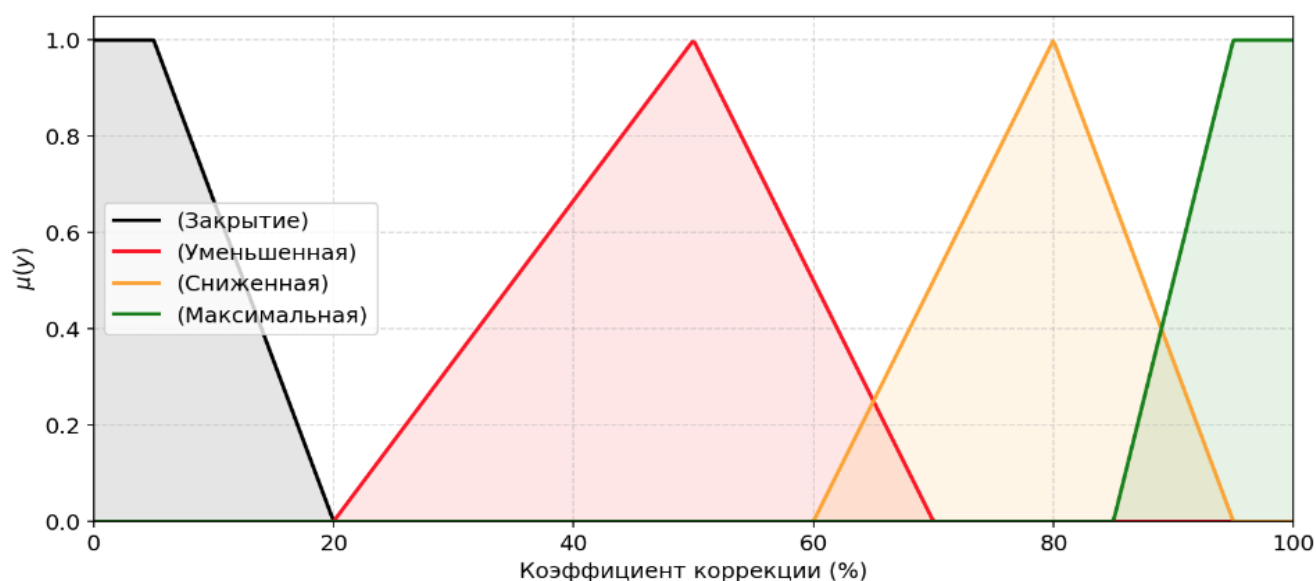


Рисунок 2.1 – Функции принадлежности коэффициента коррекции пропускной способности

Функции принадлежности $\mu_{z_m}(y)$ определены на универсуме $[0, 100]$:

- $\mu_{\text{закр}}(y)$: трапециевидальная функция $[0, 0, 10, 20]$, соответствующая режиму закрытия сектора (пропускная способность близка к нулю);

- $\mu_{\text{ум}}(y)$: треугольная функция с центром в 50% [20,50,70], режим уменьшения потока (значительные ограничения);
- $\mu_{\text{сниж}}(y)$: треугольная функция с центром в 80% [60,80,95], режим повышенной готовности, происходит снижение пропускной способности, которое может перейти в уменьшение;
- $\mu_{\text{макс}}(y)$: трапецеидальная функция [85,95,100,100], максимальная пропускная способность (согласно заявленному НПС), штатный режим работы без ограничений.

Функции принадлежности выходной переменной $\mu_{Z_m}(y)$ определены на универсуме значений [0; 100], интерпретируемом как процент от статического норматива пропускной способности сектора. Каждая функция принадлежности соотнесена с определённым режимом оперативной коррекции и отражает качественное состояние выходной переменной y .

Для терм-множества выходной переменной приняты следующие функции принадлежности.

Терм «минимальная» описывается трапецеидальной функцией принадлежности $\mu_{\text{мин}}(y)$, заданной параметрами [0,0,20]. Данный терм соответствует режиму, при котором пропускная способность сектора практически исчерпана, а его дальнейшее использование либо невозможно, либо допустимо лишь в предельно ограниченном объёме. Указанная область соответствует режиму фактического закрытия сектора для потока ВС (пропускная способность близка к нулю).

Терм «уменьшенная» задаётся треугольной функцией принадлежности $\mu_{\text{ум}}(y)$, с параметрами [20,50,70]. Указанный терм характеризует состояние сектора, при котором требуется существенное ограничение интенсивности ВД вследствие выраженного снижения его операционных возможностей.

Терм «сниженная» описывается треугольной функцией принадлежности $\mu_{\text{сниж}}(y)$, с параметрами [60,80,95]. Данный режим соответствует состоянию повышенной операционной напряжённости, при котором сектор сохраняет работоспособность, однако требует снижения пропускной способности по

сравнению со штатным уровнем. В рассматриваемом диапазоне система фиксирует переходную область между умеренным ограничением и более жёстким снижением допустимой интенсивности потока.

Терм «максимальная» задаётся трапецеидальной функцией принадлежности $\mu_{\text{макс}}(y)$, с параметрами [85, 95, 100, 100]. Этот терм соответствует штатному режиму функционирования сектора, при котором его пропускная способность близка или равна заявленному нормативному значению, а влияние дестабилизирующих факторов на ОВД является минимальным либо отсутствует.

Таким образом, выбранная система функций принадлежности обеспечивает плавный переход между различными режимами функционирования сектора ОВД и позволяет интерпретировать результат нечёткого вывода не только как численное значение коэффициента коррекции, но и как качественно определённое операционное состояние сектора ОВД.

База правил ($\mathcal{B}$) нечёткой системы представляет собой совокупность продукционных правил, устанавливающих соответствие между комбинациями входных состояний и выходным управляющим воздействием. Поскольку каждому входному параметру поставлено в соответствие конечное терм-множество, формирование базы правил осуществляется на основе декартова произведения терм-множеств входных переменных.

База знаний представляет собой множество из $N=36$ продукционных правил следующего вида:

$$R_k: \text{ЕСЛИ } x_1 \text{ есть } A_i \text{ И } x_2 \text{ есть } B_j \text{ И } x_3 \text{ есть } D_l, \text{ ТО } y \text{ есть } Z_m, \quad (2.5)$$

где: $k = 1 \dots 36$; $A_i \in T(V)$ – термы переменной объема ВД; $B_j \in T(C)$ – термы переменной, описывающей структурную сложность ВО; $D_l \in T(R)$ – термы переменной, отражающей степень доступности ВП; Z_m – лингвистические термы выходной переменной, интерпретируемой как коэффициент оперативной коррекции пропускной способности ($Z_m \in T(y)$).

Таким образом, каждое правило базы знаний формализует экспертное представление о том, каким образом конкретное сочетание интенсивности ВД,

сложности структуры потока ВС и действующих ограничений ВП должно влиять на итоговое значение коэффициента коррекции $K_{\text{кор}}(t)$.

Существенной особенностью сформированной базы правил является наличие правил приоритетного срабатывания, отражающих жёсткие эксплуатационные ограничения, связанные с обеспечением безопасности полётов. Такие правила имеют безусловный характер по отношению к отдельным входным переменным и задают доминирующее решение независимо от значений остальных факторов. В частности, при наличии полного ограничения доступности ВП используется правило вида:

Если R есть {Полные}, то u есть {Закрытие}, $\forall V, C$

Указанное правило означает, что при критическом снижении доступности ВП сектора значения переменных, характеризующих объём ВД и сложность его структуры, утрачивают определяющее значение, поскольку приоритет получает требование обеспечения безопасности и физической реализуемости эшелонирования.

Количество правил в базе определяется мощностью декартова произведения терм-множеств входных переменных:

$$N_{\text{правил}} = |T(V)| \times |T(C)| \times |T(R)| = 4 \times 3 \times 3 = 36 \quad (2.6)$$

Полнота базы правил обеспечивает определённую функциональность нечёткой системы при любых допустимых входных данных. Иными словами, для каждого возможного сочетания значений входных переменных в базе знаний существует соответствующее продукционное правило, что исключает возникновение неопределённых состояний при формировании выходного решения. Сформированная структура базы правил представлена в таблице 2.1, а–в.

Таблица 2.1, а – Блок 1. Ограничения отсутствуют ($R \approx 1,0$)

№	Объём ВД (V)	Сложность ВО (C)	Ограничения ВП (R)	Выходной $K_{кор}$ (Y)	Логическое обоснование
1	Низкий	Линейная	Отсутствуют	Максимальная	Идеальные условия. Низкая интенсивность ВД и сложность
2	Низкий	Смешанная	Отсутствуют	Максимальная	Мало ВС, сложность не оказывает влияния на ОВД
3	Низкий	высокая	Отсутствуют	Максимальная	Низкая интенсивность ВД компенсирует неблагоприятную геометрию потоков, вследствие чего сохраняется резерв пропускной способности
4	Оптимальный	Линейная	Отсутствуют	Максимальная	Штатный режим работы сектора
5	Оптимальный	Смешанная	Отсутствуют	Максимальная	Штатный режим работы сектора
6	Оптимальный	Высокая	Отсутствуют	Сниженная	Сложная геометрия при нормальном потоке ВС=риск
7	Высокий	Линейная	Отсутствуют	Сниженная	Высокая интенсивность ВД при линейной структуре потоков - управляемость ситуации, требуется снижение допустимой загрузки сектора

Окончание таблицы 2.1, а

№	Объём ВД (V)	Сложность ВО (C)	Ограничения ВП (R)	Выходной $K_{кор}$ (Y)	Логическое обоснование
8	Высокий	Смешанная	Отсутствуют	Сниженная	Высокая нагрузка, стандартная сложность
9	Высокий	Высокая	Отсутствуют	Сниженная	Высокая интенсивность ВД в сочетании с высокой структурной сложностью требует снижения допустимой пропускной способности
10	Перенасыщенный	Линейная	Отсутствуют	Уменьшенная	Сектор перегружен. Ограничение потока ВС
11	Перенасыщенный	Смешанная	Отсутствуют	Уменьшенная	Критический перегруз
12	Перенасыщенный	Высокая	Отсутствуют	Закрытие	Режим, требующий прекращения приёма входящего потока ВС

В таблице 2.1, а приведены правила, когда помех в виде ограничений использования ВП для ОВД нет. Пропускная способность ограничивается только количеством ВС и сложностью их траекторий.

Таблица 2.1, б – Блок 2. Частичные ограничения ($0,25 < R < 1,0$)

№	Объём ВД (V)	Сложность ВО (C)	Ограничения ВП (R)	Выходной $K_{кор}$ (Y)	Логическое обоснование
13	Низкий	Линейная	Частичные	Максимальная	Риск минимален, нет ограничений НПС
14	Низкий	Смешанная	Частичные	Сниженная	Ограничения + смешанный поток ВД требуют дополнительных интервалов эшелонирования
15	Низкий	Высокая	Частичные	Сниженная	Сложная ВО в ограничениях = снижение НПС
16	Оптимальный	Линейная	Частичные	Сниженная	Стандартный поток, но ограничения диктуют ограничения НПС
17	Оптимальный	Смешанная	Частичные	Сниженная	Дальнейшее увеличение загрузки сектора недопустимо
18	Оптимальный	Высокая	Частичные	Уменьшенная	Совместное влияние частичных ограничений ВП и высокой структурной сложности обуславливает необходимость существенного ограничения входящего потока ВС

Окончание таблицы 2.1, б

№	Объём ВД (V)	Сложность ВО (C)	Ограничения ВП (R)	Выходной $K_{кор}$ (Y)	Логическое обоснование
19	Высокий	Линейная	Частичные	Уменьшенная	Много ВС. «Уменьшенная» для безопасности
20	Высокий	Смешанная	Частичные	Уменьшенная	Дальнейшее увеличение загрузки сектора недопустимо.
21	Высокий	Высокая	Частичные	Закрытие	Режим, требующий прекращения приёма входящего потока.
22	Перенасыщен- ный	Линейная	Частичные	Закрытие	Режим, требующий прекращения приёма входящего потока.
23	Перенасыщен- ный	Смешанная	Частичные	Закрытие	Операционно недопустимое состояние.
24	Перенасыщен- ный	Высокая	Частичные	Закрытие	Операционно недопустимое состояние.

Режим «Максимальная» пропускная способность практически недоступна (кроме самых простых случаев), так как диспетчеру нужно больше времени на анализ ВО и решение задач ОВД.

Таблица 2.1, в – Блок 3. Полные ограничения ($R \leq 0,25$)

№	Объём ВД (V)	Сложность ВО (C)	Ограничения ВП (R)	Выходной $K_{кор}$ (Y)	Логическое обоснование
25	Низкий	Линейная	Полные	Закрытие	Закрыта большая часть ВП
26	Низкий	Смешанная	Полные	Закрытие	Закрыта большая часть ВП
27	Низкий	Высокая	Полные	Закрытие	Закрыта большая часть ВП
28	Оптимальный	Линейная	Полные	Закрытие	Закрыта большая часть ВП
29	Оптимальный	Смешанная	Полные	Закрытие	Закрыта большая часть ВП
30	Оптимальный	Высокая	Полные	Закрытие	Закрыта большая часть ВП
31	Высокий	Линейная	Полные	Закрытие	Закрыта большая часть ВП
32	Высокий	Смешанная	Полные	Закрытие	Закрыта большая часть ВП
33	Высокий	Высокая	Полные	Закрытие	Закрыта большая часть ВП
34	Перенасыщенный	Линейная	Полные	Закрытие	Закрыта большая часть ВП
35	Перенасыщенный	Смешанная	Полные	Закрытие	Закрыта большая часть ВП
36	Перенасыщенный	Высокая	Полные	Закрытие	Закрыта большая часть ВП

В таблицах 2.1, а–в представлена полная база продукционных правил нечёткой системы, структурированная по уровням ограничений ВП. Такая форма представления позволяет последовательно проследить влияние каждого из входных факторов на итоговое значение коэффициента оперативной коррекции пропускной способности.

В блоке правил, соответствующем отсутствию ограничений ВП, выходное решение определяется главным образом сочетанием объёма ВД и структурной сложности потоков ВС. При низкой и оптимальной загрузке сектора, а также при линейной или смешанной структуре воздушного движения, система допускает функционирование сектора в режиме, близком к номинальному. По мере увеличения объёма ВД и усложнения пространственно-временной структуры потока ВС значение выходной переменной последовательно смещается в область более жёсткой коррекции пропускной способности.

Во втором блоке правил учитывается наличие частичных ограничений ВП. В данном случае даже при сравнительно благоприятных значениях объёма ВД и сложности потоков система формирует более консервативное решение, поскольку сокращение доступного объёма ВП приводит к уменьшению маневренного резерва и повышает требования к обеспечению безопасного эшелонирования. По этой причине область режимов, соответствующих максимальной пропускной способности, существенно сужается, а при высоких значениях интенсивности и сложности движения система переходит к режимам значительного ограничения либо прекращения приёма дополнительного потока ВС.

Третий блок правил соответствует условиям полного или близкого к полному ограничения доступности ВП. В данном случае независимо от значений объёма ВД и структурной сложности потоков ВС выходное решение принимает значение, соответствующее закрытию сектора для дальнейшего увеличения загрузки. Такое решение обусловлено тем, что при критическом снижении доступности ВП приоритет приобретает не оптимизация использования сектора, а безусловное обеспечение безопасности полётов.

Таким образом, сформированная база правил отражает иерархию влияния рассматриваемых факторов на пропускную способность сектора: при отсутствии ограничений доминируют интенсивность движения и его структурная сложность, тогда как при существенном снижении доступности ВП решающее значение получает фактор ограничений.

Существенной особенностью базы знаний является наличие доминирующего правила безопасности – правило «Вето», в соответствии с которым при полном ограничении доступности ВП значения переменных, характеризующих объём ВД и сложность его структуры, утрачивают определяющее значение.

В рамках настоящего исследования используется механизм нечёткого вывода $\mathcal{M}$ типа Мамдани [90, 107], обеспечивающий интерпретируемую связь между экспертной базой правил и численным значением выходной переменной.

2.2. Детальное описание входных лингвистических переменных

2.2.1. Переменная объём воздушного движения (V)

Переменная V характеризует количественную загрузку сектора ОВД. В рамках настоящего исследования она задаётся не в абсолютных единицах, то есть не в виде фактического числа ВС, а в относительном выражении – как процент от установленного значения норматива пропускной способности сектора [2, 15]. Такой подход обеспечивает сопоставимость оценок для секторов с различной нормативной пропускной способностью и тем самым повышает универсальность разработанной модели.

Универсум значений переменной V задаётся следующим образом:

$$V_s(t) = \frac{\lambda_s(t)}{\mu_{\text{норм},s}} \cdot 100\%; \quad U_V = [0,120], (\%), \quad (2.7)$$

где $\lambda_s(t)$ – интенсивность входящего потока ВС в момент времени t ; $\mu_{\text{норм},s}$ –

нормативная пропускная способность сектора s .

Верхняя граница 120 % введена как расчётный запас универсального множества, позволяющий описывать состояния кратковременного превышения нормативной пропускной способности и формировать терм «перенасыщенный» (то есть используется значение предельно допустимого НПС [15]).

Для переменной V (Volume) предлагается использовать следующее термножество (рисунок 2.2):

$$T(V) = \{\text{Низкий, Оптимальный, Высокий, Перенасыщенный}\} \quad (2.8)$$

Рассмотрим математическое описание функций принадлежности, используемых для фаззификации данной переменной.

В рамках исследования предложен гибридный подход, при котором для различных термов применяются функции разного типа, наиболее адекватно отражающие их содержательный смысл.

Терм «Низкий» описывается трапецеидальной функцией принадлежности:

$$\mu_{\text{низ}} = (u; a, b, c, d) = \max\left(\min\left(\frac{u-a}{b-a}, 1, \frac{d-u}{d-c}\right), 0\right), \quad (2.9)$$

где u – фактическая загрузка сектора в данный момент времени, выраженная в процентах от нормативной пропускной способности; a, b, c, d – выбранные параметры терма «Низкий» [0, 0, 30, 60].

В диапазоне от 0% до 30% функция равна 1. Это зона «абсолютно низкого» потока ВС, где нагрузка минимальна и линейна. Спад до 0 происходит при увеличении потока ВС на 30-60%.

Терм «Оптимальный» описывается функцией Гаусса:

$$\mu_{\text{опт}}(u; c, \sigma) = \exp\left(-\frac{(u-c)^2}{2\sigma^2}\right), \quad (2.10)$$

где $c=60$, $\sigma = 15$.

Параметр c определяет центр функции принадлежности, то есть значение, соответствующее максимальной степени принадлежности к терму «оптимальный». В рассматриваемой модели уровень загрузки порядка 60 % интерпретируется как наиболее благоприятный с точки зрения соотношения между интенсивностью ВД

и возможностями предоставления диспетчерского обслуживания. Параметр σ задаёт ширину области комфортного функционирования. Использование гауссовой функции позволяет описать плавное и нелинейное уменьшение степени принадлежности по мере отклонения от центрального значения терма [107], что в большей степени соответствует реальным особенностям изменения загруженности диспетчера.

Терм «Высокий» также описывается гауссовой функцией принадлежности того же вида, однако с параметрами $c = 85$ и $\sigma = 15$. Смещение центра в область более высоких значений отражает предкритический уровень загрузки сектора, при котором интенсивность ВД уже оказывает существенное влияние на загруженность диспетчера, но сектор ещё сохраняет работоспособность при условии благоприятной структуры потока ВС и отсутствия дополнительных ограничений ВП.

Терм «Перенасыщенный» описывается односторонней S-образной функцией (сигмоидой), моделирующей эффект «плеча» или насыщения:

$$\mu_{\text{пер}}(u; c, \sigma) = \frac{1}{1 + e^{-\alpha(u-c)}} \quad (2.11)$$

или, в упрощенном виде для кортежа FIS (гауссова комбинация):

$$\mu_{\text{пер}}(u) = \begin{cases} \exp\left(-\frac{(u-c)^2}{2\sigma^2}\right), & u < c, \\ 1, & u \geq c, \end{cases} \quad (2.12)$$

где $c = 100$, $\sigma = 10$.

Сигмоидальная функция используется для описания монотонного перехода в область насыщения, когда превышение порогового значения (при приближении значения u к 100 %) приводит к резкому росту степени принадлежности соответствующему терму [15]. Тем самым любой уровень загрузки, превышающий НПС, интерпретируется как состояние перегрузки сектора.

Таким образом, выбранная система функций принадлежности обеспечивает адекватное представление различных режимов загрузки сектора ОВД – от минимальной интенсивности ВД до состояния перенасыщения.

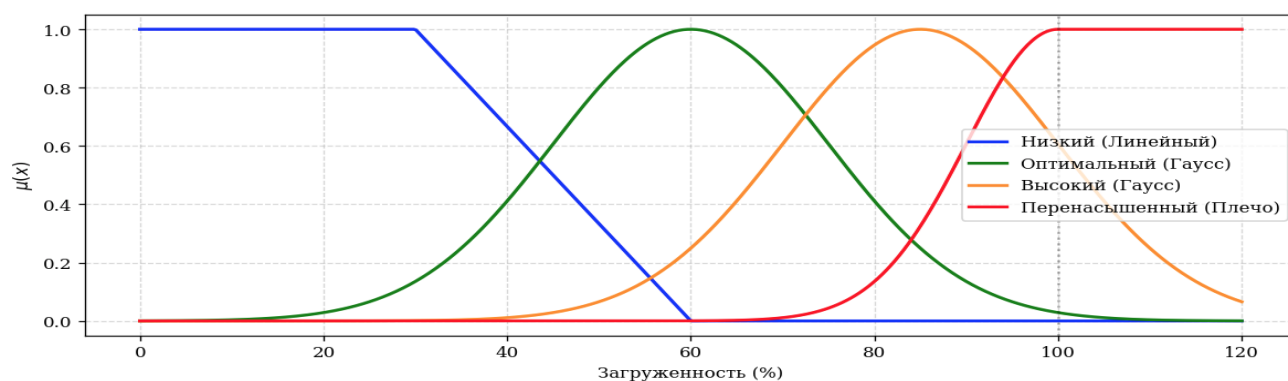


Рисунок 2.2 – График функции принадлежности переменной V

2.2.2. Переменная индекс структурной сложности воздушной обстановки (C)

Переменная C представляет собой агрегированный индекс структурной сложности ВО, характеризующий топологию ВД. В отличие от переменной V , отражающей прежде всего количественную сторону загрузки, переменная C описывает качественные особенности воздушной обстановки, определяющие уровень когнитивной и операционной загруженности диспетчера УВД [2, 40, 113-116].

Универсум значений переменной сложности задаётся в виде $U_C = [0,10]$. Выбор данного диапазона обусловлен необходимостью согласования математического описания с результатами экспертного оценивания, выполненного с использованием десятибалльной шкалы. Такая шкала интуитивно понятна практическим специалистам и позволяет сопоставить расчётный индекс сложности ВО с субъективным восприятием рабочей нагрузки диспетчера УВД. По своему назначению данный подход близок к субъективным методикам оценки рабочей нагрузки оператора, в том числе NASA-TLX [119].

В рамках проведённого исследования была выполнена экспертная оценка характеристик сложности с привлечением 30 специалистов РДЦ [116]. При этом нижняя граница шкалы (0 баллов) соответствует полностью структурированному и упорядоченному движению, при котором ВС следуют по согласованным

маршрутам с минимальным числом конфликтных взаимодействий, тогда как верхняя граница (10 баллов) отражает предельно сложную конфигурацию воздушной обстановки, характеризующуюся множественными пересечениями траекторий, встречными эволюциями по высоте, неоднородностью скоростных режимов и иными факторами, затрудняющими обеспечение безопасного эшелонирования.

Переменная C характеризуется следующим терм-множеством:

$$T(C) = \{\text{линейная, смешанная, высокая}\} \quad (2.13)$$

Терм «Линейная» описывается Z-образной функцией (представлена на рисунке 2.3). Это сплайн-функция, которая сохраняет значение 1 на начальном участке и плавно спадает до 0, выражается:

$$\mu_{\text{лин}}(u; a, b) = \begin{cases} 1, & u \leq a \\ 1 - 2 \left(\frac{u - a}{b - a} \right)^2, & a < u \leq \frac{a + b}{2} \\ 2 \left(\frac{b - u}{b - a} \right)^2, & \frac{a + b}{2} < u < b \\ 0, & u \geq b \end{cases}, \quad (2.14)$$

где u – индекс сложности, выраженный в условных единицах сложности; a, b – выбранные параметры терма на основе экспертных оценок [31]. В работе приняты значения $a = 2, b = 4$.

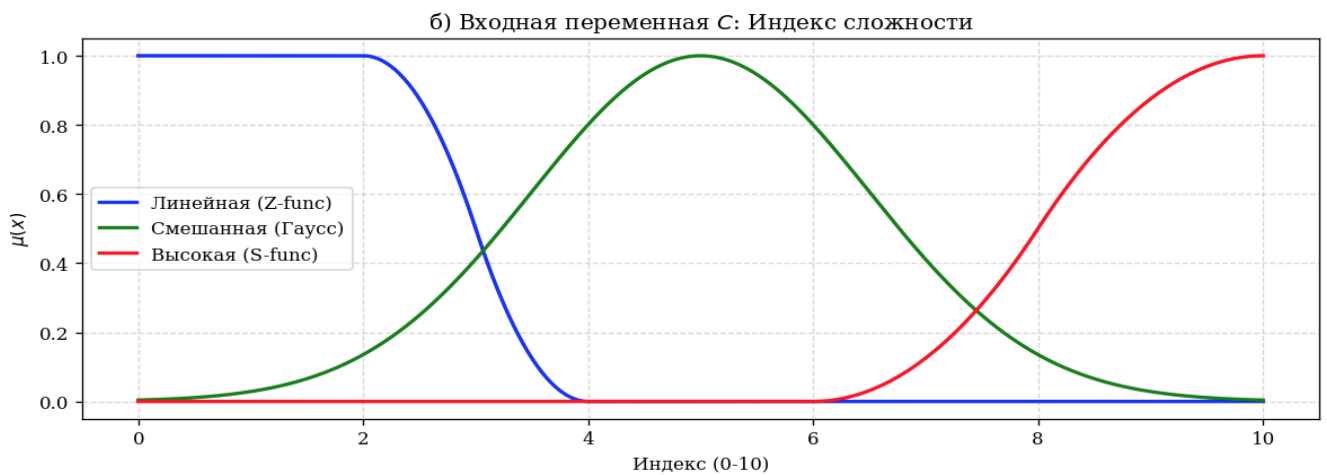


Рисунок 2.3 – График функции принадлежности переменной C

Значение $a = 2$ интерпретируется как область устойчиво низкой сложности, в которой деятельность диспетчера УВД преимущественно носит характер мониторинга ВО. Значение $b = 4$ задаёт границу исчезновения уверенной принадлежности к терму «линейная», поскольку при дальнейшем росте индекса возрастает число потенциально значимых взаимодействий ВС и возрастает потребность в активном ОВД потока ВС [2, 40, 113-115, 120].

Терм «Смешанная» описывается гауссовой функцией принадлежности:

$$\mu_{\text{смеш}}(u) = \exp\left(-\frac{(u - c)^2}{2\sigma^2}\right), \quad (2.15)$$

где центр $c = 5$ (точка равновесия) соответствует середине шкалы сложности (рисунок 2.3). Данный терм представляет собой рутинный режим работы, характеризующийся чередованием простых и умеренно сложных задач.

Значение $\sigma = 1,5$ задаёт сравнительно узкую переходную область, что позволяет избежать чрезмерного размывания данного терма на зоны явно низкой и явно высокой сложности (рисунок 2.3).

Терм «Высокая» описывается S-образной функцией принадлежности:

$$\mu_{\text{выс}}(u; a, b) = \begin{cases} 0, & u \leq a \\ 2 \left(\frac{u - a}{b - a} \right)^2, & a < u \leq \frac{a + b}{2} \\ 1 - 2 \left(\frac{b - u}{b - a} \right)^2, & \frac{a + b}{2} < u < b \\ 1, & u \geq b \end{cases} \quad (2.16)$$

где $a = 6$, $b = 10$.

Рассмотрим обоснование выбранных параметров. Параметр $a = 6$ (начало роста сложности) (рисунок 2.3) соответствует началу устойчивого перехода в область высокой сложности, когда деятельность по ОВД приобретает выраженный реактивный характер, а число потенциально значимых взаимодействий между ВС требует постоянного активного контроля. Диспетчер переходит от превентивного контроля к реактивному разрешению конфликтов, когда количество одновременно отслеживаемых конфликтов превышает объем оперативной памяти человека. Данный довод может быть дополнительно соотнесён с классическими представлениями инженерной психологии об ограниченности оперативной памяти

человека, в частности с известной работой Дж. Миллера о пределах переработки информации [120].

Параметр $b = 10$ задаёт область насыщения, при которой ситуация с полной уверенностью интерпретируется как высокосложная. При индексе 10 и выше (хотя шкала ограничена 10, математически функция готова к значениям >10) степень уверенности в том, что ситуация критическая, равна 1. Дальнейший рост сложности не меняет качественной оценки – ситуация уже является небезопасной.

2.2.3. Переменная коэффициент доступности воздушного пространства (R)

Рассмотрим физический смысл и приведем обоснование переменной. В отличие от классических моделей, учитывающих только метеоусловия, в данной работе вводится обобщенная переменная x_3 , обозначаемая как R (Restrictions).

Переменная R характеризует интегральную проницаемость (доступность) ВП сектора ОВД для планирования полетов [23, 116-118, 120]. Она принимает значения в диапазоне $U_R \in [0, 1]$, где значение $R = 1$ соответствует полностью доступному ВП, а значения, близкие к нулю, отражают его критически низкую доступность (рисунок 2.4).

Такое представление позволяет унифицировать описание разнородных ограничивающих факторов. Например, неблагоприятные метеоявления, запретные зоны, зоны ограничений ВП или эксплуатационные ограничения, включая введение специальных режимов ИВП (например, введение режима «Ковёр»), приводящие к сокращению доступной для ОВД части сектора, в рамках модели интерпретируются одинаково – как уменьшение коэффициента R [23, 116-118, 120].

Применяемое терм-множество для переменной R (Restrictions):

$$T(R) = \{\text{полные, частичные, отсутствуют}\} \quad (2.17)$$

Приведем математическое описание и обоснование параметров переменной R .

Терм «Полные» описывается Z-образной функцией принадлежности (рисунок 2.4):

$$\mu_{\text{полн}}(u; a, b) = \mu_Z(u; a, b), \quad (2.18)$$

где в качестве параметров приняты значения $a = 0$, $b = 0,25$.

В этом случае функция принадлежности принимает значение, близкое к единице, при крайне низкой доступности ВП и плавно убывает по мере увеличения R . При $R \leq 0,25$ дополнительно действует доминирующее правило безопасности («Вето»), поэтому функция принадлежности описывает не самостоятельное решение, а семантическую область полного ограничения.

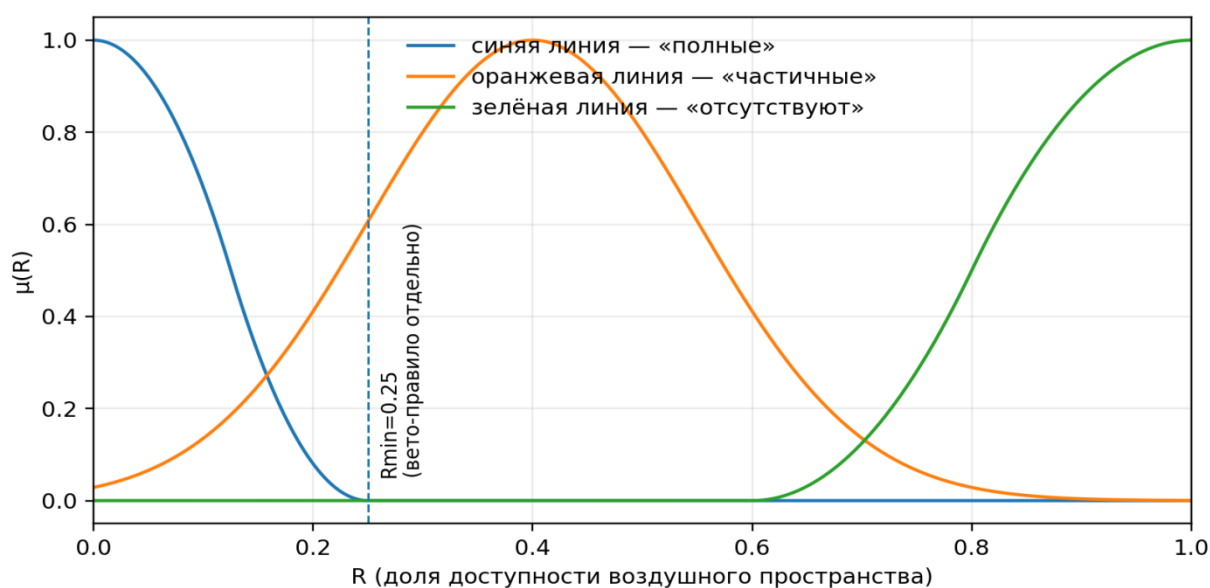


Рисунок 2.4 – График функции принадлежности переменной R

Общий вид Z-образной функции может быть представлен следующим образом:

$$\mu_Z(u; a, b) = \begin{cases} 1, & u \leq a \\ 1 - 2 \left(\frac{u - a}{b - a} \right)^2, & a < u \leq \frac{a + b}{2} \\ 2 \left(\frac{b - u}{b - a} \right)^2, & \frac{a + b}{2} < u < b \\ 0, & u \geq b \end{cases}, \quad (2.19)$$

где u – аргумент (значение коэффициента доступности ВП); a, b – параметры функции ($a < b$), определяющие границы перехода функции от 1 к 0.

При этом в модели дополнительно вводится доминирующее правило безопасности («Вето»), согласно которому при $R(t) \leq R_{\min} = 0,25$ сектор рассматривается как фактически недоступный для дальнейшего увеличения потока ВС, а система формирует решение, соответствующее закрытию сектора, независимо от значений остальных входных переменных. Следовательно, функции принадлежности для переменной R используются прежде всего для описания плавных переходов между режимами вне области приоритетного ограничения.

В настоящей работе принято значение $R_{\min} = 0,25$, что соответствует критическому сокращению ресурса сектора (доступно не более 25% объёма). Важно подчеркнуть, что «вето»-условие задаётся отдельно и имеет приоритет над результатами нечёткого вывода; функции принадлежности $\mu(R)$ используются для градаций ограничений вне зоны вето и для плавных переходов между режимами.

Параметры функций принадлежности для терма «Полные» задают плавный спад уверенности в принадлежности к категории «полные ограничения» по мере увеличения R и не заменяют «вето»-условие. После выхода из зоны вето ($R > R_{\min}$) ограничения интерпретируются преимущественно как «частичные», что соответствует переходу к режимам снижения пропускной способности (например, «уменьшенная/сниженная»), без полного закрытия сектора.

Терм «Частичные» ограничения описывается функцией принадлежности Гаусса:

$$\mu_{\text{част}}(u; c, \sigma) = \exp\left(-\frac{(u - c)^2}{2\sigma^2}\right), \quad (2.20)$$

где $c = 0,4$, $\sigma = 0,15$.

Центр функции соответствует состоянию, при котором доступна лишь часть ВП, а диспетчерское обслуживание осуществляется в условиях заметного сужения маневренного ресурса. Выбор сравнительно малого значения σ позволяет локализовать данный режим в ограниченном диапазоне и тем самым обеспечить его содержательную отличимость от режимов полного ограничения и практически свободного ВП.

Терм «Отсутствуют» описывается S-образной функцией принадлежности:

$$\mu_{\text{отсут}}(u; a, b) = \mu_S(u; a, b), \quad (2.21)$$

где точка $a = 0,6$, $b = 1,0$.

Такой выбор параметров означает, что при доступности более 60 % ВП система начинает интерпретировать условия функционирования сектора ОВД как близкие к штатным. По мере приближения коэффициента R к единице уверенность в принадлежности к терму «отсутствуют ограничения» возрастает и достигает максимума в условиях практически полной доступности ВП сектора.

Использование S-образной функции в данном случае отражает нелинейный характер роста операционной устойчивости: при переходе от умеренно ограниченного к более доступному состоянию ВП сектора ОВД одинаковый прирост доступности ВП обеспечивает более заметное расширение возможностей маневрирования ВС, чем аналогичный прирост в условиях, уже близких к полному отсутствию ограничений.

2.3. База нечётких правил и механизм вывода

Принципиальным требованием к предлагаемой модели является её интерпретируемость. Для задач ОВД это требование имеет не вспомогательное, а базовое значение: расчётный результат должен быть объясним диспетчеру УВД, старшему диспетчеру или руководителю полётов, поскольку именно человек остаётся ответственным субъектом принятия оперативного решения.

2.3.1. Структура модели и анализ топологии базы знаний

Ядром разработанной системы является база нечетких правил $\mathcal{B}$, которая представляет собой лингвистическую аппроксимацию многомерной функции коррекции пропускной способности:

$$y = f(V, C, R), \quad (2.22)$$

где y – выходная переменная, интерпретируемая как коэффициент оперативной коррекции пропускной способности сектора ОВД ($K_{\text{кор}}$).

Каждое правило R_k задаётся формальной импликацией вида, принятого в системах нечёткого вывода типа Мамдани [90, 107]:

$$R_k: \text{ЕСЛИ } (x_1 \text{ есть } A_i) \wedge (x_2 \text{ есть } B_j) \wedge (x_3 \text{ есть } D_l) \Rightarrow (y \text{ есть } Z_m), \quad (2.23)$$

где $k = 1 \dots 36$; $A_i \in T(V)$, $B_j \in T(C)$, $D_l \in T(R)$, $Z_m \in T(y)$.

Сформированная база правил подлежит анализу с точки зрения полноты и непротиворечивости. Для исключения неопределённости при принятии решения она построена на основе полного охвата всех возможных сочетаний входных лингвистических термов. При условии покрытия универсумов входных переменных соответствующими функциями принадлежности полнота базы правил обеспечивает наличие по меньшей мере одного активированного правила для любой допустимой точки входного пространства, то есть $\sum \alpha_k > 0$.

Указанное свойство гарантирует корректность функционирования системы на всём допустимом множестве входных данных и исключает возникновение областей, в которых управляющее решение не формируется.

Содержательный анализ базы знаний показывает, что введение переменной R позволяет организовать правила в виде трёх иерархически упорядоченных групп, соответствующих различным уровням доступности ВП.

Первая группа соответствует штатному режиму функционирования, при котором ограничения ВП отсутствуют. В этом случае итоговое значение выходной переменной определяется главным образом сочетанием объёма воздушного движения V и структурной сложности ВО C . При низкой и оптимальной загрузке

сектора ОВД, а также при линейной или смешанной структуре ВД система формирует решение, соответствующее максимальному уровню пропускной способности. Вместе с тем при сочетании оптимального объёма ВД с высокой структурной сложностью вводится консервативная коррекция, переводящая выходной параметр в терм «сниженная». Тем самым учитывается, что даже при умеренном числе ВС сложная геометрия потоков способна существенно увеличить загруженность диспетчера и сократить фактически доступный резерв пропускной способности.

Вторая группа правил описывает режим частичных ограничений ВП. В этом случае уменьшение доступного объёма ВП сектора ОВД, вызванное, например, метеорологическими условиями, ограничениями использования ВП или необходимостью обходных маршрутов, приводит к систематическому снижению допустимого уровня пропускной способности. По существу, по сравнению со штатным режимом все оценки смещаются в сторону более жёсткой коррекции. Ситуации, которые при отсутствии ограничений соответствовали бы максимальной пропускной способности, в условиях частичной недоступности ВП интерпретируются как режимы сниженной или уменьшенной пропускной способности. Это отражает нелинейный характер деградации операционных возможностей сектора ОВД в условиях пространственных стеснений.

Третья группа соответствует режиму критического ограничения доступности ВП. При снижении коэффициента доступности ВП сектора ОВД ниже установленного порогового значения вступает в действие доминирующее правило безопасности («Вето»), в соответствии с которым влияние переменных V и C перестаёт быть определяющим. Формально данное правило может быть записано в виде:

$\forall v, c$: ЕСЛИ R есть «Полные», ТО u есть «Закрытие».

Смысл данного условия состоит в том, что при критическом сокращении доступного объёма ВП дальнейшее использование сектора для приёма потока ВС становится недопустимым независимо от текущей интенсивности ВД и конфигурации траекторий ВС. Тем самым в модели реализуется приоритет

требования безопасности над соображениями использования остаточной пропускной способности.

Следовательно, введение переменной R позволяет перейти от упрощённой модели, ориентированной преимущественно на внутренние характеристики ВД, к более общей схеме, учитывающей как параметры самого потока ВС, так и внешние факторы, определяющие доступность ВП сектора ОВД. Это обеспечивает возможность обработки широкого спектра ограничений – неблагоприятных метеорологических условий, режимных ограничений, связанных с временным закрытием отдельных элементов ВП, – в рамках единого математического аппарата.

2.3.2. Математический аппарат логического вывода

Механизм вывода $\mathcal{M}$ реализует отображение входного векторного пространства $\mathbf{X} \in \mathbb{R}^3$ в скалярное выходное пространство $\mathbf{Y} \in \mathbb{R}^1$.

В настоящей работе используется алгоритм нечёткого вывода типа Мамдани [90, 107], поскольку он обеспечивает высокую интерпретируемость как промежуточных, так и итоговых результатов. Это особенно важно для задач оценки пропускной способности сектора ОВД, где получаемое решение должно быть не только вычислительно корректным, но и содержательно понятным специалисту.

Вычислительная процедура включает четыре последовательно выполняемых этапа.

Этап 1. Фаззификация и агрегирование условий. На вход системы поступает вектор четких измерений, полученных от автоматизированных систем автоматически или введенных оператором:

$$\mathbf{x}^0 = (v_0, c_0, r_0), \quad (2.24)$$

где v_0 – текущее значение объема ВД (например, 85%); c_0 – текущее значение индекса сложности ВО (например, 7,2); r_0 – текущее значение коэффициента

доступности ВП (например, 0.5).

Для каждого правила R_k из базы знаний ($k = 1 \dots 36$) вычисляется степень истинности α_k . Поскольку antecedentes правил объединены логическим оператором «И» (конъюнкция), математически это реализуется через операцию пересечения нечетких множеств с использованием Т-нормы (функции минимума):

$$\alpha_k = \mu_{R_k}(x^0) = \min(\mu_{A_i}(v_0), \mu_{B_j}(c_0), \mu_{D_l}(r_0)), \quad (2.25)$$

где $\mu_{A_i}(v_0)$ – значение функции принадлежности терма объема ВД соответствующему лингвистическому терму; $\mu_{B_j}(c_0)$ – значение функции принадлежности терма сложности ВО; $\mu_{D_l}(r_0)$ – значение функции принадлежности терма ограничений. Использование оператора минимума отражает принцип ограничивающего условия: степень активации правила определяется наименее выраженным из его antecedентов. При $\alpha_k = 0$ правило считается неактивным.

Этап 2. Активизация заключений правил. На данном этапе определяется вклад каждого активированного правила в формирование результирующего решения. Функция принадлежности выходного терма Z_m соответствующего консеквенту правила R_k , «усекается» на уровне α_k . Используется метод Мин-импликации (отсечения) выходной функции принадлежности [90, 107]:

$$\mu'_{R_k}(y) = \min(\alpha_k, \mu_{Z_m}(y)), \quad \forall y \in U_Y, \quad (2.26)$$

где y – переменная выходного универсума (фактор пропускной способности, $0 \dots 100\%$); $\mu_{Z_m}(y)$ – исходная функция принадлежности выходного терма; $\mu'_{R_k}(y)$ – её модифицированная (усеченная) функция принадлежности после активации правила. Геометрически данная операция соответствует отсечению функции принадлежности по высоте α_k , что позволяет учесть степень уверенности системы в применимости конкретного правила.

Этап 3. Аккумуляция результатов. Поскольку одному и тому же выходному терму может соответствовать несколько активированных правил, возникает необходимость объединения их вкладов в единое результирующее нечёткое множество. Для этого используется S-норма максимума:

$$\mu_{\Sigma}(y) = \max_{k=1}^N (\mu'_{R_k}(y)) \bigcup_{k=1}^{36} \mu'_{R_k}(y) \text{ или} \quad (2.27)$$

$$\mu_{\Sigma}(y) = \max_{k=1, \dots, 36} (\mu'_{R_k}(y)), \quad y \in U_Y,$$

где $\mu_{\Sigma}(y)$ – итоговая сложная геометрическая фигура, огибающая все активированные правила; $\mu'_{R_k}(y)$ – функция принадлежности выходного термина, связанного с k -м правилом. Оператор максимума реализует логику дизъюнкции: для усиления принадлежности в некоторой точке выходного универсума достаточно срабатывания хотя бы одного правила с высокой степенью активации.

Этап 4. Дефаззификация. Заключительным этапом является преобразование результирующего нечёткого множества $\mu_{\Sigma}(y)$ в чёткое значение выходной переменной y^* , интерпретируемое как рекомендуемое значение коэффициента коррекции норматива пропускной способности сектора ОВД. В работе применяется метод центра тяжести [121, 122], обеспечивающий плавность изменения выходного значения и учёт всей формы результирующего нечёткого множества:

$$y^* = \frac{\int_{U_Y} y \cdot \mu_{\Sigma}(y) dy}{\int_{U_Y} \mu_{\Sigma}(y) dy}, \quad (2.28)$$

где y^* – представляет собой чёткое значение выходной переменной, выраженное в процентах от нормативной пропускной способности или в нормированном виде – в зависимости от принятой в модели шкалы.

Интеграл в знаменателе выражения (2.28) обозначим как M , представляет собой геометрическую площадь итоговой фигуры результирующего нечёткого множества. Характеризует суммарную «массу» нечёткого множества или уверенность системы в принятом решении, тогда как числитель (2.28) – S , представляет собой первый статический момент этой площади относительно начала координат. Переменная интегрирования y здесь выступает как «плечо рычага». Данный интеграл «взвешивает» площадь, чем правее (ближе к 100%) находится фигура, тем больше вклад в этот интеграл.

В результате получим упрощенное выражение:

$$y^* = \frac{S}{M}, \quad (2.29)$$

где y^* – выражает координату центра масс фигуры на оси Y .

Полученная величина соответствует координате центра тяжести результирующей фигуры и, тем самым, отражает компромиссное решение, формируемое системой с учётом всех активированных правил и степеней их истинности. Иначе говоря, если одни правила ориентируют систему на более жёсткое ограничение пропускной способности, а другие – на более мягкую коррекцию, итоговое значение y^* определяется как взвешенный результат их совместного действия.

При интерпретации дефаззифицированного значения y^* как процента от статического НПС соответствующий коэффициент оперативной коррекции определяется соотношением $K_{\text{кор}}(t) = y^*(t)/100$, что обеспечивает согласование результата нечёткого вывода с выражением для динамической пропускной способности сектора ОВД.

2.4. Анализ базы правил и ключевые стратегии управления

База нечётких правил B представляет собой не просто совокупность соответствий между входными и выходной переменными (таблица 2.1, а-в), а формализованное описание стратегии управления пропускной способностью сектора ОВД в условиях неопределённости и ограниченной доступности ВП. Её структура отражает принципы упорядочивания факторов, определяющих операционную допустимость воздушной обстановки, и обеспечивает реализацию механизмов, ориентированных на устойчивость функционирования и безусловное соблюдение требований безопасности полётов [2, 20, 23].

Сформированная база знаний реализует несколько ключевых стратегий управления.

Доминирующее правило безопасности при критическом ограничении ВП (ограничительное «вето»).

В традиционных расчётных подходах оценки пропускной способности нередко допускается возможность взаимной компенсации факторов, при которой неблагоприятное значение одного параметра может быть частично нивелировано благоприятными значениями других параметров. Однако применительно к задачам обеспечения безопасности полётов такая логика допустима лишь в ограниченной степени. В разработанной модели реализован принцип приоритетного учёта ограничений ВП: при критическом снижении его доступности остальные факторы перестают быть определяющими [118].

Анализ третьего блока правил, представленного в таблице 2.1 в, показывает, что для всех сочетаний входных переменных, при которых R относится к терму «полные», выходная переменная принимает значение, соответствующее закрытию сектора:

$$\forall v \in U_V, \forall c \in U_C: \text{ЕСЛИ } R \text{ есть «Полные» ТО } y \text{ есть «Закрытие»} \quad (2.30)$$

Содержательно это означает, что при падении коэффициента проницаемости сектора ниже критического уровня ($R \leq 0,25$), например вследствие активной грозовой деятельности, введения запретных режимов использования во ВП либо иных факторов (например, введение режима запрета полетов – подача сигнала «Ковёр»), приводящих к блокированию значительной части сектора, система не рассматривает низкую интенсивность ВД или простую структуру потока ВС как достаточное основание для сохранения заявленной пропускной способности. Даже при минимальном количестве ВС сектор ОВД может оказаться фактически недоступным для безопасного ОВД нового потока ВС вследствие отсутствия необходимого пространства для маневрирования и разрешения потенциальных конфликтных ситуаций.

С математической точки зрения данный эффект обеспечивается совместным действием структуры базы правил и операции минимума, используемой при агрегировании антецедентов. При высокой степени принадлежности значения r_0 терму «полные» максимальную активность получают правила, ассоциированные с

выходным термом «закрытие», вследствие чего дефаззифицированное значение выходной переменной смещается в область минимально допустимых значений. Тем самым в модели реализуется безусловный приоритет требований безопасности над стремлением сохранить номинальную пропускную способность.

Консервативная коррекция при высокой структурной сложности ВО потока ВС (стратегия «Якорь безопасности»).

Второй важной особенностью базы правил является наличие консервативных решений, активируемых в ситуациях, когда количественные показатели загрузки сектора ОВД не выходят за пределы допустимого диапазона, однако структурная сложность ВО возрастает до уровня, существенно увеличивающего рабочую нагрузку диспетчера.

Данный механизм устраняет одно из принципиальных ограничений статических нормативных подходов оценки НПС, в которых пропускная способность определяется преимущественно интенсивностью ВД и в недостаточной степени учитывает геометрию потоков, наличие точек схождения, пересечений маршрутов, разнонаправленных эшелонных эволюций и иных факторов, затрудняющих ОВД в динамически меняющейся ВО [113-116]. В разработанной модели это отражено, в частности, следующим правилом:

ЕСЛИ V есть «Оптимальный» И C есть «Высокая», то y есть «Сниженная»

Содержательный смысл данного правила состоит в том, что даже при относительно невысокой интенсивности ВД высокая структурная сложность ВО требует сохранения резерва пропускной способности. В противном случае возникает риск недооценки фактической загруженности диспетчера УВД. Следовательно, переменная C в данной ситуации выступает в качестве фактора, ограничивающего достижение максимального значения выходной переменной и обеспечивающего более консервативную настройку системы оценки пропускной способности сектора ОВД.

Нелинейная реакция на рост интенсивности ВД («Плавное насыщение»). Третья стратегическая особенность модели связана с характером её реакции на увеличение объёма ВД. Использование гладких функций принадлежности для

переменной V позволяет реализовать не пороговое, а плавное нелинейное изменение выходной переменной по мере приближения загрузки сектора к предельным значениям.

В отличие от жёстких пороговых схем, при которых переход между режимами может осуществляться скачкообразно, предлагаемая модель обеспечивает постепенное усиление ограничительных тенденций по мере смещения значения V из области оптимальной загрузки в зону высокой, а затем и перенасыщенной интенсивности. Это позволяет заранее формировать сигнал, указывающие на необходимость корректировки пропускной способности и создавать временной резерв для принятия РП упреждающих организационных решений: координации со смежными секторами, перераспределения потоков ВС и ограничения входящего потока ВД.

Таким образом, база нечётких правил реализует не только механизм вычисления выходной переменной, но и целостную стратегию управления, основанную на приоритетном учёте безопасности, консервативной коррекции в условиях высокой структурной сложности и плавном реагировании на рост интенсивности воздушного движения.

2.5. Постановка задачи параметрической адаптации

Разработанная нечёткая модель в исходной постановке формируется на основе экспертных оценок и, следовательно, в определённой степени зависит от представлений специалистов о границах лингвистических термов, характере переходов между ними и степени влияния отдельных факторов на итоговое значение выходной переменной. Такая модель обладает высокой интерпретируемостью, поскольку её логика представлена в виде функций принадлежности и продукционных правил типа «ЕСЛИ–ТО». Вместе с тем статические параметры функций принадлежности, заданные на этапе

проектирования, не всегда в полной мере отражают специфику функционирования конкретного сектора ОВД и могут требовать уточнения на основе объективных данных [88, 89, 90, 107, 122].

Необходимость параметрической адаптации обусловлена также тем, что условия эксплуатации секторов ОВД изменяются во времени под воздействием сезонных колебаний интенсивности ВД, изменения структуры ВП, внедрения новых средств автоматизации, корректировки процедур ОВД, изменения конфигурации использования ВП и иных организационно-технических факторов. В этих условиях однократная экспертная настройка параметров функций принадлежности не обеспечивает достаточной гибкости модели при её использовании в различных секторах и временных условиях [2, 38, 123].

В связи с этим в диссертационном исследовании ставится задача параметрической адаптации нечёткой модели типа Мамдани на основе выборки исторических, имитационных и экспертных данных. При этом структура модели, включающая состав входных переменных, систему лингвистических термов и базу продукционных правил, сохраняется неизменной, поскольку она отражает экспертную логику оценки динамической пропускной способности сектора ОВД. Адаптации подлежат только параметры функций принадлежности, определяющие границы и характер переходов между лингвистическими термами [122, 124-126].

Такой подход позволяет согласовать модель с особенностями конкретного сектора ОВД без утраты её интерпретируемости и без разрушения экспертно заданных правил, имеющих значение для обеспечения безопасности. В отличие от нейро-нечётких моделей, ориентированных на автоматическое формирование или существенное изменение структуры вывода, в настоящем исследовании сохраняется контролируемая экспертная архитектура Мамдани, а адаптация выполняется в пределах заранее заданной системы лингвистических переменных и продукционных правил [90, 107, 122, 124, 125].

Для обеспечения возможности автоматизированной настройки параметры функций принадлежности целесообразно задать в унифицированной форме с заданными параметрами, допускающей последующую численную оптимизацию. В

частности, в качестве аппроксимирующих функций могут быть использованы гауссовы функции принадлежности [122, 124-126]:

$$\mu_{Gauss}(x; c, \sigma) = \exp\left(-\frac{(u - c)^2}{2\sigma^2}\right), \quad (2.31)$$

где u – значение входной переменной; c – центр функции принадлежности; σ – параметр, определяющий её ширину $\sigma > 0$.

При таком подходе вектор обучаемых параметров может быть представлен в виде:

$$\theta = \{c_i, \sigma_i\}_{i=1}^L, \quad \theta \in \Theta, \quad (2.32)$$

где L – общее число настраиваемых функций принадлежности входных переменных; Θ – допустимое множество параметров, определяемое экспертными ограничениями, границами универсумов входных переменных и требованиями сохранения семантического смысла лингвистических термов.

Введение множества допустимых параметров Θ принципиально важно, поскольку адаптация функций принадлежности не должна приводить к разрушению смысловой структуры модели. В частности, центры соседних функций принадлежности должны сохранять исходный порядок следования термов, а параметры ширины должны оставаться положительными. Это исключает ситуации, при которых после настройки терм «низкий» может оказаться правее терма «высокий», либо функции принадлежности утрачивают содержательную интерпретируемость. Таким образом, адаптация рассматривается не как произвольное обучение модели, а как контролируемое уточнение её параметров в пределах экспертно заданной структуры [88, 122, 123].

Задача параметрической адаптации формулируется как задача минимизации функционала ошибки на обучающей выборке:

$$E(\theta) = \sum_{k=1}^M \left(y_{\text{цел}}^{(k)} - \hat{y}^{(k)}(x^k; \theta) \right)^2 \rightarrow \min_{\theta}, \quad (2.33)$$

где M – объём обучающей выборки; $x^{(k)}$ – вектор входных признаков для k -го наблюдения; $y_{\text{цел}}^{(k)}$ – эталонное значение выходной переменной; $\hat{y}^{(k)}(x^k; \theta)$ – значение, вычисляемое моделью при текущих параметрах θ .

В качестве эталонных значений могут использоваться решения, полученные по данным исторических журналов автоматизированных систем УВД, результатам имитационного моделирования, а также экспертной разметке типовых и нетиповых ситуаций. При этом эталонное значение не рассматривается как абсолютно истинное, а используется как ориентир для согласования параметров модели с наблюдаемыми или воспроизведёнными условиями функционирования сектора ОВД. Такой подход позволяет совместить экспертную интерпретируемость исходной модели с возможностью её уточнения по данным [2, 38, 123].

Для отдельного наблюдения квадратичная функция ошибки принимает вид:

$$E = \left(y_{\text{цел}}^{(k)} - y_{\text{расч}}^{(k)} \right)^2 \quad (2.34)$$

Выбор квадратичного критерия обусловлен его аналитической простотой, чувствительностью к значительным отклонениям и широким использованием в задачах параметрической идентификации и численной оптимизации [126, 127]. В рассматриваемой задаче данный критерий позволяет количественно оценить расхождение между эталонным значением коэффициента оперативной коррекции НПС и результатом, полученным с использованием нечёткой модели.

С практической точки зрения задача адаптации состоит в подборе таких значений параметров θ , при которых выход модели максимально согласуется с фактическими решениями, принимаемыми в реальных условиях функционирования сектора ОВД, либо с результатами имитационного моделирования, рассматриваемыми в качестве эталонных. Это позволяет уменьшить зависимость модели от межэкспертной вариативности оценок и одновременно повысить точность описания процессов оценки динамической пропускной способности.

Важным ограничением предлагаемого подхода является сохранение экспертной базы правил. В процессе параметрической адаптации не допускается автоматическое исключение правил, изменение их логической структуры или снятие консервативных условий, связанных с обеспечением безопасности. Это особенно существенно для редких, но критически важных ситуаций, например, при существенном снижении доступности воздушного пространства или резком

увеличении структурной сложности ВО. В таких случаях правила приоритетного срабатывания, включая доминирующее правило безопасности, должны сохраняться независимо от структуры обучающей выборки [90, 107, 122, 123, 128].

Таким образом, модель, представленная в главе 2, рассматривается как интерпретируемая нечёткая модель типа Мамдани с возможностью параметрической адаптации. Её структура задаёт состав входных переменных, семантику лингвистических термов и логику продукционных правил, тогда как процедура адаптации обеспечивает уточнение параметров функций принадлежности по данным реальной эксплуатации, имитационного моделирования или экспертной разметки.

Если выходная переменная $y^*(t)$ интерпретируется как процент от статической НПС, то соответствующий коэффициент оперативной коррекции НПС определяется соотношением:

$$K_{\text{кор}}(t) = \frac{y^*(t)}{100}. \quad (2.35)$$

Предложенная постановка задачи параметрической адаптации позволяет сохранить регламентируемую основу НПС и экспертную интерпретируемость модели, одновременно обеспечивая возможность её настройки под особенности конкретных секторов ОВД. В результате нечёткая модель Мамдани используется не как неизменяемая экспертная схема, а как адаптируемый, но контролируемый инструмент динамической оценки пропускной способности, сохраняющий прозрачность логики вывода и приоритет требований безопасности полётов.

Выводы по Главе 2

В главе 2 решена задача математической формализации метода динамической корректировки пропускной способности секторов ОВД на основе

аппарата нечёткой логики. Полученные результаты позволяют сделать следующие выводы.

1. Разработана структура нечёткой модели, в которой состояние сектора ОВД описывается тремя входными переменными: объёмом ВД V , индексом структурной сложности ВО C и коэффициентом доступности ВП R . Показано, что такая система входных параметров обеспечивает необходимую и достаточную информативность модели, позволяя одновременно учитывать количественную загрузку сектора, топологические особенности воздушной обстановки и влияние внешних ограничивающих факторов на доступность ВП.

2. Предложена система фаззификации входных и выходной переменных, основанная на использовании функций принадлежности различного типа. Применение трапецеидальных, гауссовых, S и Z -образных функций позволило сформировать гибридную схему описания лингвистических термов, адекватную характеру изменения контролируемых параметров. Это обеспечило возможность перехода от жёстких пороговых решений к плавной нелинейной коррекции пропускной способности сектора в зависимости от текущего состояния воздушной обстановки.

3. Сформирована полная база нечётких правил, включающая 36 продукционных правил, полученных на основе декартова произведения термножеств входных переменных. Показано, что такая структура базы знаний обеспечивает полноту модели и исключает возникновение областей неопределённости при формировании выходного решения. Использование механизма нечёткого вывода типа Мамдани и дефаззификации по методу центра тяжести обеспечивает гладкий характер изменения выходной переменной и, следовательно, устойчивость формируемого управляющего воздействия.

4. В модели реализован принцип приоритетного учёта ограничений ВП. Показано, что введение коэффициента R и соответствующей группы правил позволяет описывать широкий спектр факторов, снижающих доступность ВП сектора, включая метеорологические и режимные ограничения, в рамках единого математического аппарата. При этом для области критически низкой доступности

ВП реализовано доминирующее правило безопасности, в соответствии с которым решение о закрытии сектора для дальнейшего увеличения потока ВС принимается независимо от значений объёма ВД и структурной сложности ВО. Тем самым в модели обеспечен приоритет требований безопасности полётов над стремлением сохранить НПС.

5. Разработанная в главе 2 нечёткая модель сформирована как интерпретируемая экспертная архитектура, пригодная для последующей параметрической адаптации на основе объективных данных. Показано, что переход к дифференцируемому представлению функций принадлежности создаёт предпосылки для построения адаптивной нечёткой модели, в которой параметры термов и правил могут уточняться по данным реальной эксплуатации сектора. Это обеспечивает возможность дальнейшего повышения точности модели и её согласования с процессами корректировки динамической пропускной способности.

Таким образом, в главе 2 сформирована интерпретируемая математическая модель динамической корректировки пропускной способности секторов ОВД, в которой статическое нормативное представление о пропускной способности заменяется адаптивной схемой её оперативной коррекции с учётом текущей ВО. Полученные результаты создают теоретическую основу для последующей параметрической настройки модели, её верификации и практического применения в задачах поддержки принятия решений при ОВД.

ГЛАВА 3. ПРОГРАММНАЯ РЕАЛИЗАЦИЯ МЕТОДА, ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ И АНАЛИЗ РЕЗУЛЬТАТОВ

3.1. Архитектура программного комплекса поддержки принятия решений

Для экспериментальной проверки гипотез, выдвинутых во второй главе, и верификации разработанной математической модели, а также проведения серии численных экспериментов был создан программный прототип системы поддержки принятия решений (СППР) [123].

Рассмотрим структурно-функциональную схему разработанной СППР. Программный комплекс реализован на языке программирования Python с использованием специализированных библиотек для нечёткого моделирования (scikit-fuzzy) [129] и научных вычислений (NumPy, Matplotlib) [130, 131]. Выбор указанного программного инструментария обусловлен его широким применением при решении задач математического моделирования, анализа данных и построения интерпретируемых вычислительных модулей.

Архитектура системы включает ряд последовательно взаимодействующих функциональных блоков, обеспечивающих преобразование исходных данных о состоянии сектора ОВД в итоговую рекомендацию по корректировке его динамической пропускной способности. На рисунке 3.1 представлена блок-схема алгоритма работы, реализованной СППР [123].

1. Модуль препроцессинга и нормализации данных. На данном этапе осуществляется преобразование разнородных входных данных, вводимых оператором либо поступающих из внешних информационных источников (автоматизированных систем управления воздушным движением, метеорологических сервисов и др.), в унифицированный вектор состояния:

$$\mathbf{x} = (v_0, c_0, r_0) \in [0, 1]^3.$$

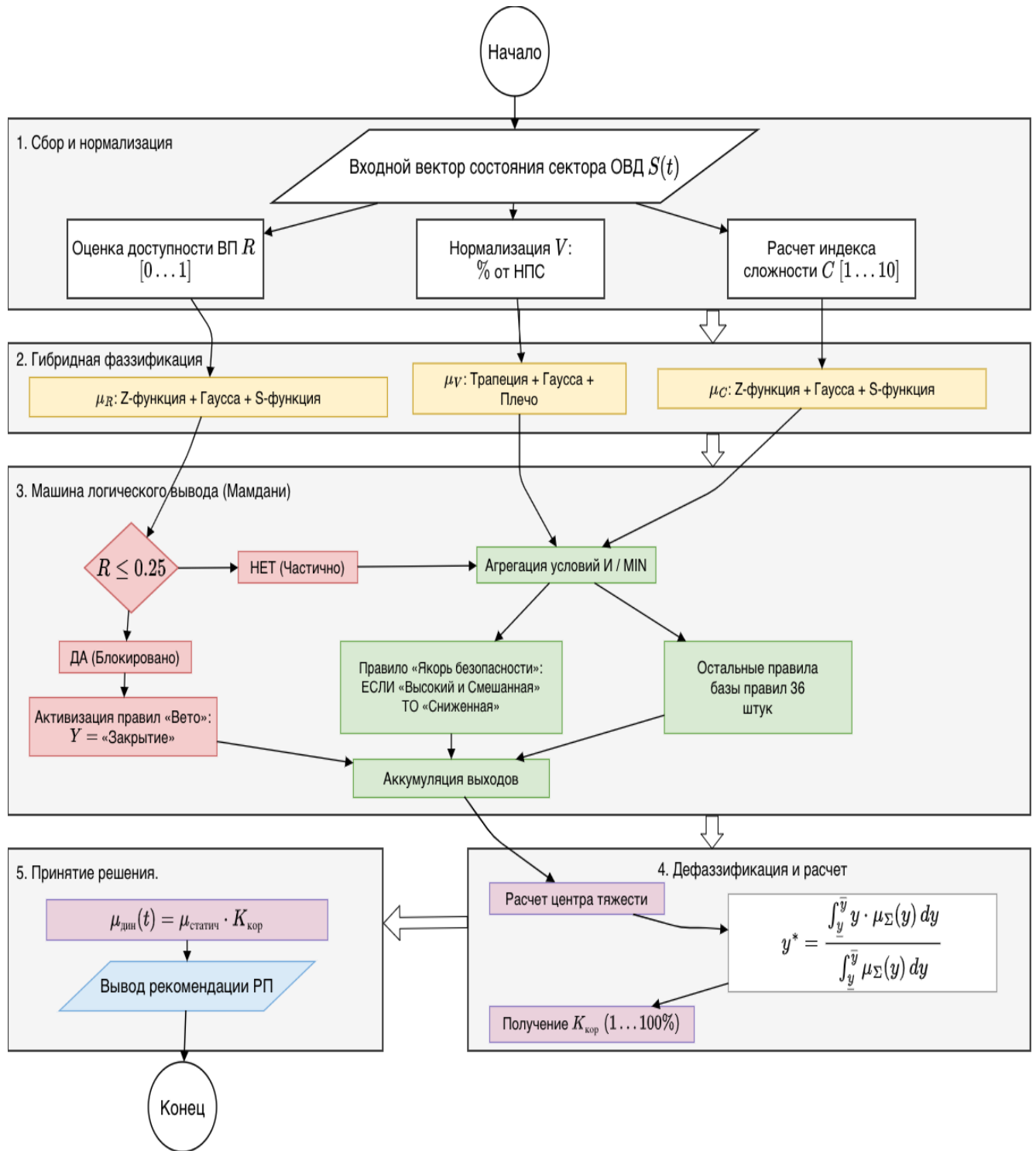


Рисунок 3.1 – Блок-схема алгоритма работы «Нечёткая модель динамической коррекции НПС секторов ОВД»

Необходимость данного этапа определяется тем, что используемые входные параметры имеют различную физическую природу и размерность: относительный объём ВД характеризуется текущей или прогнозируемой загрузкой сектора, выраженной в процентах от НПС, сложность ВО – интегральным индексом

конфликтности, а ограничения – долей недоступного ВП. Без предварительного приведения этих параметров к единой нормированной шкале применение единого механизма нечеткого вывода является затруднительным, поскольку функции принадлежности должны быть определены на согласованных универсальных множествах соответствующих лингвистических переменных [89, 107, 132]. Нормализация обеспечивает сопоставимость входных переменных и инвариантность вычислительного ядра СППР по отношению к масштабу и конфигурации рассматриваемого сектора ОВД. Именно на данном этапе формируются значения входных переменных, поступающие далее в блок фаззификации.

2. Блок гибридной фаззификации данных. На данном этапе чёткие численные значения вектора состояния $\mathbf{x} = (v_0, c_0, r_0)$ преобразуются в значения функций принадлежности соответствующих лингвистических переменных. Для описания входных параметров используется гибридный набор функций принадлежности, включающий трапецеидальные функции для областей штатного функционирования и гауссовы функции для зон, близких к предельным режимам [31, 133].

Такой подход позволяет, с одной стороны, обеспечить устойчивую оценку в диапазонах, соответствующих нормальным условиям работы сектора, а с другой – отразить нелинейный характер изменения операционной нагрузки при приближении параметров к критическим значениям. В результате на выходе данного блока формируется совокупность степеней принадлежности входных переменных соответствующим терм-множествам.

3. Ядро нечеткого вывода. На данном этапе реализуется основная логика принятия решения на основе базы знаний, содержащей 36 продукционных правил. Выбор архитектуры нечёткого вывода типа Мамдани обусловлен требованием интерпретируемости результатов, что имеет принципиальное значение для систем, применяемых в задачах, связанных с обеспечением безопасности полётов. Предлагаемая СППР должна не только формировать итоговую рекомендацию, но и обеспечивать возможность содержательной интерпретации причин её

формирования («white box AI») [108-111]. Данное требование согласуется с современными подходами к доверенным и человеко-ориентированным системам искусственного интеллекта, в которых подчёркивается необходимость объяснимости, контролируемости и сохранения значимой роли человека при использовании алгоритмических рекомендаций.

В системах, связанных с обеспечением безопасности полётов, алгоритмическая рекомендация не должна рассматриваться как автономное решение, исключающее профессиональную оценку диспетчера УВД. Пользователь должен иметь возможность понять, какие входные факторы привели к снижению или сохранению коэффициента коррекции НПС, поскольку именно объяснимость результата является условием доверия к СППР и её корректного применения в контуре человеко-машинного взаимодействия [108-111, 134].

Ядро нечеткого вывода реализует нелинейную процедуру агрегации входных факторов V , C и R , включая механизм приоритетного учёта ограничений воздушного пространства. Это позволяет корректно обрабатывать ситуации, в которых значения входных параметров формально оказываются противоречивыми, например, при относительно невысоком объёме ВД, но существенной степени ограничения доступного объёма ВП.

4. Блок дефаззификации. В данном блоке результирующее нечёткое множество, полученное после агрегации правил, преобразуется в скалярный выходной параметр – коэффициент коррекции $K_{кор}$, используемый для последующей оценки динамической пропускной способности сектора ОВД.

В качестве метода дефаззификации выбран метод центра тяжести, широко применяемый в системах нечёткого вывода Мамдани для получения чёткого выходного значения на основе агрегированного нечёткого множества [107]. В отличие от методов, основанных на выборе максимума, данный подход учитывает вклад всех активированных правил, что обеспечивает непрерывный характер выходной функции. Это, в свою очередь, снижает чувствительность результата к малым колебаниям входных параметров и уменьшает вероятность скачкообразного изменения рекомендаций, что особенно важно при практическом использовании

СППР в задачах оперативной поддержки принятия решений.

5. Блок визуализации и формирования отчетности. Заключительным этапом работы программного комплекса является представление результатов в форме, удобной для оперативного восприятия и последующего анализа. В зависимости от режима работы системы результаты могут отображаться в виде индикаторов состояния, графиков, характеризующих текущую и прогнозируемую динамическую пропускную способность сектора ОВД.

С позиций человеко-ориентированного проектирования СППР должна не подменять диспетчера УВД или РП, а обеспечивать повышение качества их информационной поддержки. Такой подход соответствует принципам проектирования интерактивных человеко-машинных систем, ориентированных на пользователя, его задачи, ограничения и условия деятельности [135, 136].

Визуальное представление динамики коэффициента коррекции и входных параметров модели позволяет оценивать не только текущее состояние сектора, но и тенденцию развития ситуации. Это повышает ситуационную осведомлённость диспетчерского персонала, что является одним из ключевых факторов эффективного принятия решений в динамических человеко-машинных системах [135, 136, 137].

3.2. Алгоритм оценки структурной сложности воздушной обстановки сектора ОВД

Одной из ключевых задач программной реализации разработанного метода является вычисление индекса структурной сложности ВО сектора $C_s(t)$, который далее используется в качестве одной из входных переменных системы нечёткого вывода [31]. В рамках настоящего исследования под структурной сложностью ВО понимается интегральная характеристика конфигурации ВО, определяемая количеством потенциальных конфликтных ситуаций, их геометрическим типом,

длительностью существования и наличием вертикального маневрирования ВС.

Следует подчеркнуть, что индекс $C_s(t)$ не предназначен для прямого отражения интенсивности или объёма ВД. Указанная функция возложена на переменную V , характеризующую относительную текущую загрузку сектора ОВД. В этой связи индекс $C_s(t)$ описывает именно структурную насыщенность ВО, то есть степень её конфликтной и геометрической усложнённости при заданном составе ВД.

В основу алгоритма положено представление ВО в виде совокупности прогнозируемых потенциальных конфликтных ситуаций, формируемых средствами среднесрочного обнаружения конфликтов [116, 138]. Каждая потенциальная конфликтная ситуация характеризуется типом взаимного расположения ВС, признаком наличия их вертикальной динамики, временными границами существования и секторной принадлежностью. Такое представление позволяет перейти от описания отдельных взаимодействий между ВС к интегральной количественной оценке сложности ВО в секторе ОВД.

Алгоритм оценки структурной сложности ВО включает два взаимосвязанных этапа. На первом этапе выполняется экспертная калибровка весовых коэффициентов, характеризующих относительную операторную тяжесть различных геометрических типов потенциальных конфликтных ситуаций, а также соотношение вкладов горизонтально-геометрической и вертикальной компонент сложности. На втором этапе на основе полученных коэффициентов и данных о текущих потенциальных конфликтных ситуациях рассчитывается индекс структурной сложности ВО сектора $C_s(t)$, нормированный для последующего использования в составе модели оценки динамической пропускной способности.

Таким образом, программная реализация оценки сложности обеспечивает формализованный переход от дискретного описания потенциально конфликтных взаимодействий к количественной характеристике, пригодной для последующей фаззификации и совместного анализа с параметрами объёма ВД и ограничений ВП [116].

3.2.1. Экспертная калибровка весовых коэффициентов структурной сложности воздушной обстановки

Ключевым этапом адекватности работы модуля являлась настройка численных значений коэффициентов $w = (\alpha, \beta, \gamma)$, обеспечивающих адекватность оценки сложности, определяющих вклад различных факторов в интегральное восприятие сложности ВО диспетчером УВД [123].

Вместо использования эвристически назначаемых коэффициентов в настоящей работе применена процедура формализации экспертных оценок. Для этого был сформирован набор из восьми эталонных сценариев ВО, охватывающих диапазон состояний от минимальной загруженности до выраженного насыщения по сложности. Сценарии различались комбинацией трёх факторов: количества ВС в секторе $N_{ВС}$, количества конфликтных взаимодействий $N_{пересеч}$ и интенсивности вертикального маневрирования $N_{верт}$ [123].

Агрегированные результаты экспертного опроса, представленные в виде средних оценок по сценариям, приведены в таблице 3.1 [123].

Для калибровки указанных коэффициентов группе из 30 диспетчеров УВД было предложено оценить сложность каждого эталонного сценария по десятибалльной шкале. Сценарии были синтезированы в виде графов взаимодействия ВС таким образом, чтобы по возможности изолировать влияние каждого из рассматриваемых факторов.

Индивидуальные результаты оценивания сложности сценариев по 10-балльной психометрической шкале представлены в Приложении А.

Таблица 3.1 – План эксперимента и усреднённые оценки экспертной группы

№	Параметры сценария $N_{\text{ВС}}/N_{\text{пересеч}}/N_{\text{верт}}$	Средняя экспертная оценка ($Y_{\text{эксп}}$)	Интерпретация сценария
1	2 / 0 / 0	1.62	Минимальная нагрузка (мониторинг)
2	4 / 0 / 0	3.08	Линейный поток ВС
3	4 / 2 / 0	6.64	Умеренная сложность (конфликтная пара)
4	6 / 1 / 1	7.71	Смешанный ВД
5	5 / 4 / 0	9.92	Высокая конфликтность ВД
6	8 / 2 / 2	10.00	Насыщение по количеству ВС
7	6 / 5 / 3	10.00	Перегрузка (высокая сложность).
8	3 / 0 / 4	7.23	Интенсивное изменение вертикального профиля

Примеры сценарных графов взаимодействий ВС показаны на рисунке 3.2, где узлы соответствуют ВС, а ребра (связи) – прогнозируемым конфликтным взаимодействиям.

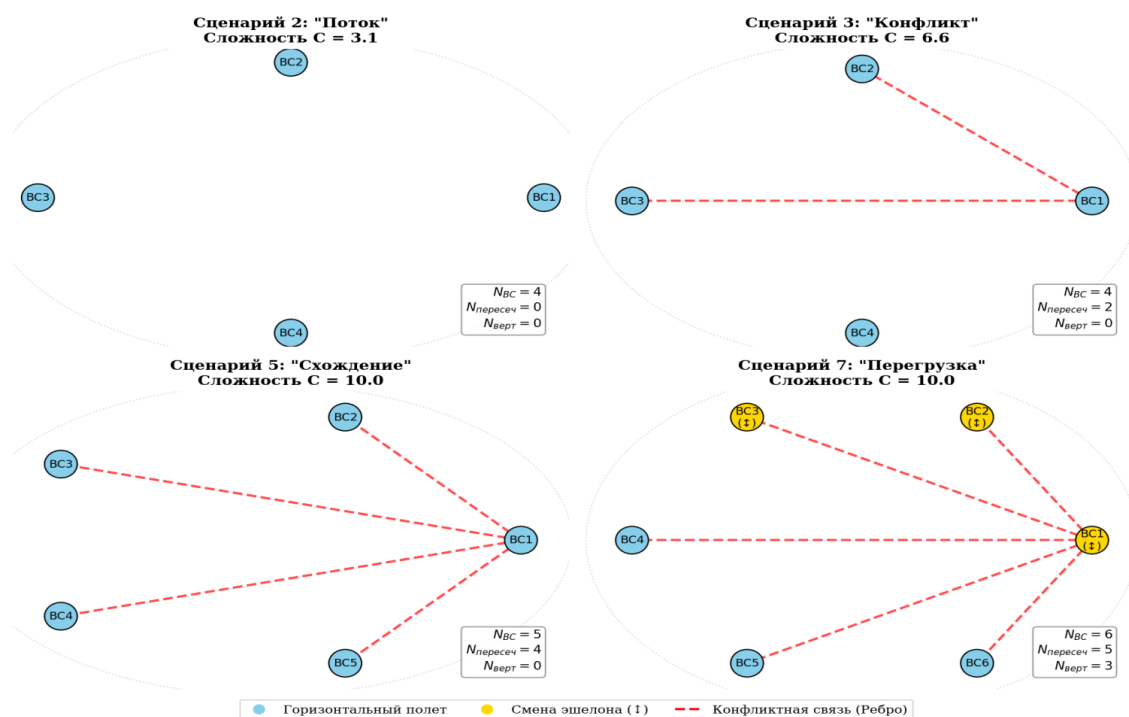


Рисунок 3.2 – Примеры графов взаимодействий для оценки сложности ВО

Воздушная обстановка моделируется как динамический взвешенный граф $G(t) = \langle \mathcal{V}, \mathcal{E} \rangle$, где (рисунок 3.2):

- $\mathcal{V}$ – множество вершин (ВС в секторе);
- $\mathcal{E}$ – множество ребер, представляющих конфликтные связи (пересекающиеся курсы ВС, их вертикальная динамика).

Представленные на рисунке 3.2 различные сценарии показывают, что при одинаковом количестве ВС в секторе ОВД, сложность ВО может иметь разный весовой коэффициент. Так, например, летящие на параллельных курсах непересекающиеся ВС (4 ВС), требуют меньшей ментальной нагрузки диспетчера УВД. В другом случае, то же количество ВС на сходящихся траекториях и особенно их сочетание с вертикальной динамикой приводят к заметному росту сложности, поскольку требуют от диспетчера УВД более интенсивного прогнозирования развития обстановки и своевременного разрешения потенциальных конфликтов.

Для количественной обработки экспертных оценок задача поиска весов была формализована как задача решения переопределённой системы линейных уравнений. Обозначим через X матрицу параметров сценариев, через Y – вектор усреднённых экспертных оценок, а через $w = (\alpha, \beta, \gamma)^T$ – вектор неизвестных коэффициентов [123].

Поскольку система не имеет точного решения (количество уравнений $n = 8$ превышает количество неизвестных $m = 3$), для нахождения оптимального вектора весов и минимизации среднеквадратичной ошибки аппроксимации использован метод наименьших квадратов. Задача сводится к минимизации функционала квадратичной ошибки. Решение определяется через нормальное уравнение Гаусса-Маркова [139]:

$$w = (X^T X)^{-1} X^T Y, \quad (3.1)$$

где X – матрица значений факторов по сценариям; $X^T X$ – матрица Грамма [140], содержащая суммы квадратов и попарных произведений признаков; $X^T Y$ – вектор правых частей, характеризующий суммарную связь факторов с экспертными оценками.

Вектор $X^T Y$ имеет вид:

$$X^T Y = \begin{pmatrix} \sum x_{i1} y_i \\ \sum x_{i2} y_i \\ \sum x_{i3} y_i \end{pmatrix}, \quad (3.2)$$

где $x_{i1} = N_{\text{BC}}$ – значение первого фактора в i -м сценарии, $x_{i2} = N_{\text{пересеч}}$ – значение второго фактора в i -м сценарии; $x_{i3} = N_{\text{верт}}$ – значение третьего фактора в i -м сценарии; y_i – средняя экспертная оценка сложности i -го сценария.

Матричная постановка задачи для рассматриваемого набора сценариев может быть записана в виде:

$$\begin{pmatrix} 2 & 0 & 0 \\ 4 & 0 & 0 \\ 4 & 2 & 0 \\ \cdot & \cdot & \cdot \\ \cdot & \cdot & \cdot \\ \cdot & \cdot & \cdot \\ 3 & 0 & 4 \end{pmatrix} \times \begin{pmatrix} \alpha \\ \beta \\ \gamma \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1,62 \\ 3,08 \\ 6,64 \\ \cdot \\ \cdot \\ \cdot \\ 7,23 \end{pmatrix}.$$

В результате вычислений получены следующие значения коэффициентов, интегрированные в программный модуль предварительной оценки факторов сложности [123]:

- $\alpha \approx 0,78$ – коэффициент базовой нагрузки ОВД, связанной с присутствием ВС в секторе при отсутствии конфликтных взаимодействий и вертикального маневрирования;

- $\beta \approx 1,76$ – коэффициент, характеризующий вклад конфликтного взаимодействия в интегральную оценку сложности;

- $\gamma \approx 1,25$ – коэффициент, характеризующий вклад вертикальной динамики воздушных судов в интегральную оценку сложности.

Вес изменения вертикального профиля ВС, вертикальное маневрирование оценивается экспертами как задача повышенной сложности, требующая контроля эшелонирования в трехмерном пространстве.

Полученные результаты позволяют сделать ряд выводов о структуре экспертного восприятия сложности ВО.

Во-первых, в сценариях, не содержащих конфликтных взаимодействий и вертикальных манёвров, наблюдается близкий к линейному рост экспертной оценки по мере увеличения количества ВС. Так, при переходе от сценария 1 к сценарию 2 удвоение числа ВС сопровождается почти пропорциональным увеличением оценки сложности. Это подтверждает наличие фоновой операторской нагрузки, связанной с функцией наблюдения даже в относительно простой воздушной обстановке.

Во-вторых, появление конфликтных взаимодействий приводит к существенно более интенсивному росту оценки сложности. Наиболее наглядно это проявляется при сравнении сценариев 2 и 3: при одинаковом количестве ВС введение двух конфликтных взаимодействий приводит к увеличению средней оценки с 3,08 до 6,64. Тем самым подтверждается, что конфликтность воздушной обстановки воспринимается экспертами как фактор существенно более высокой значимости по сравнению с простым присутствием ВС в секторе.

В-третьих, заметное влияние на экспертную оценку оказывает вертикальная динамика. Сценарий 8, характеризующийся сравнительно небольшим количеством ВС, но интенсивным изменением вертикального профиля, получил высокую оценку 7,23, сопоставимую со сценариями, содержащими конфликтные взаимодействия. Это свидетельствует о том, что вертикальное маневрирование является самостоятельным источником роста сложности и должно учитываться в структуре итогового показателя.

Наконец, для сценариев с высокой насыщенностью конфликтных взаимодействий и значительным числом ВС наблюдается выход экспертных оценок к верхней границе шкалы. Данный результат указывает на наличие эффекта насыщения при субъективном восприятии сложности диспетчером УВД и подтверждает целесообразность использования ограниченной результирующей шкалы при построении итогового индекса.

Таким образом, проведённая экспертная калибровка позволила определить относительные веса факторов, влияющих на восприятие сложности воздушной обстановки диспетчером УВД. Вместе с тем коэффициент α , соответствующий

базовой нагрузке ОВД, в итоговый индекс структурной сложности ВО непосредственно не включается. Это обусловлено тем, что в разработанной модели влияние общего количества ВС уже учитывается отдельной входной переменной V . Следовательно, сохранение члена, связанного с α , в составе индекса $C_s(t)$ привело бы к двойному учёту одного и того же фактора – интенсивности ВД.

По этой причине на следующем этапе построения алгоритма выполняется переход от предварительной линейной факторной аппроксимации к конфликтно-ориентированному представлению ВО. В рамках такого перехода коэффициент α исключается из итоговой формулы индекса структурной сложности ВО, а коэффициенты β и γ , полученные по результатам экспертной калибровки, сохраняются как параметры, отражающие относительную значимость горизонтально-конфликтной и вертикальной компонент сложности. Тем самым результаты настоящего подраздела используются не как окончательная форма расчёта индекса, а как основание для задания весов в более содержательной модели, опирающейся на данные о потенциальных конфликтных ситуациях.

Дальнейшее развитие данного подхода связано с переходом к расчёту индекса структурной сложности на основе множества прогнозируемых ПКС (MTCD) [116], их геометрии, продолжительности и признаков вертикального маневрирования, что рассматривается в подразделе 3.2.2.

3.2.2. Метод расчёта индекса структурной сложности сектора ОВД по данным потенциально конфликтных ситуаций

Для количественного описания структурной (геометрической) сложности воздушной обстановки в секторе РДЦ вводится индекс $C_s(t)$, формируемый на основе прогнозируемых ПКС [141], получаемых модулем среднесрочного обнаружения конфликтов (MTCD) [138, 141, 142] по данным планов полётов и/или прогнозных траекторий ВС. В рамках настоящего исследования под ПКС

понимается прогнозируемое нарушение установленных норм горизонтального и(или) вертикального эшелонирования в пределах заданного горизонта прогнозирования.

Переход к расчёту индекса сложности ВО по данным ПКС обусловлен необходимостью устранения прямой зависимости показателя $C_s(t)$ от количества ВС в секторе. Как было показано в подразделе 3.2.1, коэффициент α характеризует базовую нагрузку ОВД, связанную с интенсивностью ВД. Однако данная составляющая уже учитывается в модели отдельной входной переменной V . В этой связи в итоговой процедуре расчёта структурной сложности целесообразно отказаться от прямого учёта числа ВС и перейти к описанию сложности через множество конфликтных взаимодействий, их геометрию, продолжительность и наличие вертикального маневрирования.

Согласно [116, 143-145] определены следующие типы ПКС (рисунок 3.3):

С1 – пересечение двух ВС с нулевой вертикальной скоростью (с постоянной высотой);

С2 – пересечение двух ВС, одно из которых имеет ненулевую вертикальную скорость, в то время как другое сохраняет высоту;

С3 – пересечение двух ВС, имеющих ненулевые вертикальные скорости;

С4 – догон одного ВС другим, при этом оба ВС имеют ненулевую вертикальную скорость;

С5 – догон одного ВС другим при этом одно из ВС имеет ненулевую вертикальную скорость, а второе сохраняет высоту;

С6 – догон одного ВС другим, при этом оба ВС имеют ненулевые вертикальные скорости;

С7 – конфликтная ситуация между двумя ВС, двигающимися встречными курсами, имеющими нулевые вертикальные скорости;

С8 – конфликтная ситуация между двумя ВС, двигающимися встречными курсами, при этом одно из ВС имеет ненулевую вертикальную скорость, второе сохраняет высоту;

С9 – конфликтная ситуация между двумя ВС, двигающимися встречными

курсами с ненулевыми вертикальными скоростями.

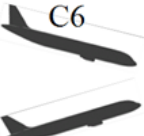
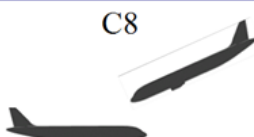
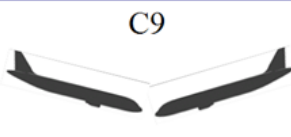
	На одном эшелоне	Один изменяет эшелон	Оба изменяют эшелоны
Пересечение	C1 	C2 	C3 
Догон	C4 	C5 	C6 
Встречный курс	C7 	C8 	C9 

Рисунок 3.3 – Типы рассматриваемых ПКС [143-145]

Каждая ПКС i описывается набором атрибутов [116]:

$$z_i = (c_i, t_i^{\text{нач}}, t_i^{\text{кон}}, s_i^{(1)}, s_i^{(2)}), \quad (3.3)$$

где $c_i \in \{C1, \dots, C9\}$ – типы ПКС, $t_i^{\text{нач}}, t_i^{\text{кон}}$ – время начала и окончания ПКС соответственно, $s_i^{(1)}, s_i^{(2)}$ – индикаторы секторов ОВД в которых в момент возникновения ПКС находятся первое и второе ВС.

Горизонт прогнозирования и окно агрегации принимаются фиксированными: $\Delta T = 20$ мин. Выбор значения ΔT соответствует постановке расчёта структурных факторов сложности (в частности, количества пересечений траекторий) в 20-минутном горизонте прогнозирования, используемой в [116].

С точки зрения взаимного пространственного положения ВС все рассматриваемые ПКС подразделяются на три базовых геометрических класса: пересечение траекторий, догон и встречные курсы. Дополнительно учитывается наличие вертикальной динамики, определяемой числом ВС в конфликтной паре, имеющих ненулевую вертикальную скорость. В этой связи вводится типология из девяти классов ПКС и характеризующий её вертикальный параметр $m(c)$, равный числу воздушных судов в конфликтной паре, имеющих ненулевую вертикальную

скорость:

$$m(c) = \begin{cases} 0, & c \in \{C1, C4, C7\} \\ 1, & c \in \{C2, C5, C8\}, \\ 2, & c \in \{C3, C6, C9\} \end{cases} \quad (3.4)$$

где: $m(c) = 0$ – оба ВС следуют без вертикального маневрирования; $m(c) = 1$ – вертикальный манёвр выполняет одно из двух ВС; $m(c) = 2$ – вертикальный манёвр выполняют оба ВС конфликтной пары. Здесь параметр m принимает значение, равное числу ВС в конфликтной паре, выполняющих набор или снижение. Соответствующие типы ПКС представлены на рисунке 3.3.

Для учёта неодинаковой операторной тяжести различных геометрических конфигураций вводится весовая функция $g(c_i)$, сопоставляющая каждому типу ПКС относительный коэффициент геометрической значимости:

$$g(c) = \begin{cases} g_{\text{пер}}, & c \in \{C1, C2, C3\} \\ g_{\text{дог}}, & c \in \{C4, C5, C6\}, \\ g_{\text{встреч}}, & c \in \{C7, C8, C9\} \end{cases} \quad (3.5)$$

где $g_{\text{пер}}$ – вес ПКС типа «пересечение траекторий»; $g_{\text{дог}}$ – вес ПКС типа «догон»; $g_{\text{встреч}}$ – вес ПКС типа «встречные курсы» (рисунок 3.3).

Учёт неодинаковой операторной нагрузки, обусловленной геометрией конфликтного взаимодействия ВС, определяется весом геометрии:

$$g: \{\text{пересечение, догон, встречные}\} \rightarrow \mathbb{R}_+$$

Вес $g(c)$ обосновывается по результатам экспертного оценивания, выполненного группой из 30 экспертов – диспетчеров УВД, которым предъявлялись сценарии, различающиеся только геометрией (при фиксированных прочих условиях):

- одинаковое количество ВС;
- одинаковые скорости/эшелоны (заданная типовая конфигурация);
- одинаковое окно и горизонт прогнозирования;
- без ограничений сектора ОВД.

Экспертам требовалось выставить оценку операторной тяжести ситуаций по шкале 1–9, где 1 – минимальная нагрузка, 9 – максимальная.

После чего определялась средняя оценка эксперта по классу геометрии для эксперта e :

$$\bar{r}_{e,\text{пересечение}} = \frac{1}{M_{\text{пересечение}}} \sum_{j \in \text{пересеч}} r_{e,j}, \bar{r}_{e,\text{догон}} = \frac{1}{M_{\text{догон}}} \sum_{j \in \text{догон}} r_{e,j},$$

$$\bar{r}_{e,\text{встречные}} = \frac{1}{M_{\text{встречные}}} \sum_{j \in \text{встреч}} r_{e,j}$$

где $r_{e,j}$ – оценка e -го эксперта для j -го сценария, $M_{\text{пересечение}}, M_{\text{догон}}, M_{\text{встречные}}$ – число сценариев в каждом классе. То есть $\bar{r}_{e,\text{пересечение}}$ – это одна цифра, «как в среднем эксперт оценивает пересечения».

Далее усредняем по всем 30 экспертам:

$$\mu_{\text{пересечение}} = \frac{1}{30} \sum_{e=1}^{30} \bar{r}_{e,\text{пересечение}}, \quad \mu_{\text{догон}} = \frac{1}{30} \sum_{e=1}^{30} \bar{r}_{e,\text{догон}},$$

$$\mu_{\text{встречные}} = \frac{1}{30} \sum_{e=1}^{30} \bar{r}_{e,\text{встречные}},$$

где μ – групповая средняя оценка тяжести класса геометрии.

Результаты усреднённых оценок по сценариям внутри класса представлены в таблице 3.2.

Таблица 3.2 – Средние значения оценок внутри сценариев каждого класса

Эксперт №	$\bar{r}_{\text{пересечение}}$	$\bar{r}_{\text{догон}}$	$\bar{r}_{\text{встречные}}$
1	6,2	4,4	8,2
2	6,0	4,0	7,9
3	5,8	4,1	7,4
4	6,4	4,6	8,3
5	6,1	4,1	8,0
6	6,3	4,2	8,5
7	5,9	4,0	7,8

Окончание таблицы 3.2

Эксперт №	$\bar{r}_{\text{пересечение}}$	$\bar{r}_{\text{догон}}$	$\bar{r}_{\text{встречные}}$
8	6,0	4,3	7,7
9	6,2	4,2	8,0
10	6,1	4,3	8,1
11	5,7	3,9	7,5
12	6,5	4,8	8,4
13	6,0	4,1	7,8
14	6,3	4,5	8,2
15	5,9	4,2	7,6
16	6,2	4,4	8,1
17	6,1	4,2	7,9
18	5,8	4,0	7,7
19	6,4	4,7	8,3
20	6,2	4,3	8,0
21	5,9	4,1	7,6
22	6,0	4,2	7,9
23	6,3	4,4	8,2
24	6,1	4,2	7,8
25	5,8	3,9	7,6
26	6,5	4,5	8,6
27	6,0	4,1	7,9
28	6,2	4,4	8,1
29	5,9	4,0	7,7
30	6,3	4,6	8,3

Получаем следующие результаты: $\mu_{\text{пересечение}} = 6,12$; $\mu_{\text{догон}} = 4,29$; $\mu_{\text{встречные}} = 8,03$.

После усреднения оценок для каждого сценария и последующего агрегирования по всей экспертной группе весовые коэффициенты приводятся к относительной шкале, при этом в качестве базового (опорного) принимается сценарий встречного движения:

$$g_{\text{встречные}} = 1, \quad g_{\text{догон}} = \frac{\mu_{\text{догон}}}{\mu_{\text{встречные}}}, \quad g_{\text{пересечение}} = \frac{\mu_{\text{пересечение}}}{\mu_{\text{встречные}}}, \quad (3.6)$$

Где $\mu_{\text{пересечение}}$, $\mu_{\text{догон}}$, $\mu_{\text{встречные}}$ – средние экспертные оценки операторной тяжести для геометрий (пересечение, догон, встречные) соответственно. Получаем: $g_{\text{встречные}} = 1$, $g_{\text{догон}} \approx 0,54$, $g_{\text{пересечение}} \approx 0,76$.

Так как в исходных данных доступны время начала и окончания ПКС, учитывается длительность присутствия конфликтной связи в пределах прогнозного окна. Для этого определяется величина:

$$D_i(t) = |[t_i^{\text{нач}}, t_i^{\text{кон}}) \cap [t, t + \Delta T)|, \quad (3.7)$$

где $D_i(t)$ – длительность присутствия i -й ПКС внутри окна $[t, t + \Delta T)$, $|\cdot|$ – длина временного интервала, $[t_i^{\text{нач}}, t_i^{\text{кон}}) \cap [t, t + \Delta T)$ – пересечение интервала существования ПКС с текущим окном агрегации.

Для приведения длительности к безразмерной шкале вводится нормированный вес:

$$\omega_D(D_i(t)) = \max\left(0, \min\left(\frac{D_i(t)}{\Delta T}, 1\right)\right), \quad (3.8)$$

где $\omega_D(D_i(t)) \in [0, 1]$ – весовой коэффициент, учитывающий длительность i -й ПКС в момент времени t ; ΔT – заданный интервал прогнозирования (20 минут); $\max(\cdot)$ и $\min(\cdot)$ – функции выбора максимального и минимального значения соответственно.

Таким образом, если ПКС присутствует в окне прогнозирования в течение всего интервала ΔT , то её вклад по длительности равен единице, если же конфликтное взаимодействие существует только в течение части окна, его вклад уменьшается пропорционально времени существования.

Поскольку расчёт индекса выполняется для конкретного сектора s , необходимо определить, какие ПКС должны учитываться при вычислении сложности данного сектора. Для этого вводится индикатор принадлежности ПКС сектору:

$$\chi_s(i) = \begin{cases} 1, & \text{если } s = s_i^{(1)} \text{ или } s = s_i^{(2)}, \\ 0, & \text{иначе} \end{cases}, \quad (3.9)$$

где $\mathcal{X}_s(i)$ – индикатор включения i -й ПКС в расчёт сложности сектора s ; $s_i^{(1)}, s_i^{(2)}$ – сектора, в которых находятся первое и второе воздушные суда в момент возникновения ПКС.

Условие $\mathcal{X}_s(i) = 1$ означает, что конфликтное взаимодействие затрагивает зону ответственности диспетчера сектора s (минимум одно ВС находится под управлением в данном секторе). Такая схема носит консервативный характер и позволяет избежать недоучёта сложности в приграничных и координационных ситуациях.

Множество ПКС, учитываемых при расчете сложности сектора s в окне $[t, t + \Delta T)$ определяется выражением:

$$K_s(t) = \{i: \mathcal{X}_s(i) = 1 \wedge [t_i^{\text{нач}}, t_i^{\text{кон}}) \cap [t, t + \Delta T) \neq \emptyset\}, \quad (3.10)$$

где $K_s(t)$ – множество индексов ПКС, учитываемых в секторе s в окне прогнозирования; условие $[t_i^{\text{нач}}, t_i^{\text{кон}}) \cap [t, t + \Delta T) \neq \emptyset$ – означает, что i -я ПКС присутствует в окне агрегации хотя бы кратковременно.

Для построения индекса структурной сложности вводятся две агрегированных компоненты: конфликтная (горизонтальная) и вертикальная.

Конфликтная компонента определяется как сумма вкладов всех ПКС, относящихся к сектору, с учётом веса геометрической значимости и длительности существования:

$$S_{\text{конфл},s}(t) = \sum_{i \in K_s(t)} g(c_i) \cdot \omega_D(D_i(t)), \quad (3.11)$$

где $S_{\text{конфл},s}(t)$ – ненормированная горизонтально-конфликтная компонента структурной сложности в секторе s в момент времени t ; $g(c_i)$ – геометрический вес i -й ПКС; $\omega_D(D_i(t)) \in [0,1]$ – вес длительности присутствия i -й ПКС в текущем окне.

Величина $S_{\text{конфл},s}(t)$ возрастает при увеличении числа ПКС, их «тяжести» по геометрии (через g), и доли времени окна, в течение которой сохраняются ПКС (через ω_D).

Вертикальная компонента определяется аналогично, однако дополнительно учитывается степень вертикального манёвра конфликтной пары ВС:

$$S_{\text{верт},s}(t) = \sum_{i \in \mathcal{K}_s(t)} g(c_i) \cdot \frac{m(c_i)}{2} \cdot \omega_D(D_i(t)), \quad (3.12)$$

где $S_{\text{верт},s}(t)$ – ненормированная вертикальная компонента структурной сложности в секторе s в момент времени t ; $m(c_i) \in [0,1,2]$ – дискретный показатель «вертикальности» ПКС, число ВС в конфликтной паре, выполняющих вертикальный манёвр (набор/снижение); $m(c_i)/2$ – нормированный множитель вертикальности.

Использование множителя $m(c_i)/2$ обусловлено необходимостью перевода признака вертикальной динамики в безразмерную шкалу от 0 до 1. В этом случае значение 0 соответствует отсутствию вертикального маневрирования, значение 0,5 – маневрированию одного ВС из конфликтной пары, а значение 1 – маневрированию обоих ВС. Такое нормирование обеспечивает сопоставимость масштаба вертикального признака с весом длительности и позволяет использовать единый подход к последующему приведению компонент к безразмерному виду.

Для получения итогового индекса сложности обе агрегированные компоненты должны быть приведены к единой шкале. С этой целью вводятся референсные значения, определяемые как максимальные наблюдаемые значения соответствующих агрегатов для рассматриваемого сектора на анализируемом интервале T :

$$S_{\text{конфл},s}^{\text{реф}}(t) = \max_{t \in T} S_{\text{конфл},s}(t), \quad S_{\text{верт},s}^{\text{реф}}(t) = \max_{t \in T} S_{\text{верт},s}(t), \quad (3.13)$$

где $S_{\text{конфл},s}^{\text{реф}}$ – референсное значение горизонтально-конфликтной компоненты для сектора s ; $S_{\text{верт},s}^{\text{реф}}$ – референсное значение вертикальной компоненты для сектора s ; T – множество моментов времени, по которым выполняется расчёт индекса в рамках выбранного интервала анализа.

Выбор максимума в качестве референсного значения обеспечивает ясную интерпретацию нормированных показателей: значение, равное единице, соответствует наиболее сложному наблюдавшемуся состоянию сектора по

соответствующей компоненте, а все остальные состояния выражаются как доля от этого максимума. Такой подход удобен при сравнении временных интервалов внутри одного и того же сектора и не требует предварительного задания универсальных проектных верхних границ, которые могут различаться для разных зон ответственности. Выбор по максимуму не требует предварительного задания проектных верхних границ (которые могут быть различны для разных секторов ОВД) и тем самым повышает воспроизводимость процедуры при наличии статистически репрезентативной выборки.

Нормирование компонент выполняется по формулам:

$$\tilde{S}_{\text{конфл},s}(t) = \max\left(0, \min\left(\frac{S_{\text{конфл},s}(t)}{S_{\text{конфл},s}^{\text{реф}}(t)}, 1\right)\right), \quad (3.14)$$

и

$$\tilde{S}_{\text{верт},s}(t) = \max\left(0, \min\left(\frac{S_{\text{верт},s}(t)}{S_{\text{верт},s}^{\text{реф}}(t)}, 1\right)\right), \quad (3.15)$$

где $\tilde{S}_{\text{конфл},s}(t)$ – нормированная горизонтально-конфликтная компонента структурной сложности сектора s ; $\tilde{S}_{\text{верт},s}(t)$ – нормированная вертикальная компонента структурной сложности сектора s .

Если на всём рассматриваемом интервале времени соответствующая компонента отсутствует, то её референсное значение принимается равным нулю, а нормированная компонента полагается тождественно равной нулю. Это исключает деление на ноль и соответствует физическому смыслу показателя.

Индекс структурной сложности сектора определяется как взвешенное среднее двух нормированных компонент с переводом в шкалу 0...10 и насыщением по верхней границе [116]:

$$C(t) = 10 \cdot \min\left(1, \frac{\beta \tilde{S}_{\text{конфл},s}(t) + \gamma \tilde{S}_{\text{верт},s}(t)}{\beta + \gamma}\right), \quad (3.16)$$

где $C(t) \in [0,10]$ – индекс структурной сложности воздушной обстановки в секторе s в момент t ; β – весовой коэффициент горизонтально-конфликтной компоненты; γ – весовой коэффициент вертикальной компоненты; $\beta + \gamma$ в знаменателе

обеспечивает интерпретацию выражения в скобках как взвешенного среднего, то есть сохраняет диапазон $[0;1]$ при $\tilde{S}_{\text{конфл},s}(t), \tilde{S}_{\text{верт},s}(t) \in [0,1]$, и делает результат инвариантным к масштабу коэффициентов (важно их соотношение); $\min(1, \cdot)$ реализует насыщение («потолок сложности») и согласуется с практикой ограничения индексов сложности.

В настоящем исследовании в качестве весов используются коэффициенты, полученные экспертной калибровкой: $\beta = 1,76$; $\gamma = 1,25$ [123]. β отражает относительную значимость конфликтной насыщенности воздушной обстановки, а γ отражает относительную значимость вертикальной динамики.

Предложенный метод позволяет перейти от набора отдельных прогнозируемых ПКС к интегральной количественной оценке структурной сложности сектора ОВД. В отличие от предварительной линейной факторной аппроксимации, использованной на этапе экспертной калибровки, данная модель опирается не на прямой учёт числа ВС, а на содержательные характеристики конфликтной структуры воздушной обстановки. Это обеспечивает более корректное разделение ролей входных переменных V и $C_s(t)$ в общей модели динамической оценки пропускной способности сектора ОВД: первая отражает объём (интенсивность) ВД, тогда как вторая – его структурную и конфликтно-геометрическую сложность.

Таким образом, индекс $C_s(t)$, рассчитываемый по формулам (3.3)–(3.16), может использоваться в качестве входной переменной системы нечёткого вывода при оценке динамической пропускной способности сектора ОВД.

3.2.3. Метод расчёта коэффициента доступности воздушного пространства

Наряду с параметрами объёма ВД V и структурной сложности $C_s(t)$, в разработанной модели динамической пропускной способности сектора ОВД необходимо учитывать текущие ограничения использования ВП. Для

формализованного описания данного фактора вводится коэффициент $R(t)$, интерпретируемый как доля доступного ВП сектора по объёму в заданном диапазоне эшелонов. Такой подход позволяет представить в единой расчётной форме разнородные ограничения, связанные с активизацией запретных и опасных зон, временными ограничениями, а также неблагоприятными метеорологическими явлениями. Метод основан на двумерной сеточной дискретизации горизонтальной проекции сектора ОВД, разбиении ВП по эшелонным слоям и бинарной классификации элементарных областей по признаку доступности [117, 118].

Горизонтальная проекция сектора ОВД представляется плоской областью S , заданной замкнутым многоугольником в двумерном евклидовом пространстве:

$$S \subset \mathbb{R}^2, \quad (3.17)$$

где S – полигональная область сектора в плоскости; $\mathbb{R}^2$ – двумерное евклидово пространство

Вертикальный диапазон расчёта задаётся как интервал эшелонов:

$$H = [h_{\min}, h_{\max}], \quad (3.18)$$

где $h_{\min}$ – нижняя граница диапазона эшелонов; $h_{\max}$ – верхняя граница. В настоящем исследовании H принимается равным диапазону FL60–FL540 при фиксированном шаге по высоте $\Delta h = 10$. Такое разбиение соответствует эшелонным слоям толщиной 1000 футов и используется как единая расчётная основа при оценке доступности сектора.

Число вертикальных слоев определяется выражением [118]:

$$L = \frac{h_{\max} - h_{\min}}{\Delta h}, \quad (3.19)$$

где L – число слоёв эшелонов полета в диапазоне $[h_{\max}; h_{\min}]$; Δh – толщина эшелонного слоя (FL).

Каждому слою $l = 1, \dots, L$ соответствует вертикальный интервал [118]:

$$h_l^u = h_{\min} + (l-1)\Delta h, \quad h_l^e = h_{\min} + l\Delta h, \quad l = 1, \dots, L, \\ H_l = \begin{cases} [h_l^u, h_l^e], l = 1, \dots, L-1, \\ [h_L^u, h_L^e], l = L. \end{cases} \quad (3.20)$$

где h_l^u – нижняя граница l -го вертикального слоя; h_l^g – верхняя граница l -го вертикального слоя; H_l – вертикальный интервал высот l -го слоя; l – индекс слоя; L – общее число слоёв.

Каждое ограничение использования воздушного пространства задаётся как объект:

$$Z_k = \langle \Omega_k, [h_k^{min}, h_k^{max}], [t_k^{нач}, t_k^{кон}] \rangle, \quad (3.21)$$

где B_k – описание k -ого ограничения; $\Omega_k \subset \mathbb{R}^2$ – горизонтальная проекция (полигон) k -ого ограничения; $[h_k^{min}, h_k^{max}]$ – вертикальный диапазон действия ограничения; $[t_k^{нач}, t_k^{кон}]$ – интервал времени активности ограничений.

Тем самым каждое ограничение описывается тремя взаимосвязанными компонентами: горизонтальной геометрией, вертикальным профилем и временными условиями активности. Такая постановка позволяет единообразно учитывать ограничения различной природы в рамках одной вычислительной схемы.

Область k -го ограничения, учитываемая на слое l в момент времени t , определяется по условию одновременной активности по времени и пересечения по высоте:

$$B_k(t, l) = \begin{cases} \Omega_k, & \text{если } t \in [t_k^{нач}, t_k^{кон}] \wedge H_l \cap [h_k^{min}, h_k^{max}] \neq \emptyset, \\ \emptyset, & \text{иначе } t \notin \end{cases} \quad (3.22)$$

где $B_k(t, l)$ – область действия k -го ограничения на слое l в момент времени t ; $\emptyset$ – пустое множество.

Интегральная область ограничений на слое l в момент времени t формируется как объединение всех активных ограничений:

$$B(t, l) = \bigcup_{k=1}^K \Omega_k(t, l), \quad (3.23)$$

где $B(t, l)$ – совокупная область ограничений на слое l в момент времени t ; K – число учитываемых ограничений; $\cup$ – операция объединения множеств.

Для практической реализации расчёта горизонтальная проекция сектора покрывается регулярной прямоугольной сеткой с шагами Δx и Δy , образующей множество ячеек:

$$\{c_i\}_{i=1}^N, \quad (3.24)$$

где c_i – i -я ячейка сетки; N – число ячеек, участвующих в расчёте.

При этом в расчёт включаются только те ячейки, которые имеют ненулевое пересечение с областью сектора:

$$m_{\text{сек}}(c_i \cap S) > 0, \quad (3.25)$$

где $\cap$ – операция пересечения; $m_{\text{сек}}(\cdot)$ – оператор вычисления площади.

Для корректного учёта граничных ячеек вводится внутрисекторная часть ячейки:

$$c_i^S = c_i \cap S, \quad (3.26)$$

где c_i^S – часть ячейки c_i , принадлежащая сектору S .

Далее для каждой пары «ячейка–слой» вводится бинарный индикатор доступности

$$a_{\{i,l\}}(t) = \begin{cases} 1, & c_i^S \cap B(t,l) = \emptyset, \\ 0, & c_i^S \cap B(t,l) \neq \emptyset, \end{cases} \quad (3.27)$$

где $a_{\{i,l\}}(t) \in \{0,1\}$ – индикатор доступности i -й ячейки на слое l в момент времени t ; $a_{\{i,l\}}(t) = 1$ соответствует доступной элементарной области; $a_{\{i,l\}}(t) = 0$ соответствует области, затронутой ограничением.

Такое бинарное описание означает, что элементарная область «ячейка–слой» считается недоступной при наличии хотя бы частичного пересечения с областью ограничений $B(t,l)$. Именно этот принцип лежит в основе дальнейшего расчёта доли доступного объёма ВП сектора.

Коэффициент доступности воздушного пространства по объёму определяется как отношение суммарного доступного объёма к полному объёму ВП сектора в рассматриваемом диапазоне эшелонов [118]:

$$R(t) = \frac{\sum_{l=1}^L \sum_{i=1}^N m_{\text{сек}}(c_i^S) \cdot \Delta h \cdot a_{i,l}(t)}{\sum_{l=1}^L \sum_{i=1}^N m_{\text{сек}}(c_i^S) \Delta h} \quad (3.28)$$

где: $R(t) \in [0, 1]$ – коэффициент доступности воздушного пространства сектора в момент времени t ; $m_{\text{сек}}(c_i^S)$ – площадь внутрисекторной части i -й ячейки; $a_{i,l}(t)$ – индикатор доступности элементарной области; Δh – толщина эшелонного слоя; L – число вертикальных слоёв; N – число расчётных ячеек.

Поскольку в рассматриваемой постановке шаг по высоте одинаков для всех слоёв, выражение (3.28) может быть упрощено:

$$R(t) = \frac{\sum_{l=1}^L \sum_{i=1}^N m_{\text{сек}}(c_i^S) \cdot \Delta h \cdot a_{i,l}(t)}{L \cdot \sum_{i=1}^N m_{\text{сек}}(c_i^S) \Delta h}, \quad (3.29)$$

где знаменатель (формула 3.29) пропорционален полному объёму сектора в пределах заданного вертикального диапазона.

При использовании регулярной сетки и допущении о приблизительном равенстве площадей внутрисекторных частей ячеек допускается приближённая оценка по доле доступных элементарных областей:

$$R(t) \approx \frac{1}{NL} \cdot \sum_{l=1}^L \sum_{i=1}^N a_{i,l}(t), \quad (3.30)$$

где $N \cdot L$ – общее число элементарных областей типа «ячейка–слой».

Формула (3.30) является вычислительно наиболее простой и может применяться при регулярной сеточной дискретизации, когда различия площадей внутрисекторных частей граничных ячеек несущественны для итоговой оценки. В то же время выражение (3.28) представляет более общий вариант и обеспечивает корректный учёт неодинаковых площадей граничных ячеек.

Для использования показателя $R(t)$ в контуре поддержки принятия решений вводится пороговое условие приоритета ограничений:

$$R(t) \leq R_{\min}, \quad (3.31)$$

где: $R_{\min}$ – пороговое значение коэффициента доступности, ниже которого ограничение ВП рассматривается как критическое; в ранее принятых настройках модели используется значение $R_{\min} = 0,25$, соответствующее зоне приоритетного или «вето»-воздействия ограничений на динамическую пропускную способность сектора ОВД.

В результате коэффициент $R(t)$ представляет собой нормированный показатель, не зависящий от природы конкретного ограничения ВП и пригодный для сопоставимого описания различных эксплуатационных ситуаций. В общей модели динамической пропускной способности сектора ОВД данный коэффициент используется совместно с параметрами $V(t)$ и $C(t)$, отражающими соответственно объём ВД и структурную сложность воздушной обстановки. Тем самым обеспечивается раздельный учёт трёх ключевых факторов, определяющих допустимую загрузку сектора ОВД: интенсивности движения, конфликтной насыщенности и доступности ВП.

Таким образом, расчёт $R(t)$ на основе формул (3.19)–(3.31) обеспечивает формализованное включение ограничений использования ВП в состав интегральной модели динамической пропускной способности сектора ОВД. Предлагаемая постановка сохраняет геометрическую интерпретируемость, допускает единый учёт ограничений различной природы и обладает вычислительной простотой, необходимой для практического применения в задачах оперативной поддержки принятия решений.

3.3. Алгоритм экспертной калибровки параметров функций принадлежности нечёткой модели

Практическая применимость разработанной нечёткой модели динамической оценки пропускной способности сектора ОВД в значительной степени определяется корректностью задания терм-множеств и параметров функций принадлежности входных переменных. На начальном этапе внедрения, как правило, отсутствует достаточный объём эксплуатационных данных, необходимый для статистического обучения модели. В этих условиях обоснованным является применение процедуры экспертной калибровки [31], обеспечивающей

эксплуатационно интерпретируемую и содержательно согласованную начальную конфигурацию нечёткого контроллера.

Целью данного этапа является определение реперных порогов и рабочих диапазонов для входных переменных V , C и R , а также формирование исходных параметров функций принадлежности, пригодных для последующего использования в вычислительном эксперименте и, при необходимости, дальнейшей параметрической адаптации модели.

В качестве исходных данных использовались результаты экспертного опроса 30 специалистов ОВД. Для структурирования экспертных оценок был применён модифицированный подход трёхточечной оценки, в рамках которого для каждого режима задавались минимальное, наиболее вероятное и максимальное значения параметра [146]. Такой подход использовался как инженерная процедура извлечения реперных характеристик режимов и переходных областей.

Для гладких термов входных переменных в модели использовались гауссовы функции принадлежности (формула 2.31). Центр терма c определялся как среднее значение наиболее вероятных экспертных оценок:

$$c = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N P_{\text{опт}}^{(i)}, \quad (3.32)$$

где N – число экспертов, $P_{\text{опт}}^{(i)}$ – наиболее вероятное значение параметра, указанное i -м экспертом.

Для оценки ширины гауссовой функции использовалась связь между параметром σ и шириной функции на уровне половины максимума (FWHM) [147]:

$$\text{FWHM} = 2\sqrt{2 \ln 2} \sigma \approx 2,355\sigma \quad (3.33)$$

В качестве инженерного допущения экспертный интервал $[P_{\min}, P_{\max}]$ интерпретировался как ширина функции принадлежности на уровне половины максимума. Тогда параметр σ определялся по формуле:

$$\sigma \approx \frac{P_{\max} - P_{\min}}{2,355}, \quad (3.34)$$

где $P_{\min}$ – «пессимистичная» (минимальная) экспертная оценка, $P_{\max}$ – «оптимистичная» (максимальная) экспертная оценка.

Следует отметить, что материалы экспертного опроса использовались прежде всего для определения реперных пороговых значений перехода между эксплуатационными режимами. Для гладких термов, аппроксимируемых гауссовыми функциями принадлежности, экспертные данные позволили непосредственно оценить как положение центра, так и ширину характерного интервала. В случае пороговых термов, описываемых S- и Z-функциями, результаты опроса задавали содержательные опорные точки перехода – в частности, начало роста принадлежности для терма «Высокая» по переменной C и критическую границу для терма «Полные» по переменной R . При этом второй параметр указанных функций, определяющий ширину переходной области, задавался на этапе моделирования как инженерная настройка исходя из требования плавности нечёткого вывода, согласованности с соседними термами и устойчивости поведения модели в переходных режимах.

Количественная обработка материалов экспертного опроса позволила выявить устойчивые закономерности субъективного восприятия рабочей нагрузки, что послужило основанием для калибровки параметров функций принадлежности (рисунок 3.4).

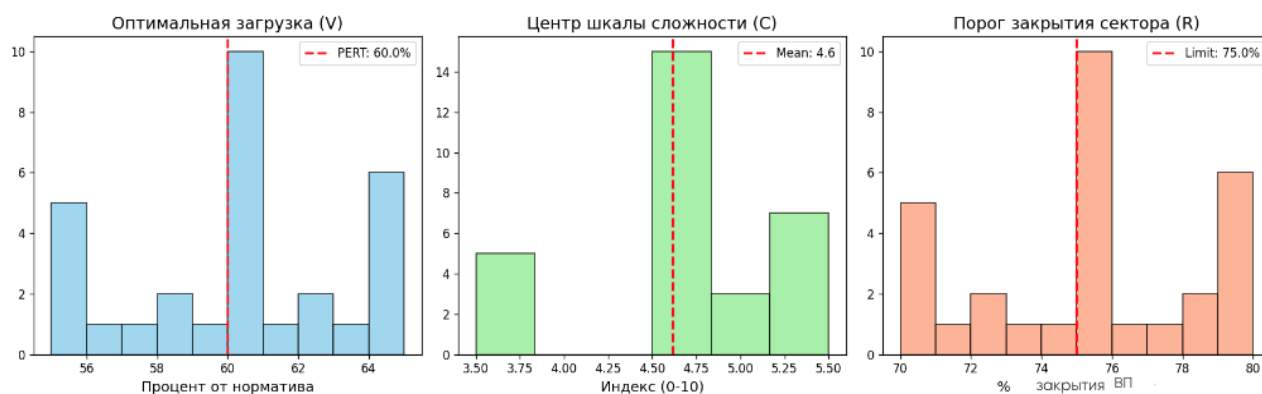


Рисунок 3.4 – Распределение ответов экспертов при калибровке параметров нечёткой модели [31]

Полученные значения использовались как исходная инициализация модели и в дальнейшем могут уточняться в модуле параметрической адаптации.

Итоги калибровки свидетельствуют о высокой согласованности профессиональных суждений (Приложение А): разброс оценок по ключевым параметрам остаётся умеренным, что подтверждает корректность использования полученных экспертных данных в качестве основы для начальной настройки нечёткой модели.

Средние значения по выборке составили: оптимальная нагрузка по V – 60,07%; нижняя и верхняя границы комфортной зоны – 45,07% и 75,07%; порог высокой нагрузки – 85,07%; границы средней сложности – 3,13–6,13; порог критической сложности – 6,13. Для фактора ограничений средний порог закрытия сектора составил 75,20% покрытия, что соответствует коэффициенту доступности $R \approx 0,25$.

Результаты расчёта и значения, принятые при моделировании, представлены в таблице 3.3 [31].

Таблица 3.3 – Расчётные и принятые параметры функций принадлежности

Переменная	Терм	Функция	Параметры (Расчетные)	Параметры (заданные при моделировании)
Объем ВД (V)	Оптимальный	Гаусса	$c = 60,1; \sigma = 12,7$	$c = 60; \sigma = 15$
	Высокий	Гаусса	$c = 85,1; \sigma \approx 10$	$c = 85; \sigma = 15$
Сложность (C)	Смешанная	Гаусса	$c = 4,63; \sigma = 1,27$	$c = 5; \sigma = 1,5$
	Высокая	S-функц.	$a = 6,13$	$a = 6$
Ограничения (R)	Частичные	Гаусса	$c = 0,548; \sigma = 0,12$	$c = 0,55; \sigma = 0,15$
	Полные	Z- функц.	$b = 0,248$	$b = 0,25$

Для термов с пороговым характером перехода экспертный опрос задавал реперные точки начала критического режима, тогда как второй параметр S- и Z-функций, определяющий ширину переходной области, задавался в программной реализации исходя из требования плавности нечёткого вывода и согласованности с соседними термами.

Детализация вычислений параметров ($c; \sigma$, а также пороговых значений) функций принадлежности нечеткой модели выполнена по агрегированным данным экспертного опроса и приведена ниже.

Для входной переменной «Объём ВД» (V) терм «Оптимальный» (табл. 3.3) аппроксимирован гауссовой функцией $P_{\max} = 75,1\%$ и $P_{\min} = 45,1\%$; ее центр принят равным среднему арифметическому точечных оценок экспертов при заданных границах интервала и $P_{\text{опт}} = c_{\text{опт}} = 60,1\%$.

При допущении, что интервал $[P_{\max}, P_{\min}]$ соответствует ширине функции на уровне половинной амплитуды, использована зависимость (3.34): $\Delta P = 75,1 - 45,1 = 30\%$, $\sigma_{\text{опт}} = \frac{30}{2,355} \approx 12,74\%$.

Для термина «Высокий» по результатам опроса объём ВД составил $c_{\text{выс}} = 85,1\%$, а параметр σ принят согласно (3.34) $\sigma_{\text{выс}} \approx 10\%$.

Входная переменная «Сложность ВО» для термина «Смешанная» характеризуется исходными данными: $P_{\max} = 6,13$ и $P_{\min} = 3,13$; центр функции определен как середина указанного экспертами интервала $c_{\text{смеш}} = \frac{P_{\max} + P_{\min}}{2} = 4,63$. Ширина диапазона для данного термина рассчитана как $\Delta P = 3$, при этом получено значение $\sigma_{\text{смеш}} \approx 1,27$.

Для термина «Высокая» использовалась S-функция. По материалам экспертного опроса определялась прежде всего реперная точка начала перехода к критической сложности: $a = 6,13$.

В итоговой конфигурации модели данное значение округлялось до $a \approx 6$, а второй параметр S-функции, определяющий завершение переходной области, задавался при моделировании как инженерная настройка. Полученный порог может быть качественно сопоставлен с ограничениями оперативной переработки информации оператором, описываемыми в когнитивной психологии, включая представления о конечной ёмкости оперативной памяти. В этом смысле начало роста S-функции в области $c \approx 6$ имеет содержательную когнитивную интерпретацию и согласуется с классическими представлениями, известными как «число Миллера» (7 ± 2 объектов в оперативной памяти) [120].

Для коэффициента доступности ВП R в работе принята обратная шкала интерпретации: $R = 1$ соответствует отсутствию ограничений, а уменьшение R отражает сокращение доступного ВП. По экспертным данным средний порог

закрытия сектора составил 75,20 % покрытия, что соответствует коэффициенту доступности ВП.

Параметр b задает точку, в которой функция «Полные» обращается в нуль (после чего состояние «полных ограничений» не рассматривается как доминирующее). Для Z -функции b определен как уровень, ниже которого ($R < b$) сектор считается функционально заблокированным $b = R_{\text{полные}} = 1 - \frac{75,2}{100} = 0,248$.

Данное значение было использовано в качестве математического основания для настройки терма ограничения «Полные» и правила «Вето» в базе нечёткого вывода. В модели соответствующая граница была округлена до $R \leq 0,25$.

При этом, как и в случае S -функции для C , экспертный опрос определял реперную критическую точку, тогда как ширина переходной области Z -функции задавалась на этапе моделирования.

Для терма «Частичные» по переменной R экспертные данные определяли промежуточный режим сокращения доступного ВП, центр которого в модели был принят на уровне $c = R_{\text{част}} = 0,548$.

Параметр $\sigma = 0,15$ задавался как инженерно выбранная ширина переходной области, обеспечивающая плавное сопряжение с термами «Отсутствуют» и «Полные».

Эмпирически полученный центр зоны «Оптимальный» по переменной V , расположенный в области около 60% от нормативного предела, указывает на предпочтительность режима умеренной загруженности диспетчера по сравнению с работой вблизи формального максимума. Такой результат качественно согласуется с представлениями о существовании оптимального диапазона рабочей нагрузки, при котором достигается баланс между достаточной активацией и сохранением когнитивного резерва оператора, в указанном смысле он не противоречит закону Йеркса-Додсона [148].

Наиболее выраженный консенсус был получен по фактору ограничений ВП. Эксперты указали, что при перекрытии сектора ограничениями использования ВП более чем примерно на 75% безопасное ОВД становится крайне затруднённым.

Именно поэтому значение $R \leq 0,25$ было положено в основу настройки Z-функции и правила «Вето» в базе нечёткого вывода. Данный результат подтверждает, что в области критического сокращения доступного объёма ВП модель должна переходить к максимально жёсткому ограничительному режиму.

Для визуальной верификации параметризации целесообразно использовать сопоставление гистограмм экспертных оценок с аппроксимирующими кривыми выбранных функций принадлежности (рисунок 3.5).

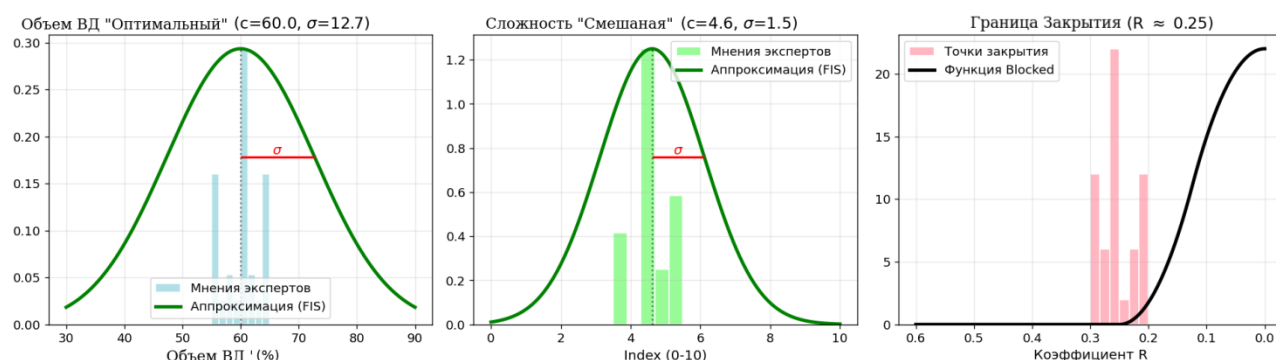


Рисунок 3.5 – Верификация функций принадлежности по экспертным данным с визуализацией параметров переходной области

Визуальная верификация показывает, что выбранные типы функций принадлежности – гауссовы, S- и Z-функции – адекватно описывают форму распределения экспертных оценок и обеспечивают содержательно интерпретируемую параметризацию нечёткой модели. При этом для гладких термов экспертные данные непосредственно определяют центр и характерную ширину распределения, тогда как для пороговых термов экспертный опрос задаёт реперные точки перехода, а окончательная ширина переходной области формируется в программной реализации.

В целом проведённая экспертная калибровка показала высокую согласованность профессиональных оценок и позволила получить параметрически устойчивую исходную конфигурацию нечёткого контроллера. Полученные параметры обеспечивают эксплуатационно и когнитивно интерпретируемое

описание режимов работы сектора ОВД и создают основу для последующего численного моделирования и анализа поверхностей решений.

Таким образом, экспертная калибровка параметров функций принадлежности выступает не только этапом начальной настройки модели, но и средством согласования формального математического аппарата с профессиональным восприятием рабочей нагрузки диспетчером. Это повышает доверие к модели и расширяет возможности её практического применения в составе систем поддержки принятия решений.

3.4. Численное моделирование и топологический анализ поверхностей решений

Ключевым этапом верификации разработанной нечёткой модели является исследование поверхностей решений, формируемых системой на всей области допустимых значений входных переменных. Целью вычислительного эксперимента являлся анализ поведения выходной функции $y = f_{FIS}(V, C, R)$.

В рамках численного моделирования решались следующие задачи: исследование характера изменения выходной функции при варьировании входных параметров; проверка непрерывности поверхности решений и отсутствия скачкообразных переходов между режимами; анализ физической интерпретируемости поведения модели в штатных, ограниченных и предкритических условиях функционирования сектора.

Вычислительный эксперимент был реализован путём дискретизации непрерывных универсумов входных переменных V и C и последующего вычисления выходного значения системы в каждом узле расчётной сетки при фиксированных значениях параметра R . Для переменной V использовался диапазон $V \in [0; 120]$, с шагом дискретизации $\Delta V = 1\%$, что соответствует 121 расчётной точке. Для переменной C задавался диапазон $C \in [0; 10]$, с шагом $\Delta C = 0,1$ что

соответствует 101 расчётной точке. Таким образом, для каждого фиксированного значения R формировалась двумерная сетка из $N = 121 \times 101 = 12221$ расчётных узлов. Вычислительный эксперимент был реализован на ЭВМ, моделирование проводилось путём дискретизации непрерывных универсумов входных переменных; был применён метод сеточного сканирования пространства состояний [149].

Для каждого узла (v_i, c_j) выход системы определялся посредством полного цикла нечёткого вывода:

$$y^*_{i,j}(R) = Defuzz(Aggr(Rules(v_i, c_j, R))), \quad (3.35)$$

где: $y^*_{i,j}(R)$ – значение выходной функции в узле (v_i, c_j) при фиксированном значении R ; $Rules(\cdot)$ – этап активации базы нечётких правил; $Aggr(\cdot)$ – этап агрегирования частных результатов вывода; $Defuzz(\cdot)$ – процедура дефаззификации.

Вычислительный эксперимент проводился для трёх характерных сценариев, отражающих различные режимы функционирования сектора ОВД:

$$R \in \{1,0; 0,4; 0,25\} \quad (3.36)$$

Значение $R = 1,0$ соответствует штатным условиям при отсутствии ограничений воздушного пространства; значение $R = 0,4$ характеризует режим существенного сокращения доступного объёма ВП сектора; значение $R = 0,25$ соответствует предкритическому режиму (закрытию большего объёма ВП), совпадающему с принятым в модели порогом приоритетного влияния ограничений.

Сценарий 1. Штатные условия ($R = 1,0$) (рисунок 3.6, а).

При отсутствии ограничений воздушного пространства поверхность решений:

$$S_1 = y(V, C)|_{R=1,0}, \quad (3.37)$$

где S_1 – первый рассматриваемый сценарий, демонстрирует выраженный нелинейный, но непрерывный характер. Анализ полученной поверхности

позволяет выделить несколько типичных областей, имеющих ясную физическую интерпретацию.

В области малых и средних значений объёма ВД и невысокой структурной сложности наблюдается зона, близкая к плато, в которой выходное значение системы сохраняется на уровне, близком к максимальному. Практически данная область соответствует сочетанию условий: $V \leq 60 \%$, $C \leq 4$.

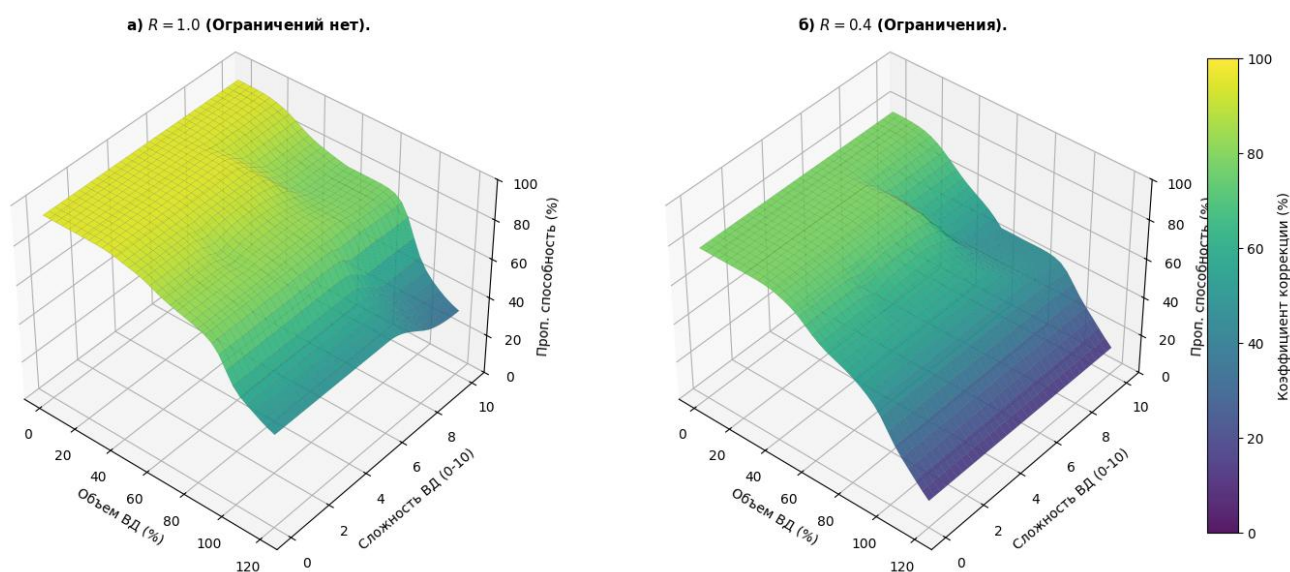


Рисунок 3.6 – Поверхность решений а) $R = 1.0$; б) $R = 0.4$

В этих условиях система поддерживает значение допустимой динамической пропускной способности, близкое к нормативному максимуму. Такая форма поверхности отражает наличие операционного резерва при сравнительно простой воздушной обстановке и соответствует принципу невмешательства в режимах, не требующих дополнительного ограничения загрузки сектора ОВД.

При увеличении параметра V в области умеренных значений C наблюдается плавное снижение выходной функции. Указанный эффект отражает постепенный переход от режима нормального функционирования к режиму насыщения по объёму ВД. Существенно, что изменение поверхности происходит без скачкообразных переходов, что свидетельствует о корректном перекрытии функций принадлежности и согласованной работе базы правил.

Наряду с этим в области высоких значений структурной сложности формируется зона пониженных значений выходной функции даже при умеренном объёме ВД. Это означает, что система интерпретирует сложную, конфликтно насыщенную конфигурацию потока как самостоятельный фактор, требующий снижения допустимой загрузки сектора ОВД. Тем самым подтверждается, что переменная C выполняет в модели собственную функцию и не сводится к косвенному описанию только интенсивности ВД.

Таким образом, в штатных условиях поверхность S_1 демонстрирует физически интерпретируемое поведение: при простых условиях сохраняется максимальный уровень допустимой пропускной способности, при увеличении объёма ВД происходит плавное ограничение, а при высокой структурной сложности снижение возможно даже при умеренном значении V .

Сценарий 2. Существенные ограничения воздушного пространства ($R = 0,4$) (рисунок 3.6, б).

При уменьшении коэффициента доступности до уровня $R = 0,4$, поверхность решений:

$$S_2 = y(V, C)|_{R=0,4}, \quad (3.38)$$

где S_2 – второй рассматриваемый сценарий, сохраняет общий характер рельефа, однако её верхний уровень оказывается заметно ниже по сравнению со штатным сценарием. Это означает, что даже при благоприятных сочетаниях параметров V и C система не достигает значений, соответствующих полной пропускной способности сектора, поскольку доступный объём воздушного пространства уже существенно сокращён.

Численный анализ показывает, что влияние параметра R проявляется как глобальное ограничение максимально достижимого уровня выходной функции. При этом характер воздействия не сводится к простому вычитанию некоторой постоянной величины, а реализуется через совокупность нечётких правил, активируемых в зависимости от сочетания всех трёх входных переменных. Вследствие этого уменьшение R приводит не только к понижению верхней

границы поверхности, но и к перераспределению областей доминирования отдельных правил.

Дополнительно наблюдается определённое сглаживание рельефа поверхности по сравнению со сценарием $R = 1,0$. В частности, зоны пониженных значений, обусловленные высокой структурной сложностью, становятся менее контрастными. Это объясняется тем, что при уже действующих ограничениях ВП часть правил, связанных со снижением допустимой пропускной способности сектора ОВД, активируется в более широкой области пространства состояний, и дальнейшее увеличение сложности не вызывает непропорционально резкого дополнительного снижения выходной переменной.

С практической точки зрения данный результат является важным, поскольку показывает, что модель не приводит к чрезмерно жёсткому кумулятивному уменьшению допустимой пропускной способности при одновременном действии нескольких неблагоприятных факторов. Выходная функция по-прежнему изменяется плавно и сохраняет интерпретируемый характер.

Сценарий 3. Предкритический режим ($R = R_{\min} = 0,25$).

Третий сценарий использовался в качестве контрольного и соответствует граничному режиму, при котором коэффициент доступности ВП достигает принятого в модели порогового значения: $R = R_{\min} = 0,25$.

В данном случае поверхность решений:

$$S_3 = y(V, C)|_{R=0,25}, \quad (3.39)$$

где S_3 – третий рассматриваемый сценарий, характеризуется дальнейшим снижением верхнего уровня и существенным сжатием диапазона допустимых выходных значений. Это указывает на доминирующее влияние ограничений ВП в структуре итоговой оценки пропускной способности сектора ОВД. Даже в условиях относительно невысокого объёма ВД и умеренной сложности воздушной обстановки система формирует заметно более осторожную рекомендацию по допустимой загрузке сектора – динамического коэффициента коррекции НПС.

Вместе с тем и в этом предкритическом режиме поверхность сохраняет непрерывный характер и не демонстрирует неестественных осцилляций либо

локальных скачков. Данный результат имеет принципиальное значение, поскольку подтверждает устойчивость алгоритма вблизи пороговой области, где влияние переменной R должно быть максимально выраженным. Иными словами, даже при переходе к зоне приоритетного ограничения система не утрачивает плавности регулирования и не формирует неинтерпретируемых переходов между соседними состояниями.

Таким образом, сценарий $R = 0,25$ подтверждает, что введённый коэффициент доступности ВП действительно выполняет функцию глобального ограничивающего параметра, однако делает это в согласовании с общим механизмом нечёткого вывода, а не в форме жёсткого дискретного обрыва допустимой пропускной способности сектора ОВД.

Общие результаты анализа поверхностей решений демонстрируют, что проведённое численное моделирование показало, что разработанная нечёткая модель обладает устойчивым и физически согласованным поведением на всей исследованной области входных параметров. Во всех рассмотренных сценариях поверхность решений сохраняет непрерывный характер, а изменение выходной функции происходит без скачкообразных переходов и без выраженных локальных осцилляций.

Полученные результаты позволяют сформулировать несколько принципиальных выводов. Во-первых, база нечётких правил обеспечивает полное покрытие исследуемой области входных состояний, вследствие чего в каждой расчётной точке формируется определённое выходное значение системы. Во-вторых, используемая процедура дефаззификации обеспечивает плавные переходы между соседними режимами функционирования, что особенно важно при практическом применении модели в задачах оперативной поддержки принятия решений. В-третьих, анализ поверхностей подтверждает корректное функциональное разделение ролей входных переменных в общей модели динамической пропускной способности сектора ОВД. Переменная V определяет эффект насыщения по объёму ВД, переменная C отражает структурную и конфликтную сложность воздушной обстановки, а переменная R задаёт глобальное

ограничение максимально достижимой динамической пропускной способности сектора ОВД в условиях сокращения доступного ВП.

Следовательно, результаты численного эксперимента подтверждают, что разработанная система формирует интерпретируемую, непрерывную и устойчивую поверхность решений, пригодную для практического использования в составе алгоритма динамической коррекции НПС сектора ОВД.

Выводы по Главе 3

Выполненное в главе исследование позволяет сформулировать следующие основные результаты и выводы.

1. Разработана программно-математическая реализация метода динамической корректировки пропускной способности секторов ОВД, в которой в едином вычислительном контуре совместно учитываются объём ВД V , структурная сложность ВО C и коэффициент доступности ВП R .

2. Предложен конфликтно-ориентированный метод расчёта индекса структурной сложности ВО на основе потенциальных конфликтных ситуаций, формируемых средствами МТCD, с учётом геометрии конфликтного взаимодействия ВС, продолжительности его существования и вертикальной динамики ВС. В отличие от подходов, основанных на прямом учёте только количества ВС, предложенный метод позволяет описывать именно конфигурационную сложность воздушной обстановки.

3. Разработан метод расчёта коэффициента ограничений ВП $R(t)$ как доли доступного ВП сектора по объёму на основе двумерной сеточной дискретизации горизонтальной проекции сектора и разбиения ВП по эшелонным слоям. Предложенный показатель обеспечивает единое количественное представление разнородных ограничений, включая запретные зоны, временные ограничения и опасные метеоявления.

4. Разработана процедура экспертной калибровки параметров нечёткой модели, обеспечивающая определение весовых коэффициентов структурной сложности и реперных параметров функций принадлежности на основе формализованной обработки экспертных оценок. Новизна данного результата состоит в согласовании математической параметризации модели с профессиональным восприятием рабочей нагрузки диспетчером УВД.

5. Установлены и введены в модель количественные пороговые значения эксплуатационных режимов, в том числе оптимальный уровень загрузки по V , порог перехода к высокой сложности по C и критическая граница доступности ВП $R \leq 0,25$, соответствующая активации правила «Вето». Указанные значения получили формализованное использование в структуре нечёткого вывода.

6. Показано, что разработанная гибридная нечёткая модель формирует непрерывные и интерпретируемые поверхности решений на всей исследованной области входных параметров, что подтверждает возможность её применения для динамической корректировки пропускной способности секторов ОВД без возникновения скачкообразных переходов между режимами.

Научная новизна результатов, полученных в главе 3, заключается в разработке программно-математической реализации метода динамической корректировки НПС секторов ОВД, в предложении конфликтно-ориентированного метода расчёта структурной сложности ВО по данным MTCD; в формализации коэффициента ограничений $R(t)$ как доли доступного ВП по объёму; в разработке процедуры экспертной калибровки параметров нечёткой модели; а также в установлении количественных пороговых значений эксплуатационных режимов, используемых в нечётком выводе.

ГЛАВА 4. РАСЧЁТНАЯ АПРОБАЦИЯ, ЭКСПЕРТНАЯ ОЦЕНКА И ПАРАМЕТРИЧЕСКАЯ АДАПТАЦИЯ НЕЧЁТКОЙ МОДЕЛИ ДИНАМИЧЕСКОЙ КОРРЕКТИРОВКИ ПРОПУСКНОЙ СПОСОБНОСТИ СЕКТОРОВ ОВД

В предыдущих главах были обоснованы факторы, определяющие необходимость перехода от статического НПС секторов ОВД к динамической корректировке, зависящей от текущего состояния ВО. Были сформированы входные переменные модели: относительный объём ВД $V_s(t)$, индекс структурной сложности ВО $C_s(t)$ и коэффициент доступности ВП $R_s(t)$, а также разработана нечёткая модель Мамдани, определяющая коэффициент коррекции $K_{кор,s}(t)$ [2, 15, 31].

Настоящая глава посвящена проверке работоспособности разработанной модели, экспертной интерпретации её результатов, постановке и алгоритмизации процедуры параметрической адаптации функций принадлежности, а также сопоставлению предлагаемого динамического подхода с действующей нормативной Методикой определения НПС секторов ОВД [15]. Логика главы состоит в переходе от математической модели к прикладному инструменту поддержки принятия решений, пригодному для использования в условиях районного диспетчерского центра.

4.1. Расчётная апробация модели на сценариях РДЦ Санкт-Петербург

Расчётная апробация нечёткой модели выполнена на наборе обезличенных сценариев, сформированных для секторов: «Север», «Юго-Запад», «Юго-Восток» районного диспетчерского центра (РДЦ) Санкт-Петербург [88, 90, 123]. Целью данного этапа является не подмена метрической валидации по фактическому эталонному ряду динамической пропускной способности, а проверка

алгоритмической реакции модели на изменение входных параметров и оценка соответствия выходного коэффициента $K_{кор,s}(t)$ заложенной базе продукционных правил (Таблица 2.1, а-в).

Для каждого расчётного сценария в программный модуль загружались временные профили $V_s(t)$, $C_s(t)$ и $R_s(t)$. На их основе выполнялся нечёткий вывод по алгоритму Мамдани [90, 107, 123], после чего определялось значение коэффициента коррекции НПС. Динамическая корректировка пропускной способности секторов ОВД определялась выражением 1.4.

Расчётная выборка построена таким образом, чтобы охватить различные сочетания интенсивности ВД, структурной сложности ВО и доступности ВП секторов ОВД. В качестве анализируемых объектов использованы три сектора РДЦ: «Север», «Юго-Восток» и «Юго-Запад». Для каждого сектора рассмотрено по три суточных сценария, каждый из которых содержит 24 временных окна. Таким образом, общий объём расчётной выборки составил 216 состояний сектора. Структура расчётной выборки, использованной для апробации модели, приведена в таблице 4.1.

Таблица 4.1 – Структура расчётной выборки для апробации модели

Обозначение сценария	Сектор ОВД	Число сценариев	Число временных окон в сценарии	Общий объём состояний
S1–S3	Север	3	24	72
S4–S6	Юго-Восток	3	24	72
S7–S9	Юго-Запад	3	24	72
Итого	3 сектора	9	24	216

Как видно из таблицы 4.1, общий объём расчётной выборки составил 216 состояний, что позволяет проанализировать реакцию модели при различных сочетаниях $V_s(t)$, $C_s(t)$ и $R_s(t)$. Выбранная структура выборки позволяет сопоставлять реакцию модели как между различными секторами, так и между различными режимами функционирования одного и того же сектора. Суточная

дискретизация в 24 временных окна используется как удобная форма представления динамики параметров в течение расчётного периода.

Входной вектор состояния сектора в момент времени t задаётся выражением [31, 116, 118, 123]:

$$X_s(t) = \{V_s(t), C_s(t), R_s(t)\}, \quad (4.1)$$

где $V_s(t)$ характеризует относительный объём ВД, выраженный в процентах от НПС; $C_s(t)$ характеризует структурную сложность ВО на шкале 0–10; $R_s(t)$ характеризует долю доступного объёма ВП на шкале 0-1.

Профиль $V_s(t)$ формируется по данным интенсивности ВД и отражает текущую или прогнозируемую загрузку сектора относительно нормативного значения пропускной способности, загружается отдельным файлом. Профиль $C_s(t)$ формируется по результатам обработки данных о ПКС, получаемых средствами среднесрочного обнаружения конфликтов (MTCD) [116, 143-145]. Профиль $R_s(t)$ загружается отдельным файлом, сформированным внешним модулем расчёта коэффициента доступности ВП [118, 150]. Такое разделение повышает модульность программной реализации и позволяет независимо совершенствовать процедуры расчёта сложности и доступности ВП.

В программной реализации коэффициент доступности ВП $R_s(t)$ рассматривается как предварительно рассчитанный входной временной профиль, формируемый специализированным программным средством «Программный модуль расчёта коэффициента доступности воздушного пространства секторов обслуживания воздушного движения» (Приложение Б). Указанный модуль предназначен для обработки графических материалов, содержащих сведения о зонах ограничения использования ВП, закрытия ВП, а также опасных метеорологических явлениях, отображаемых на индикаторе воздушной обстановки (ИВО), распознавания соответствующих областей на изображении, их наложения на сеточную модель сектора и последующего расчёта доли доступного объёма ВП [118].

При проверке работоспособности модуля использовались обезличенные сценарии, сформированные на основе картографических материалов района

ответственности РДЦ Санкт-Петербург. Расчёт выполнялся для трёх секторов: «Север», «Юго-Запад» и «Юго-Восток». В качестве расчётной основы применялась регулярная сетка с шагом 5×5 км. Вертикальный диапазон анализа задавался в пределах от FL60 до FL540, при этом в интерфейсе предусмотрена возможность ручного изменения нижней и верхней границы эшелонов.

Пример распознавания графических изображений контуров неблагоприятных метеоявлений и зон ограничений использования ВП на ИВО приведен на рисунке 4.1, графические объекты распознаются как с заливкой сплошным цветом контуров неблагоприятных явлений погоды, так и без.

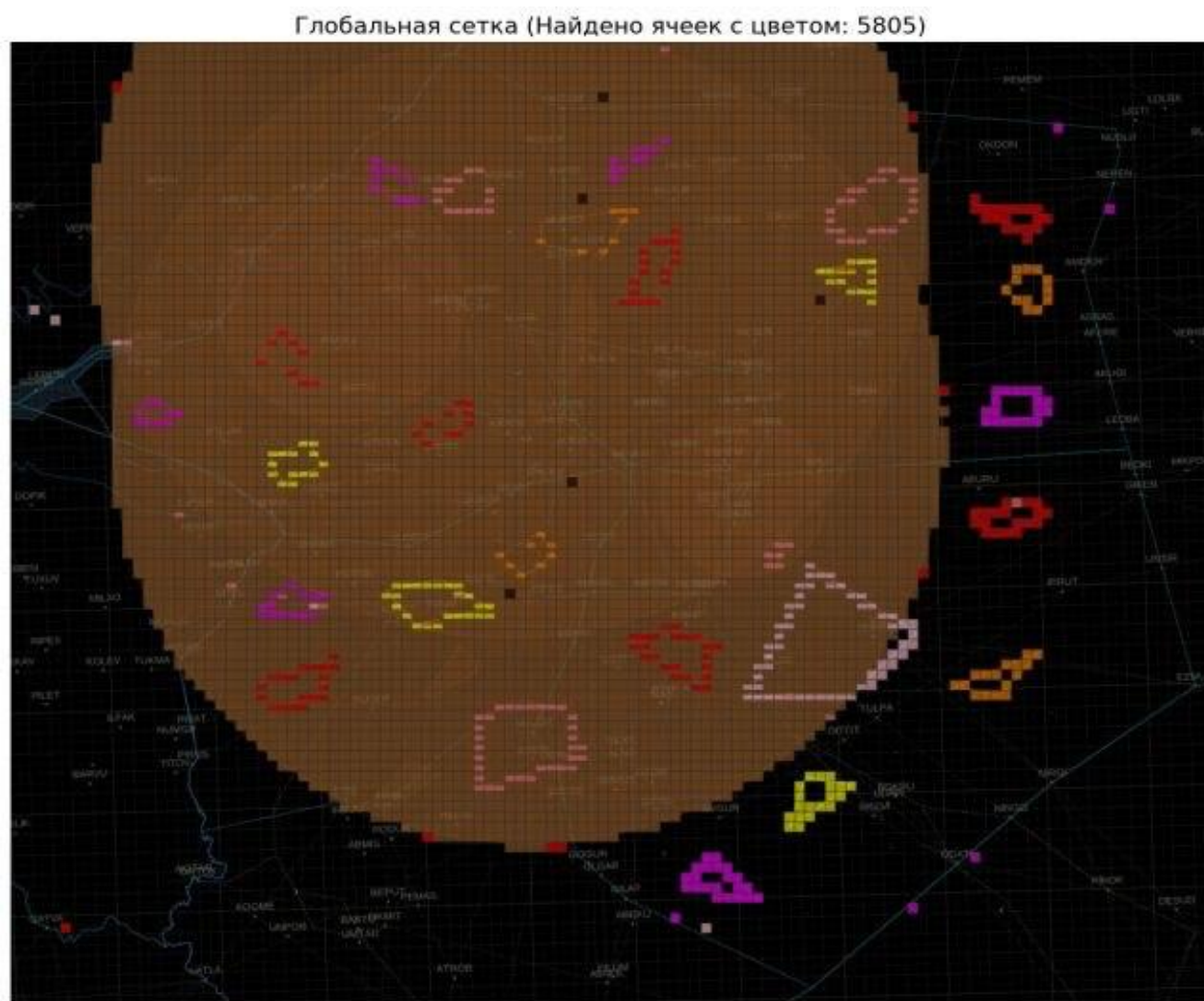


Рисунок 4.1 – Пример распознавания графической информации с ограничениями ВП и контурами неблагоприятных явлений погоды

Для распознавания интенсивности отображаемых метеорологических контуров использовалась реализуемая в АС УВД «Галактика» следующая цветовая градация интенсивности отображаемых контуров (Таблица 4.2) [150]. При этом полнота распознавания графических отображений программным модулем составила 98,628%, а точность – 97,466%.

Таблица 4.2 – Цветовая градация отображаемых метеоконтуров [150]

1.		(0xFF, 0xFF, 0xFF)	отсутствие метеоявлений
2.		(0xC0, 0xC0, 0xC0)	облака верхнего уровня
3.		(0x80, 0xE0, 0x80)	слоистые облака
4.		(0x00, 0xFF, 0x00)	небольшие осадки
5.		(0x00, 0xC0, 0x00)	средние осадки
6.		(0x00, 0x80, 0x00)	сильные осадки
7.		(0x00, 0xFF, 0xFF)	конвективные облака
8.		(0x00, 0x80, 0xC0)	небольшой ливень
9.		(0x00, 0x00, 0xFF)	ливень
10.		(0x40, 0x00, 0x80)	сильный ливень
11.		(0xE0, 0x80, 0xC0)	гроза с вероятностью 30–70%
12.		(0xE0, 0x00, 0xC0)	гроза с вероятностью 70–90%
13.		(0xFF, 0x00, 0x00)	гроза с вероятностью >90%

Работа программного модуля включает загрузку исходного изображения, выделение областей ограничений, морфологическую постобработку полученных контуров, их наложение на границы секторов и расчёт коэффициента $R_s(t)$ для каждого сектора ОВД. На рисунке 4.2 показан результат обработки и расчёта коэффициента доступности ВП.

Полученные значения $R_s(t)$ используются в качестве входных данных нечёткой модели Мамдани при формировании коэффициента оперативной коррекции НПС. Таким образом, программный модуль обеспечивает переход от визуального представления ограничений ВП к количественному параметру, пригодному для последующей автоматизированной оценки динамической пропускной способности сектора ОВД.

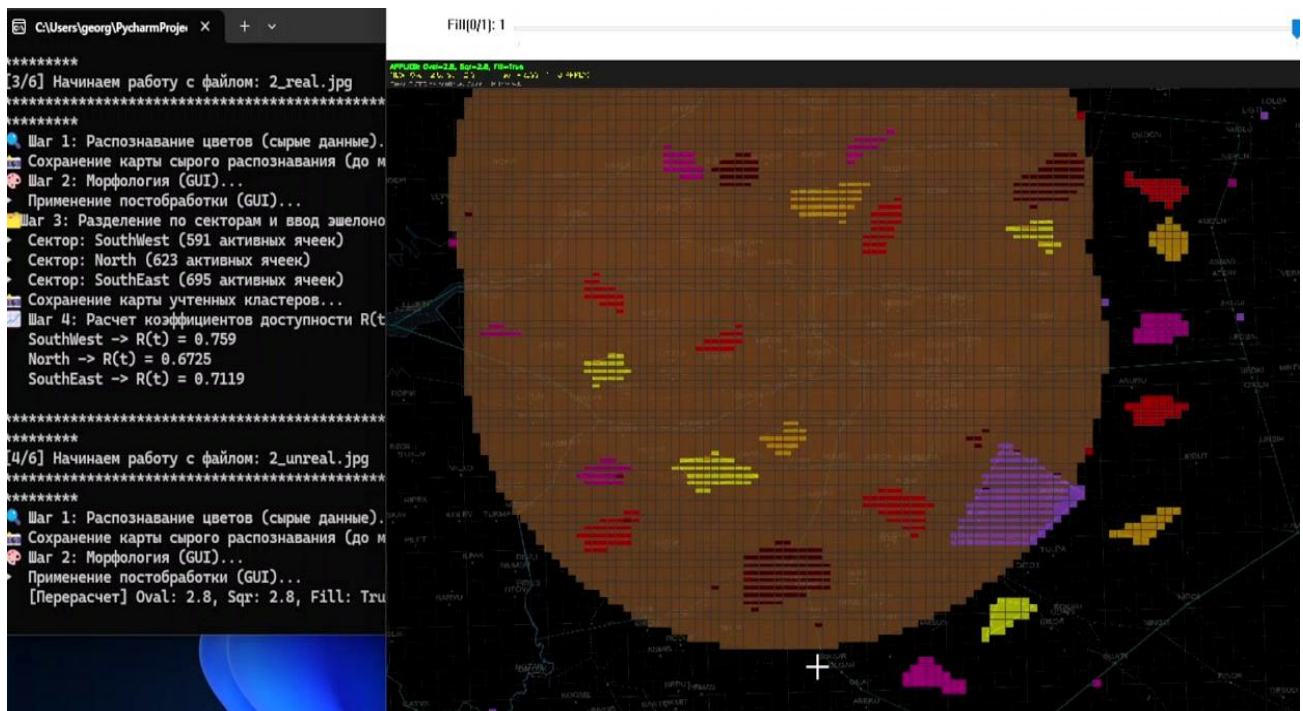


Рисунок 4.2 – Результат расчёта коэффициента $R_s(t)$ по секторам РДЦ Санкт-Петербурга

Исходные графические материалы, используемые для формирования $R_s(t)$, в настоящей главе не раскрываются, поскольку могут содержать сведения о фактической конфигурации ограничений ВП, датах их введения и реальной воздушной обстановке. В расчётной апробации используются обезличенные численные профили доступности воздушного пространства, достаточные для проверки реакции нечёткой модели.

После ввода всех необходимых параметров, для каждого временного окна выполнялась фаззификация входных переменных, определялись степени активации продукционных правил, выполнялась агрегация выходных функций принадлежности и дефаззификация методом центра тяжести. В результате формировалось чёткое значение $K_{кор,s}(t)$, используемое для расчёта $\mu_s(t)$.

В модели реализованы четыре выходных класса коэффициента коррекции НПС: «максимальная», «сниженная», «уменьшенная» и «закрытие». Эти классы используются не только для визуализации результата, но и для последующего сопоставления результатов модели с экспертной классификацией состояния

сектора. На рисунке 4.3 показан общий вид программного модуля нечёткой модели динамической коррекции НПС сектора ОВД (Приложение Б) [118].

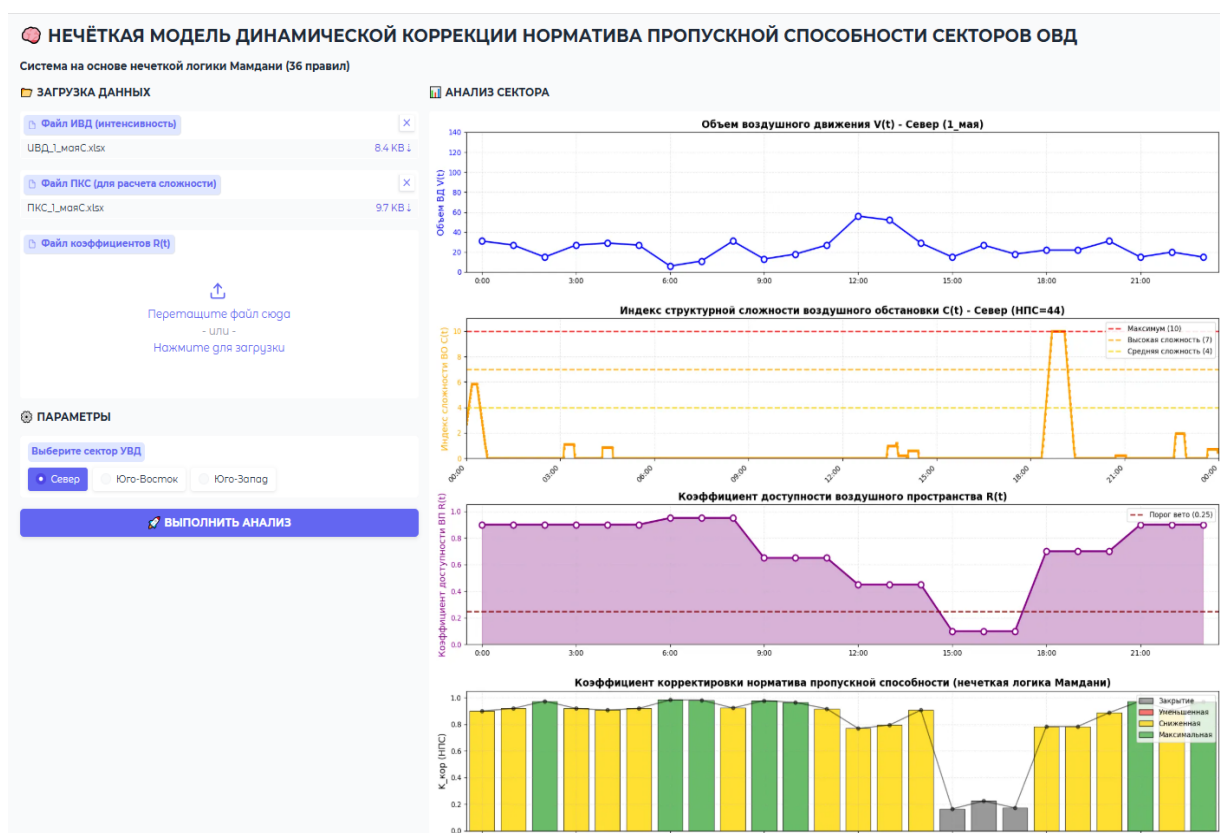


Рисунок 4.3 – Общий вид программного модуля нечёткой модели динамической коррекции НПС секторов ОВД

Для демонстрации результатов выбраны два расчётных примера, показывающие различный характер реакции модели. Первый пример, представленный на рисунке 4.4, отражает ситуацию, при которой снижение коэффициента коррекции обусловлено преимущественно изменением доступности воздушного пространства и локальным ростом структурной сложности воздушной обстановки. На графиках показаны временные профили $V_s(t)$, $C_s(t)$, $R_s(t)$, а также соответствующее изменение выходного коэффициента $K_{кор,s}(t)$.

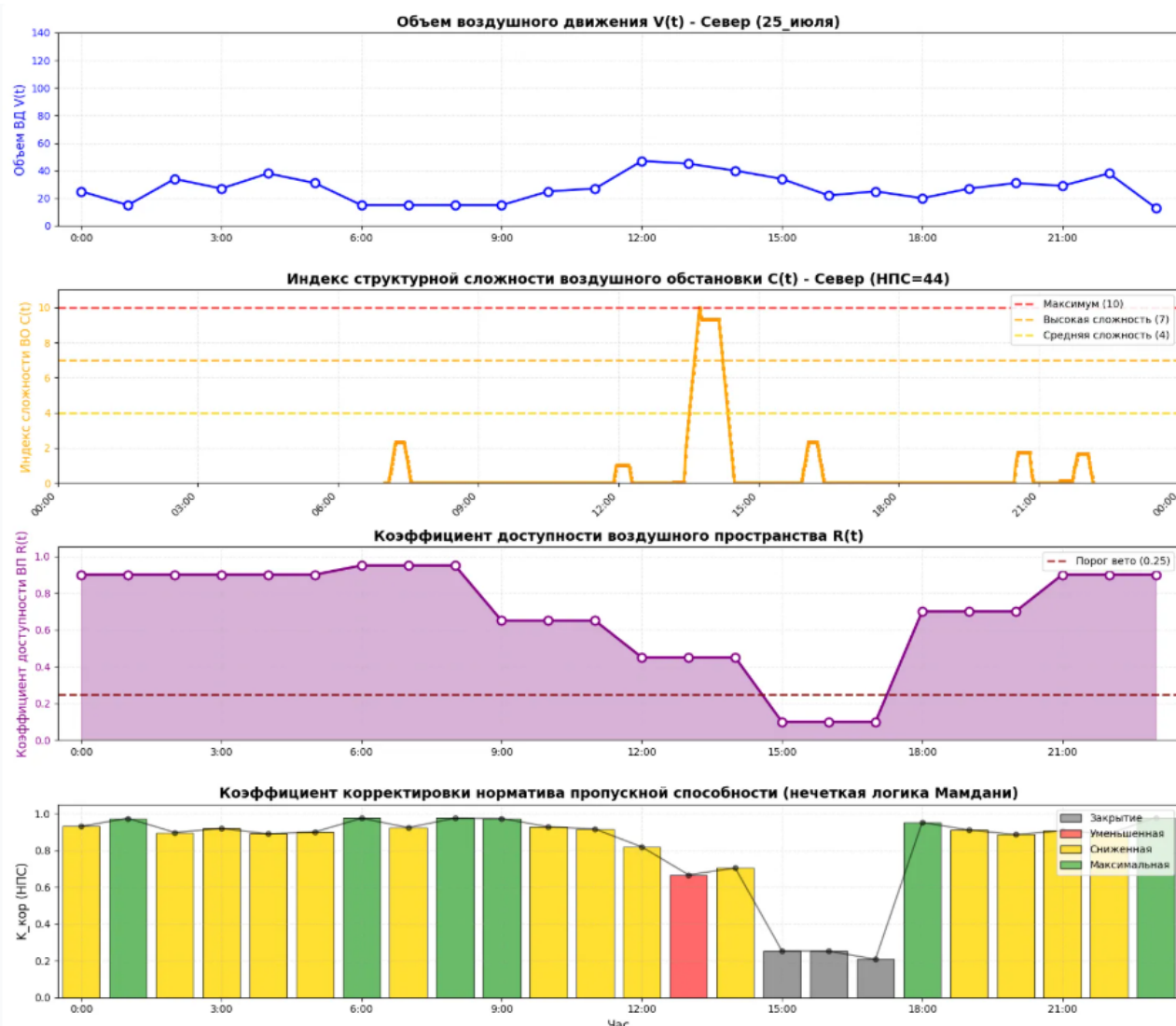


Рисунок 4.4 – Пример расчёта временных профилей $V_s(t)$, $C_s(t)$, $R_s(t)$ и $K_{кор,s}(t)$ для сектора «Север»

Как видно из рисунка 4.3, при сохранении высокого значения коэффициента доступности ВП и низкой или умеренной структурной сложности ВО коэффициент коррекции находится в области, близкой к сохранению НПС. При снижении $R_s(t)$ до критических значений программный модуль формирует резкое уменьшение $K_{кор,s}(t)$. Такая реакция соответствует заложенной в базу правил консервативной логике, направленной на предотвращение завышения допустимой загрузки сектора при существенном сокращении доступного объёма ВП.

Второй расчётный пример приведён на рисунке 4.5. Он показывает работу модели при более высоком уровне относительного объёма воздушного движения, когда значение $K_{кор,s}(t)$ формируется совместным влиянием $V_s(t)$, $C_s(t)$ и $R_s(t)$.

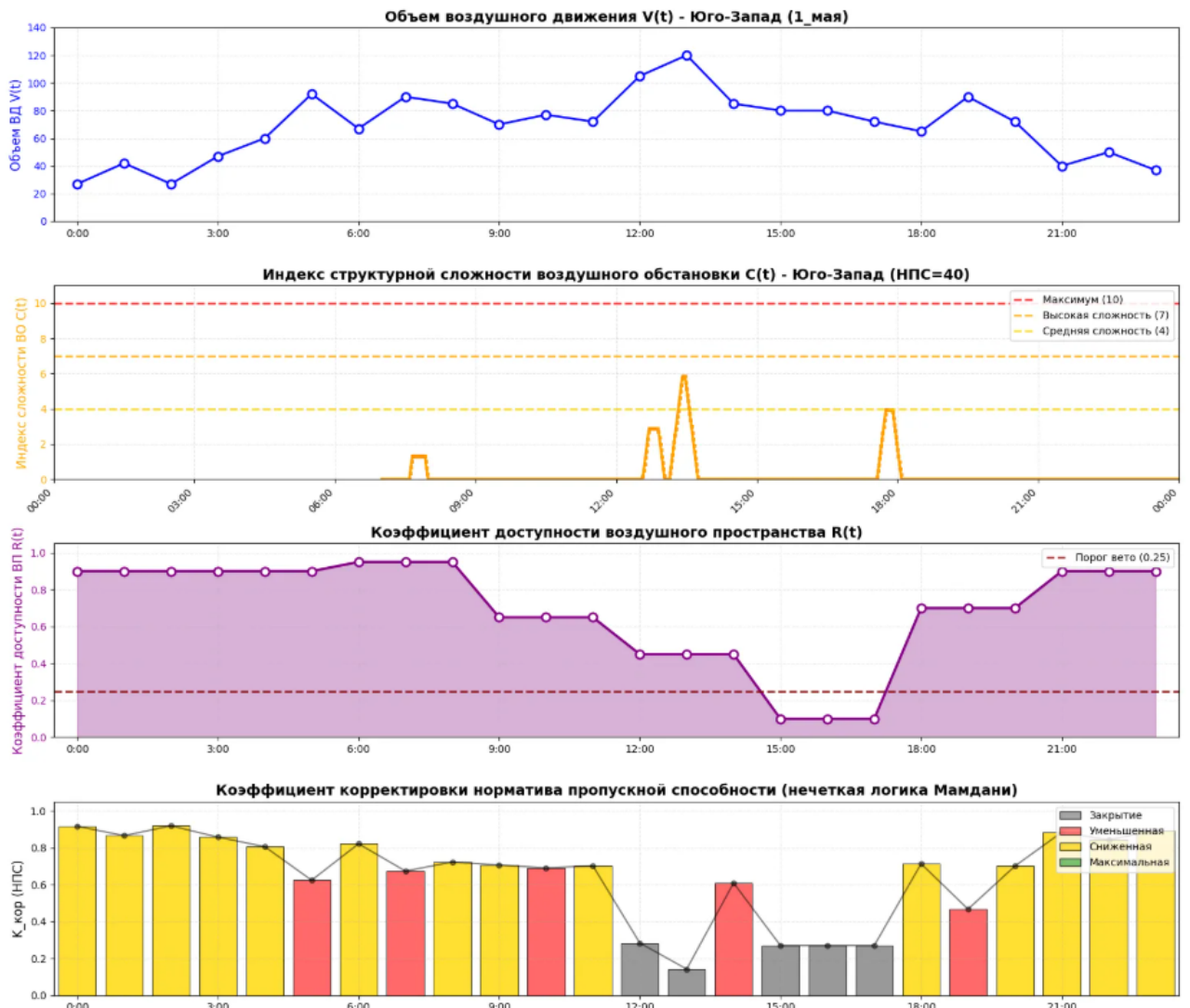


Рисунок 4.5 – Пример расчёта коэффициента коррекции НПС при изменении интенсивности ВД и структурной сложности ВО для сектора «Юго-Запад»

Сравнение рисунков 4.4 и 4.5 показывает, что разработанный модуль формирует коэффициент коррекции НПС не как функцию одного показателя загрузки, а как результат совместной оценки трёх факторов. При сохранении высокого значения $R_s(t)$ и низкой структурной сложности ВО $C_s(t)$ коэффициент $K_{кор,s}(t)$ находится в области, близкой к нормативному режиму. При возникновении локальных всплесков сложности или росте относительного объёма ВД значение коэффициента снижается, что соответствует переходу сектора в режим повышенной операционной нагрузки сектора ОВД.

Наиболее выраженная реакция наблюдается при существенном снижении доступности ВП. В интервалах, где $R_s(t)$ опускается ниже критического уровня

$R_{\min} = 0,25$, программный модуль формирует консервативную оценку коэффициента коррекции НПС. Данный результат подтверждает, что введение коэффициента доступности ВП позволяет предотвратить завышение допустимой загрузки сектора в условиях сокращения рабочего объёма ВП.

4.2. Экспертная оценка результатов нечёткой модели

После расчётной апробации модели проведена экспертная оценка её результатов. Основная задача данного этапа состояла в проверке того, насколько выходные значения нечёткой модели соответствуют профессиональному восприятию допустимого режима работы секторов ОВД. В отличие от прямой оценки динамической пропускной способности в ВС/ч, экспертам предлагалась категориальная классификация состояния сектора. Такой подход является более устойчивым, поскольку в практической деятельности диспетчерский персонал чаще оценивает не точную математическую величину пропускной способности, а допустимый режим работы сектора с учётом текущей ВО.

В экспертной оценке использовались девять обезличенных расчётных сценариев, сформированных по трём секторам и трём режимам изменения входных параметров. Каждый сценарий включал 24 временных окна. В экспертной оценке приняли участие 30 специалистов, имеющих опыт непосредственного ОВД (Таблица 4.3). Экспертам предъявлялись временные профили $V_s(t)$, $C_s(t)$ и $R_s(t)$, а исходные карты ограничений, реальные даты введения ограничений и иные сведения, позволяющие восстановить фактическую ВО, не предъявлялись.

Общий объём индивидуальных экспертных суждений составил: $9 \cdot 24 \cdot 30 = 6480$ классификационных оценок. Такая выборка является достаточной для предварительной проверки согласованности модели с экспертным восприятием состояния сектора и для постановки задачи последующей параметрической адаптации.

Таблица 4.3 – Структура обезличенной экспертной выборки

Сценарий	Сектор ОВД	Число временных окон	Предъявляемые параметры	Тип экспертного ответа
S1	Север	24	$V_s(t), C_s(t), R_s(t)$	класс режима
S2	Север	24	$V_s(t), C_s(t), R_s(t)$	класс режима
S3	Север	24	$V_s(t), C_s(t), R_s(t)$	класс режима
S4	Юго-Восток	24	$V_s(t), C_s(t), R_s(t)$	класс режима
S5	Юго-Восток	24	$V_s(t), C_s(t), R_s(t)$	класс режима
S6	Юго-Восток	24	$V_s(t), C_s(t), R_s(t)$	класс режима
S7	Юго-Запад	24	$V_s(t), C_s(t), R_s(t)$	класс режима
S8	Юго-Запад	24	$V_s(t), C_s(t), R_s(t)$	класс режима
S9	Юго-Запад	24	$V_s(t), C_s(t), R_s(t)$	класс режима
Итого	3 сектора	216	три входных профиля	категориальная оценка

Данные таблицы 4.3 показывают, что экспертам предъявлялись только численные временные профили входных переменных, без раскрытия исходных материалов, содержащих сведения о фактической воздушной обстановке. Экспертам предлагалось отнести каждое временное окно к одному из четырёх классов допустимого режима работы сектора ОВД. Указанные классы совпадают с выходными термами нечёткой модели, что обеспечивает возможность прямого сопоставления экспертной классификации и результата, полученного с помощью программного модуля [118].

Использование рангов классов позволяет дополнительно анализировать не только факт совпадения или несовпадения модели и экспертной оценки, но и величину расхождения между соседними состояниями. Это особенно важно для переходных областей функций принадлежности, где различие между классами может иметь не дискретный, а плавный характер. Для обеспечения сопоставимости экспертных оценок с результатом нечёткой модели использовалась шкала выходных классов, представленная в таблице 4.4.

Таблица 4.4 – Интерпретация выходных классов коэффициента коррекции

Класс	Операционный смысл	Ориентировочный диапазон $K_{кор,s}(t)$	Ранг
Максимальная	сохранение нормативного режима работы сектора	0,85–1,00	4
Сниженная	умеренное снижение допустимой загрузки	0,70–0,85	3
Уменьшенная	значительное снижение допустимой загрузки	0,25–0,70	2
Закрытие	критическое ограничение доступного объёма ВП	0,00–0,25	1

Приведённая в таблице 4.4 шкала позволяет перейти от численного значения $K_{кор,s}(t)$ к категориальной оценке режима работы секторов ОВД.

Пусть в экспертной оценке участвуют M специалистов. Индивидуальная оценка m -го эксперта для временного окна t обозначается $E_m(t)$. Согласованная экспертная оценка определяется по правилу большинства, что соответствует распространённой процедуре агрегирования категориальных экспертных суждений при отсутствии единственного объективно наблюдаемого эталона [152]:

$$E^*(t) = \text{mode}\{E_1(t), E_2(t), \dots, E_M(t)\}, \quad (4.2)$$

где $E^*(t)$ – согласованная экспертная классификация состояния сектора в момент времени t ; $E_M(t)$ – индивидуальная оценка m -го эксперта; M – число экспертов; mode – наиболее часто встречающийся класс среди экспертных ответов.

Для характеристики устойчивости экспертного решения используется показатель согласованности:

$$A(t) = \frac{\max_k n_k(t)}{M}, \quad (4.3)$$

где $A(t)$ – доля экспертов, поддержавших наиболее часто выбранный класс; $n_k(t)$ – число экспертов, выбравших класс k ; M – общее число экспертов. Чем ближе $A(t)$ к единице, тем более устойчивой является групповая экспертная оценка для соответствующего временного окна.

Результат модели для каждого временного окна переводится в категориальную форму. Обозначим через $\hat{E}(t)$ класс состояния сектора, сформированный нечёткой моделью на основе рассчитанного значения $K_{кор,s}(t)$.

Для оценки согласованности модели и экспертной классификации используется доля совпадений:

$$P_{\text{совп}} = \frac{1}{n} \sum_{t=1}^n I(\hat{E}(t) = E^*(t)), \quad (4.4)$$

где $P_{\text{совп}}$ – доля совпадений результата модели с согласованной экспертной оценкой; n – число временных окон; $\hat{E}(t)$ – класс состояния сектора, сформированный нечёткой моделью; $I(\cdot)$ – индикатор совпадения, принимающий значение 1 при совпадении классов и 0 при их несовпадении.

Результаты сопоставления выходных классов модели с согласованной экспертной оценкой по каждому сценарию приведены в таблице 4.5.

Таблица 4.5 – Результаты сопоставления модели и экспертной оценки по сценариям

Сценарий	Сектор	Временных окон	Совпадений	Доля совпадений, %	Средняя согласованность A	Интерпретация
S1	Север	24	23	96	0,90	высокое совпадение
S2	Север	24	23	96	0,90	высокое совпадение
S3	Север	24	24	100,0	100	полное совпадение
S4	Юго-Восток	24	22	91,7	0,88	высокое совпадение
S5	Юго-Восток	24	22	91,7	0,88	высокое совпадение
S6	Юго-Восток	24	23	96	0,90	высокое совпадение
S7	Юго-Запад	24	21	87,5	0,84	достаточное совпадение
S8	Юго-Запад	24	24	100,0	100	полное совпадение
S9	Юго-Запад	24	22	91,7	0,88	высокое совпадение
Итого	3 сектора	216	204	94,4	0,89	высокая согласованность

Из таблицы 4.5 следует, что интегральная доля совпадений результата модели с согласованной экспертной оценкой составила 94,4 %, что свидетельствует о высокой согласованности результата нечёткой модели с коллективной

экспертной оценкой. Наименьшая доля совпадений наблюдается для сценариев, в которых значения входных параметров находятся в переходных областях между соседними классами. Это является ожидаемым результатом для нечёткой модели, поскольку такие области характеризуются частичной активацией нескольких правил.

Для более детального анализа используется матрица сопоставления классов. В строках указывается согласованная экспертная оценка $E^*(t)$, в столбцах – класс $\hat{E}(t)$, сформированный нечёткой моделью. Диагональные элементы матрицы соответствуют полным совпадениям, а внедиагональные элементы отражают расхождения. Для детального анализа характера расхождений между моделью и экспертной оценкой построена матрица сопоставления классов, представленная в таблице 4.6.

Таблица 4.6 – Матрица сопоставления экспертной оценки и результата модели

$E^*(t) / \hat{E}(t)$	Максимальная	Сниженная	Уменьшенная	Закрытие	Итого
Максимальная	36	2	0	0	38
Сниженная	2	124	3	0	129
Уменьшенная	0	4	17	0	21
Закрытие	0	0	1	27	28
Итого	38	130	21	27	216

Анализ матрицы (Таблица 4.6) показывает, что основная часть расхождений приходится на соседние классы: «максимальная» – «сниженная» и «сниженная» – «уменьшенная». Грубые противоречия, при которых модель относилась бы критически ограниченное состояние к максимальному режиму или наоборот, отсутствуют. Это подтверждает согласованность консервативной логики базы правил с профессиональным восприятием состояния сектора.

Обобщённые показатели согласованности модели и экспертной классификации приведены в таблице 4.7.

Таблица 4.7 – Интегральные показатели согласованности модели и экспертной оценки

Показатель	Значение	Интерпретация
Доля совпадений $P_{\text{совп}}$	0,944	высокое совпадение модели с экспертной классификацией
Средняя согласованность экспертов A	0,89	устойчивая групповая экспертная оценка
Среднее отклонение рангов D_r	0,06	расхождения преимущественно между соседними классами
Грубые противоречия классов	0	критические расхождения отсутствуют

Данные таблицы 4.7 подтверждают отсутствие грубых противоречий между результатами модели и согласованной экспертной оценкой.

4.3. Алгоритм параметрической адаптации функций принадлежности по результатам экспертной классификации сценариев

В настоящем исследовании необходимо различать первичный параметрический синтез функций принадлежности и последующую параметрическую адаптацию модели. Первичный синтез выполняется на этапе построения нечёткой модели и основан на обработке экспертных оценок реперных точек лингвистических термов. Его результатом является исходный набор параметров θ_0 . Параметрическая адаптация, рассматриваемая в данном разделе, выполняется после расчётной апробации модели и экспертной классификации обезличенных сценариев. Её цель состоит не в построении функций принадлежности заново, а в уточнении исходных параметров θ_0 таким образом, чтобы результаты модели были максимально согласованы с экспертной оценкой состояния сектора [88, 151].

Пусть θ обозначает вектор параметров функций принадлежности входных и выходной лингвистических переменных. В этот вектор могут входить координаты опорных точек трапецевидных функций, центры и ширины гауссовых функций, параметры S- и Z-образных функций, а также границы выходных классов

коэффициента коррекции. Тогда задача параметрической адаптации может быть записана в общем виде:

$$\theta^* = \arg \min_{\theta} J(\theta), \quad (4.5)$$

где θ^* – адаптированный набор параметров функций принадлежности; θ – текущий набор параметров; $J(\theta)$ – функция несоответствия результата модели согласованной экспертной классификации.

В отличие от нейросетевой модели, в которой параметры могут изменяться без явной смысловой интерпретации, адаптация нечёткой модели должна выполняться с сохранением физического и операционного смысла каждого термина. Это требование особенно важно для задач ОВД, где результат алгоритма должен быть объяснимым для диспетчерского персонала ОВД и РП [108-111].

Поскольку экспертная оценка задаётся категориально, функция несоответствия может быть определена через ошибку классификации с регуляризацией отклонения параметров от исходной экспертно заданной модели [153, 154]:

$$J(\theta) = \frac{1}{n} \sum_{t=1}^n I(\hat{E}_{\theta}(t) \neq E^*(t)) + \lambda \cdot \|\theta - \theta_0\|^2, \quad (4.6)$$

где $J(\theta)$ – функция несоответствия результата модели экспертной классификации; $\hat{E}_{\theta}(t)$ – класс состояния сектора, полученный моделью при параметрах θ ; $E^*(t)$ – согласованная экспертная оценка; n – число временных окон; θ_0 – исходный набор параметров, полученный на этапе параметрического синтеза; λ – коэффициент регуляризации, ограничивающий чрезмерное отклонение адаптированных параметров от исходной интерпретируемой модели.

Регулирующее слагаемое необходимо для предотвращения ситуации, при которой формально улучшается совпадение с экспертной выборкой, но нарушается смысловая структура функций принадлежности. В задачах ОВД недопустимы параметры, которые обеспечивают высокую статистическую точность ценой утраты интерпретируемости. Перечень параметров, которые могут уточняться в процессе параметрической адаптации, приведён в таблице 4.8.

Таблица 4.8 – Параметры, уточняемые при адаптации нечёткой модели

Переменная	Адаптируемые параметры	Источник экспертной информации	Ограничение интерпретируемости
$V_s(t)$	границы термов «низкий», «оптимальный», «высокий», «перенасыщенный»	оценка допустимого режима при различной загрузке	сохранение монотонной логики нагрузки
$C_s(t)$	границы перехода от простой к сложной ВО	оценка влияния ПКС и вертикальной динамики	сохранение шкалы 0–10
$R_s(t)$	границы термов доступности ВП и критический порог	оценка реакции на ограничения ВП	консервативность при малом $R_s(t)$
$K_{кор,s}(t)$	границы выходных классов	согласованная экспертная классификация режима	сохранение смысла классов

Как следует из таблицы 4.8, адаптация должна затрагивать только параметры функций принадлежности, не изменяя смысловую структуру входных переменных и базы продукционных правил.

Процедура адаптации может быть выполнена как отдельный модуль, связанный с базовой нечёткой моделью через файл параметров функций принадлежности. Такая архитектура позволяет сохранить неизменной основу расчёта $K_{кор}(t)$, а адаптация выполняется в режиме периодического обновления параметров по результатам экспертной оценки. Последовательность программной реализации адаптационного алгоритма представлена в таблице 4.9.

Таблица 4.9 показывает, что процедура адаптации может быть реализована как отдельный расчётный контур, взаимодействующий с основной нечёткой моделью через файл параметров функций принадлежности.

В качестве методов поиска θ^* могут применяться как переборные и координатные процедуры, так и градиентные или эволюционные алгоритмы. Однако в условиях ограниченного объёма экспертной выборки предпочтение следует отдавать устойчивым процедурам с малым числом свободных параметров и явно заданными ограничениями.

Таблица 4.9 – Алгоритм параметрической адаптации функций принадлежности

Этап	Содержание этапа	Результат
1	Загрузка исходных параметров θ_0 и базы правил	исходная интерпретируемая модель
2	Загрузка экспертно размеченных сценариев $V_s(t), C_s(t), R_s(t), E^*(t)$	обучающая выборка
3	Расчёт выходных классов $\hat{E}_\theta(t)$ для текущего θ	модельная классификация
4	Вычисление функции несоответствия $J(\theta)$	значение критерия адаптации
5	Изменение параметров θ с учётом ограничений интерпретируемости	пробный набор параметров
6	Проверка порядка термов, диапазонов и критических порогов	отбраковка недопустимых решений
7	Выбор θ^* , обеспечивающего минимальное $J(\theta)$	адаптированная модель
8	Сохранение адаптированных параметров и повторная проверка на контрольной выборке	готовый файл параметров

Оценка результатов адаптации должна выполняться не только по росту доли совпадений с экспертной классификацией, но и по сохранению структуры модели. В качестве контрольных показателей могут использоваться: доля совпадений $P_{\text{совп}}$ до и после адаптации, среднее отклонение рангов D_r , число грубых противоречий классов, а также величина отклонения $\|\theta - \theta_0\|$. Критерии оценки результатов параметрической адаптации приведены в таблице 4.10.

Таблица 4.10 – Критерии оценки результатов параметрической адаптации

Критерий	Смысл	Желательная динамика после адаптации
$P_{\text{совп}}$	доля совпадений модели с экспертной классификацией	увеличение
D_r	среднее отклонение рангов классов	уменьшение
Число грубых противоречий	количество расхождений между крайними классами	отсутствие или уменьшение
$\ \theta - \theta_0\ $	отклонение параметров от исходной модели	ограниченное значение
Интерпретируемость термов	сохранение операционного смысла функций принадлежности	обязательное сохранение

Представленные критерии (Таблица 4.10) позволяют оценивать адаптацию не только по росту совпадений с экспертной классификацией, но и по сохранению интерпретируемости модели.

Таким образом, параметрическая адаптация не отменяет экспертный синтез функций принадлежности, а дополняет его вторым уровнем настройки, основанным на результатах работы модели в расчётных сценариях. Такой подход обеспечивает сочетание эмпирической обоснованности, адаптивности и объяснимости нечёткого вывода.

4.4. Сравнительный анализ с нормативной Методикой

Сравнение разработанной нечёткой модели с нормативным подходом целесообразно выполнять не в логике их противопоставления, а в логике функционального дополнения. Нормативная Методика обеспечивает получение базового значения пропускной способности сектора ОВД при заданных условиях расчёта и является необходимым элементом регламентированного планирования [2, 15]. Разработанная модель предназначена для оперативной коррекции этого значения с учётом текущих или прогнозируемых условий ВО [118].

Следовательно, предлагаемая модель не заменяет нормативный расчёт, а формирует динамический корректирующий контур над статическим НПС (формула 1.4) [15, 31].

В выражении 1.4 $\mu_{\text{норм},s}$ выступает верхним плановым ориентиром, а $K_{\text{кор},s}(t)$ – инструментом учёта факторов, которые в нормативной оценке НПС не представлены как непрерывные временные параметры.

Нормативный подход ориентирован на установление НПС сектора, применимой для планирования и регламентирования. Он обеспечивает сопоставимость результатов и нормативную определённость. Однако при оперативном использовании сектора ОВД его фактическая загрузка и допустимый режим работы могут изменяться под влиянием текущей структуры ВО, ограничений ВП и иных факторов.

Разработанная модель решает иную задачу: она уточняет нормативную величину в конкретный момент времени. Поэтому корректное сравнение должно учитывать различие назначения двух подходов. Нормативная Методика отвечает на вопрос о базовой пропускной способности сектора, а нечёткая модель – о том, какую долю этого норматива целесообразно использовать при текущем состоянии среды.

В таблице 4.11 приводится сравнение существующего нормативного подхода определения пропускной способности секторов ОВД, согласно Методике и разработанной нечёткой модели корректировки НПС секторов ОВД по ключевым критериям [15, 31, 118].

Таблица 4.11 – Сравнение нормативного подхода и динамической нечёткой коррекции

Критерий	Нормативный подход	Предлагаемая нечёткая модель
Назначение	установление базового норматива пропускной способности	оперативная коррекция базового норматива
Характер оценки	статическая величина	временной профиль $\mu_s(t)$
Учёт интенсивности ВД	через нормативную структуру расчёта	явно через $V_s(t)$
Учёт структурной сложности	ограниченно или косвенно	явно через $C_s(t)$
Учёт доступности ВП	не представлен как непрерывный коэффициент	явно через $R_s(t)$
Результат	$\mu_{\text{норм},s}$	$\mu_s(t) = \mu_{\text{норм},s} \cdot K_{\text{кор},s}(t)$,
Интерпретируемость	нормативная и регламентная	через базу продукционных правил Мамдани
Практическая роль	базовый расчёт и планирование	корректирующий контур СППР

Из таблицы 4.11 следует, что разработанная модель расширяет возможности нормативного подхода за счёт явного учёта динамических факторов. При этом сохраняется связь с нормативной базой, поскольку исходное значение $\mu_{\text{норм},s}$ остаётся основой расчёта.

Для качественного сопоставления рассмотрены четыре типовых сценария, отражающие различные эксплуатационные условия. Они позволяют показать, как

нормативная методика и динамическая нечёткая коррекция реагируют на изменение входного вектора состояния сектора. Реакция нормативного и динамического подходов в типовых эксплуатационных сценариях сопоставлена в таблице 4.12.

Таблица 4.12 – Сопоставление реакции нормативного и динамического подходов в типовых сценариях

Сценарий	Входные условия	Нормативный подход	Динамическая коррекция	Вывод
Низкая нагрузка и низкая сложность	малое $V_s(t)$, низкое $C_s(t)$, высокое $R_s(t)$	норматив сохраняется	$K_{кор,s}(t)$ близок к 1	метод не создаёт избыточных ограничений
Высокая структурная сложность при умеренной нагрузке	умеренное $V_s(t)$, высокое $C_s(t)$, высокое $R_s(t)$	изменение сложности учитывается ограниченно	коэффициент коррекции снижается	модель учитывает структурные риски
Существенное сокращение доступного объёма ВП	низкое $R_s(t)$	норматив сам по себе не изменяется	формируется резкое снижение $K_{кор,s}(t)$	реализуется консервативная реакция на ограничения
Высокая относительная нагрузка	высокое $V_s(t)$, среднее или высокое $C_s(t)$	допустимость определяется через достижение норматива	коэффициент снижается плавно	предупреждается переход к перегрузке

Анализ сценариев (Таблица 4.12) показывает, что основное преимущество динамической модели заключается не в изменении самого нормативного значения, а в возможности оперативно ограничивать его использование в неблагоприятных условиях. Это особенно важно при высокой структурной сложности ВО и при сокращении доступного объёма ВП.

Результаты сравнительного анализа позволяют выделить три ключевых преимущества предлагаемого подхода. Во-первых, модель обеспечивает явный учёт структурной сложности ВО, что позволяет различать ситуации с одинаковым количеством ВС, но различной конфликтностью и различной когнитивной нагрузкой на диспетчера УВД. Во-вторых, коэффициент доступности ВП позволяет количественно учитывать ограничения различной природы, включая

временные зоны ограничения использования ВП, неблагоприятные метеоусловия и иные факторы сокращения доступного объёма ВП сектора. В-третьих, нечёткий вывод обеспечивает плавный переход между режимами, что соответствует непрерывному характеру изменения ВО.

Таким образом, динамический корректирующий контур обеспечивает более гибкое использование НПС без отказа от её регламентной роли. Практическая ценность подхода состоит в том, что статический норматив сохраняется как базовый уровень [15], а нечёткая модель формирует оперативную оценку степени его допустимого использования [31, 118, 123].

4.5. Рекомендации по практическому внедрению

Практическое внедрение разработанной модели целесообразно осуществлять поэтапно, с обязательным сохранением роли диспетчерского персонала и РП в принятии окончательных решений. Нечёткая модель должна рассматриваться как элемент системы поддержки принятия решений, а не как автономный механизм управления воздушным движением. Информационный контур применения модели в составе СППР АС УВД представлен на рисунке 4.6.

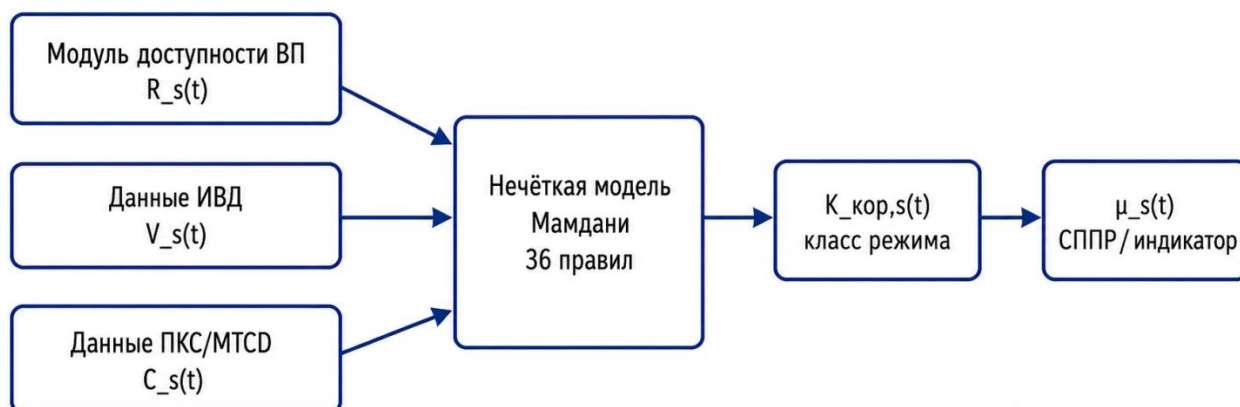


Рисунок 4.6 – Информационный контур применения модели динамической коррекции в составе СППР ОВД

В составе СППР модель должна выполнять функцию аналитического модуля, который принимает подготовленные временные профили входных параметров и формирует расчётный коэффициент коррекции НПС. Результат работы модуля может использоваться старшим диспетчером или РП для оценки допустимого режима работы сектора ОВД, планирования перераспределения потоков ВС и определения необходимости ограничительных мер.

Модель не должна автоматически заменять профессиональное решение диспетчерского персонала. Её назначение состоит в том, чтобы обеспечить единообразную, воспроизводимую и объяснимую оценку текущих условий, уменьшить зависимость результата от субъективной интерпретации отдельных факторов и повысить своевременность выявления неблагоприятных сочетаний нагрузки, сложности и ограничений.

Основные информационные потоки, необходимые для функционирования программного модуля определения динамической коррекции НПС секторов ОВД, представлены в таблице 4.13.

Таблица 4.13 – Информационные потоки программного модуля

Параметр	Источник данных	Предварительная обработка	Результат для модели
$V_s(t)$	данные интенсивности ВД	расчёт относительной загрузки от НПС	временной профиль объёма ВД
$C_s(t)$	данные ПКС/MTCD	агрегирование конфликтных взаимодействий	временной профиль сложности
$R_s(t)$	модуль доступности ВП	распознавание ограничений и расчёт доли доступного объёма	временной профиль доступности
$K_{кор,s}(t)$	нечёткая модель Мамдани	фаззификация, вывод, дефаззификация	коэффициент коррекции

Для функционирования модели необходимы три информационных потока: данные интенсивности ВД для расчёта $V_s(t)$, данные ПКС/MTCD для формирования $C_s(t)$, а также данные внешнего модуля оценки доступности ВП для

расчёта $R_s(t)$. Каждый поток может формироваться отдельной подсистемой, что позволяет сохранять модульность архитектуры.

Как видно из таблицы 4.13, каждый входной параметр модели формируется самостоятельным информационным контуром и передаётся в нечёткую модель в виде подготовленного временного профиля.

Особое внимание должно уделяться качеству и актуальности данных. При некорректном расчёте хотя бы одного входного профиля итоговый коэффициент коррекции НПС может потерять операционный смысл. Поэтому перед внедрением необходимо определить регламент обновления данных, допустимую задержку расчёта и порядок проверки входных файлов.

Выходными результатами программного модуля являются коэффициент $K_{кор,s}(t)$, динамическая корректировка пропускной способности $\mu_s(t)$, а также категориальный класс состояния сектора. Для практического применения целесообразно отображать результат не только в численной форме, но и в виде визуального индикатора, соответствующего классам «максимальная», «сниженная», «уменьшенная» и «закрытие».

Интерпретация результата должна сопровождаться указанием факторов, оказавших основное влияние на снижение коэффициента коррекции. Например, снижение может быть обусловлено высокой относительной загрузкой, ростом структурной сложности ВО, падением доступности ВП или их совместным действием. Такая объяснимость является важным условием доверия пользователя к алгоритмической рекомендации.

Внедрение модели должно учитывать ряд ограничений. Во-первых, модель не предназначена для автоматического закрытия сектора ОВД или автоматического ограничения входа ВС без участия ответственного должностного лица. Во-вторых, параметры функций принадлежности должны быть верифицированы и адаптированы применительно к конкретному району ОВД. В-третьих, исходные материалы, используемые для расчёта $R_s(t)$, могут иметь ограниченный режим распространения, что требует регламентированного порядка их обработки и хранения.

Дополнительно необходимо предусмотреть контрольные режимы работы: аналитический режим на архивных данных, режим имитационного проигрывания сценариев, режим информационного сопровождения и только после этого – опытную эксплуатацию в составе СППР. Такой поэтапный подход снижает риск некорректной интерпретации результатов и обеспечивает накопление статистики согласованности модели с экспертными решениями.

Рекомендуемая последовательность внедрения модели в практику РДЦ приведена в таблице 4.14.

Таблица 4.14 – Рекомендуемые этапы внедрения модели в практику РДЦ

Этап	Содержание	Ожидаемый результат
1. Аналитическая проверка	расчёт на архивных и имитационных данных	подтверждение корректности алгоритма
2. Экспертная оценка	классификация обезличенных сценариев специалистами ОВД	формирование эталонной экспертной выборки
3. Параметрическая адаптация	уточнение функций принадлежности по экспертным данным	повышение согласованности модели
4. Опытная эксплуатация	использование в информационном режиме без управляющего воздействия	накопление статистики и обратной связи
5. Включение в СППР	отображение $K_{кор,s}(t)$, $\mu_s(t)$ и класса состояния сектора	поддержка решений старшего диспетчера и РП

Реализация указанных этапов (Таблица 4.14) позволит постепенно перейти от исследовательского прототипа к прикладному инструменту поддержки принятия решений. При этом сохраняется ключевой принцип: модель должна повышать информированность диспетчерского персонала, но не подменять установленный порядок принятия решений в системе ОВД.

Выводы по главе 4

1. Выполнена расчётная апробация нечёткой модели динамической коррекции НПС на наборе обезличенных сценариев для секторов РДЦ Санкт-

Петербург. Показано, что модель обеспечивает ожидаемую реакцию на изменение относительного объёма ВД, структурной сложности ВО и доступности ВП.

2. Проведена экспертная оценка результатов модели на основе категориальной классификации состояния сектора ОВД. Предложенный подход позволяет сопоставлять модель не с недоступным фактическим эталоном динамической пропускной способности, а с согласованной экспертной интерпретацией допустимого режима работы сектора.

3. Полученные результаты экспертной классификации показали высокую согласованность выходных классов модели с экспертным восприятием состояния сектора. Основная часть расхождений относится к соседним классам, а грубые противоречия между крайними состояниями отсутствуют.

4. Выполнена параметрическая адаптация функций принадлежности по результатам экспертной классификации сценариев. Показано, что адаптация должна уточнять исходные параметры θ_0 , сохраняя структуру базы продукционных правил и операционную интерпретируемость нечёткой модели.

5. Выполнен сравнительный анализ нормативного подхода и разработанной модели. Установлено, что предлагаемая модель не заменяет нормативную методику, а дополняет её динамическим корректирующим контуром, позволяющим учитывать факторы, не представленные в нормативе как непрерывные временные параметры.

6. Разработаны рекомендации по практическому внедрению модели в состав СППР ОВД. Обоснована необходимость поэтапного внедрения: от аналитической проверки и экспертной оценки до опытной эксплуатации и использования в информационном контуре поддержки решений старшего диспетчера или руководителя полётов.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В результате выполненной диссертационной работы достигнута цель исследования, направленная на повышение эффективности функционирования системы организации воздушного движения в рамках положений Глобального аэронавигационного плана ИКАО, и решена актуальная научная задача разработки нового научно обоснованного метода динамической корректировки НПС секторов ОВД на основе нечёткой модели. Получены следующие новые научные результаты:

1. Проведён анализ существующих отечественных и зарубежных подходов к нормированию пропускной способности секторов ОВД. Показано, что действующие нормативные методы обеспечивают определение базового значения пропускной способности, однако не позволяют в явном виде учитывать краткосрочное изменение структуры ВО, потенциальную конфликтность потоков ВС и фактическое сокращение доступного объёма ВП при введении ограничений.

2. Обоснована необходимость перехода от статической оценки НПС к динамической корректировке, в которой нормативное значение $\mu_{\text{норм},s}$ рассматривается как базовый ориентир, а текущее состояние сектора учитывается посредством коэффициента коррекции $K_{\text{кор},s}(t)$. Динамическая корректировка пропускной способности сектора ОВД представлена в виде:

$$\mu_s(t) = \mu_{\text{норм},s} \cdot K_{\text{кор},s}(t).$$

Разработана структура вектора состояния сектора ОВД, включающего три входных параметра: относительный объём ВД $V_s(t)$, индекс структурной сложности ВО $C_s(t)$ и коэффициент доступности ВП $R_s(t)$. Указанные параметры отражают соответственно количественную загрузку сектора, характер взаимодействия ВС и долю доступного объёма ВП.

3. Разработан метод расчёта индекса структурной сложности ВО $C_s(t)$, основанный на учёте ПКС, геометрии взаимодействия траекторий ВС, их вертикальной динамики и длительности существования конфликтных связей.

Индекс приведён к шкале 0-10, что позволило использовать его в качестве входной переменной нечёткой модели.

4. Разработан метод расчёта коэффициента доступности ВП $R_s(t)$, основанный на сеточной дискретизации сектора ОВД и оценке доли доступного объёма ВП с учётом горизонтального и вертикального распространения ограничений. Показано, что при значениях $R_s(t) \leq 0,25$ сектор должен рассматриваться как существенно ограниченный по доступному объёму ВП, что требует консервативного снижения допустимой загрузки.

5. Разработана нечёткая модель динамической корректировки НПС секторов ОВД на основе алгоритма Мамдани. Модель содержит три входные лингвистические переменные $V_s(t)$, $C_s(t)$, $R_s(t)$, одну выходную переменную $K_{кор,s}(t)$ и базу из 36 продукционных правил. Новизна модели заключается в совместном учёте объёма ВД, структурной сложности ВО и доступности ВП в едином интерпретируемом механизме нечёткого вывода.

6. Выполнен параметрический синтез функций принадлежности входных и выходных переменных на основе экспертного опроса 30 специалистов ОВД. По результатам обработки экспертных оценок определены параметры термов, характеризующих оптимальную и высокую загрузку сектора, смешанную и высокую сложность ВО, частичные и критические ограничения доступности ВП. Полученные параметры использованы для построения исходной экспертно обоснованной нечёткой модели.

7. Разработана программная реализация нечёткой модели динамической корректировки НПС секторов ОВД. Программный комплекс обеспечивает загрузку временных профилей $V_s(t)$, $C_s(t)$, $R_s(t)$, выполнение фаззификации, нечёткого вывода по базе разработанных правил, дефаззификации и формирование выходного коэффициента $K_{кор,s}(t)$. Результаты расчёта отображаются в виде временных графиков, классов режима работы сектора и динамической корректировки НПС.

8. Выполнена расчётная апробация модели на обезличенных сценариях для секторов РДЦ Санкт-Петербург. Рассмотрены сценарии для секторов «Север»,

«Юго-Восток» и «Юго-Запад», включающие 216 расчётных временных состояний. Показано, что модель формирует ожидаемую реакцию: сохраняет нормативный режим при благоприятных условиях, снижает коэффициент коррекции при росте сложности или загрузки и резко ограничивает допустимую загрузку сектора ОВД при существенном снижении доступности ВП.

9. Проведена экспертная оценка результатов нечёткой модели на обезличенных расчётных сценариях. В экспертной оценке использована категориальная шкала режимов: «максимальная», «сниженная», «уменьшенная», «закрытие». Сопоставление результатов модели с согласованной экспертной классификацией показало высокую степень совпадения. Основные расхождения относятся к соседним классам, что соответствует переходным областям функций принадлежности и не противоречит логике нечёткого вывода.

10. Сформирована задача параметрической адаптации функций принадлежности по результатам экспертной классификации расчётных сценариев. Показано, что адаптация должна выполняться после первичного параметрического синтеза и состоять в уточнении параметров функций принадлежности при сохранении структуры модели и базы продукционных правил. Такая постановка обеспечивает повышение согласованности модели с экспертной оценкой без потери интерпретируемости.

11. Проведён сравнительный анализ разработанного метода с нормативной Методикой определения НПС. Показано, что предложенная модель не заменяет нормативную Методику, а дополняет её динамическим корректирующим контуром. Нормативная пропускная способность используется как базовое значение, а коэффициент $K_{кор,с}(t)$ позволяет учитывать текущую загрузку сектора ОВД, сложность ВО и ограничения доступности ВП.

12. Разработаны рекомендации по практическому внедрению метода в состав СППР. Показано, что программный модуль должен использоваться как информационно-аналитическое средство, не подменяющее диспетчера УВД или РП, а повышающее качество их информационной поддержки за счёт наглядного представления динамической оценки пропускной способности сектора ОВД.

Применение полученных в работе результатов позволяет:

1. Осуществлять динамическую корректировку НПС секторов ОВД с учётом текущего состояния ВО и доступности ВП.
2. Выявлять ситуации, в которых при умеренном количестве ВС фактическая сложность ОВД возрастает вследствие конфликтной структуры потоков ВС, их вертикальных манёвров или ограничений ВП.
3. Предотвращать завышение допустимой загрузки сектора ОВД при существенном сокращении доступного объёма ВП, в том числе при значениях $R_s(t) \leq 0,25$.
4. Использовать НПС не как неизменяемую величину, а как базовый параметр, подлежащий оперативной корректировке в зависимости от текущего состояния сектора ОВД.
5. Применять разработанный программный модуль в составе СППР для анализа сценариев загрузки сектора ОВД, оценки последствий ограничений ВП и информационной поддержки старшего диспетчера или РП.

Направления дальнейших исследований:

1. Интеграция программного модуля динамической корректировки с источниками данных автоматизированных систем ОВД, средствами среднесрочного обнаружения конфликтов и модулем расчёта доступности воздушного пространства.
2. Проведение опытной эксплуатации программного модуля в режиме информационной поддержки планирования загрузки секторов ОВД и анализа сценариев изменения ВО.
3. Разработка регламентов применения динамической корректировки пропускной способности в составе СППР с учётом требований безопасности полётов, человеко-ориентированного проектирования и сохранения ведущей роли диспетчера УВД при принятии решений.

Полученные результаты создают научно-методическую основу для дальнейшего развития средств динамической оценки пропускной способности секторов ОВД и могут быть использованы при совершенствовании СППР в РДЦ.

СПИСОК СОКРАЩЕНИЙ И УСЛОВНЫХ ОБОЗНАЧЕНИЙ

АНО – аэронавигационное обслуживание;

АНС – аэронавигационная система;

АС УВД – автоматизированная система управления воздушным движением;

ВД – воздушное движение;

ВО – воздушная обстановка;

ВП – воздушное пространство;

ВПП – взлётно-посадочная полоса;

ВС – воздушное судно;

ГА – гражданская авиация;

ДВО – динамическая воздушная обстановка;

ЕС ОрВД – Единая система организации воздушного движения;

ИВД – интенсивность воздушного движения;

ИВО – индикатор воздушной обстановки;

ИВП – использование воздушного пространства;

ИКАО – Международная организация гражданской авиации;

КИМ ОрВД – комплекс имитационного моделирования организации воздушного движения;

КСА УВД – комплекс средств автоматизации управления воздушным движением;

НПС – норматив пропускной способности;

ОВД – обслуживание воздушного движения;

ОрВД – организация воздушного движения;

ПКС – потенциально-конфликтная ситуация;

ПО – программное обеспечение;

РДЦ – районный диспетчерский центр;

РП – руководитель полётов;

РФ – Российская Федерация;

СППР – система поддержки принятия решений;

УВД – управление воздушным движением;

ЭВМ – электронно-вычислительная машина;

ANFIS – Adaptive Neuro-Fuzzy Inference System – адаптивная нейро-нечёткая система вывода;

ASBU – Aviation System Block Upgrades – блочная модернизация авиационной системы;

ATC – Air Traffic Control – управление воздушным движением;

ATFCM – Air Traffic Flow and Capacity Management – организация потоков воздушного движения и пропускной способности;

ATFM – Air Traffic Flow Management – организация потоков воздушного движения;

ATM – Air Traffic Management – организация воздушного движения;

BBB – Basic Building Blocks – базовые элементы Глобального аэронавигационного плана ИКАО;

CAP – Collaborative Advanced Planning – совместное перспективное планирование;

CAPAN – Capacity Analysis – методика анализа пропускной способности EUROCONTROL;

CDM – Collaborative Decision Making – совместное принятие решений;

CNN – Convolutional Neural Network – свёрточная нейронная сеть;

CNS/ATM – Communications, Navigation, Surveillance/Air Traffic Management – связь, навигация, наблюдение / организация воздушного движения;

DORATASK – методика оценки диспетчерской нагрузки и пропускной способности сектора ОБД на основе анализа задач диспетчера;

EASA – European Union Aviation Safety Agency – Агентство Европейского союза по авиационной безопасности;

EUROCONTROL – European Organisation for the Safety of Air Navigation – Европейская организация по безопасности аэронавигации;

FAA – Federal Aviation Administration – Федеральное управление гражданской авиации США;

FIS – Fuzzy Inference System – система нечёткого вывода;

FMP – Flow Management Position – позиция управления потоками воздушного движения;

FTS – Fast-Time Simulation – имитационное моделирование в ускоренном масштабе времени;

FWHM – Full Width at Half Maximum – полная ширина на половине максимума;

GANP – Global Air Navigation Plan – Глобальный аэронавигационный план ИКАО;

GDP – Ground Delay Program – программа наземной задержки воздушных судов;

ICAO – International Civil Aviation Organization – Международная организация гражданской авиации;

KPA – Key Performance Areas – ключевые области эффективности;

MAE – Mean Absolute Error – средняя абсолютная ошибка;

MAP – Monitor Alert Parameter – параметр предупредительного мониторинга;

MBB – Measurement-Based Approach – подход, основанный на измерениях;

MSE – Mean Squared Error – среднеквадратичная ошибка;

MTCD – Medium-Term Conflict Detection – среднесрочное обнаружение конфликтов;

NASA TLX – NASA Task Load Index – индекс субъективной рабочей нагрузки NASA;

RMSE – Root Mean Squared Error – корень из среднеквадратичной ошибки;

RTS – Real-Time Simulation – имитационное моделирование в реальном масштабе времени;

TFM – Traffic Flow Management – управление потоками воздушного движения;

TMI – Traffic Management Initiatives – мероприятия по управлению потоками воздушного движения;

s – индекс сектора ОВД;

t – момент времени;

ΔT – длительность расчётного временного окна;

$\mu_{\text{норм},s}$ – нормативная пропускная способность сектора s ;

$\mu_s(t)$ – динамическая корректировка пропускной способности сектора s в момент времени t ;

$K_{\text{кор},s}(t)$ – коэффициент динамической коррекции нормативной пропускной способности сектора s ;

$V_s(t)$ – относительный объём воздушного движения в секторе s ;

$C_s(t)$ – индекс структурной сложности воздушной обстановки в секторе s ;

$R_s(t)$ – коэффициент доступности воздушного пространства сектора s ;

$\lambda_s(t)$ – интенсивность входящего потока воздушных судов в секторе s ;

$N_s(t)$ – число воздушных судов в рассматриваемом временном окне;

$X_s(t)$ – входной вектор состояния сектора s ;

c_i – i -я ячейка сеточной модели сектора;

H_l – l -й эшелонный слой воздушного пространства;

$a_{i,l}(t)$ – бинарный индикатор доступности i -й ячейки на эшелонном слое l ;

$b_{i,l}(t)$ – бинарный индикатор занятости i -й ячейки ограничением на эшелонном слое l ;

$m_{\text{сек}}(c_{s,i})$ – площадь внутрисекторной части i -й ячейки;

$R_{\min}$ – пороговое значение коэффициента доступности воздушного пространства;

α – весовой коэффициент базовой нагрузки;

β – весовой коэффициент горизонтально-конфликтной компоненты сложности;

γ – весовой коэффициент вертикальной компоненты сложности;

α_r – степень активации r -го продукционного правила;

y – переменная универсального множества выходной лингвистической переменной;

E_r – выходной терм, связанный с r -м продукционным правилом;

$E^*(t)$ – согласованная экспертная классификация состояния сектора в момент времени t ;

$\hat{E}(t)$ – класс состояния сектора, сформированный нечёткой моделью;

θ – вектор параметров функций принадлежности;

θ_0 – исходный экспертно заданный набор параметров функций принадлежности;

θ^* – адаптированный набор параметров функций принадлежности;

$J(\theta)$ – функция несоответствия результата модели экспертной классификации;

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Транспортная стратегия Российской Федерации до 2030 года с прогнозом до 2035 года : утверждена распоряжением Правительства Российской Федерации от 27 ноября 2021 г. № 3363-р. [Электронный ресурс] – URL: <http://www.mintrans.gov.ru/file/473193> (дата обращения: 26.01.2026). – Доступ свободный.
2. ICAO Doc. 9971. Manual on Collaborative Air Traffic Flow Management (ATFM). Third Ed., Montreal, 2018, 228 p.
3. Организация управления воздушным движением / В. И. Алешин, Ю. П. Дарымов, Г. А. Крыжановский [и др.] ; под ред. Г. А. Крыжановского. – Москва : Транспорт, 1988. – 264 с.
4. Международная организация гражданской авиации (ИКАО). Глобальный аэронавигационный план (GANP) (Doc. 9750) : sixth edition (online format). [Электронный ресурс]. – URL: <https://www.icao.int/global-air-navigation-plan-ganp> (дата обращения: 24.01.2026). – Доступ свободный.
5. Международная организация гражданской авиации (ИКАО). Global Air Traffic Management Operational Concept (Doc. 9854, AN/458). – 1st ed. – Montréal : ICAO, 2005.
6. Международная организация гражданской авиации (ИКАО). Manual on Air Traffic Management System Requirements (Doc. 9882, AN/467). – 1st ed. – Montréal : ICAO, 2008.
7. Международная организация гражданской авиации (ИКАО). Manual on Global Performance of the Air Navigation System (Doc. 9883). – 1st ed. – Montréal : ICAO, 2009.
8. Международная организация гражданской авиации (ИКАО). Aviation System Block Upgrades (ASBU) framework : updated July 2019. [Электронный ресурс]. – URL: <https://www4.icao.int/ganportal/ASBU> (дата обращения: 24.01.2026). – Доступ свободный.

9. Международная организация гражданской авиации (ИКАО). The Aviation System Block Upgrades – The Framework for Global Harmonization : issued July 2016. [Электронный ресурс]. – URL: https://www.icao.int/sites/default/files/sp-files/airnavigation/Documents/ASBU_2016-FINAL.pdf (дата обращения: 24.01.2026). – Текст : электронный.

10. Международная организация гражданской авиации (ИКАО). Aviation System Block Upgrades (ASBU) : March 2013. [Электронный ресурс]. – URL: <https://www.icao.int/sites/default/files/environmental-protection/Documents/ASBU.en.Mar-2013.pdf> (дата обращения: 24.01.2026). – Доступ свободный.

11. Международная организация гражданской авиации (ИКАО). Key Performance Indicators (KPIs) (GANP/ASBU portal). [Электронный ресурс]. – URL: <https://www4.icao.int/ganpportal/ASBU/KPI> (дата обращения: 24.01.2026). – Доступ свободный.

12. Международная организация гражданской авиации (ИКАО). Aviation System Block Upgrade (ASBU) Implementation Monitoring Report. [Электронный ресурс]. – URL: <https://www.icao.int/aviation-system-block-upgrade-asbu-implementation-monitoring-report> (дата обращения: 24.01.2026). – Доступ свободный.

13. Международная организация гражданской авиации (ИКАО). Multi-disciplinary Working Group on the Economic Challenges Linked to the Implementation of the ASBUs (MDWG-ASBU) : reports and materials. [Электронный ресурс]. – URL: <https://www.icao.int/sustainability/Pages/ASBU-Implementation.aspx> (дата обращения: 24.01.2026). – Доступ свободный.

14. EUROCONTROL. Aviation System Block Upgrade (ASBU) Implementation Monitoring Report (ICAO EUR States — reference period 2024) [Электронный ресурс]. — Режим доступа: <https://www.eurocontrol.int/publication/aviation-system-block-upgrade-asbu-implementation-monitoring-report-2024> (дата обращения: 24.01.2026). – Доступ свободный.

15. Методика определения нормативов пропускной способности диспетчерских пунктов (секторов) органов обслуживания воздушного движения : утв. приказом Федерального агентства воздушного транспорта от 07.11.2012 № 757 – Текст : электронный // Гарант : справочно-правовая система. – URL: <https://www.garant.ru/products/ipo/prime/doc/70165526/> (дата обращения: 17.01.2026). – Доступ свободный.

16. Федеральные авиационные правила «Организация воздушного движения в Российской Федерации» : утв. приказом Минтранса России от 25.11.2011 № 293 [Электронный ресурс]. – URL: <https://docs.cntd.ru/document/902319871> (дата обращения: 24.01.2026). – Текст : электронный.

17. Концепция научно-технологического развития транспортного комплекса Российской Федерации на период до 2035 года : утв. распоряжением Правительства Российской Федерации от 19.12.2025 № 3871-р – Текст : электронный // Гарант : справочно-правовая система. – URL: <https://www.garant.ru/products/ipo/prime/doc/413223834/> (дата обращения: 24.01.2026). – Доступ свободный.

18. International Civil Aviation Organization (ICAO). Procedures for Air Navigation Services – Air Traffic Management (PANS-ATM). Doc. 4444. 16th Edition. – Montreal: ICAO. [Электронный ресурс]. – URL: <https://store.icao.int/en/procedures-for-air-navigation-services-air-traffic-management-doc-4444> (дата обращения: 11.02.2026). – Доступ свободный.

19. Международная организация гражданской авиации (ИКАО). Приложение 11 к Конвенции о международной гражданской авиации. Air Traffic Services : извлечение / публикация на сайте ИКАО. [Электронный ресурс]. – URL: https://www.icao.int/sites/default/files/safety/CAPSCA/PublishingImages/Pages/ICAO-SARPs-%28Annexes-and-PANS%29/an11_1_edited.pdf (дата обращения: 11.02.2026). – Текст : электронный.

20. Международная организация гражданской авиации (ИКАО). Глобальный план обеспечения безопасности полетов (Дос. 10004). – Текст : непосредственный.
21. Международная организация гражданской авиации (ИКАО). Руководство по разработке региональных и национальных планов обеспечения безопасности полетов (Дос. 10131).
22. Международная организация гражданской авиации (ИКАО). Глобальная дорожная карта обеспечения безопасности полетов (Дос. 10161).
23. Международная организация гражданской авиации (ИКАО). Руководство по управлению безопасностью полетов (РУБП) (Дос. 9859). – 3-е изд.
24. ICAO. ATFM Training Guide. Montreal: ICAO, 2022. [Электронный ресурс]. – URL: <https://www.icao.int/sites/default/files/APAC/Documents/ATFM-Training-Guide.pdf> (дата обращения: 30.04.2026). – Доступ свободный.
25. Asia/Pacific Framework for Collaborative Air Traffic Flow Management. – Bangkok: ICAO Asia and Pacific Office, 2019.
26. ATFM Operations Handbook. – New Delhi: Airports Authority of India, 2017. – 120 p.
27. Long-Range Air Traffic Flow Management Concept. – Amsterdam: Civil Air Navigation Services Organisation (CANSO), 2021. – 60 p.
28. ATFCM Users Manual. – Brussels: EUROCONTROL, 2019.
29. Крыжановский, Г. А. Введение в прикладную теорию управления воздушным движением / Г. А. Крыжановский. – Москва : Машиностроение, 1984. – 264 с.
30. Федеральные правила использования воздушного пространства Российской Федерации : утверждены постановлением Правительства Российской Федерации от 11 марта 2010 г. № 138.
31. Торосян, А. А. Метод расчета динамической оценки пропускной способности воздушного пространства на основе нечетких моделей / А. А. Торосян // Научный вестник ГосНИИ ГА. – 2026. – № 54. – С. 43–53.

32. Жильцов, И. Е. Оценка пропускной способности в задаче совместного планирования потоков воздушных судов / И. Е. Жильцов, А. К. Митрофанов, Л. Е. Рудельсон // Научный вестник МГТУ ГА. – 2018. – Т. 21, № 2. – С. 83–95.
33. Рудельсон, Л. Е. Методы оценки пропускной способности воздушного пространства / Л. Е. Рудельсон, А. К. Митрофанов // Научный вестник ГосНИИ ГА. – 2015. – № 7. – С. 45–53.
34. Крыжановский, Г. А. Методы оценки загруженности диспетчера УВД / Г. А. Крыжановский // Труды ГосНИИ ГА. – 2012. – № 312. – С. 67–74.
35. Пятко, С. Г. Моделирование потоков воздушного движения и оценка пропускной способности / С. Г. Пятко, В. И. Алешин // Вестник МГТУ ГА. – 2016. – № 3. – С. 54–62.
36. Соколов, Н. Н. Анализ факторов, влияющих на пропускную способность секторов ОВД / Н. Н. Соколов, Е. С. Соколов // Аэронавигация и управление воздушным движением. – 2019. – № 2. – С. 21–30.
37. Дарымов, Ю. П. Методы оценки и прогнозирования загрузки диспетчерских секторов / Ю. П. Дарымов // Транспорт Российской Федерации. – 2017. – № 4. – С. 34–40.
38. EUROCONTROL. Capacity Assessment Methodology (CAPAN). – Brussels: EUROCONTROL, 2010.
39. EUROCONTROL. Pessimistic Sector Capacity Estimation. – Brussels: EUROCONTROL, 2014.
40. EUROCONTROL. Cognitive Complexity in Air Traffic Control. – Brussels: EUROCONTROL, 2006.
41. Pérez Moreno, F. Dynamic methodology for ATC sector capacity assessment. – Madrid: UPM, 2023.
42. Djokic, J., Lorenz, B., Fricke, H. Air traffic control complexity as workload driver // Transportation Research Part C. – 2010. – Vol. 18, No. 6. – P. 930–936. DOI: 10.1016/j.trc.2010.03.005.

43. Kopardekar, P., Rhodes, J., Schwartz, A., Magyarits, S., Willems, B. Relationship of maximum manageable air traffic control complexity and sector capacity // Proceedings of the 26th International Congress of the Aeronautical Sciences. – 2008.
44. Schmidt, D. K. On modeling atc work load and sector capacity // Journal of Aircraft. – 1976. – Vol. 13, No. 7. – P. 531–537. DOI: 10.2514/3.44541.
45. Di Mascio, P., et al. How air traffic controller workload influences airport capacity // Applied Sciences. – 2021. – Vol. 11. – P. 1–19.
46. Pérez Moreno, F., et al. How has the concept of air traffic complexity evolved? // Applied Sciences. – 2024. – Vol. 14. – Article 3604.
47. Xiao, M., Zhang, J., Cai, K. Air traffic complexity evaluation using computational intelligence // Journal of Advanced Transportation. – 2015.
48. Yang, L., Yin, S., Hu, M., Han, K., Zhang, H. Empirical exploration of air traffic and human dynamics in terminal airspaces // IEEE/CAA Journal of Automatica Sinica. – 2017.
49. Pang, Y., Hu, J., Lieber, C., Cooke, N., Liu, Y. Air traffic controller workload level prediction using graph learning // arXiv. – 2023.
50. Park, J. W., Kim, H. Terminal control area capacity estimation model incorporating structural space // arXiv. – 2025.
51. Gómez Arnaldo, C., Arroyo López, J. M., Delgado-Aguilera, R., Pérez, F. Cell-based optimization of ATC sector boundaries using traffic complexity // Aerospace. – 2026.
52. FAA. Order JO 7210.3. Facility Operation and Administration. – 2019.
53. Власова, А. В. Коэффициент загрузки диспетчера УВД как показатель уровня управления безопасностью полетов / А. В. Власова // Научный вестник ГосНИИ ГА. – 2018. – № 22. – С. 102–108.
54. Socha, V. Workload assessment of air traffic controllers January 2020 Transportation Research Procedia 51:243-251 DOI:10.1016/j.trpro.2020.11.027.
55. FAA. Air Traffic Control Handbook. JO 7110.65BB.
56. Federal Aviation Administration. Flow Operations Handbook. Section 9. Monitor Alert Parameter [Электронный ресурс]. – URL:

https://www.faa.gov/air_traffic/publications/atpubs/foa_html/chap18_section_9.html
(дата обращения: 30.04.2026). – Доступ свободный.

57. Delahaye, D. Air Traffic Complexity Map Based on Linear Dynamical Systems, ENAC, 2022.

58. International Civil Aviation Organization. Human Factors Training Manual (Doc 9683-AN/950). – 1st ed. – Montreal : ICAO, 1998.

59. Wang, S., Yang, B., Duan, R., Li, J. Predicting the Airspace Capacity of Terminal Area under Convective Weather Using Machine Learning // Aerospace. 2023. Vol. 10, no. 3. Article 288. DOI: 10.3390/aerospace10030288.

60. Pérez Moreno, F., Pastor, E., Royo, P., Barrado, C. Prediction of air traffic complexity through a dynamic data-driven approach // Transportation Research Part C: Emerging Technologies. 2024.

61. Wieland, F., et al. Predicting Sector Capacity Using Machine Learning // AIAA Aviation Forum. 2022. DOI: 10.2514/6.2022-3754.

62. Martínez, I., et al. Predicting Air Traffic Flow Management hotspots due to convective weather using machine learning // Engineering Applications of Artificial Intelligence. 2024.

63. Fernández, E.C., et al. DART: A Machine-Learning Approach to Trajectory Prediction and Demand-Capacity Balancing // SESAR Innovation Days. 2017. [Электронный ресурс] – URL: <https://crida.es/webcrida/wp-content/uploads/2018/08/2017-SID-Calvo-Cordero-DART-a-Machine-Learning-Approach-to-Trajectory-Prediction-and-Demand-Capacity-Balancing.pdf> (дата обращения: 30.04.2026). – Доступ свободный.

64. David Gianazza. Learning Air Traffic Controller Workload from Past Sector Operations / ATM Seminar, 12th USA/Europe Air Traffic Management R&D Seminar, Jun 2017, Seattle, United States // HAL-ENAC. 2017. [Электронный ресурс] – URL: <https://enac.hal.science/hal-01592233v1/document> (дата обращения: 30.04.2026). – Доступ свободный.

65. Beiser, A. Tackling the Air Traffic Flow and Capacity Management Problem with Answer Set Programming // CEUR Workshop Proceedings. 2025. [Электронный

ресурс] – URL: https://ceur-ws.org/Vol-4117/paper_dc_4.pdf (дата обращения: 30.04.2026). – Доступ свободный.

66. CANSO. Implementing Air Traffic Flow Management and Collaborative Decision Making. Amsterdam: Civil Air Navigation Services Organisation, 2019. [Электронный ресурс] – URL: <https://canso.org/publication/implementing-air-traffic-flow-management-and-collaborative-decision-making/> (дата обращения: 30.04.2026).

67. EUROCONTROL Network Manager. ATFCM Users Manual. Edition 23.1. Brussels: EUROCONTROL, 2019. [Электронный ресурс] – URL: <https://www.eurocontrol.int/sites/default/files/2019-09/atfcm-user-manual-13092019.pdf> (дата обращения: 30.04.2026). – Доступ свободный.

68. ICAO. Air Traffic Services Planning Manual (Doc. 9426). Montreal: ICAO, 1984.

69. ICAO. MID Doc. 014. MID Region Air Traffic Flow Management Plan. 2nd ed. Cairo: ICAO MID Office, 2022. [Электронный ресурс] – URL: <https://www.icao.int/sites/default/files/MID/Documents/MID-DOC-014-MID-ATFM-Plan-V2.0.pdf> (дата обращения: 30.04.2026). – Доступ свободный.

70. ICAO. Models to Determine Airspace Capacity. Capacity Assessment Workshop. 2025. [Электронный ресурс] – URL: <https://www.icao.int/sites/default/files/APAC/Meetings/2025/2025%20Capacity%20Assessment%20WS/Day%203/SP-12-Models-to-determine-Airspace-Capacity-by-FAA.pdf> (дата обращения: 30.04.2026). – Доступ свободный.

71. Flynn, G. ATC Capacities and their Costs. Brussels: EUROCONTROL, 2005. [Электронный ресурс] – URL: https://www.eurocontrol.int/sites/default/files/library/026_Pessimistic_Sector_Capacity.pdf (дата обращения: 30.04.2026). – Доступ свободный.

72. EUROCONTROL. Cognitive Complexity and Air Traffic Controller Workload. Brussels: EUROCONTROL, 2003. [Электронный ресурс] – URL: https://www.eurocontrol.int/archive_download/all/node/9822 (дата обращения: 30.04.2026). – Доступ свободный.

73. EUROCONTROL Network Manager. CAPAN Methodology: Models to Determine Airspace Capacity. ICAO Capacity Assessment Workshop. 2025. [Электронный ресурс] – URL: <https://www.icao.int/sites/default/files/APAC/Meetings/2025/2025%20Capacity%20Assessment%20WS/Day%203/SP-13-EUROCONTROL-NM-CAPAN-Methodology-by-EUROCONTROL.pdf> (дата обращения: 30.04.2026). – Доступ свободный.

74. EUROCONTROL. The ATC Capacity Analyser. Brussels: EUROCONTROL, 2001. [Электронный ресурс] – URL: https://www.eurocontrol.int/archive_download/all/node/10163 (дата обращения: 30.04.2026). – Доступ свободный.

75. Chenxi, L., Zheng, W. Study on Sector Capacity and Workload Model of Air Traffic Controllers Based on Least Square Method // International Conference on Power, Intelligent Computing and Systems (ICPICS). – 2020. – P. 1058-1062. DOI: 10.1109/ICPICS50287.2020.9202266.

76. EUROCONTROL. European Network Operations Plan 2025/2026–2029. Version 1 [Электронный ресурс]. – Brussels : EUROCONTROL, 2025. [Электронный ресурс] – URL: <https://www.eurocontrol.int/publication/european-network-operations-plan-20252026-2029-v1> (дата обращения: 30.04.2026). – Доступ свободный.

77. EUROCONTROL. ATFCM Operations Manual. Edition Wave 2.1 [Электронный ресурс]. – Brussels : EUROCONTROL, 2025. [Электронный ресурс] – URL: <https://www.eurocontrol.int/sites/default/files/2025-11/eurocontrol-atfcm-operations-manual-wave-2-1-external.pdf> (дата обращения: 30.04.2026). – Доступ свободный.

78. ENAIRE. ATFM flow management [Электронный ресурс]. – URL: https://www.enaire.es/services/atm/atfm_flow_management (дата обращения: 30.04.2026). – Доступ свободный.

79. Direction des Services de la Navigation Aérienne. DSNA's Collaborative Advanced Planning: A dynamic en route ATFM measure towards smart collaborative refiling [Электронный ресурс]. – Paris : Ministère de l'Écologie, du Développement durable et de l'Énergie, [2015]. [Электронный ресурс] – URL:

<https://www.ecologie.gouv.fr/sites/default/files/documents/fiche%20CAP%20V4%20VF%20web-4.pdf> (дата обращения: 30.04.2026). – Доступ свободный.

80. Cortés Obrero, G. How do controllers actually use advanced tools? // HindSight. – 2017. – No. 25. – P. 26–29. [Электронный ресурс] – URL: <https://skybrary.aero/sites/default/files/bookshelf/3938.pdf> (дата обращения: 30.04.2026). – Доступ свободный.

81. Federal Aviation Administration. Method for Calculating Monitor Alert Parameters : Notice N JO 7210.913 [Электронный ресурс]. – Washington : U.S. Department of Transportation, Federal Aviation Administration, 2018. [Электронный ресурс] – URL: https://www.faa.gov/documentLibrary/media/Notice/N_JO_7210.913_Method_for_Calculating_Monitor_Alert_Parameters.pdf (дата обращения: 30.04.2026). – Доступ свободный.

82. NAV CANADA. Understanding delays in air traffic: Traffic management initiatives and more [Электронный ресурс]. – URL: <https://www.navcanada.ca/en/news/blog/understanding-delays-in-air-traffic-traffic-management-initiatives-and-more.aspx> (дата обращения: 30.04.2026). – Доступ свободный.

83. NAV CANADA. Inside Canada's Air Traffic System: Meet the Team Managing Flight Interruptions [Электронный ресурс]. – 18 July 2025. [Электронный ресурс] – URL: <https://www.navcanada.ca/en/news/blog/inside-canadas-air-traffic-system-meet-the-team-managing-flight-interruptions.aspx> (дата обращения: 30.04.2026). – Доступ свободный.

84. Lee, K., Feron, E., Pritchett, A. Describing Airspace Complexity: Airspace Response to Disturbances // Journal of Guidance, Control, and Dynamics. – 2009. – Vol. 32, no. 1. – P. 210–222. DOI: 10.2514/1.36308.

85. Prandini, M., Putta, V., Hu, J. Air Traffic Complexity in Future Air Traffic Management Systems // Journal of Aerospace Operations. – 2012. – Vol. 1, no. 3. – P. 281–299. DOI: 10.3233/AOP-2012-0015.

86. Wang, H., Song, Z., Wen, R. Modeling Air Traffic Situation Complexity with a Dynamic Weighted Network Approach // Journal of Advanced Transportation. – 2018. – P. 1–15. DOI: 10.1155/2018/5254289.
87. Antulov-Fantulin, B., Juricic, B., Radisic, T., Çetek, C. Determining Air Traffic Complexity – Challenges and Future Development // Promet – Traffic & Transportation. – 2020. – Vol. 32, no. 4. – P. 475–485. DOI: 10.7307/ptt.v32i4.3401.
88. Zadeh, L.A. Fuzzy Sets // Information and Control. – 1965. – Vol. 8, no. 3. – P. 338–353. DOI: 10.1016/S0019-9958(65)90241-X.
89. Zadeh, L.A. The Concept of a Linguistic Variable and its Application to Approximate Reasoning – I // Information Sciences. – 1975. – Vol. 8, no. 3. – P. 199–249. DOI: 10.1016/0020-0255(75)90036-5.
90. Mamdani, E.H., Assilian, S. An Experiment in Linguistic Synthesis with a Fuzzy Logic Controller // International Journal of Man-Machine Studies. – 1975. – Vol. 7, no. 1. – P. 1–13. DOI: 10.1016/S0020-7373(75)80002-2.
91. EUROCONTROL. Human Factors Integration in Future ATM Systems. – Brussels : EUROCONTROL, 2000. [Электронный ресурс] – URL: <https://skybrary.aero/sites/default/files/bookshelf/5458.pdf> (дата обращения: 30.04.2026). – Доступ свободный.
92. EUROCONTROL. Human Factors Integration in ATM System Design : White Paper Brussels : EUROCONTROL, 2019. [Электронный ресурс]. – URL: <https://www.eurocontrol.int/publication/human-factors-integration-atm-system-design> (дата обращения: 30.04.2026). – Доступ свободный.
93. Автоматизация процессов управления воздушным движением / Ю. П. Дарымов, Г. А. Крыжановский, В. А. Солодухин [и др.] ; под ред. Г. А. Крыжановского. – Москва : Транспорт, 1981. – 400 с.
94. Крыжановский, Г. А. Оптимизация процессов принятия решений в системе УВД / Г. А. Крыжановский // Межвузовский сборник научных трудов. – Ленинград, 1982. – С. 131–135.
95. Новиков, П. П. Принятие решений человеком в авиационных системах управления / П. П. Новиков. – Москва : Воздушный транспорт, 1980. – 341 с.

96. Венда, В. Ф. Системы гибридного интеллекта: эволюция, психология, информатика / В. Ф. Венда. – Москва : Машиностроение, 1990. – 448 с.
97. Поспелов, Д. А. Ситуационное управление: теория и практика / Д. А. Поспелов. – Москва : Наука, Главная редакция физико-математической литературы, 1986. – 288 с.
98. Гаврилова, Т. А. Базы знаний интеллектуальных систем : учебник для вузов / Т. А. Гаврилова, В. Ф. Хорошевский. – Санкт-Петербург : Питер, 2001. – 384 с.
99. Смоленцев, В. П. Управление системами и процессами : учебник для студентов высших учебных заведений / В. П. Смоленцев, В. П. Мельников, А. Г. Схиртладзе ; под ред. В. П. Мельникова. – Москва : Академия, 2010. – 336 с.
100. Тиханычев, О. В. Теория и практика автоматизации поддержки принятия решений / О. В. Тиханычев. – Москва : Эдитус, 2018. – 76 с.
101. Ротштейн, А. П. Интеллектуальные технологии идентификации: нечёткие множества, генетические алгоритмы, нейронные сети / А. П. Ротштейн. – Винница : УНИВЕРСУМ-Винница, 1999. – 320 с. – Текст : непосредственный.
102. Бусленко, А. П. Моделирование сложных систем / А. П. Бусленко. – Москва : Транспорт, 1987. – 399 с. – Текст : непосредственный.
103. Крыжановский, Г. А. Методы оптимизации процессов УВД / Г. А. Крыжановский, В. А. Солодухин. – Москва : Транспорт, 1987. – 152 с.
104. Zadeh L.A. Fuzzy Logic, Neural Network and Soft Computing// Communications of the ACM. – 1994. – Vol. 37, no. 3. – P. 77–84. DOI: 10.1145/175247.175255
105. Bellman, R. E., Zadeh, L. A. Decision-Making in a Fuzzy Environment // Management Science. – 1970. – Vol. 17, no. 4. – P. B141–B164. DOI: 10.1287/mnsc.17.4.B141.
106. Шапиро, Д. И. Принятие решений в системах организационного управления: использование расплывчатых категорий / Д. И. Шапиро. – Москва : Энергоатомиздат, 1983. – 184 с.

107. Mamdani, E. H. Application of Fuzzy Algorithms for Control of Simple Dynamic Plant // Proceedings of the Institution of Electrical Engineers. – 1974. – Vol. 121, no. 12. – P. 1585–1588. DOI: 10.1049/piee.1974.0328.

108. European Union Aviation Safety Agency. Artificial Intelligence Roadmap 2.0: A human-centric approach to AI in aviation, Cologne : EASA, 2023. [Электронный ресурс]. URL: <https://www.easa.europa.eu/en/document-library/general-publications/easa-artificial-intelligence-roadmap-20> (дата обращения: 30.04.2026).

109. European Union Aviation Safety Agency. Artificial Intelligence Concept Paper Issue 2: Guidance for Level 1 & 2 machine-learning applications, Cologne : EASA, 2024. [Электронный ресурс]. – URL: <https://www.easa.europa.eu/en/document-library/general-publications/easa-artificial-intelligence-concept-paper-issue-2> (дата обращения: 30.04.2026). – Доступ свободный.

110. Federal Aviation Administration. Roadmap for Artificial Intelligence Safety Assurance, Washington : FAA, 2024. [Электронный ресурс]. – URL: https://www.faa.gov/aircraft/air_cert/step/roadmap_for_AI_safety_assurance (дата обращения: 30.04.2026). – Доступ свободный.

111. International Civil Aviation Organization. Responsible and strategic integration of artificial intelligence in aviation : Working Paper A42-WP/234, Montreal : ICAO, 2025. [Электронный ресурс]. – URL: https://www.icao.int/sites/default/files/Meetings/a42/Documents/WP/wp_234_en.pdf (дата обращения: 30.04.2026). – Доступ свободный.

112. Arrieta, A. B., Díaz-Rodríguez, N., Del Ser, J., Bennetot, A., Tabik, S., Barbado, A., García, S., Gil-López, S., Molina, D., Benjamins, R., Chatila, R., Herrera, F. Explainable Artificial Intelligence (XAI): Concepts, taxonomies, opportunities and challenges toward responsible AI // Information Fusion. – 2020. – Vol. 58. – P. 82–115. DOI: 10.1016/j.inffus.2019.12.012.

113. Laudeman, I. V., Shelden, S. G., Branstrom, R., Brasil, C. L. Dynamic Density: An Air Traffic Management Metric. – Moffett Field : NASA Ames Research Center, 1998. – NASA/TM-1998-112226.

114. Mogford, R. H., Guttman, J. A., Morrow, S. L., Kopardekar, P. The Complexity Construct in Air Traffic Control: A Review and Synthesis of the Literature. – Atlantic City : Federal Aviation Administration Technical Center, 1995. – DOT/FAA/CT-TN95/22.

115. Masalonis, A. J., Callahan, M. B., Wanke, C. R. Dynamic Density and Complexity Metrics for Realtime Traffic Flow Management // Proceedings of the 5th USA/Europe Air Traffic Management R&D Seminar. – Budapest, 2003.

116. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2026665870 Российская Федерация. Программный модуль расчета коэффициента доступности воздушного пространства секторов обслуживания воздушного движения: заявление 11.05.2026: опубликовано 26.05.2026/ А. А. Торосян, Н. Е. Баранов, Т. В. Шевченко, Д. О. Тарасов.

117. Krozel, J., Mitchell, J. S. B., Polishchuk, V., Prete, J. Maximum Flow Rates for Capacity Estimation in Level Flight with Convective Weather Constraints // Air Traffic Control Quarterly. – 2007. – Vol. 15, no. 3. – P. 209–238. DOI: 10.2514/ATCQ.15.3.209.

118. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2026665072 Российская Федерация. Нечёткая модель динамической коррекции нормативов пропускной способности секторов обслуживания воздушного движения: заявление 04.05.2026: опубликовано 20.05.2026 / А. А. Торосян, Н. Е. Баранов, Т. В. Шевченко, Д. О. Тарасов.

119. Hart, S. G., Staveland, L. E. Development of NASA-TLX (Task Load Index): Results of Empirical and Theoretical Research // Human Mental Workload / ed. by P. A. Hancock, N. Meshkati. – Amsterdam : North-Holland, 1988. – P. 139–183.

120. Miller, G. A. The Magical Number Seven, Plus or Minus Two: Some Limits on Our Capacity for Processing Information // Psychological Review. – 1956. – Vol. 63, no. 2. – P. 81–97. DOI: 10.1037/h0043158.

121. Cheng, Chin-Bin, Shyur, Huan-Jyn. Flight safety management: Quantitative and AI Approaches. 2025: Book / Springer Nature Singapore Pte Ltd., 2025. 225 p.

122. Леоненков, А. В. Нечёткое моделирование в среде MATLAB и fuzzyTECH / А. В. Леоненков. – Санкт-Петербург : БХВ-Петербург, 2005. – 736 с.
123. Торосян, А. А. Алгоритмические основы расчёта динамической пропускной способности секторов обслуживания воздушного движения на основе гибридной нечёткой логики / А. А. Торосян, Т. В. Шевченко, Д. О. Тарасов // Вестник Санкт-Петербургского государственного университета гражданской авиации. – 2026. – № 1. – С. 58–67.
124. Nauck, D., Klawonn, F., Kruse, R. Foundations of Neuro-Fuzzy Systems. – Chichester : John Wiley & Sons, 1997. – 316 p.
125. Rutkowski, L. Computational Intelligence: Methods and Techniques. – Berlin : Springer, 2008. – 514 p. DOI: 10.1007/978-3-540-76288-1.
126. Nocedal, J., Wright, S. J. Numerical Optimization. – 2nd ed. – New York : Springer, 2006. – 664 p.
127. Rudin, C. Stop explaining black box machine learning models for high stakes decisions and use interpretable models instead // Nature Machine Intelligence. – 2019. – Vol. 1. – P. 206–215. DOI: 10.1038/s42256-019-0048-x.
128. Jang, J.-S. R. ANFIS: Adaptive-Network-Based Fuzzy Inference System // IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics. – 1993. – Vol. 23, no. 3. – P. 665–685. DOI: 10.1109/21.256541.
129. Warner, J. D., Sexauer, J., Broeck, W. van den [et al.]. JDWarner/scikit-fuzzy: Scikit-Fuzzy 0.5.0 : программное обеспечение. Zenodo, 2024. DOI: 10.5281/zenodo.13372212. [Электронный ресурс]. – URL: <https://zenodo.org/doi/10.5281/zenodo.13372212> (дата обращения: 20.03.2026). – Доступ свободный.
130. Python Software Foundation. Python 3 Documentation. [Электронный ресурс]. – URL: <https://docs.python.org/3/> (дата обращения: 20.03.2026). – Доступ свободный.
131. Harris, C. R., Millman, K. J., Walt, S. J. van der [et al.]. Array programming with NumPy // Nature. 2020. Vol. 585. P. 357–362. DOI: 10.1038/s41586-020-2649-2.

132. Ross, T. J. Fuzzy Logic with Engineering Applications. 4th ed. Chichester : John Wiley & Sons, 2016. 584 p.
133. High-Level Expert Group on Artificial Intelligence. Ethics Guidelines for Trustworthy AI. Brussels : European Commission, 2019.
134. Parasuraman, R., Sheridan, T. B., Wickens, C. D. A model for types and levels of human interaction with automation // IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics. Part A: Systems and Humans. 2000. Vol. 30, no. 3. P. 286–297. DOI: 10.1109/3468.844354.
135. ISO 9241-210:2019. Ergonomics of human-system interaction — Part 210: Human-centred design for interactive systems. Geneva : International Organization for Standardization, 2019.
136. EUROCONTROL. Human Factors Integration in ATM System Design : White Paper. Brussels : EUROCONTROL, 2019.
137. Куклев, Е. А. Моделирование систем и процессов: методы разработки математических и комбинированных моделей систем и процессов в гражданской авиации : учебное пособие / Е. А. Куклев, М. Ю. Смуров, А. Б. Байрамов ; под общ. ред. Е. А. Куклева. – Санкт-Петербург : СПбГУГА, 2015. – 166 с.
138. EUROCONTROL. Specification for Medium-Term Conflict Detection (MTCD) : EUROCONTROL-SPEC-0139. Edition 2.0. Brussels : EUROCONTROL, 2017. [Электронный ресурс]. – URL: <https://www.eurocontrol.int/publication/eurocontrol-specification-medium-term-conflict-detection-mtcd> (дата обращения: 03.02.2026). – Доступ свободный.
139. Hallin, M. Gauss–Markov Theorem in Statistics // Wiley StatsRef: Statistics Reference Online. 2014. DOI: 10.1002/9781118445112.stat07536.
140. Horn, R. A., Johnson, C. R. Matrix Analysis. 2nd ed. Cambridge : Cambridge University Press, 2012. 607 p.
141. Лосев, С. Н. Вероятностно-геометрический метод среднесрочного обнаружения конфликтов между воздушными судами / С. Н. Лосев, В. И. Макаренко, Н. Н. Подольская // Мехатроника, автоматизация, управление. – 2015. – Т. 16, № 4. – С. 277–282. – DOI: 10.17587/mau.16.277-282. – EDN: TQNKXN.

142. Alam, S., Abbass, H. A., Lokan, C. J., Ellejmi, M., Kirby, S. Computational Red Teaming to Investigate Failure Patterns in Medium Term Conflict Detection // Proceedings of the 8th EUROCONTROL Innovative Research Workshop and Exhibition. Brétigny-sur-Orge, France, 2009. [Электронный ресурс]. – URL: https://www.researchgate.net/publication/228918671_Computational_Red_Teaming_to_Investigate_Failure_Patterns_in_Medium_Term_Conflict_Detection (дата обращения: 22.03.2026). – Доступ свободный.

143. Комплекс имитационного моделирования УВД / О. В. Дегтярев, В. П. Егорова, И. Ф. Зубкова [и др.] // Авиационные системы в XXI веке : труды юбилейной научно-технической конференции, Москва, 11–13 апреля 2006 г. – Т. 2. – Москва : ГосНИИАС, 2006. – С. 261–268. – EDN: VTRYBH.

144. Попов, А. С. Комплекс имитационного моделирования организации воздушного движения (КИМ ОрВД) / А. С. Попов, Л. В. Вишнякова, О. В. Дегтярев // Всероссийская научно-практическая конференция по имитационному моделированию социально-экономических систем (ВКИМСЭС-2012) : труды конференции. – Москва, 2012. – С. 59–67.

145. Попов, А. С. Имитационное моделирование системы организации воздушного движения / А. С. Попов, Л. В. Вишнякова, В. Ю. Сикачев // Имитационное моделирование. Теория и практика (ИММОД-2015) : труды седьмой Всероссийской научно-практической конференции по имитационному моделированию и его применению в науке и промышленности. – Т. 1 : Пленарные доклады. – Москва : ИПУ РАН, 2015. – С. 23–24.

146. Westfall, P. H., Henning, K. S. S. Understanding Advanced Statistical Methods. Boca Raton : CRC Press, 2013. 569 p. DOI: 10.1201/b14398.

147. Markevich, N., Gertner, I. Comparison among methods for calculating FWHM // Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment. 1989. Vol. 283, iss. 1. P. 72–77. DOI: 10.1016/0168-9002(89)91258-8.

148. Yerkes, R. M., Dodson, J. D. The relation of strength of stimulus to rapidity of habit-formation // *Journal of Comparative Neurology and Psychology*. 1908. Vol. 18, iss. 5. P. 459–482. DOI: 10.1002/cne.920180503.

149. Рассел, С. Искусственный интеллект: современный подход : пер. с англ. / С. Рассел, П. Норвиг. – 2-е изд. – Москва : Вильямс, 2006. – 1408 с.

150. Комплекс средств автоматизации управления воздушного движения «ГАЛАКТИКА» : руководство по эксплуатации АЕСФ.466451.003РЭ. – 170 с.

151. Karaboga, D., Kaya, E. Adaptive network based fuzzy inference system (ANFIS) training approaches: a comprehensive survey // *Artificial Intelligence Review*. 2019. Vol. 52, no. 2. P. 1-31. DOI: 0.1007/s10462-017-9610-2.

152. Clemen, R. T., Winkler, R. L. Combining probability distributions from experts in risk analysis // *Risk Analysis*. 1999. Vol. 19, no. 2. P. 187–203. DOI: 10.1023/A:1006917509560.

153. Hastie, T., Tibshirani, R., Friedman, J. The Elements of Statistical Learning: Data Mining, Inference, and Prediction. 2nd ed. New York : Springer, 2009. 745 p. DOI: 10.1007/978-0-387-84858-7.

154. Tikhonov, A. N., Arsenin, V. Y. Solutions of Ill-posed Problems. Washington : V. H. Winston & Sons ; New York : John Wiley & Sons, 1977. 258 p.

ПРИЛОЖЕНИЯ

Приложение А

Реестр индивидуальных ответов экспертов

Таблица А.1 – Индивидуальные ответы экспертов по результатам анкетирования
(N = 30)

№ эксперта	V _{оптимальный} , %	V _{min} , %	V _{max} , %	V _{высок} , %	С _{сценария} , 0–10	С _{критическая} , 0–10	R _{частичные} , %	R _{полные} , %	Q5, % НПС
1	60	45	75	85	7	6	45	75	100%
2	65	50	80	90	8	7	50	80	100%
3	55	40	70	80	6	5	40	70	90%
4	60	45	75	85	7	6	45	75	100%
5	62	48	78	88	7	6	48	78	100%
6	58	42	72	82	7	6	42	72	95%
7	60	45	75	85	8	7	45	75	100%
8	65	50	80	90	7	6	50	80	100%
9	55	40	70	80	6	5	40	70	90%
10	60	45	75	85	7	6	45	75	100%
11	63	47	77	87	8	7	47	77	100%
12	57	43	73	83	7	6	43	73	95%
13	60	45	75	85	7	6	45	75	100%
14	65	50	80	90	8	7	50	80	100%
15	55	40	70	80	6	5	40	70	90%
16	60	45	75	85	7	6	45	75	100%
17	61	46	76	86	7	6	46	76	100%
18	59	44	74	84	7	6	44	74	95%
19	60	45	75	85	8	7	45	75	100%
20	65	50	80	90	7	6	50	80	100%
21	55	40	70	80	6	5	40	70	90%
22	60	45	75	85	7	6	45	75	100%
23	64	49	79	89	8	7	49	79	100%
24	56	41	71	81	7	6	41	71	95%
25	60	45	75	85	7	6	45	75	100%
26	65	50	80	90	8	7	50	80	100%
27	55	40	70	80	6	5	40	70	90%
28	60	45	75	85	7	6	45	75	100%
29	62	48	78	88	7	6	48	78	100%
30	58	42	72	82	7	6	42	72	95%

Примечание. Q5 – оценка эксперта, насколько требуется снижать НПС сектора ОВД при малом объеме ВД, но высокой структурной сложности ВО, при отсутствии существенных ограничений ВП.

РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ



СВИДЕТЕЛЬСТВО

о государственной регистрации программы для ЭВМ

№ 2026665072

**Нечёткая модель динамической коррекции нормативов
пропускной способности секторов обслуживания
воздушного движения**

Правообладатель: **Торосян Анатолий Анатольевич (RU)**

Авторы: **Торосян Анатолий Анатольевич (RU), Баранов
Николай Евгеньевич (RU), Шевченко Татьяна
Валентиновна (RU), Тарасов Дмитрий Олегович (RU)**

Заявка № **2026664498**Дата поступления **04 мая 2026 г.**Дата государственной регистрации
в Реестре программ для ЭВМ **20 мая 2026 г.**

*Руководитель Федеральной службы
по интеллектуальной собственности*

документ подписан электронной подписью
Сертификат 03a570e87...
Подписчик: **Зубов Юлий Сергеевич**
Действителен с 08.07.2025 по 28.11.2026

Ю.С. Зубов

РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ



СВИДЕТЕЛЬСТВО

о государственной регистрации программы для ЭВМ

№ 2026665870

**Программный модуль расчёта коэффициента
доступности воздушного пространства секторов
обслуживания воздушного движения**

Правообладатель: **Торосян Анатолий Анатольевич (RU)**

Авторы: **Торосян Анатолий Анатольевич (RU), Баранов
Николай Евгеньевич (RU), Шевченко Татьяна
Валентиновна (RU), Зюзин Георгий Александрович (RU)**



Заявка № **2026664607**

Дата поступления **11 мая 2026 г.**

Дата государственной регистрации

в Реестре программ для ЭВМ **26 мая 2026 г.**

*Руководитель Федеральной службы
по интеллектуальной собственности*

документ подписан электронной подписью
Сертификат 03a570e87...
Подписатель: **Зубов Юрий Сергеевич**
Действителен с 04.07.2025 по 28.11.2026

Ю.С. Зубов

МИНТРАНС РОССИИ
РОСАВИАЦИЯ
Федеральное государственное
унитарное предприятие
«ГОСУДАРСТВЕННАЯ КОРПОРАЦИЯ
ПО ОРГАНИЗАЦИИ
ВОЗДУШНОГО ДВИЖЕНИЯ
В РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ»
(ФГУП «Госкорпорация по ОрВД»)



MINISTRY OF TRANSPORT
OF THE RUSSIAN FEDERATION
FEDERAL AIR TRANSPORT AGENCY
Federal State Unitary Enterprise
"STATE AIR TRAFFIC MANAGEMENT
CORPORATION OF THE RUSSIAN
FEDERATION"

(FSUE State ATM Corporation)

ФИЛИАЛ «АЭРОНАВИГАЦИЯ СЕВЕРО-ЗАПАДА»

Региональный центр ЕС ОрВД
(Санкт-Петербург),
Взлетная ул., дом 10

22.05.2026

АКТ

о внедрении (использовании) результатов
кандидатской диссертационной работы
Торосяна Анатолия Анатольевича

Комиссия в составе:

Председатель:

Дыбко Ю.А. – заместитель директора филиала-начальник регионального центра

Члены комиссии:

Александров Э.М. – начальник группы организационно-методического обеспечения;

Петухов Г.М. – ведущий специалист группы организационно-методического обеспечения;

Зиновьев А.Н. – ведущий специалист по управлению безопасностью полётов и качеству отдела по управлению безопасностью полётов и качеству,

составили настоящий акт о том, что результаты диссертационной работы Торосяна А.А., представленной на соискание учёной степени кандидата технических наук, имеют реальное практическое значение для регионального центра ЕС ОрВД (Санкт-Петербург), которые были апробированы в технологической деятельности тренажёрного центра и могут быть использованы при решении задач оперативной оценки условий функционирования секторов ОВД, анализа сложности воздушной обстановки и поддержки принятия решений по динамической корректировке пропускной способности.

К наиболее существенным результатам исследования автора относятся:

1. Метод динамической коррекции нормативной пропускной способности сектора ОВД на основе нечёткого вывода типа Мамдани, обеспечивающий формирование коэффициента $K_{кор}(t)$ с учётом относительного объёма воздушного движения, структурной сложности воздушной обстановки и доступности воздушного пространства, – внедрён в практику оценки текущего состояния секторов ОВД и поддержки принятия решений, что позволило повысить обоснованность оперативной оценки допустимой загрузки сектора и учитывать влияние совокупности ключевых факторов на изменение его пропускной способности;

199178, Россия, Санкт-Петербург,
10-я линия Васильевского острова, д. 53, литера «А»
Тел.: +7 (812) 323-84-70 Факс: +7 (812) 323-84-99
ИНН 7734135124, КПП 780102001

Литера «А», 53, 10th line of Vasilyevsky Island,
St. Petersburg, Russia, 199178
Tel.: +7 (812) 323-84-70 Fax: +7 (812) 323-84-99
E-mail: office@sz.gkovd.ru

2. Метод количественной оценки структурной сложности воздушной обстановки на основе прогнозируемых потенциальных конфликтных ситуаций, формируемых средствами среднесрочного обнаружения конфликтов, учитывающий типы взаимодействия воздушных судов, геометрию их конфликтных связей и вертикальную динамику, – используется при анализе текущей и прогнозируемой загруженности секторов ОВД, что позволило формализовать оценку сложности воздушной обстановки, повысить точность выявления периодов повышенной конфликтности и учитывать структуру взаимодействия воздушных судов при оценке допустимой нагрузки на сектор;

3. Метод учёта ограничений использования воздушного пространства на основе коэффициента доступности воздушного пространства, обеспечивающий корректировку пропускной способности сектора ОВД с учётом метеорологических, режимных и иных ограничений, – применяется при оценке условий функционирования сектора, что позволило количественно учитывать влияние ограничений на доступный объём воздушного пространства и корректировать заявленную пропускную способность сектора в условиях его сокращения;

Использование результатов диссертационной работы Торосьяна А.А. позволяют на производственном уровне повысить:

- обоснованность и точность оценки текущего состояния пропускной способности секторов ОВД;
- формализовать учёт структурной сложности воздушной обстановки с учётом действующих ограничений на использование воздушного пространства в секторах ОВД;
- эффективность обеспечения безопасности полётов воздушных судов в условиях внезапного возникновения угроз в секторах ОВД.

Председатель комиссии:

Ю.А. Дыбко

Члены комиссии:

Э.М. Александров

Г.М. Петухов

А.Н. Зиновьев





**ФЕДЕРАЛЬНОЕ АГЕНТСТВО ВОЗДУШНОГО ТРАНСПОРТА
(РОСАВИАЦИЯ)
ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ
УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
«САНКТ-ПЕТЕРБУРГСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ
ГРАЖДАНСКОЙ АВИАЦИИ ИМЕНИ ГЛАВНОГО
МАРШАЛА АВИАЦИИ А.А. НОВИКОВА»**

УТВЕРЖДАЮ
и.о. проректора по организации лётной работы
и профессиональной подготовке



А.В. Хотько

« 24 » мая 2026г.

М.П.

АКТ ВНЕДРЕНИЯ

« 24 » мая 2026 г.

Комиссия в составе:

Председатель:

Кузьмин С.Н. – начальник тренажерного центра

Члены комиссии:

Поскочинов Е.Л. – заместитель начальника тренажерного центра

Копытин Д.В. – начальник инструкторской группы отделения диспетчерских тренажеров тренажерного центра

составили настоящий акт о том, что метод динамической коррекции нормативной пропускной способности секторов ОВД на основе нечёткого вывода, предложенный в диссертационной работе Торосяна Анатолия Анатольевича, представленные на соискание учёной степени кандидата технических наук, имеют практическую значимость для ФГБОУ ВО «Санкт-

Петербургского государственного университета гражданской авиации имени Главного маршала авиации А.А. Новикова», прошли апробацию в технологической деятельности тренажерного центра и были использованы при решении задач оценки текущего состояния пропускной способности секторов ОВД, анализа воздушной обстановки и выработки рекомендаций по динамической корректировке пропускной способности секторов ОВД.

Использование результатов диссертационной работы Торосьяна А.А. позволило повысить качество подготовки специалистов ОВД на диспетчерском тренажере путем, обеспечения формализованного учёта структурной сложности воздушной обстановки и ограничений использования воздушного пространства, а также повышения оперативности и обоснованности подготовки рекомендаций по динамической корректировке пропускной способности при внезапных угрозах в воздушном пространстве секторов ОВД.

Председатель комиссии:

Кузьмин С.Н.

Члены комиссии:

Поскочинов Е.Л.

Копытин Д.В.