

Федеральное государственное автономное образовательное
учреждение высшего образования
«Московский физико-технический институт
(национальный исследовательский университет)»
(МФТИ, Физтех)

На правах рукописи



Афанасьева Марина Алексеевна

**МЕТОДИКА ДИНАМИЧЕСКОГО ПОСТРОЕНИЯ МАРШРУТА
РУЛЕНИЯ ВОЗДУШНОГО СУДНА НА ОСНОВЕ ИНТЕГРАЦИИ
ЦИФРОВЫХ ДАННЫХ И МОДЕЛИ АЭРОДРОМНОЙ
ИНФРАСТРУКТУРЫ**

1.2.2. Математическое моделирование, численные методы и комплексы
программ (технические науки)

ДИССЕРТАЦИЯ

на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Научный руководитель
академик РАН,
д.т.н., профессор Желтов С.Ю.

Москва - 2026

ОГЛАВЛЕНИЕ

ВВЕДЕНИЕ.....	4
РАЗДЕЛ 1. ОБОСНОВАНИЕ АКТУАЛЬНОСТИ ТЕМЫ ИССЛЕДОВАНИЙ. ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ.....	11
1.1 Анализ требований нормативных документов по обеспечению безопасности движения ВС в зоне аэродрома	14
1.2 Сравнительный анализ существующих подходов и способов реализации задачи движения ВС по аэродрому	16
1.3 Обоснование интеграции цифровых сообщений от диспетчера УВД и базы данных аэродромной инфраструктуры	27
1.4 Постановка задачи исследования	29
Выводы по главе 1	31
РАЗДЕЛ 2. РАЗРАБОТКА МЕТОДИЧЕСКОГО АППАРАТА ДИНАМИЧЕСКОГО ПОСТРОЕНИЯ МАРШРУТА РУЛЕНИЯ ВС НА ОСНОВЕ КОМПЛЕКСИРОВАНИЯ ДАННЫХ ЦИФРОВОГО ОБМЕНА И СТРУКТУРИРОВАННЫХ НАВИГАЦИОННЫХ ДАННЫХ	34
2.1 Разработка формализованной модели аэродромной инфраструктуры на основе цифровых данных аэродромной инфраструктуры.....	34
2.1.1 Пространственные объекты аэродромной картографической базы данных	35
2.1.2 Формализация геометрии с помощью ASRN	38
2.2 Разработка алгоритмов интерпретации структурированных цифровых сообщений диспетчера УВД	41
2.2.1 Разработка алгоритмов интерпретации структурированных цифровых сообщений диспетчера УВД.....	41
2.2.2 Downlink сообщения	45
2.2.3 Uplink сообщения	49
2.3 Разработка методики динамического построения маршрута руления ВС на основе комплексирования цифровых данных с использованием модифицированного А-алгоритма.....	55
2.3.1 Комплексирование данных CPDLC и AMDB: формализация сопоставления «семантика - топология»	56
2.3.2 Модифицированный А-алгоритм.....	57
2.4 Разработка рекомендаций по информационной интеграции сформированного маршрута руления в бортовые средства индикации и систему автоматического управления ВС.....	62
2.4.1 Информационная модель	62
2.4.2 Рекомендации по интеграции маршрута руления для типовых CPDLC-сообщений D-TAXI.....	65

Выводы по главе 2.....	77
РАЗДЕЛ 3 РЕАЛИЗАЦИЯ РАЗРАБОТАННЫХ АЛГОРИТМОВ В БОРТОВЫХ СИСТЕМАХ ВС, ОЦЕНКА ИХ ЭФФЕКТИВНОСТИ	79
3.1 Реализация динамического маршрута руления ВС по аэродрому на средствах индикации экипажу на базе стенда прототипирования кабины экипажа МС-21	79
3.1.1. Стенд прототипирования кабины экипажа как инструмент исследования	79
3.1.2. Архитектура и компонентная структура модуля «Функция движения по поверхности аэродрома».....	81
3.1.3. Взаимодействие модуля с бортовыми системами	82
3.1.4. Индикация маршрута на навигационном дисплее	85
3.2 Экспериментальная оценка эффективности ручного режима (советующая система).....	86
3.2.1 Методика экспериментальных исследований	89
3.2.2 Информационное обеспечение варианта А	96
3.2.3 Информационное обеспечение варианта Б.....	102
3.2.4 Результаты экспериментальной оценки ручного режима	109
3.2.5. Статистическая обработка и интерпретация результатов	114
3.2.6. Интегральный критерий качества человеко-машинного интерфейса... ..	115
3.2.7. Выводы по ручному режиму	116
3.3 Реализация динамического маршрута руления ВС по аэродрому в системе автоматического управления на базе комплексного полунатурного стенда с моделью МС-21	117
3.3.1. Комплексный полунатурный стенд с моделью МС-21	118
3.3.2. Формирование маршрута для автоматического управления.....	118
3.3.3. Сопровождение маршрута в автоматическом режиме.....	120
3.4 Экспериментальная оценка эффективности автоматического режима руления	122
3.4.1. Методика оценки автоматического режима.....	122
3.4.2. Результаты экспериментальной оценки автоматического режима.....	124
3.4.3. Сравнительный анализ ручного и автоматического режимов	129
3.4.4. Выводы по автоматическому режиму.....	131
3.5. Общие выводы по экспериментальным исследованиям.....	131
Выводы по разделу 3	134
ЗАКЛЮЧЕНИЕ	136
СПИСОК СОКРАЩЕНИЙ И УСЛОВНЫХ ОБОЗНАЧЕНИЙ	140
СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ	141

ВВЕДЕНИЕ

Актуальность темы. Для осуществления навигации по поверхности аэродрома пилоты обычно используют различные визуальные ориентиры, включая маркировку взлетно-посадочных полос, наземные указатели и светосигнальные системы, рекомендации диспетчерских служб, передаваемые посредством радиообмена, а также схемы аэродромов, представленные в форме бумажных или электронных карт.

Диспетчер управления воздушным движением (УВД) выдает указания для движения по маршруту, используя стандартную фразеологию и уникальные наименования участков маршрута. Процедуры использования действующих систем УВД базируются преимущественно на принципе взаимной видимости, что позволяет обеспечивать необходимые интервалы разделения между воздушными судами и/или наземными транспортными средствами на территории аэродрома. Тем не менее наблюдается рост числа авиационных происшествий и инцидентов во время движения воздушных судов и транспортных средств по территории аэродрома. Сопутствующие этому факторы связаны с возрастающим количеством операций, выполняемых в условиях ограниченной видимости, с постоянным увеличением интенсивности воздушного движения, сложностью инфраструктуры аэродромов, а также разнообразием методов и процедур повышения пропускной способности аэродромов. Следовательно, безопасность наземных операций на аэродромах имеет большое значение, в том числе и со стороны бортового оборудования, особенно при высоких нагрузках на пилота в сложных условиях, которые могут привести к человеческим ошибкам, вследствие которых возможны авиакатастрофы [84].

Таким образом, традиционные подходы, основанные преимущественно на голосовой связи и статичных визуальных материалах, недостаточно поддерживают точную геопривязку указаний и их однозначную интерпретацию, что увеличивает количество ошибок со стороны экипажа и усложняет координацию при высокой загрузке. Без интеграции современных средств цифрового обмена и структурированных навигационных данных невозможно обеспечить требуемую согласованность

между сообщением диспетчера, положением ВС на местности и актуальной конфигурацией аэродромной инфраструктуры.

Целью работы является разработка математической модели, численных методов и комплекса программ для автоматического построения маршрута руления воздушного судна в зоне аэродрома на основе интеграции цифровых команд от диспетчера УВД (CPDLC) и данных аэродромной инфраструктуры (AMDB), обеспечивающая повышение безопасности и эффективности наземного движения.

Для достижения указанной цели были поставлены и решены **задачи**:

1. Проведен анализ проблемы безопасности наземного движения ВС в зоне аэродрома, систематизированы типы авиационных инцидентов, связанных с наземным движением, выполнен обзор существующих бортовых средств ситуационной осведомленности экипажа и выявлены их функциональные ограничения, обосновывающие необходимость разработки нового математического и алгоритмического обеспечения.
2. Исследована нормативно-техническая база цифрового обмена данными CPDLC и стандарты описания аэродромной инфраструктуры AMDB и разработана формализованная постановка задачи совместного использования этих разнородных источников данных для построения маршрутов руления.
3. Разработана математическая модель аэродромной поверхности в виде ориентированного графа (Aerodrome Surface Route Network — ASRN), включающая формализацию топологии, типизацию узлов и ребер, а также весовых коэффициентов, отражающих эксплуатационные ограничения и инфраструктуру аэродрома.
4. Разработан метод формализованного описания и интерпретации структурированных сообщений CPDLC сервиса D-TAXI, обеспечивающий декодирование команд диспетчера и их однозначное отображение на элементы разработанной модели ASRN.
5. Разработан численный метод поиска оптимального маршрута руления, представляющий собой модификацию алгоритма A^* с многокритериальной эвристической функцией. Метод учитывает соответствие команде CPDLC, ограничения по углам поворота, статус покрытия и весовые характеристики элементов модели ASRN.

6. Реализован комплекс проблемно-ориентированных программ, включающий: библиотеку кодирования/декодирования CPDLC-сообщений (реализация методов интерпретации данных), модуль поиска маршрута на графе (реализация численного метода), и модуль визуализации (интеграция в бортовое ПО).

7. Выполнена верификация и апробация разработанных методов и программного комплекса на функциональных стендах прототипирования, включая экспериментальную оценку корректности и вычислительной эффективности предложенных алгоритмов.

Объект исследования - процесс математического моделирования и алгоритмизации задач наземной навигации воздушных судов на основе цифровых данных.

Предмет исследования - математические модели, численные методы и алгоритмы автоматического построения оптимального маршрута руления, реализованные в виде комплекса программ для бортового оборудования гражданской авиации.

Методы исследования. В работе применены методы системного анализа, формализации данных, алгоритмической разработки, экспериментальных исследований, численные методы оптимизации и компьютерного моделирования. Разработка программного обеспечения (ПО) осуществлена на языке C/C++ с использованием стандартных библиотек для обработки данных AMDB, обработки сообщений CPDLC и реализации алгоритмов поиска оптимального пути.

Научная новизна диссертационной работы заключается в следующем:

1. Разработана новая математическая модель аэродромной инфраструктуры (ASRN), отличающаяся от известных интеграцией семантики команд CPDLC в весовую функцию ребер графа, что позволяет формализовать задачу поиска маршрута как задачу оптимизации на графе с динамически изменяемыми ограничениями.
2. Разработан и обоснован новый численный метод на базе модифицированного алгоритма A^* , отличающийся использованием многокритериальной эвристической функции, учитывающей не только геометрическую длину пути, но и штрафные коэффициенты за несоответствие типу ВС, статусу ВПП и сложность маневрирования через углы поворота, что обеспечивает соблюдение правил безопасности на этапе планирования.

3. Разработан метод верификации и интерпретации цифровых команд D-TAXI, основанный на отображении формализованных сообщений ASN.1 PER на топологические элементы модели ASRN, что обеспечивает однозначность исполнения указаний диспетчера и позволяет выявлять коллизии на этапе обработки команды.
4. Создан комплекс проблемно-ориентированных программ, реализующий предложенные математические модели и численные методы, отладка и апробация которого проведена на стендах полунатурного моделирования, что подтверждает его работоспособность и эффективность в режиме реального времени.

Научные результаты, выносимые на защиту:

1. Математическая модель аэродромной поверхности в виде ориентированного взвешенного графа ASRN (Aerodrome Surface Route Network), отличающаяся от известных моделей (ARINC 816, EUROCAE ED-136) тем, что в весовую функцию ребер графа интегрированы семантика цифровых команд CPDLC и динамические эксплуатационные ограничения воздушного судна, что позволяет формализовать задачу поиска маршрута как оптимизационную задачу на графе с изменяемыми в реальном времени параметрами.
2. Метод формализации и интерпретации структурированных цифровых сообщений CPDLC сервиса D-TAXI, отличающийся от известных подходов (стандарт RTCA DO-351B, реализация FANS/ATN) тем, что обеспечивает автоматическое семантическое отображение элементов сообщения ASN.1 PER на топологические элементы графа ASRN и верификацию соответствия команды текущей конфигурации аэродрома, что устраняет неоднозначность интерпретации указаний диспетчера и минимизирует риски ошибок экипажа.
3. Численный метод с применением модифицированного алгоритма A* динамического построения оптимального маршрута руления, отличающийся от известных реализаций алгоритмов поиска на графах применением многокритериальной эвристической функции, интегрирующей топологические ограничения команды CPDLC, геометрические характеристики траектории, статус элементов покрытия и

эксплуатационные ограничения типа воздушного судна, что обеспечивает построение маршрута, обеспечивающего соблюдение нормативных требований безопасности и эксплуатационных ограничений в реальном масштабе времени.

4. Комплекс проблемно-ориентированных программ, реализующий предложенные математические модели и численные методы, отличающийся от известных реализаций систем АММ и библиотек CPDLC тем, что объединяет в единой информационной структуре модули декодирования сообщений D-TAXI, математическую модель ASRN и реализацию модифицированного A*-алгоритма, обеспечивая сквозную обработку данных от приема цифровой команды до визуализации маршрута на навигационном дисплее и его интеграции с системой автоматического управления воздушного судна.

5. Результаты экспериментальной апробации разработанных методов и программного комплекса, полученные на полунатурном стенде прототипирования кабины экипажа самолета МС-21 с участием пилотов, что подтверждает достоверность математических моделей, сходимость и вычислительную эффективность численных методов, а также надежность функционирования программного обеспечения в режиме реального времени и при экспертном оценивании человеко-машинного интерфейса.

Практическая значимость. Разработанный комплекс программ и реализованные в нем математические методы позволяют повысить безопасность и эффективность наземного движения за счет автоматизации процесса планирования маршрута и снижения влияния человеческого фактора. Предложенные математические модели и численные методы универсальны и могут быть адаптированы для различных типов воздушных судов и аэродромов, а также служить основой для развития перспективных систем автоматического наземного движения.

Основные результаты диссертационной работы внедрены в деятельность ФАУ «ГосНИИАС» и использованы при выполнении научно-исследовательских и опытно-конструкторских работ.

В рамках НИР «СГС Т2.2» внедрены алгоритм построения оптимального маршрута руления воздушного судна на графовой модели аэродромной инфраструктуры и алгоритмы интерпретации структурированных команд диспетчера УВД, поступающих по каналу цифрового обмена данными. В рамках НИР «СГС Т3» внедрены решения, обеспечивающие передачу сформированного маршрута руления и связанных с ним управляющих параметров в систему автоматического управления воздушным судном для реализации функций автоматизированного сопровождения движения по аэродрому. В НИОКР «ИКБО-ИМА» использованы разработанные алгоритмы формирования и обработки маршрутной информации для отображения экипажу на бортовых средствах индикации, включая представление маршрута руления, объектов аэродромной инфраструктуры и цифровых диспетчерских указаний. В СЗР ЦАИ в составе программного обеспечения «SmartSky» внедрены программные средства передачи результатов работы алгоритмов построения маршрута руления на средства индикации экипажа.

Внедрение указанных результатов подтверждается соответствующими актами о внедрении.

Результаты исследования готовы к использованию в опытно-конструкторских работах по созданию бортового оборудования нового поколения.

Апробация работы. Основные положения работы апробированы на следующих конференциях:

1. Международная научно-техническая конференция, посвященная 100-летию отечественной гражданской авиации (Москва, 2023)
2. XIV Всероссийское совещание по проблемам управления (Москва, 2024)
3. Всероссийская научно-практическая онлайн-конференция с международным участием «Интеллектуальные технологии в эргодизайне и когнитивных науках» (Брянск, 2025)
4. XVIII Всероссийская мультиконференция по проблемам управления (Тула, 2025)

5. VI Всероссийская научно-техническая конференция «Моделирование авиационных систем» (Москва, 2025)

Также ключевые результаты работы опубликованы в виде:

- 3 статьи в журналах, входящих в перечень рецензируемых научных изданий Высшей аттестационной комиссии при Министерстве науки и высшего образования Российской Федерации;
- 5 тезисов в изданиях, индексируемых в Российском индексе научного цитирования;
- 1 патент на изобретение;
- 3 свидетельства о государственной регистрации программы для ЭВМ.

Личный вклад соискателя. Все представленные в диссертации положения получены и изложены лично автором, включая теоретические выводы, практические решения, программно-алгоритмическое обеспечение и результаты тестирования. **Структура и объем работы.** Работа состоит из введения, трех разделов, заключения, списка литературы, изложенных на 150 страницах. Работа содержит 22 рисунка и 18 таблиц. Список литературы содержит 84 наименования.

РАЗДЕЛ 1. ОБОСНОВАНИЕ АКТУАЛЬНОСТИ ТЕМЫ ИССЛЕДОВАНИЙ. ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

В соответствии с положениями Глобального плана обеспечения безопасности полетов [1], повышение уровня безопасности при осуществлении операций на ВПП признано одним из приоритетных направлений развития авиационной безопасности на глобальном уровне. В нормативно-методическом документе ИКАО, посвященном предотвращению несанкционированного занятия ВПП [2], содержится рекомендация по необходимости внедрения национальными органами гражданской авиации комплексных программ по минимизации риска несанкционированных занятий активной ВПП. На основе анализа итоговых отчетов о расследовании авиационных происшествий и инцидентов, связанных с несанкционированным занятием ВПП, а также с учетом требований действующего законодательства Российской Федерации и рекомендаций Международной организации гражданской авиации, Федеральным агентством воздушного транспорта разработана система мероприятий по профилактике и предотвращению несанкционированных выездов на активные ВПП, утвержденная приказом от 6 февраля 2017 г. № 69-П.

Высокая актуальность данного направления обусловлена рядом факторов. Во-первых, операции на ВПП и руление на аэродроме относятся к одним из критических и энергоемким фазам полета, выполняемым на с высокой степенью взаимодействия системы «экипаж-диспетчер УВД» с наземной инфраструктурой. Во-вторых, в условиях непрерывного роста интенсивности воздушного движения на крупных аэродромах совокупность рисков, связанных с человеческим фактором, технической надежностью и организацией аэродромного обслуживания, требует постоянного совершенствования методов профилактики и минимизации опасностей [3].

Безопасность на ВПП (Runway Safety) – это авиационные происшествия, связанные с выкатываниями, грубыми посадками, касанием земли крылом, фюзеляжем, рулевым винтом (для вертолетов), несанкционированными выездами на ВПП, инфраструктурой аэродромов (состояние ВПП и перрона, разметка, маршруты руления и т.п.), столкновения с птицами. Авиационные инциденты, относящиеся к

безопасности на ВПП, определенные ИКАО [4] и Федеральным агентством воздушного транспорта (Росавиация), представлены в Таблица 1.1.

Таблица 1.1 – Категории авиационных инцидентов, относящиеся безопасности на ВПП

Категория авиационного инцидента	Определение
Conventional Take-off and Landing	Столкновение с препятствием (препятствиями) при взлете или посадке
Ramp	Наземное обслуживание
Navigation	Ошибки в навигации
Runway Incursion	Несанкционированное занятие рабочей ВПП
Runway Excursion	Выкатывания за пределы ВПП при взлете или посадке
Undershoot/Overshoot	Посадки с недолетом или перелетом ВПП
Abnormal Runway Contact	Грубые посадки, а также случаи касания ВПП хвостовой частью фюзеляжа, крылом или двигателем
Aerodrome	Инфраструктура аэродрома
Loss of Control – Ground	Случаи потери управляемости воздушным судном при движении по земле, которые не связаны с отказами систем воздушного судна
Bird	Столкновение воздушных судов с птицами
Wild	Дикие животные

Согласно данным Росавиации, инциденты, связанные с процедурами на взлетно-посадочных полосах, продолжают оставаться одним из наиболее частых видов происшествий на аэродромах. За последние десять лет в России было зарегистрировано свыше 100 случаев столкновений воздушных судов при выполнении маневров руления или пересечения взлетно-посадочных полос. В 2019 году Росавиацией было отмечено, что примерно 30% всех авиационных инцидентов в стране происходят непосредственно в зоне аэродрома [23 - 25].

На Рисунок 1.1 представлены основные группы причин авиационных инцидентов в гражданской авиации на территории Российской Федерации за 2015 – 2020

года. Потеря управления в полете (Loss of Control in Flight) — это авиационные происшествия, связанные с попаданием в сложное (необычное) пространственное положение, сваливание, попадание в режим вихревого кольца, перезатяжение несущего винта (для вертолетов). Столкновение с землей в управляемом полете (Controlled flight into terrain) – это авиационные происшествия, связанные со столкновением с землей (водой) в управляемом полете, преждевременным снижением при посадке, нарушением эксплуатационного минимума, потерей ориентировки в снежном вихре (для вертолетов). Из Рисунок 1.1 видно, что наибольшее количество авиационных инцидентов (авиакатастроф и авиапроисшествий) происходит именно по теме «Безопасность на ВПП».

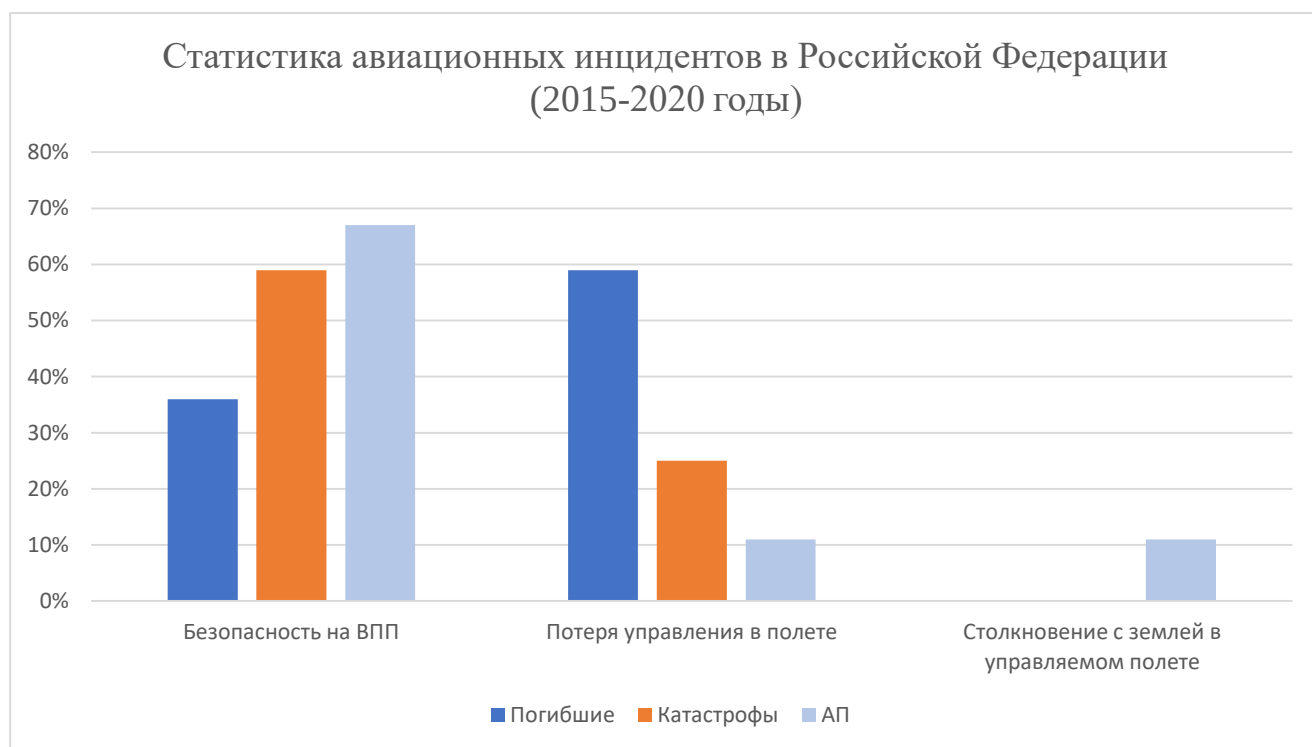


Рисунок 1.1 – Статистика авиационных инцидентов в Российской Федерации

Основными причинами инцидентов на ВПП и в зоне аэродрома являются, согласно работам [6 - 9]:

- человеческий фактор (ошибки авиадиспетчеров, ошибки пилотов: недостаточная осведомленность об аэродроме, недостаток связи в следствии нагруженного трафика) – 60% от всех авиационных инцидентов в зоне аэродрома;

- недостаточное освещение и маркировка (плохая видимость) – 15% от всех авиационных инцидентов в зоне аэродрома;

В работах [10 - 15] дополнительно рассматриваются следующие причины:

- нарушения процедур и регламентов (плохая чистка снега) – 5% от всех авиационных инцидентов в зоне аэродрома;
- технические неполадки (неисправность оборудования) – 20% от всех авиационных инцидентов в зоне аэродрома.

Официальное изучение и систематизация инцидентов, связанных с движением воздушных судов на аэродромах, начались около 40 лет назад, в значительной степени под влиянием ряда крупных авиационных происшествий. Одним из первых и наиболее значимых исследований в этой области стал анализ авиакатастрофы, произошедшей 27 марта 1977 года в аэропорту Лос-Родос на острове Тенерифе. Это событие, ставшее крупнейшей катастрофой в истории гражданской авиации, было связано с несанкционированным занятием рабочей взлетно-посадочной полосы. В условиях густого тумана на ВПП столкнулись два самолета Boeing 747, принадлежащие авиакомпаниям KLM и Pan American. Причинами катастрофы стали ошибочная команда диспетчера и несогласованные действия экипажей, что привело к гибели 583 человек [16]. Эта авиакатастрофа стала катализатором для специального расследования с целью изучения отдельных инцидентов на ВПП, чтобы определить их основные причины и рекомендовать соответствующие меры по исправлению положения. По итогам изучения исследователи составили список выводов и рекомендаций по безопасности полетов в зоне аэродрома. Среди их выводов была необходимость в более четких разметках структуры аэродромов, улучшении контроля со стороны службы УВД и пересмотре процедур обучения летного состава и диспетчерских служб.

1.1 Анализ требований нормативных документов по обеспечению безопасности движения ВС в зоне аэродрома

Система современного нормативно-правового регулирования в области авиационной безопасности в Российской Федерации строится на трехуровневой основе,

включающей международные договоренности, общепринятые отраслевые стандарты и национальное законодательство.

1. Документы ИКАО.

Основополагающую роль в установлении требований к организации диспетчерского обслуживания в зоне аэродрома и регламентации коммуникационных процедур между экипажем и диспетчерской службой движения играет документ ИКАО [42]. Данный документ устанавливает единые международные стандарты для организации воздушного движения и определяет обязательные процедуры взаимодействия между участниками процесса управления воздушным движением и экипажами воздушных судов.

2. Международные стандарты отрасли.

Система требований к системам передачи данных, оборудованию и инфраструктуре аэродромов определяется следующим набором международных стандартов:

- Для систем цифровой коммуникации применяются стандарты EUROCAE ED-110B, определяющий требования интероперабельности ATN Baseline 1, RTCA DO-290, устанавливающий требования безопасности и характеристик сервисов передачи данных УВД в континентальном воздушном пространстве, а также RTCA DO-351B, регламентирующий требования, к совместимости бортовых и наземных средств цифрового обмена данными УВД, обеспечивающей корректную передачу, прием и интерпретацию структурированных CPDLC-сообщений [43 - 46].
- Для аэродромной инфраструктуры и картографирования используются стандарты RTCA DO-272D, RTCA DO-291C и RTCA DO-342, определяющие соответственно требования к AMDB, правила обмена аэродромными данными и процедуры верификации и валидации AMDB/ASRN в задачах маршрутизации. Формат встраиваемого представления AMDB для бортовых систем определяется спецификацией ARINC 816-2 [47 - 51].

3. Системе управления безопасностью полетов (СУБП) оператора аэродрома, которая устанавливает требования к идентификации опасностей и управлению рисками безопасности на этапе наземного обслуживания ВС.

Таким образом, совокупность вышеуказанных нормативных документов предъявляет следующий набор принципиальных требований к организации безопасности полетов:

- Обеспечение непрерывного контроля. Необходимость осуществления постоянного надзора за движением воздушного судна по установленным маршрутам с немедленной передачей информации об обнаруженных отклонениях экипажу с целью обеспечения осведомленности и своевременного принятия корректирующих мер;
- Снижение влияния человеческого фактора. Внедрение механизмов автоматизации передачи маршрутной информации и технических средств визуализации навигационных данных для снижения вероятности ошибок персонала;
- Стандартизация операционных процедур. Установление унифицированных стандартных операционных процедур, особенно критичных при осуществлении полетов в условиях пониженной видимости и при высокой интенсивности движения на аэродроме;
- Повышение ситуационной осведомленности. Интеграция информационных потоков от наземной системы управления движением (диспетчер УВД) с данными, содержащимися в цифровой модели аэродромной инфраструктуры, для формирования у экипажа адекватного представления о текущем состоянии аэродрома и полученных диспетчерских указаниях.

1.2 Сравнительный анализ существующих подходов и способов реализации задачи движения ВС по аэродрому

На современном этапе развития авиационной техники существуют несколько подходов к решению задачи безопасного и эффективного движения ВС в зоне аэродрома.

Если говорить про **традиционный подход**, то к нему относятся голосовая коммуникация и ручной ввод данных. В классической схеме взаимодействия экипаж получает указание о маршруте руления посредством голосовой связи от диспетчера УВД. Экипаж затем вручную вводит полученную информацию в систему самолетодвижения (FMS, Flight Management System) или на дисплей навигации (ND, Navigation Display), а иногда и запоминают полученную информацию, следуя «на руках» по маршруту руления.

Основные недостатки такого подхода:

1. Лингвистические ошибки

Передача информации голосовым каналом сопряжена с высокой вероятностью возникновения ошибок восприятия речи экипажем, что обусловлено совокупностью факторов окружающей среды в кабине экипажа, включая интенсивный радиотрафик, фоновый акустический шум работающих двигателей и систем авионики, а также речевые особенности диспетчеров, работающих на английском языке, который не является их родным языком.

2. Повышенная когнитивная нагрузка на экипаж

Необходимость одновременного восприятия, расшифровки, запоминания и ручного ввода поступающей информации в бортовые системы приводит к значительному увеличению когнитивной нагрузки на членов экипажа, что неизбежно отвлекает их внимание от основного процесса мониторинга полетного плана и контроля окружающей обстановки в зоне аэродрома, особенно критичного при выполнении наземного движения и маневров на малых высотах.

3. Отсутствие автоматизированной проверки соответствия маршрута

Система голосовой коммуникации не предусматривает встроенного механизма для автоматической верификации соответствия устно переданного маршрута руления фактической конфигурации аэродромной инфраструктуры, что приводит к возможности реализации ошибочного маршрута, несовместимого с имеющимся состоянием ВПП, рулежных дорожек или стоянок.

4. Асинхронность и задержки в передаче информации

Пространственное разделение между диспетчерским центром и экипажем, а также временные задержки, присущие голосовому каналу коммуникации, приводят к возможности рассинхронизации действий между наземными системами управления движением и бортовым оборудованием воздушного судна, создавая риск возникновения конфликтов при выполнении предыдущих команд и получении новых указаний.

5. Ограниченная эффективность при высокой плотности движения

В условиях максимальной интенсивности использования аэродромной инфраструктуры традиционный способ передачи информации через голосовой канал становится узким местом (bottleneck) системы управления воздушным движением, приводя к возрастанию времени занятости радиочастотного канала, увеличению очередей на получение разрешений на взлет и посадку, и как следствие, к снижению пропускной способности аэродрома.

Современный подход охарактеризован тенденцией снижения количества происшествий в зоне аэродрома с помощью внедрения специализированных программных продуктов в бортовое оборудование воздушного судна. Эти программные решения ориентированы на обеспечение обмена данными в режиме реального времени, что позволяет пилотам и диспетчерам лучше координировать свои действия. В настоящее время существуют несколько комплексов программных средств для бортового оборудования в целях предотвращения конфликтов в зоне аэродрома и повышения информационной осведомленности у пилотов.

В самолетах A350/A380 от компании «Airbus» внедрен комплекс программного обеспечения «Безопасность на ВПП», включающий в себя следующие функции [17 - 19]:

- движущаяся карта аэропорта (Airport Moving Map);
- система предупреждения о положении относительно ВПП (Runway Awareness and Advisory System);
- функция оповещения на поверхности (Surface Alerting Function);

- система предотвращения выкатывания за пределы ВПП (Runway Over-run Prevention System).

Индикация «Движущаяся карта аэропорта» в кадре Навигационного дисплея (Navigation Display) представлена на Рисунок 1.2, которая представляет из себя цифровую карту с использованием данных AMDB, представляющую пилотам визуализацию текущего положения и направления самолета на аэродроме в реальном времени (фиолетовый символ воздушного судна). Эта технология отображает детали аэродрома, включая доступные ВПП, рулежные дорожки, зоны стоянок и терминалы, положение воздушного судна на карте аэродрома, индикацию сообщений состояния функции, информацию об аэродроме (код ИКАО), что значительно улучшает ситуационную осведомленность пилотов и помогает избежать ошибок при движении по аэродрому. Также функция дает возможность настройки маршрута руления ввиду ограничений на аэродроме (Notice to Airmen, Notice to Air Men, Notice to Airman or Notice to Air Missions - NOTAM), снижает риск навигационных ошибок на сложных аэродромах и непреднамеренного выезда на ВПП. В 2013 году исследование Федерального управления гражданской авиации США показало, что использование этой системы снижает вероятность навигационных ошибок в зоне аэродрома.

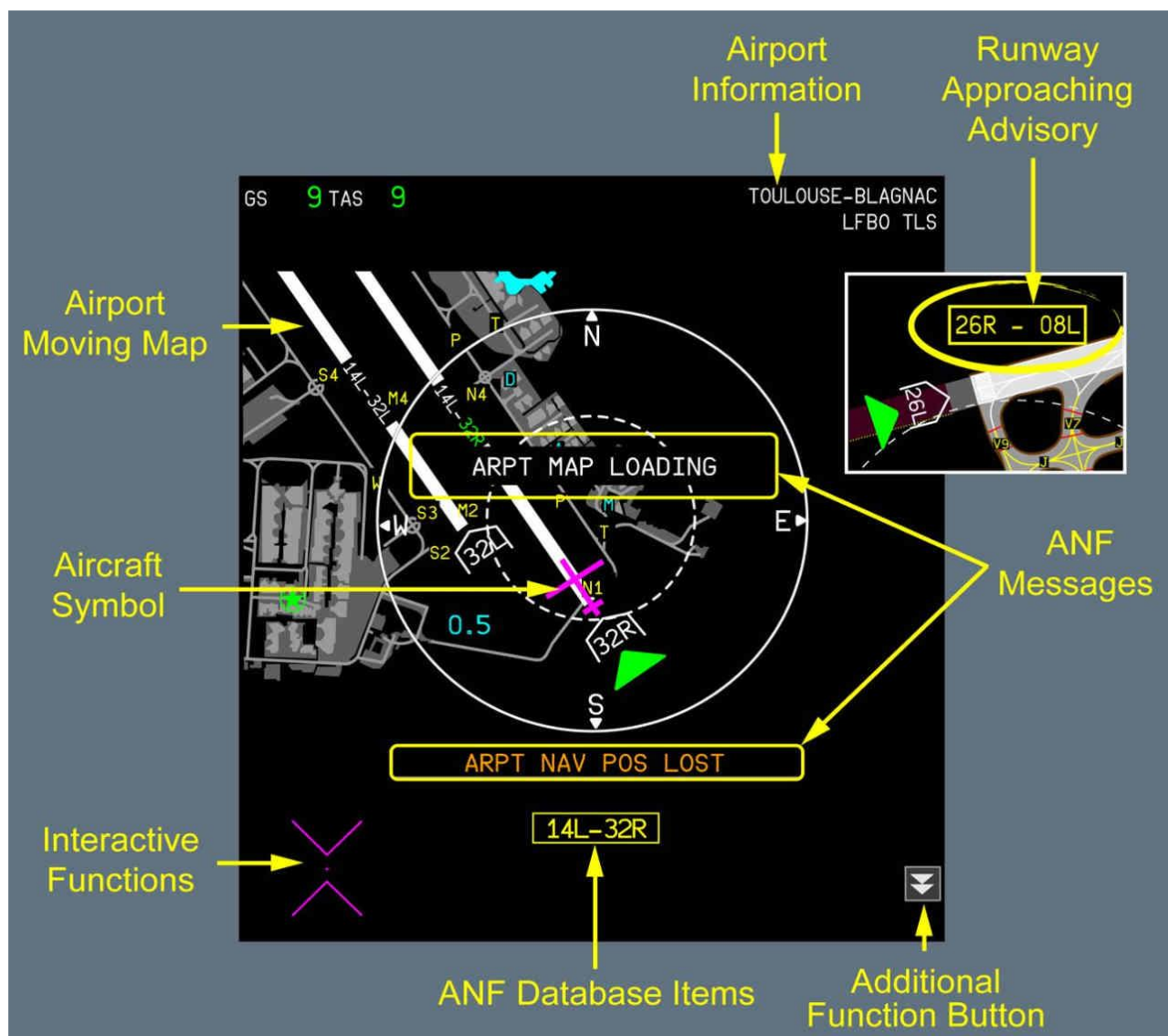


Рисунок 1.2 – Кадр функции «Движущаяся карта аэропорта» в навигационном дисплее в ВС Airbus A350

Кадр системы предупреждений о положении относительно ВПП на навигационном дисплее представлена на Рисунок 1. 3. На карте аэродрома уведомление о приближении к ВПП (Runway Approaching Advisory), указывающее на активную взлетно-посадочную полосу (в данном случае 26R – 08L, которая выделена желтым цветом). В верхней части рисунка выделено уведомление "RWY AHEAD" (перевод: «ВПП впереди») на главном пилотажном дисплее (Primary Flight Display), предупреждающее экипаж о том, что самолет приближается к ВПП. Ниже можно увидеть карту аэродрома с маршрутом руления, ВПП и позиционированием самолета, обозначенным фиолетовым символом ВС. Полоса 26R – 08L выделена желтым цве-

том, указывая на текущий курс и приближение ВС к началу ВПП. Система предупреждения о положении относительно ВПП используется в дополнение к системе АММ. Целью этой технологии является визуальная подсказка при приближении к ВПП, что дает возможность контроля движения. Индикация, предупреждающая о выезде на ВПП, дублируется на навигационный дисплей, главный пилотажный дисплей и головной дисплей (Head Up Display). Система разработана для повышения ситуационной осведомленности летного состава, тем самым снижая риски нарушения правил движения на ВПП, путаницы на ВПП и отклонений от ВПП.

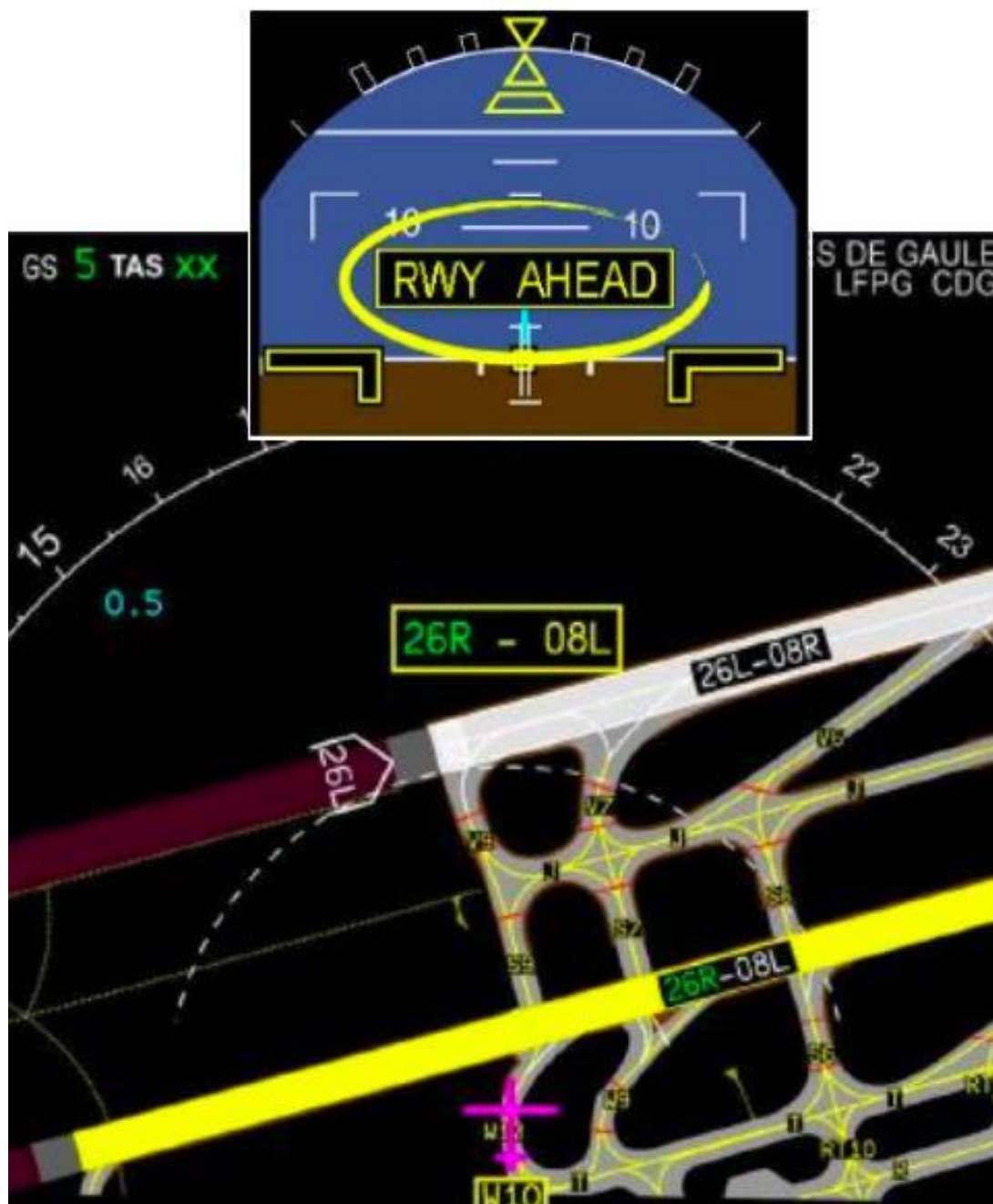


Рисунок 1. 3 – Кадр системы предупреждений о положении относительно ВПП на навигационном дисплее в ВС Airbus A350

Кадр функции оповещения на поверхности на главном пилотажном дисплее представлена на Рисунок 1.4. Функция оповещения на поверхности предупреждает пилотов о рисках столкновений с другими воздушными судами на ВПП. Используя данные, непрерывно передаваемые ВС об их местоположении, высоте и скорости – с помощью технологии автоматическое зависимое наблюдение-вещание (Automatic Dependent Surveillance – Broadcast) – она непрерывно отслеживает окру-

жающее движение на ВПП. Если во время взлета или посадки самолета обнаруживается опасность столкновения с другими ВС, система выдает предупреждение на главное пилотажное дисплее «TRAFFIC ON RUNWAY» (перевод: «движение по ВПП»). Функция также может индицироваться на навигационном дисплее.

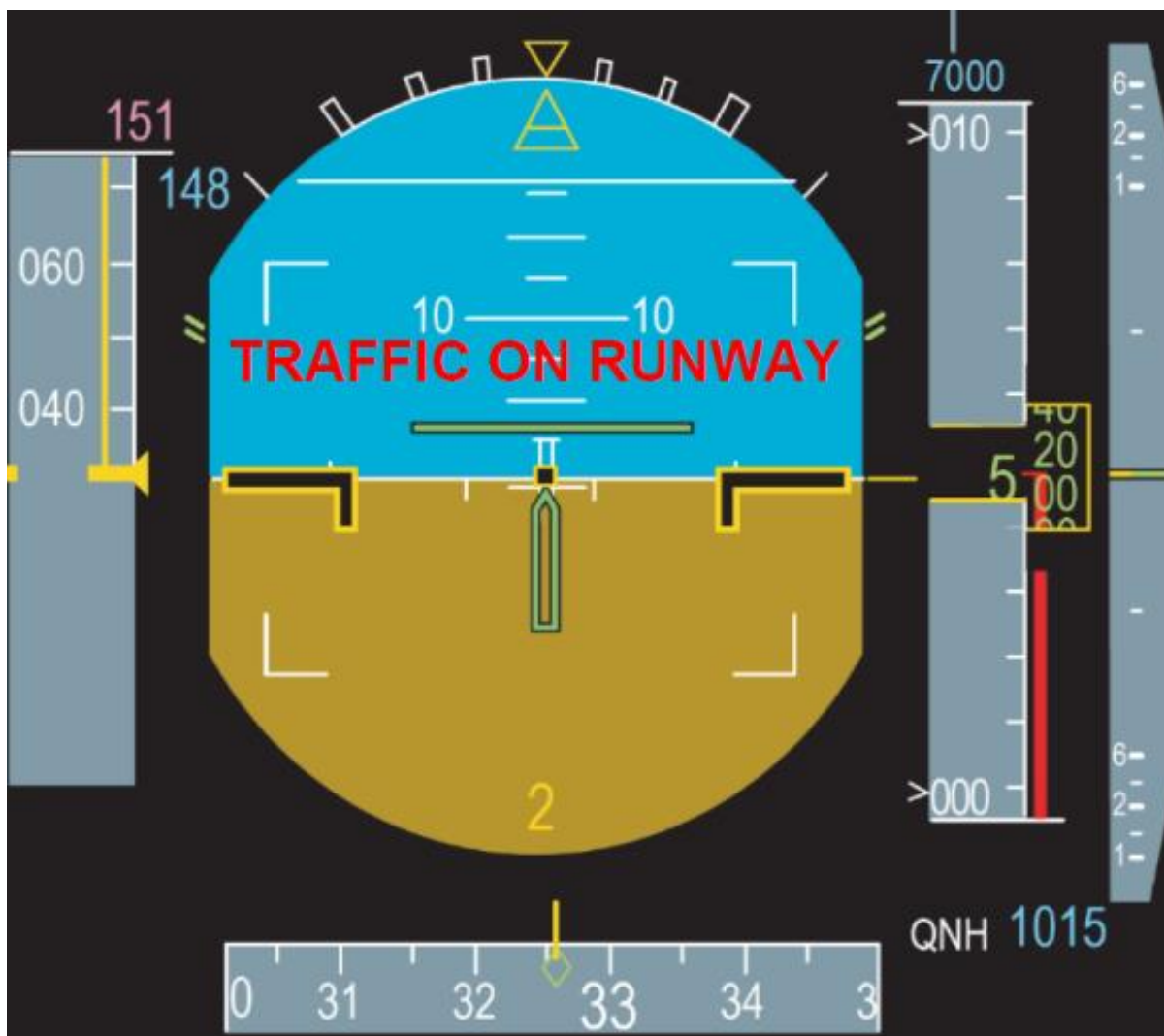


Рисунок 1.4 – Кадр функции оповещения на поверхности на главном пилотажном дисплее в ВС Airbus A350

На Рисунок 1.5 представлен кадр системы предотвращения выкатывания за пределы ВПП на навигационном дисплее, на котором видно две фиолетовые метки, указывающие места остановки на ВПП при разных условиях (сухая или мокрая ВПП). Система предотвращения выкатывания за пределы ВПП состоит из двух подфункций: предупреждения о выезде за пределы ВПП (Runway overrun warning) и защиты от выезда за пределы ВПП (Runway overrun protection). Функция «Runway

overrun warning» генерирует предупреждения, побуждающие летный экипаж выполнить уход на второй круг, в то время как функция «Runway overrun protection» генерирует предупреждения, побуждающие летный экипаж применить имеющиеся средства торможения. Система непрерывно рассчитывает размер тормозного пути в режиме реального времени в зависимости от оставшейся длины ВПП и дает четкие, недвусмысленные визуальные и звуковые оповещения для предотвращения выкатки за пределы ВПП.



Рисунок 1.5 – Кадр системы предотвращения выкатывания за пределы ВПП на навигационном дисплее в ВС Airbus A350

Эти системы функционируют автономно на борту и основаны на данных, заложенных производителем и обновляемых через AIRAC (Aeronautical Information

Regulation And Control) циклы. Однако они не учитывают текущие командные указания диспетчера в режиме реального времени.

Controller-Pilot Data Link Communications (CPDLC, Цифровая передача команд между диспетчером и пилотом) представляет собой систему автоматизированного обмена структурированными текстовыми сообщениями между диспетчерским центром управления воздушным движением и экипажем воздушного судна. CPDLC является фундаментальным компонентом современной парадигмы управления воздушным движением, направленной на замену традиционной голосовой коммуникации на цифровые каналы передачи данных.

Технология CPDLC интегрируется в кабину пилота через Multipurpose Control and Display Unit (MCDU). Multipurpose Control and Display Unit (MCDU) представляет собой универсальное многофункциональное устройство управления и отображения информации, которое служит основным интерфейсом взаимодействия экипажа с интегрированными бортовыми системами управления полетом. В контексте системы CPDLC, MCDU выполняет роль критического звена, трансформирующего структурированные текстовые сообщения от диспетчера в формат, доступный для восприятия и принятия решения пилотами. Кадр MCDU с сообщением в свободном формате представлен на Рисунок 1.6.



Рисунок 1.6 – Кадр MCDU с сообщением в свободном формате

MCDU является критическим интерфейсом для интеграции CPDLC в кабину пилота, обеспечивая надежный, документированный и восстанавливаемый способ передачи информации между диспетчерской службой и экипажем ВС. Благодаря процедурам возможности ответа экипажем в виде подтверждения (ACCEPT), отклонения (REJECT) с указанием причины и возможности просмотра многостраничных сообщений (MORE), система CPDLC через MCDU обеспечивает высокий уровень безопасности и эффективности при выполнении наземных операций на аэродроме, особенно в условиях высокой интенсивности движения.

Отдельно технологии, представленные выше, имеют свои ограничения, обусловленные природой и назначением. CPDLC не предназначен для передачи срочных голосовых команд: он служит для отправки формализованных текстовых сообщений, которые обычно несут несрочную разрешительную или информационную нагрузку. AMDB, используемая для индикации карты аэродрома, обладает рядом

ограничений, связанных с точностью и своевременностью обновления данных, совместимостью форматов и ограниченной детализацией объектов. Обновления происходят с задержкой, что может вызывать рассогласования с реальной инфраструктурой.

В литературе рассматриваются вопросы цифровизации процессов управления движением воздушных судов на земле, а также алгоритмические методы построения маршрутов с учетом сложной структуры аэродромной инфраструктуры. Однако интеграция CPDLC и AMDB в единую бортовую систему с реализацией интерактивной визуализации остается мало исследованной.

1.3 Обоснование интеграции цифровых сообщений от диспетчера УВД и базы данных аэродромной инфраструктуры

Интеграция CPDLC и AMDB объединяет преимущества обоих решений, позволяя преодолеть эти ограничения. Электронные сообщения CPDLC обеспечивают оперативный и надежный обмен управленческой информацией, а структурированная карта AMDB способствует наглядному отображению маршрутов и точному позиционированию [20 - 22]. Это создает эффективную платформу, где данные из CPDLC используются для динамического построения и корректировки маршрутов на основе карты AMDB. Такая синергия повышает безопасность, снижает нагрузку на радиоканалы, минимизирует ошибки и ускоряет процесс управления движением на аэродроме, открывая новые возможности для инновационных систем автоматизации и поддержки принятия решений.

Наиболее перспективный подход связан с интеграцией трех компонентов:

1. Связь «диспетчер-пилот» по линии передачи данных (CPDLC, Controller-Pilot Data Link Communications) представляет собой систему цифровой связи между диспетчером и экипажем воздушного судна, предназначенную для обмена текстовыми электронными сообщениями в целях управления воздушным движением. CPDLC дополняет традиционную голосовую связь, снижая нагрузку на радиоканалы и минимизируя риски неправильного восприятия команд. Основная функция CPDLC заключается в обмене сообщениями, включающими разрешения на изменение маршрута, запросы и подтверждения, при одновременном

сохранении возможности использования голосовой связи для передачи указаний повышенного приоритета. Ранее в проектах Европейской научно-исследовательской программы по модернизации управления воздушным движением (SESAR, Single European Sky ATM Research Programme) были продемонстрированы TAXI-CPDLC-функции и их валидация в контуре системах для УВД, однако интеграция с бортовой визуализацией и автоматической алгоритмической интерпретацией маршрутов оставалась ограниченной [26].

Функциональная архитектура CPDLC основана на концепции «диалога» - последовательности сообщений между диспетчером и пилотом, относящихся к конкретной транзакции. Особый интерес для автоматизации процессов руления представляет применение CPDLC для наземных операций. Такой тип сообщений расширяет функциональность на операции руления, обеспечивая цифровую передачу разрешений на руление между диспетчером и экипажем [27].

Ключевыми элементами таких сообщений являются:

- маршрут руления в виде последовательности элементов аэродрома (рулежных дорожек, точек удержания);
 - ограничивающие точки маршрута - точки, в которых воздушное судно должно остановиться до получения дальнейшего разрешения.
2. База данных аэродромной инфраструктуры (AMDB, Aerodrome Mapping Database) — это структурированная цифровая карта аэродрома, представляющая собой упорядоченную и стандартизированную базу данных, включающую важнейшие элементы инфраструктуры: рулежные дорожки, перроны, стоянки и зоны ожидания. AMDB обеспечивает географическое и навигационное представление аэродрома, необходимое для автоматизации процессов руления и построения маршрутов. А также, AMDB является ключевым источником данных для бортовых навигационных приложений и наземных систем управления, повышая ситуационную осведомленность при рулении и уменьшая риск пространственной дезориентации экипажа.
 3. Наибольший интерес в рамках текущей задачи представляет - аэродромная наземная маршрутная сеть (ASRN, Aerodrome Surface Routing Network). ASRN -

это модель замкнутого ориентированного графа, формируемую на основе данных AMDB и предназначенную для вычисления и визуализации маршрутов руления воздушных судов. Вершины ASRN соответствуют пересечениям рулевых дорожек и другим ключевым точкам аэродромной инфраструктуры, а ребра - направленным или двунаправленным соединениям между ними, имеющим геометрические характеристики для графического отображения маршрута.

Такая сеть обеспечивает выполнение ключевых функций: построение непрерывного маршрута руления, его передачу в машиночитаемом формате для использования бортовыми и наземными системами, а также отображение маршрута на электронной карте аэродрома.

Преимущества интегрированного подхода, представленного выше [28 - 32]:

- Устранение ошибок передачи информации за счет автоматического декодирования CPDLC-сообщений и их верификации по данным AMDB;
- Снижение когнитивной нагрузки на экипаж путем автоматического построения маршрута и вывода его на кадр навигационного дисплея;
- Повышение ситуационной осведомленности благодаря динамическому обновлению маршрутной информации при изменении указаний диспетчера;
- Повышение эффективности операций на аэродроме за счет оптимизации маршрутов и сокращения времени руления;
- Улучшение безопасности путем предотвращения несанкционированных отклонений от маршрута и конфликтов с другими ВС и препятствиями.

1.4 Постановка задачи исследования

По результатам анализа требований нормативных документов, сравнительного анализа существующих подходов и обоснования интеграции технологий выявлено, что на современном этапе развития средств бортовой авиации отсутствуют комплексные решения для автоматического построения маршрута руления воздушного судна в зоне аэродрома, которые интегрируют цифровые команды от диспет-

через УВД (CPDLC) с данными базы аэродромной инфраструктуры (AMDB) и обеспечивают их согласованное отображение на дисплеях кабины экипажа и в системе автоматического управления.

Существующие системы навигационного обеспечения на борту воздушного судна, такие как интерактивная карта аэропорта (Airport Moving Map) и системы предупреждения о положении относительно ВПП (RAAS), функционируют автономно и основаны на статической информации из базы AMDB, заложенной производителем и обновляемой через AIRAC циклы. Одновременно, системы цифровой передачи команд между диспетчером и пилотом (CPDLC) обеспечивают надежный обмен структурированными текстовыми сообщениями, но не интегрируют передаваемые команды с геопространственной моделью аэродрома для динамического построения маршрутов. Применение методов синтеза информационных потоков, получивших широкое распространение в робототехнике (для навигации автономных мобильных систем в динамических средах), беспилотной авиации (для оптимизации траекторий в условиях препятствий) и интеллектуальных транспортных системах (для маршрутизации в сложных дорожных сетях), остается недостаточно развитым в контексте аэродромной навигации пилотируемых воздушных судов.

В рамках диссертации акцент сделан на интеграции команд CPDLC и данных AMDB, поскольку именно эти компоненты являются критичными для безопасного и эффективного взаимодействия экипажа с диспетчерской службой и навигации по электронной карте аэродрома. Система должна обеспечивать автоматическое построение маршрута на основе команд диспетчера, верификацию соответствия маршрута инфраструктуре аэродрома и динамическое отображение маршрута на дисплеях кабины как основных критериев повышения безопасности.

Для этого требуется решить ряд взаимосвязанных исследовательских задач:

- разработки формализованной модели аэродромной инфраструктуры на основе данных AMDB;
- разработки алгоритмов интерпретации структурированных сообщений CPDLC;

- разработки методики динамического построения оптимального маршрута руления с использованием модифицированного A*-алгоритма;
- разработки программно-алгоритмического обеспечения системы и ее интеграции с бортовыми системами навигации и управления;
- тестирования и валидации системы на реальных данных московских аэродромов с целью подтверждения ее работоспособности и эффективности.

Выводы по главе 1

В главе 1 проанализированы требования нормативной документации по обеспечению безопасности движения воздушных судов в зоне аэродрома, существующие подходы и средства автоматизации навигационного обеспечения на борту, а также обоснована необходимость интеграции технологий CPDLC и AMDB. Также поставлена задача диссертационного исследования.

В результате сформированы нижеприведенные выводы.

1. Несмотря на развитие и применение перспективных систем в бортовом оборудовании для навигации и взаимодействия с УВД (CPDLC, системы предупреждений RAAS), основным способом передачи команд диспетчера экипажу остается голосовая коммуникация, сопряженная с высокими рисками ошибок восприятия и повышенной когнитивной нагрузкой на членов экипажа. На сегодняшний день бортовые системы навигации представляют собой независимые функциональные модули (интерактивная карта аэродрома АММ, системы предупреждений), работающие на основе статической информации из базы AMDB, обновляемой через AIRAC циклы. Эти системы не интегрируют текущие команды диспетчера в режиме реального времени, что не позволяет экипажу получить полное и согласованное представление о полученных указаниях и их взаимосвязи с инфраструктурой аэродрома.
2. Нормативная документация ИКАО (Doc 4444, DO-272, DO-291) и европейские стандарты (EUROCAE ED-110, ARINC 816-2) содержат требования к организации коммуникации между диспетчером и экипажем, определяют формат базы данных аэродромной инфраструктуры (AMDB) и устанавливают обязательные процедуры безопасности. Однако эти стандарты не предусматривают единого

механизма интеграции цифровых команд CPDLC с геопространственными данными AMDB для автоматического построения маршрутов руления. Ответственность за интерпретацию команд и навигацию полностью возлагается на экипаж, что является источником значительного числа инцидентов в зоне аэродрома.

3. Краткое описание существующих подходов и технологий в разрезе методов решения задачи навигации на аэродроме изложена ниже.
 - a. Традиционный подход (голосовая коммуникация и ручной ввод) позволяет передавать гибкие и адаптивные указания, однако высока вероятность лингвистических ошибок восприятия, повышенной когнитивной нагрузки, отсутствие автоматизированной верификации маршрута и невозможностью достичь высокой пропускной способности аэродрома при максимальной интенсивности движения.
 - b. Автономные бортовые системы визуализации (Airport Moving Map, RAAS) обеспечивают представление инфраструктуры аэродрома и предупреждают об опасных ситуациях на основе встроенных алгоритмов. Однако они работают независимо от диспетчерских команд, не учитывают текущее состояние движения на аэродроме в режиме реального времени и не предоставляют экипажу явного маршрута, построенного на основе указаний диспетчера.
 - c. Системы цифровой коммуникации (CPDLC) обеспечивают надежный и документированный обмен структурированными сообщениями между диспетчером и экипажем, снижают нагрузку на радиоканалы и минимизируют риски неправильного восприятия команд. Тем не менее, CPDLC не предусматривает встроенного механизма для автоматического преобразования передаваемых команд в навигационные данные и их визуализации на дисплеях кабины в контексте геопространственной модели аэродрома.
 - d. Интегральные решения, объединяющие CPDLC, AMDB и алгоритмы маршрутизации, потенциально могут устранить недостатки отдельных

подходов, обеспечивая автоматическое построение маршрутов, согласованность диспетчерских команд с инфраструктурой, повышение ситуационной осведомленности и снижение когнитивной нагрузки на экипаж. Однако на сегодняшний день такие комплексные системы для бортового оборудования не реализованы в оперативной авиации.

4. Поставлена задача разработки методического аппарата и программного обеспечения для автоматического построения маршрута руления воздушного судна в зоне аэродрома на основе интеграции цифровых команд от диспетчера УВД (CPDLC) и данных аэродромной инфраструктуры (AMDB), обеспечивающего повышение безопасности, снижение когнитивной нагрузки на экипаж и повышение эффективности наземного движения на аэродроме. Система должна поддерживать верификацию соответствия маршрута инфраструктуре, динамическое отображение маршрута на дисплеях навигации и интеграцию с системами автоматического управления ВС.

РАЗДЕЛ 2. РАЗРАБОТКА МЕТОДИЧЕСКОГО АППАРАТА ДИНАМИЧЕСКОГО ПОСТРОЕНИЯ МАРШРУТА РУЛЕНИЯ ВС НА ОСНОВЕ КОМПЛЕКСИРОВАНИЯ ДАННЫХ ЦИФРОВОГО ОБМЕНА И СТРУКТУРИРОВАННЫХ НАВИГАЦИОННЫХ ДАННЫХ

В настоящей работе предложен методический подход к динамическому построению маршрутов руления ВС. Он основан на объединении структурированных сообщений CPDLC диспетчера УВД с данными AMDB в формате сети маршрутизации ASRN. Это позволяет оптимизировать маршрут по длине пути с учетом технических ограничений ВС и аэродромной инфраструктуры.

2.1 Разработка формализованной модели аэродромной инфраструктуры на основе цифровых данных аэродромной инфраструктуры

В настоящей работе предложен методический подход к динамическому построению маршрутов руления ВС. Он основан на объединении структурированных сообщений CPDLC диспетчера УВД с данными AMDB в формате сети маршрутизации ASRN. Такая формализация преобразует субъективные указания диспетчера в проверяемую графовую модель аэродрома. Это позволяет оптимизировать маршрут по длине пути с учетом технических ограничений ВС и аэродромной инфраструктуры.

Современные бортовые системы визуализации навигационного дисплея для руления на аэродроме и управления движением воздушных судов на поверхности аэродрома базируются на использовании аэродромных картографических баз данных (Aerodrome Mapping Database, AMDB), представляющих собой формализованное цифровое описание аэродромной инфраструктуры. В соответствии с требованиями стандарта RTCA DO-272D AMDB трактуется, как структурированное хранилище геопространственной информации об аэродромной поверхности, содержащее согласованные геометрические, топологические и семантические характеристики взлетно-посадочных полос, рулежных дорожек, перронов, мест стоянки воздушных судов и других функциональных элементов аэродромной инфраструктуры.

Архитектура AMDB следует многоуровневой модели представления аэродромной среды. На нижнем уровне (уровень примитивов) хранятся базовые геометрические элементы: точки, линии и полигоны (многоугольники). На среднем уровне

(уровень объектов) эти примитивы комбинируются в пространственные объекты, такие как ВПП (RunwayElement), рулежная дорожка (TaxiwayElement), стоянка (ApronElement) и так далее. На верхнем уровне (уровень топологии) объекты связываются в более сложные структуры, в частности в аэродромную наземную маршрутную сеть (Aerodrome Surface Routing Network, ASRN).

2.1.1 Пространственные объекты аэродромной картографической базы данных

Пространственные объекты AMDB представляют собой формализованные описания элементов аэродромного окружения, предназначенные для машинной обработки и использования в бортовом и наземном оборудовании, связанным с движением по поверхности аэродрома [37 - 41] несанкционированных занятий активной ВПП.

В AMDB пространственный объект описывает что это за сущность (тип объекта/класс) и какими свойствами она обладает, чтобы ее можно было корректно интерпретировать. Каждый объект характеризуется геометрией (точка, линия или многоугольник), задающей его положение и форму, а также набором атрибутов, описывающих свойства объекта и условия его эксплуатации.

Атрибуты рассматриваются как характеристики объекта: на уровне типа они задаются именем, типом данных и областью допустимых значений, а на уровне экземпляра принимают конкретные значения. Для обеспечения единообразной интерпретации и сопоставимости данных используется каталог пространственных объектов – систематизированное описание типов объектов, их атрибутов и отношений, применимых в наборе данных.

Формализованное описание геометрии и атрибутивного состава пространственных объектов AMDB обеспечивает переход от «картографического» представления аэродромной среды к машинно-интерпретируемой модели, пригодной для алгоритмической обработки в наземных и бортовых функциях, связанных с движением по поверхности. В рамках данной логики ключевым является выделение таких типов объектов и атрибутов, которые позволяют не только визуализировать элементы инфраструктуры, но и задавать допустимые связи между ними, то есть формировать топологическую основу для вычисления маршрутов руления.

Пространственные объекты аэродромных данных, о которых рассказано выше, представлены на Рисунок 2.1.

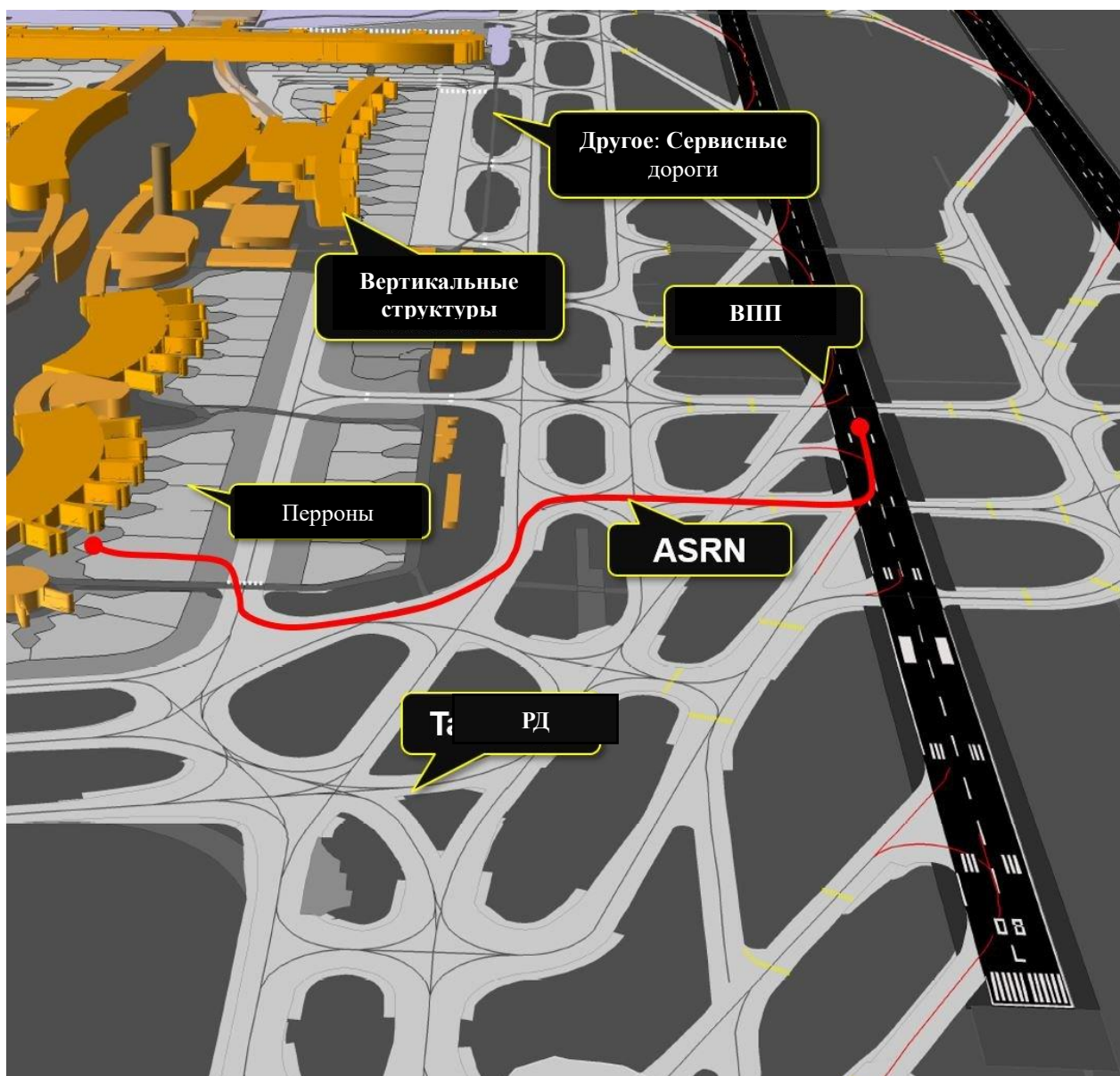


Рисунок 2.1 – Разметка аэродромных данных на 3D карте аэродрома

Элементы аэродромной инфраструктуры представляются следующими типами пространственных объектов, представленными в Таблица 2.1.

Таблица 2.1 – Типы пространственных объектов

Пространственный объект	Типы пространственного объекта
ВПП	Runway Shoulder (боковая полоса безопасности), Runway Marking (маркировка ВПП), Arresting System Location (местоположение системы аварийного торможения), Painted Centerline (осевая линия, нанесенная краской), Runway Exit Line (линия схода с ВПП),

	Stopway (концевая полоса торможения), Arresting Gear Location (местоположение троса аварийного торможения), Runway Intersection (пересечение ВПП), Runway Displaced Area (часть ВПП до смещенного порога), Runway Threshold (порог ВПП), Blastpad (Концевая полоса безопасности), Runway Centerline Point (точка осевой линии ВПП), Runway Element (элементы ВПП), Land And Hold Short Operation Location (посадка и пробег до назначенной РД)
РД	Taxiway Element (элемент рулежной дорожки), Taxiway Intersection Marking (маркировка пересечения РД), Taxiway Holding Position (место ожидания при рулении), Taxiway Guidance Line (указательная линия РД), Taxiway Shoulder (боковая полоса безопасности РД), Bridge Side (сторона моста), Frequency Area (зона использования определенных частот), Position Marking (маркировка расположения)
Перроны	Stand Guidance Line (указательная линия места стоянки), Apron Element (элемент перрона), Aerodrome Reference Point (контрольная точка аэродрома), Parking Stand Area (Место стоянки), Parking Stand Location (место нахождения стоянки), Deicing Area (площадка противообледенительной защиты), Service Road (маршрут движения), Deicing Group (группа противообледенительных площадок)
Зона строительства	Construction Area (зона строительства)
Взлетно-посадочные вертолетные площадки	Touch Down Lift Off Area (зона приземления и отрыва), Final Approach and Take off Area (зона конечного этапа захода на посадку и взлета), Helipad Threshold (порог взлетно-посадочной вертолетной площадки)
Вертикальные конструкции	Vertical Point Structure (точечная вертикальная конструкция), Vertical Line Structure (линейная вертикальная конструкция), Vertical Polygonal Structure (вертикальная конструкция, занимающая определенную площадь)
Маркировка поверхности	Aerodrome Surface Lighting (огни маркировки поверхности аэродрома)
Опорные точки	Survey Control Point (опорная точка)
Водоемы	Water (водоем)
ASRN	ASRN Node (вершина графа), ASRN Edge (ребро графа)
Знаки аэродрома	Aerodrome Sign (аэродромный знак)
Опасные участки	Hotspot (опасный участок), ATC Blind Spot (слепой участок УВД)

С точки зрения задач руления наиболее значимым является не столько перечень отдельных объектов (ВПП, РД, перроны и т.д.), сколько возможность формального задания связности между ними, поскольку именно связность определяет множество допустимых перемещений по аэродромной поверхности. Для решения этой задачи в AMDB выделяется специализированный пространственный объект ASRN, который задает маршрутную структуру движения в виде сети, пригодной для вычислительных процедур и дальнейшего использования в прикладных функциях, включая сценарии D-TAXI.

2.1.2 Формализация геометрии с помощью ASRN

ASRN (Aerodrome Surface Routing Network) – это один пространственных объектов из данных AMDB, предназначенный для представления маршрутной структуры движения по поверхности аэродрома в виде сети, пригодной для вычислительных процедур (в частности, для функций руления и связанных с ними бортового программного обеспечения). В стандартизованном виде ASRN описывает узлы и связи между ними (ребра), а также правила их соотнесения с физическими элементами аэродромной инфраструктуры и временной применимостью данных. ASRN применяется там, где требуется формализованная топология возможных перемещений по аэродромной поверхности, включая контекст применения в концепциях типа D-TAXI.

Вершины ASRN представляют пересечения двух или более элементов аэродрома, связанных с операциями по рулению, или другие конкретные места, например, места ожидания или вход и выход с места стоянки.

Ребра ASRN представляют направленные или двунаправленные соединения между вершинами. Ребро также имеет соответствующую геометрию, которая может использоваться для графического отображения маршрута руления. Рекомендуется обеспечивать полную связность сети.

В прикладном аспекте ASRN обеспечивает, как минимум, следующие функции:

1. построение однозначного маршрута руления,

2. передачу маршрутов руления в форме, пригодной для использования бортовыми системами и функциями,
3. отображение маршрута руления на карте аэродрома.

Для обеспечения полной связности для создания вершин используются площадные элементы (однако по возможности допускается использование линейных элементов для уточнения положения и количества вершин и определения геометрии соединяющих вершины ребер). Установлено, что использование линейных элементов для создания вершин не позволяет обеспечить полную связность, поскольку существует множество примеров, в которых отсутствует физическая маркировка, необходимая для определения допустимых переходов между поверхностями, существуют разрывы физической маркировки либо отсутствуют пересечения физической маркировки с элементами маркировки, которые должны иметь логические соединения с этой маркировкой.

Тем самым ASRN концептуально фиксирует задачу руления как задачу поиска пути в графе, где вершины и ребра образуют формализованную топологию возможных перемещений. Важным следствием такого представления является то, что маршрут руления может быть не только «прочитан» как заранее заданная последовательность участков, но и вычислен алгоритмически на основе структуры сети и ее атрибутов, что соответствует заявленным функциям ASRN по построению маршрута, его передаче в пригодной для бортового применения форме и отображению на карте аэродрома.

Для того чтобы вычислительное построение маршрута было не только топологически корректным, но и семантически осмысленным (например, с различением переходов «РД - перрон», «РД - место стоянки», «РД - позиция ожидания», «выход с ВПП» и т.п.), элементы графа ASRN типизируются. Тип вершины задается атрибутом *nodetype* (Таблица 2.2), а тип ребра - атрибутом *edgetype* (Таблица 2.3), указанные атрибуты определяют допустимый контекст использования узлов и связей при формировании маршрута руления.

Таблица 2.2 – Атрибуты *nodetype*

Метка	Код	Определение
-------	-----	-------------

Taxiway	0	Вершина, в которой встречаются две рулежные дорожки.
Taxiway Holding Position	1	Вершина, в которой находится место ожидания при рулении.
Runway Entry/Exit	2	Вершина, в которой сходятся ВПП и рулежная дорожка.
Runway Exit Line	3	Вершина, в которой встречаются линия выхода с ВПП и пересечение РД.
Runway Intersection	4	Вершина, в которой встречаются две рулежные дорожки.
Parking Entry/Exit	5	Вершина, где соединяется площадка стоянки и рулежная дорожка.
Apron Entry/Exit	6	Вершина, где соединяется площадка перрона и рулежная дорожка.
Taxiway Link	7	Вершина на рулежной дорожке на траверзе вершины, являющейся точкой входа/выхода площадки стоянки или перрона.
Deicing	8	Вершина, где возможно проведение операций противообледенительной защиты.

Таблица 2.3 – Атрибуты edgetype

Метка	Код	Определение
Taxiway	0	Ребро, проходящее вдоль рулежной дорожки (или дорожек).
Runway	1	Ребро, проходящее вдоль взлетно-посадочной полосы (или полос).
Runway Exit	2	Ребро, соединяющее ВПП и выход с рулежной дорожки.
Parking	3	Ребро, соединяющее рулежную дорожку и точку входа/выхода с места стоянки.
Reserved	4	Зарезервировано.
Deicing	5	Ребро, соединяющее площадку противообледенительной защиты и рулежную дорожку / место стоянки / перрон.
Apron	6	Ребро, проходящее вдоль перрона (или перронов).

В совокупности типизация узлов и связей (nodetype, edgetype) и топологическое задание соединений между узлами (через ссылки на начальную и конечную вершины ребра, а также атрибут направленности) формируют достаточную информационную основу для алгоритмического построения связного маршрута руления

по сети ASRN. Это позволяет бортовому программному обеспечению, ориентированному на задачи экипажа, формировать непрерывное представление маршрута не только при наличии полного набора сегментов, но и в ситуациях, когда в переданном сообщении отсутствуют отдельные элементы маршрута и требуется вычислительное «достроение» траектории по связной сети с учетом семантики переходов (например, к месту стоянки, на перрон, к позиции ожидания, в зону противообледенительной обработки). При этом вычислительное восстановление маршрута следует трактовать как механизм интерпретации и представления маршрута для бортовых функций (передача/отображение/контроль непротиворечивости), а не как замену или изменение диспетчерского разрешения на руление.

2.2 Разработка алгоритмов интерпретации структурированных цифровых сообщений диспетчера УВД

В данном подразделе обосновывается подход к интерпретации цифровых сообщений диспетчера, относящихся к рулению (D-TAXI), в интересах бортового программного обеспечения экипажа: от получения бинарного сообщения до извлечения смысла «куда и как разрешено рулить» и представления этого смысла в форме, пригодной для построения маршрута руления в бортовом оборудовании.

2.2.1 Разработка алгоритмов интерпретации структурированных цифровых сообщений диспетчера УВД

В сообщениях CPDLC информационное содержание сообщений задается формальными спецификациями ASN.1 и кодируется по правилам Packed Encoding Rules (PER), что обеспечивает строгую однозначность представления параметров сообщения (включая предлоги или маркеры отношений, типы элементов маршрута, координатные данные и классификационные признаки объектов, например, категорию точки ожидания перед ВПП). Нормативная роль RTCA DO-351B при этом заключается в регламентации собственно формата и семантики структур CPDLC (набор ASN.1-типов, правила построения SEQUENCE/CHOICE/ENUMERATED, а также включение маршрутных данных, например, TaxiRoute, в соответствующие поля constrainedData).

Одновременно RTCA DO-350 выступает как «каталог» (или классификатор) стандартных сообщений CPDLC, вводя их идентификаторы/номера (например, UM308 для маршрута руления, DM135 для запроса маршрута руления, UM311 для команды HOLD POSITION и т.п.), что принципиально для алгоритмов обработки на борту: по номеру сообщения выбирается соответствующая грамматика параметров, процедура валидации и правила формирования выходной структуры. В прикладных требованиях к автоматизации обмена CPDLC эти номера используются явно (в виде таблиц «операция - источник - номер сообщения по DO-350»), тем самым обеспечивая трассируемость реализуемых алгоритмов интерпретации к стандартизованным типам сообщений и их ожидаемому составу данных.

Возможное взаимодействие экипажа и УВД с помощью сообщений CPDLC в рамках руления по поверхности представлено в Таблица 2.4.

Таблица 2.4 – Возможное взаимодействие экипажа и УВД с помощью сообщений CPDLC в рамках руления по поверхности

№	Операция	Источник сообщения	Номер сообщения по DO-350 с описанием
1. Нахождение на месте стоянки			
1.1	Запрос маршрута руления	Борт	DM135 REQUEST TAXI [taxi requestO] Request for taxi clearance. May specify to/from taxi position(s) and/or the ATIS code. <i>Запрос на разрешение такси. Может указывать позицию(и) такси и/или код ATIS.</i>
	Маршрут руления	УВД	UM308 [runwayO] TAXI [taxi route] Instruction to taxi to the specified location; may include a hold short position. Указание рулить к указанному месту; может включать в себя удержание короткой позиции.
	Подтверждение	Борт	DM0 WILCO Indication that the instruction is understood and will be complied with. <i>Указывает на то, что инструкция понята и будет выполняться.</i>

№	Операция	Источник сообщения	Номер сообщения по DO-350 с описанием
1.2	Уточненный маршрут с временами	Борт	DM176 GOING TO PERFORM Основная проблема заключается в том, что стандарт CPDLC версии 4, регламентированный документом DO-351B, не предусматривает механизма для передачи маршрута в виде последовательности точек с привязкой ко времени их прохождения. В связи с этим возникла необходимость разработки и введения нового типа сообщения.
1.3	Задержка времени начала руления	УВД	UM270 EXPECT [clearance typeR] [assigned time] Notification that ATC is planning to issue the specified clearance type (e.g approach, departure, further, startup, pushback, taxi or oceanic) as required to meet the specified time <i>Уведомление о том, что УВД планирует выдать разрешение указанного типа (например, посадка, вылет, заход на посадку, руление и т.д.) в соответствии с требованиями по заданному времени</i>
	Подтверждение	Борт	DM0 WILCO Indication that the instruction is understood and will be complied with. <i>Указывает на то, что инструкция понята и будет выполняться.</i>
	Уточненный маршрут с временами	Борт	DM176 GOING TO PERFORM Основная проблема заключается в том, что стандарт CPDLC версии 4, регламентированный документом DO-351B, не предусматривает механизма для передачи маршрута в виде последовательности точек с привязкой ко времени их прохождения. В связи с этим возникла необходимость разработки и введения нового типа сообщения

№	Операция	Источник сообщения	Номер сообщения по DO-350 с описанием
2. Руление			
2.1	Задержка на рулении остановкой	УВД	UM311 HOLD POSITION Instruction to hold the current position. Инструкция для удержания текущей позиции. <i>При наличии конфликта. Возможна реализация с использованием HOLD POSITION в комбинации с сообщением ON</i>
	Подтверждение	Борт	DM0 WILCO Indication that the instruction is understood and will be complied with. <i>Указывает на то, что инструкция понята и будет выполняться.</i>
2.2	Команда на возобновление движения	УВД	UM306 RESUME TAXI [taxi resume conditionO] При наличии конфликта. Возможна реализация с использованием RESUME Instruction to resume a previously issued taxi. The conditions for resuming the taxi may be specified. <i>Инструкция по возобновлению ранее использованного маршрута руления. Условия возобновления руления могут быть указаны.</i>
	Подтверждение	Борт	DM0 WILCO Indication that the instruction is understood and will be complied with. <i>Указывает на то, что инструкция понята и будет выполняться.</i>
2.3	Разрешение на пересечение ВПП	УВД	UM307 CROSS [ground location] При наличии пересечений ВПП Instruction to cross the specified ground location. <i>Указание пересечь указанное место.</i>

№	Операция	Источник сообщения	Номер сообщения по DO-350 с описанием
	Подтверждение	Борт	DM0 WILCO Indication that the instruction is understood and will be complied with. <i>Указывает на то, что инструкция понята и будет выполняться.</i>

В рамках CPDLC обмен сообщениями структурируется по направлению передачи и включает два класса: uplink – сообщения, формируемые наземной стороной (диспетчер УВД) и адресуемые борту, и downlink – сообщения, формируемые бортовой стороной (экипаж/бортовая система) и адресуемые наземной стороне.

2.2.2 Downlink сообщения

В рамках текущей диссертационной работы формируются следующие Downlink-сообщения (от борта к наземной службе управления): DM0 (WILCO), DM1 (UNABLE), DM3 (ROGER), DM135 (REQUEST TAXI), DM136 (REQUEST EXPECTED TAXI) и DM209 (ROUTE TIME). Ниже описывается процедура формирования каждого из них с указанием источников данных и структуры атрибутов.

DM135 - REQUEST TAXI [taxi requestO]

Сообщение DM135 представляет собой запрос маршрута руления со стороны экипажа. Согласно стандарту DO-350, синтаксис сообщения определяется типом [TaxiRequestO], который является CHOICE-типом ASN.1, содержащим необязательную структуру TaxiRequest. Структура TaxiRequest определена следующим образом:

```
TaxiRequest ::= SEQUENCE {
  from [0] GroundLocation OPTIONAL,
  to [1] GroundLocation OPTIONAL,
  atis [2] ATISCode OPTIONAL
}
```

Таким образом, для формирования сообщения DM135 требуется заполнение трех опциональных полей:

1. Текущее местоположение (from) – элемент типа GroundLocation (CHOICE из 19 вариантов). Данное поле содержит наименование элемента аэродрома, на котором воздушное судно находится в данный момент, а также атрибут типа (locationChoice), определяющий категорию объекта (стоянка - stand, перрон - apron, РД - taxiway, ВПП - runway и т.д.). Информация о текущем местоположении извлекается из данных AMDB в ходе работы функции определения положения ВС в зоне аэродрома. Функция движения в зоне аэродрома определяет, на каком элементе аэродромной инфраструктуры находится ВС, и предоставляет как наименование (например, «S12» для стоянки), так и тип атрибута (например, GroundLocationChoice = stand).
2. Конечная точка маршрута (to) – элемент типа GroundLocation. Наименование конечной точки (например, обозначение ВПП «07L» или стоянки «A5») приходит по протоколу взаимодействия (см. Таблица 2.5) из FMS при наличии активного плана полета. В FMS содержатся данные о назначенной ВПП вылета или прилета, и это наименование передается в подсистему формирования CPDLC-сообщений. Атрибут типа конечной точки (locationChoice) определяется путем поиска в данных AMDB по наименованию: программа идентифицирует, к какой категории объекта принадлежит данная точка (ВПП, точка ожидания, стоянка и др.), и устанавливает соответствующий параметр атрибута.

Таблица 2.5 – Протокол взаимодействия с FMS

Имя параметра	Тип	Размер (байт)	Комментарий
Airport Ident	T_STRING(1..7)	6	ICAO код аэропорта
Runway Ident	T_STRING(1..7)	6	Имя ВПП
Gate Ident	T_STRING(1..7)	6	Имя гейта
Block Type	Enum	1	Тип блока, определяющий принадлежность данных: 1 – Аэропорт вылета 2 – Аэропорт прилета 3 – Альтернативный аэропорт

ALTN Airport index	T_BYTE	1	Порядковый номер альтернативного аэропорта от 1 до 6
Status	Enum	1	Статус расчетов: 1 – ОК 2 – Нет в НБД 3 – Не ОК

3. Код АТИС (atis) – строка типа ATISCode, представляющая собой IA5String (SIZE 1), то есть одиночный символ-идентификатор текущего информационного сообщения АТИС. Код АТИС вводится экипажем по желанию.

Для случая, когда конечной точкой является ВПП (choiceTO == 9), отдельно заполняются поля runway.direction и runway.configuration (left, right, center, none), а для прочих типов – строковое значение GroundLocationIA5Stringvalue. Аналогичная логика применяется для поля from. Результатом работы функции является закодированная в формате ASN.1 PER-строка в шестнадцатеричном представлении, готовая к передаче по каналу CPDLC.

DM176 - GOING TO PERFORM

Сообщение DM176 является расширением стандарта DO-350 и предназначено для передачи рассчитанного маршрута руления с привязкой к временным и скоростным параметрам каждой точки маршрута. Основная проблема заключается в том, что стандарт CPDLC версии 4, регламентированный документом DO-351B, не предусматривает механизма для передачи маршрута в виде последовательности точек с привязкой ко времени их прохождения. В связи с этим возникла необходимость разработки и введения нового типа сообщения с помощью расширения структуры constrainedData. Можно ввести TaxiRoute3D по аналогии с 4d траекторией.

Таким образом, каждая точка маршрута описывается структурой Taxi3DWayPoint (расширение стандартной Taxi3DWayPoint из DO-351B):

```
Taxi3DWayPoint ::= SEQUENCE {
    position      [0] GroundLatLong,
    targetEntryTime [1] Timesec OPTIONAL,
    requiredDelay  [2] Timesec OPTIONAL,
```

```

    asociatedLocation [3] GroundLocation OPTIONAL,
    estimatedSpeed [4] Speed OPTIONAL,
    nextTransferTime [5] Timesec OPTIONAL
}

```

Для каждой точки маршрута заполняются следующие поля:

1. Координаты точки (position) - структура GroundLatLong, содержащая широту и долготу. Данные извлекаются из ключевых (поворотных) точек маршрута руления в виде координат вершин графа рулежных дорожек AMDB.
2. Время прохождения (nextTransferTime) – структура Timesec (часы, минуты, секунды). Рассчитывается алгоритмом построения маршрута на основании расстояний между точками и ограничений скорости. Поле dTime входной структуры RoutePoint содержит время в секундах, которое разбивается на часы, минуты и секунды при заполнении структуры.
3. Тип ассоциированного элемента аэродрома (asociatedLocation) – структура GroundLocation, определяющая категорию объекта аэродромной инфраструктуры, с которым ассоциирована данная точка маршрута. С целью обеспечения преобразования внутренних типов объектов AMDB в типы GroundLocationChoice, определенные стандартом DO-351B, используется следующая логика, представленная в Таблица 2.6.

Таблица 2.6 – Логика значения поля locationChoice

Feattype	GroundLocationChoice
RunwayElement	Runway
RunwayIntersection	Intersection
TaxiwayElement, TaxiwayShoulder, TaxiwayGuidanceLine	Taxiway
TaxiwayIntersectionMarking	Intersection
TaxiwayHoldingPosition	HoldingPoint
RunwayExitLine	NormalExit
ApronElement	Apron
StandArea, ParkingStandArea, ParkingStand-Location	Stand
DeicingArea	DeicingStopPosition

4. Путевая скорость (estimatedSpeed) – структура Speed с выбором SpeedChoice_groundMetric, содержащая значение скорости в км/ч. Значение скорости берется из поля ground speed входной структуры RoutePoint, которое рассчитывается алгоритмом маршрутизации с учетом ограничений скорости на соответствующих участках рулежных дорожек.

DM0 - WILCO

Сообщение DM0 является стандартным подтверждением получения и исполнения указания диспетчера. Сообщение не содержит информационной нагрузки (NULL-тип). Никаких дополнительных данных о местоположении или маршруте в сообщении не включается. Результатом является минимальная ASN.1 PER-закодированная последовательность.

DM1 - UNABLE

Сообщение DM1 передает отказ экипажа от выполнения полученного указания. Как и DM0, оно не содержит информационной нагрузки (NULL-тип). Данное сообщение формируется в ситуациях, когда экипаж не может выполнить полученное разрешение (например, невозможность следования по указанному маршруту руления вследствие препятствий или технических ограничений).

DM3 - ROGER

Сообщение DM3 означает подтверждение приема информации без явного обязательства исполнения. Не содержит информационной нагрузки (NULL-тип). Используется, в частности, как ответ на информационные сообщения от наземной службы, не требующие непосредственного действия со стороны экипажа.

2.2.3 Uplink сообщения

В рамках текущей диссертационной работы осуществляется прием и обработку следующих Uplink-сообщений (от службы УВД к борту): UM308 (TAXI), UM270 (EXPECT), UM307 (CROSS), UM306 (RESUME TAXI) и UM311 (HOLD POSITION). Ниже описывается процедура обработки каждого из них с указанием источников данных и структуры атрибутов.

UM308 - [runwayO] TAXI [taxi route]

Сообщение UM308 является основным разрешением на руление и представляет собой наиболее информационно емкое из Uplink-сообщений.

Из принятого сообщения извлекаются следующие данные:

1. ВПП назначения (Runway) – структура типа Runway, содержащая два поля: direction (RunwayDirection, INTEGER 1..36) и configuration (RunwayConfiguration : left = 0, right = 1, center = 2, none = 3). При наличии ВПП (флаг HasRunway = true) программа преобразует числовые значения в текстовое обозначение (например, direction = 7, configuration = 0 в «07L»). Обозначение ВПП записывается в поле targetRWY структуры RouteLists. Информация о ВПП назначения необходима для определения конечной точки маршрута руления в зоне аэродрома и последующего поиска пути в графе AMDB.
2. Маршрут руления (TaxiRoute) – массив из элементов типа TaxiRouteElement, каждый из которых содержит:
 - a. Предлог направления (DirectionPreposition) – перечисление из 9 значений (at = 0, on = 1, to = 2, abeam = 3, via = 4, from = 5, onto = 6, clearOf = 7, across = 8), определяющее пространственное отношение к элементу маршрута. Предлог via (4) обозначает промежуточные участки, по которым следует осуществлять руление; предлог to (2) указывает на конечную точку маршрута; from (5) – на начальную точку.
 - b. Элемент маршрута (TaxiElement) — CHOICE-тип, который может принимать одну из двух форм:
 - c. standardElement – строка IA5String (SIZE 1..16), содержащая стандартный идентификатор элемента аэродрома (например, обозначение РД);
 - d. location - структура GroundLocation, содержащая атрибут типа (locationChoice) и наименование конкретного объекта аэродромной инфраструктуры.

При разборе элемента типа GroundLocation анализируется значение locationChoice, определяющее категорию объекта. На текущий момент реализована

полная обработка всех вариантов перечисления GroundLocationChoice, представленных в Таблица 2.7.

Таблица 2.7 – GroundLocationChoice

locationChoice	Тип объекта	Способ получения
apron	Перрон	GroundLocationIA5Stringvalue.
gate	Выход на посадку (гейт)	GroundLocationIA5Stringvalue.
stand	Стоянка ВС	GroundLocationIA5Stringvalue.
holdingBay	Площадка ожидания	GroundLocationIA5Stringvalue.
holdingPoint	Точка ожидания	holdingPoint.pointName + (опц.) holdingPoint.pointCategory (catI/catII/catIII, если HaspointCategory=true) + holdingPoint.runway (т.е. runway.direction + runway.configuration).
intersection	Пересечение	По intersection.Choice: intersectionName или taxiway или runway (для runway: direction+configuration).
hangar	Ангар	GroundLocationIA5Stringvalue.
namedPoint	Именованная точка	GroundLocationIA5Stringvalue.
ramp	Площадка	GroundLocationIA5Stringvalue.
runway	ВПП	runway.direction + runway.configuration (left/right/center/none).
taxilane	Рулежная полоса на перроне	GroundLocationIA5Stringvalue.
taxiway	РД	GroundLocationIA5Stringvalue.
terminal	Терминал	GroundLocationIA5Stringvalue.

deicingPosition	Позиция противообледенительной обработки	GroundLocationIA5Stringvalue.
deicingStopPosition	Точка остановки для противообледенительной обработки	GroundLocationIA5Stringvalue.
normalExit	Обычный съезд с ВПП	GroundLocationIA5Stringvalue
rapidExit	Скоростной съезд с ВПП	GroundLocationIA5Stringvalue
aircraftLatlong	Координаты ВС (широта/долгота)	aircraftLatlong.latitude, aircraftLatlong.longitude (в структуре также присутствуют направления N/S и E/W).
Use Of Extensibility	Для расширения стандарта	Для расширения стандарта

На основе полученных данных формируется текстовое представление разобранного маршрута для отображения экипажу, например: «TAXI TO HOLDING POINT RUNWAY 07L VIA A, B, CROSS RUNWAY 25R».

UM270 - EXPECT [clearance typeR] [assigned time]

Сообщение UM270 передает экипажу ожидаемый тип разрешения и назначенное время. Согласно стандарту DO-351B, оно определяется структурой ClearanceTypeRAssignedTime.

Из принятого сообщения извлекаются следующие данные:

Тип разрешения (ClearanceTypeR) – перечисление, определяющее категорию ожидаемого разрешения, представлено в Таблица 2.8.

Таблица 2.8 Структура ClearanceTypeR

Значение	Тип разрешения	Определение
0	APPROACH	Разрешение на заход
1	DEPARTURE	Разрешение на вылет
2	FURTHER	Дополнительное разрешение
3	STARTUP	Разрешение на запуск
4	PUSHBACK	Разрешение на буксировку
5	TAXI	Разрешение на руление

2. Назначенное время (AssignedTime) - составная структура, содержащая следующие опциональные поля:

- Предлог времени (TimePreposition) — определяет отношение ко времени: at (0), inAccordanceWith (1), after (2), before (3).
- Тип времени (AssignedTimeType) — определяет семантику временного параметра: CTOT (0, расчетное время взлета), EDCT (1, ожидаемое время получения разрешения на вылет), ELDT (2, расчетное время посадки), EOBT (3, расчетное время уборки колодок), ETOT (4, расчетное время взлета), TOBT (5, целевое время уборки колодок), TSAT (6, целевое время одобрения запуска), TTOT (7, целевое время взлета), CSTT (8, расчетное время руления до точки).
- Время (Time) — структура с полями hours (0..23) и minutes (0..59).

На основе полученных данных формируется текстовое представление и объединяется в итоговую строку вида «EXPECT TAXI AT TSAT 14:30». Данная информация отображается экипажу и используется для планирования времени начала руления.

UM307 - CROSS [ground location]

Сообщение UM307 содержит указание диспетчера на пересечение определенного элемента аэродромной инфраструктуры (как правило, ВПП).

Из сообщения UM307 извлекается единственный параметр – местоположение в виде структуры GroundLocation (см. Таблица 2.7), определяющее объект, который необходимо пересечь. Результатом является строка вида «CROSS RUNWAY 25R» или «CROSS TAXIWAY A».

UM306 - RESUME TAXI [taxi resume conditionO]

Сообщение UM306 содержит указание на возобновление руления, опционально с условием относительно другого воздушного судна. Согласно стандарту DO-351B, оно определяется типом TaxiResumeConditionO, который является CHOICE из трех вариантов.

Из принятого сообщения извлекаются следующие данные:

1. Условие возобновления (TaxiResumeConditionOChoice) – определяет контекст возобновления руления:
 - a. none – безусловное возобновление, без дополнительных параметров;
 - b. beforeAircraft – возобновить руление перед указанным воздушным судном;
 - c. afterAircraft – возобновить руление после указанного воздушного судна.
2. Идентификация воздушного судна (AircraftIdType) – при выборе вариантов beforeAircraft или afterAircraft извлекается структура TaxiResumeCondition, содержащая:
 - d. aircraftId – идентификатор ВС (позывной), IA5String (SIZE 2..8), опциональный;
 - e. aircraftType – тип ВС (обозначение ICAO), IA5String (SIZE 2..5), опциональный;
 - f. aircraftMovement – направление движения ВС: leftToRight или rightToLeft, опциональный.

На основе полученных данных формируется текстовое представление и объединяется в итоговую строку, например: «RESUME TAXI AFTER SU1234 A320

LEFT». Данное сообщение сигнализирует экипажу о необходимости продолжить прерванное руление с учетом условий, полученных от службы УВД.

UM311 - HOLD POSITION

Сообщение UM311 является простейшим из Uplink-сообщений и содержит безусловное указание диспетчера остановиться на текущей позиции. На основе полученных данных формируется текстовое представление и объединяется в итоговую строку вида «HOLD POSITION».

В рамках текущего пункта показано, что переход к формализованной семантической модели сообщений CPDLC является достаточным основанием для реализации на борту функций:

1. контекстной индикации и предупреждений для экипажа,
2. корректного отображения текстов указаний/информации УВД в человекоориентированном виде,
3. автоматизированного формирования ответных/инициируемых экипажем сообщений в адрес службы УВД.

Алгоритмы интерпретации выступают слоем семантического сопряжения между каналом CPDLC и бортовыми подсистемами (индикация, предупреждения, поддержка руления/навигации), сохраняя приоритет безопасности, процедурной корректности и разграничение ответственности между экипажем, бортовым оборудованием и службой УВД.

2.3 Разработка методики динамического построения маршрута руления ВС на основе комплексирования цифровых данных с использованием модифицированного А-алгоритма

В рамках настоящей работы рассматривается задача динамического построения маршрута руления ВС на аэродроме на стороне бортового вычислительного контура с использованием цифровых указаний диспетчера, передаваемых по каналу CPDLC, и цифровых карт аэродрома AMDB. Методика ориентирована на формирование геопривязанного маршрута для индикации на бортовых средствах (напри-

мер, Airport Moving Map на навигационном дисплее) и для алгоритмического контроля согласованности движения ВС с полученной цифровой командой службы УВД.

2.3.1 Комплексирование данных CPDLC и AMDB: формализация сопоставления «семантика - топология»

В отличие от подходов, где маршрут формируется экипажем вручную (вводом по голосовой инструкции через радиосвязь), предлагаемый методический аппарат основывается на формальном сопоставлении семантики CPDLC-сообщений и топологии аэродромной сети, извлекаемой из AMDB. Указанное сопоставление обеспечивает автоматизированную трансформацию текстово-структурных элементов указания в маршруте как упорядоченную последовательность узлов и ребер аэродромной маршрутной сети ASRN, задаваемой AMDB-данными. Наличие такого преобразования формирует единый информационный контур «команда - объект карты - траектория», в котором команда диспетчера, элементы цифровой карты и построенная траектория согласованы и синхронно доступны для последующей индикации и контроля. Также для обеспечения безопасности поиск маршрута должен учитывать конфликты на рулежных дорожках, пересечениях и участках ВПП [56].

Сформулируем задачу динамического построения маршрута руления следующим образом. Входными данными являются:

- актуальная аэродромная карта в формате AMDB, содержащая набор пространственных объектов, а также производную от нее сеть ASRN;
- цифровое диспетчерское указание на руление, представленное в виде CPDLC-сообщения D-TAXI.

Выходными данными алгоритма являются:

- последовательность номеров вершин и ребер графа ASRN, задающая маршрут руления от текущего положения ВС или стартового узла сети до целевого элемента, указанного в CPDLC-сообщении (ВПП, стоянка или точка ожидания);

- геодезический трек в системе координат WGS-84, пригодный для отображения на навигационном дисплее в составе функции Airport Moving Map (АММ) и для использования в алгоритмах автоматизированного руления;
- набор идентификаторов элементов AMDB, через которые проходит маршрут, позволяющий формировать проверочные и ответные CPDLC-сообщения, а также выполнять контроль согласованности между маршрутом, заданным диспетчером, и фактически проложенным путем по карте аэродрома.

Таким образом, методика должна обеспечить комплексирование трех типов информации: структурной (граф ASRN), семантической (идентификаторы и атрибуты объектов AMDB) и операционной (команды CPDLC и эксплуатационные ограничения), с целью построения маршрута руления, минимизирующего заданный функционал стоимости при соблюдении всех ограничений.

2.3.2 Модифицированный А-алгоритм

Графовые модели аэродромной поверхности используются для безопасного и оптимального управления движением воздушных судов [57]. Аэродромная сеть моделируется ориентированным графом $G = (V, E)$, где вершины V соответствуют узловым точкам инфраструктуры (пересечения, точки ожидания, въезды/выезды на стоянки), а ребра E - допустимым сегментам движения с атрибутами геометрии и направлений, извлекаемыми из соответствующих элементов инфраструктуры аэродрома ассоциированных с ребрами графа. Алгоритм построения маршрута использует модификацию алгоритма A^* для графа ASRN - аэродромной маршрутной сети.

Каждое ребро $e = (u, v)$ ассоциируется с конкретным элементом инфраструктуры (например, сегментом РД или связью перрон – стоянка) и наследует его атрибуты: геометрию (координатное описание), разрешенные направления движения (одно-/двунаправленность), эксплуатационный статус (например, active/closed/construction), а также характеристики покрытия, используемые для контроля применимости к данному типу ВС (в сценариях - с учетом PCN/ACN).

Разрешение конфликтов может выполняться ожиданием, изменением последовательности движения или перестроением маршрута [58].

Задача заключается в поиске оптимального маршрута $P^* = [V_0, V_1, \dots, V_m]$, начинающегося на стартовой вершине $V_0 = s$ и заканчивающегося в целевой вершине $V_m = n$, минимизирующего суммарные затраты. Под «затратами» далее понимается совокупность базовой стоимости прохождения ребер (например, длина, оценка времени руления, технологические коэффициенты) и добавочных штрафов, отражающих предпочтительность/непредпочтительность отдельных решений с точки зрения соблюдения ограничений, заданных цифровым разрешением и данными инфраструктуры. Базовым методом поиска кратчайших путей во взвешенном графе с неотрицательными весами является алгоритм Дейкстры [52]. Выбор метода поиска зависит от свойств графа, наличия эвристической информации и требований к вычислительной сложности [54].

Оптимальное построение маршрута реализуется с использованием алгоритма A^* [53], основанного на функции оценки:

$$f(n) = g(n) + h(n),$$

где:

- $g(n)$ – суммарный вес маршрута от начальной вершины s до n [59]:

$$V_0 g(n) = \sum_{k=1}^m W_{V_{k-1}, V_0}, V_0 = s, V_m = n,$$

где W_{V_{k-1}, V_0} – вес (стоимость перехода) между смежными вершинами на рассматриваемом пути.

- $h(n)$ – эвристическая оценка целевого функционала.

В рассматриваемой постановке эвристическая оценка дополняется компонентами, отражающими практические ограничения построения маршрута руления на борту (в рамках вычислителя/индикации движения по аэродрому), включая согласование с CPDLC-разрешением [59, 60] и проверку инфраструктурных атрибутов AMDB. В рамках текущей задачи эвристическая оценка до цели содержит следующие ограничения:

1) Штраф за несоответствие маршруту, указанному в CPDLC сообщении.

Пусть из принятого CPDLC-сообщения сформировано множество ребер, соответствующее разрешенному диспетчером маршруту движения (например, последовательности элементов TO/VIA/ACROSS и т.п.). Если текущее ребро не входит в множество ребер, задаваемое полученным сообщением, то вводится штраф:

$$C_{CPDLC}(e_{ij}, S) = \begin{cases} w, & \text{если } e_{ij} \in S; \\ 10 * w, & \text{если } e_{ij} \notin S, \end{cases}$$

где S – множество ребер, определенных сообщением;

2) Штраф за острые углы.

Если угол между соседними ребрами θ превышает допустимый предел (например, 85° , 100° , 180° - в зависимости от сценария), соответствующий поворот штрафуеться:

$$C_{turn}(e_{ij}, \theta) = \begin{cases} w, & \text{если } |\theta| \leq \theta_{max}; \\ 7 * w, & \text{если } |\theta| > \theta_{max} \end{cases}$$

3) Штраф за несоответствие инфраструктурным ограничениям аэродрома.

Если рассматриваемое ребро не соответствует типу или статусу из полигональных данных AMDB, то к функции добавляется штраф:

$$C_{type}(e_{ij}) = \begin{cases} w, & \text{если тип ребра разрешен;} \\ 50 * w, & \text{если иначе} \end{cases}.$$

К разрешенным типам ребра относятся:

- ребра, которые имеют состояние элемента «открыто» (т.е. рулежная дорожка, парковка и т.д. – не находятся, например, на ремонте);
- ребра, которые имеют требуемое направление (элементы сети могут быть однопавленными или двупавленными);
- ребра, которые имеют код, выражающий несущую способность искусственного покрытия для эксплуатации без ограничений в рамках типа воздушного судна (в зависимости от сценария).

При изменении доступности элементов аэродромной сети задача относится к классу динамических задач поиска кратчайшего пути [55, 56].

Общая формула эвристической оценки целевого функционала имеет следующий вид:

$$h(n) = C_{CPDLC}(e_{ij}, S) + C_{turn}(e_{ij}, \theta) + C_{type}(e_{ij}).$$

В алгоритме для обеспечения оптимальности выбирается допустимая эвристика, которая не переоценивает истинную стоимость пути, то есть $f(n) \leq f^*(n)$, где $f^*(n)$ - минимальная стоимость от s до n .

Если все возможные маршруты $P^* = [p_0, p_1, \dots, p_m]$, уже построены, то для выбора кратчайшего маршрута следует применить следующий критерий:

1. Для каждого маршрута, где $p_i^* = [v_0^i, v_1^i, \dots, v_m^i]$, вычисляется суммарная стоимость:

$$c(p_i) = \sum_{j=1}^m w_{v_{j-1}, v_j}.$$

2. Объявляется минимальное значение стоимости как функция выбора:

$$C_{min} = \min_{1 \leq i \leq N} C(p_i).$$

Таким образом, алгоритмически происходит сравнение всех стоимостей маршрутов, и выбирается путь с наименьшей суммарной стоимостью переходов [61 - 70].

Блок – схема алгоритма построения маршрута руления, описанного выше, представлена на Рисунок 2.2. Инициализация включает прием и декодирование сообщения от УВД, с последующей проверкой корректности полученных данных, таких как идентификаторы начальной и конечной точки, их принадлежность графу и соответствие типам аэродромных объектов. При выявлении несоответствий обработка прекращается, исключая построение ошибочных маршрутов. После успешной валидации формируется внутренняя структура графа: матрица смежности, массивы меток расстояний и предков, а также вектор посещенности узлов.

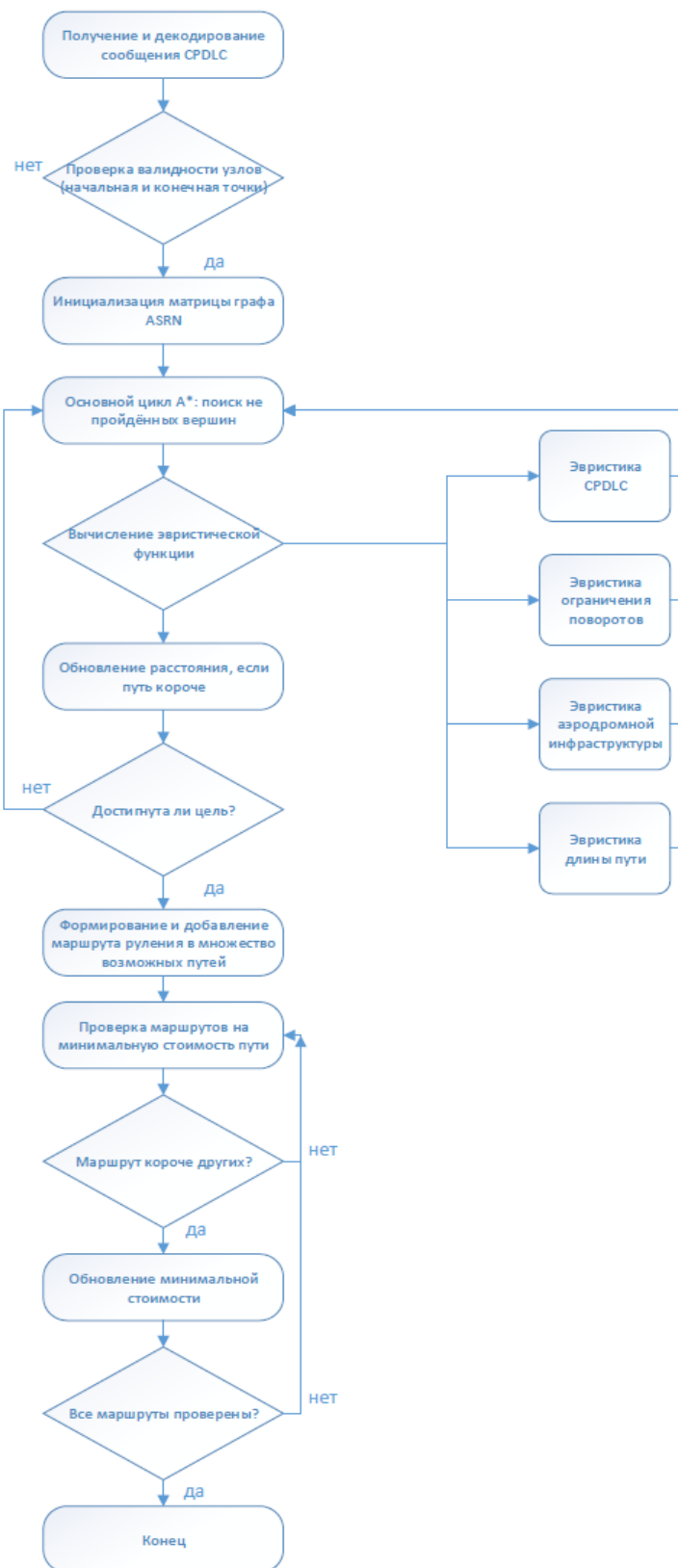


Рисунок 2.2 – Блок – схема алгоритма построения маршрута руления

2.4 Разработка рекомендаций по информационной интеграции сформированного маршрута руления в бортовые средства индикации и систему автоматического управления ВС

На основании проведенного анализа функциональных требований (см. 1.1 Анализ требований нормативных документов по обеспечению безопасности движения ВС в зоне аэродрома), а также экспериментальных данных, полученных на стенде комплексного пилотажного стенда самолета МС-21, разработана информационная модель индикации маршрута руления на навигационном дисплее экипажа.

2.4.1 Информационная модель

Информационная модель включает четыре функциональных зоны индикации на ND:

Зона 1. Текстовая расшифровка CPDLC-сообщения (нижняя часть экрана). Содержит текстовое представление полученной команды диспетчера в формате, соответствующем стандартной фразеологии.

Зона 2. Элементы управления (кнопки «ACCEPT» и «REJECT», нижняя часть экрана под зоной 2). Обеспечивают интерактивное взаимодействие экипажа с системой для подтверждения или отклонения полученных указаний.

Зона 3. Таблица элементов маршрута руления (левая верхняя часть экрана). Представляет последовательность элементов маршрута с выделением текущего активного элемента.

Зона 4. Графическое представление маршрута руления на карте аэродрома (центральная область ND). Маршрут отображается в виде непрерывной линии, наложенной на элементы аэродромной инфраструктуры AMDB.

Разработанная система цветового кодирования элементов индикации, обеспечивающая однозначную интерпретацию экипажем текущего состояния маршрута руления и характера полученных указаний, представлена в Таблица 2.9.

Таблица 2.9 – Система цветового кодирования элементов индикации

	Элементы экрана ND CPDLC	Зона 1. Текст расшифровки сообщения CPDLC (внизу экрана)	Зона 2. Кнопки под текстом маршрута руления	Зона 3. Таблица Элементов маршрута руления слева сверху	Зона 4. Маршрут руления на карте аэродрома
маршрут руления	UM 308	активного цвета	АССЕРТ/РЕ- JECT <i>состояние <готовые к нажатию></i>	Синяя таблица	фиолетовая линия
	АС- СЕРТ	неактивного цвета	АССЕРТ – выделена РЕJECT – не выделена	Синяя таблица с белым активным элементом	Зеленая линия
	РЕJECT	неактивного цвета	АССЕРТ – не выделена РЕJECT – выделена	-	-
начало движения	UM 270	активного цвета	АССЕРТ/РЕ- JECT <i>состояние <готовые к нажатию></i>	Синяя таблица с белым активным элементом	Зеленая линия
	АС- СЕРТ	неактивного цвета	АССЕРТ – выделена РЕJECT – не выделена	Синяя таблица с белым активным элементом	Зеленая линия
	РЕJECT	неактивного цвета	АССЕРТ – не выделена РЕJECT – выделена	Синяя таблица с белым активным элементом	Зеленая линия
команда остановки	UM 311	активного цвета	АССЕРТ/РЕ- JECT <i>состояние <готовые к нажатию></i>	Синяя таблица с белым активным элементом и с оранжевым элементом – точкой остановки	Зеленая линия

	Элементы экрана ND CPDLC	Зона 1. Текст расшифровки сообщения CPDLC (внизу экрана)	Зона 2. Кнопки под текстом маршрута руления	Зона 3. Таблица Элементов маршрута руления слева сверху	Зона 4. Маршрут руления на карте аэродрома
	АС-СЕРТ	неактивного цвета	АССЕРТ – выделена REJECT – не выделена	Синяя таблица с белым активным элементом и с оранжевым элементом – точкой остановки	Зеленая линия
	REJECT	неактивного цвета	АССЕРТ – не выделена REJECT – выделена	Синяя таблица с белым активным элементом и с оранжевым элементом – точкой остановки	Зеленая линия
продолжить движение	UM 306	активного цвета	АССЕРТ/REJECT <i>состояние <готовые к нажатию></i>	Синяя таблица с белым активным элементом	Зеленая линия
	АС-СЕРТ	неактивного цвета	АССЕРТ – выделена REJECT – не выделена	Синяя таблица с белым активным элементом	Зеленая линия
	REJECT	неактивного цвета	АССЕРТ – не выделена REJECT – выделена	Синяя таблица с белым активным элементом	Зеленая линия
пересечение ВПП	UM 307	активного цвета	АССЕРТ/REJECT <i>состояние <готовые к нажатию></i>	Синяя таблица с белым активным элементом	Зеленая линия
	АС-СЕРТ	неактивного цвета	АССЕРТ – выделена REJECT – не выделена	Синяя таблица с белым активным элементом	Зеленая линия

Элементы экрана ND CPDLC	Зона 1. Текст расшифровки сообщения CPDLC (внизу экрана)	Зона 2. Кнопки под текстом маршрута руления	Зона 3. Таблица Элементов маршрута руления слева сверху	Зона 4. Маршрут руления на карте аэродрома
REJECT	неактивного цвета	АССЕРТ – не выделена REJECT – выделена	Синяя таблица с белым активным элементом	Зеленая линия

Выбор фиолетового цвета для обозначения предложенного, но не подтвержденного маршрута обусловлен конвенцией, принятой в авиационной индикации для обозначения плановой траектории. Зеленый цвет подтвержденного маршрута соответствует общепринятой семантике «разрешено - безопасно». Оранжевый цвет для точки остановки используется как предупредительный, привлекающий внимание экипажа.

Сообщение, требующее реакции экипажа (АССЕРТ/REJECT), не должно исчезать с экрана до получения нового сообщения или совершения действия экипажем. Данное требование обеспечивает непрерывность ситуационной осведомленности и предотвращает потерю информации о текущих указаниях диспетчера.

2.4.2 Рекомендации по интеграции маршрута руления для типовых CPDLC-сообщений D-TAXI

2.4.2.1 Маршрут руления

Сообщение UM 308 (TAXI TO...) является основным сообщением D-TAXI, содержащим полное описание маршрута руления от текущего положения ВС до назначенной позиции (ВПП, стоянки, точки ожидания).

Рекомендации по индикации при получении UM 308, представлены на Рисунок 2.3. В зоне 2 отобразить расшифрованный текст маршрута руления активным цветом. В зоне 4 активировать кнопки АССЕРТ и REJECT (активный цвет, состояние «готовы к нажатию»). В зоне 3 отобразить таблицу элементов маршрута руле-

ния на синем фоне. В зоне 1 отобразить маршрут руления на карте аэродрома фиолетовым цветом, что соответствует статусу «предложен, ожидает подтверждения экипажа».

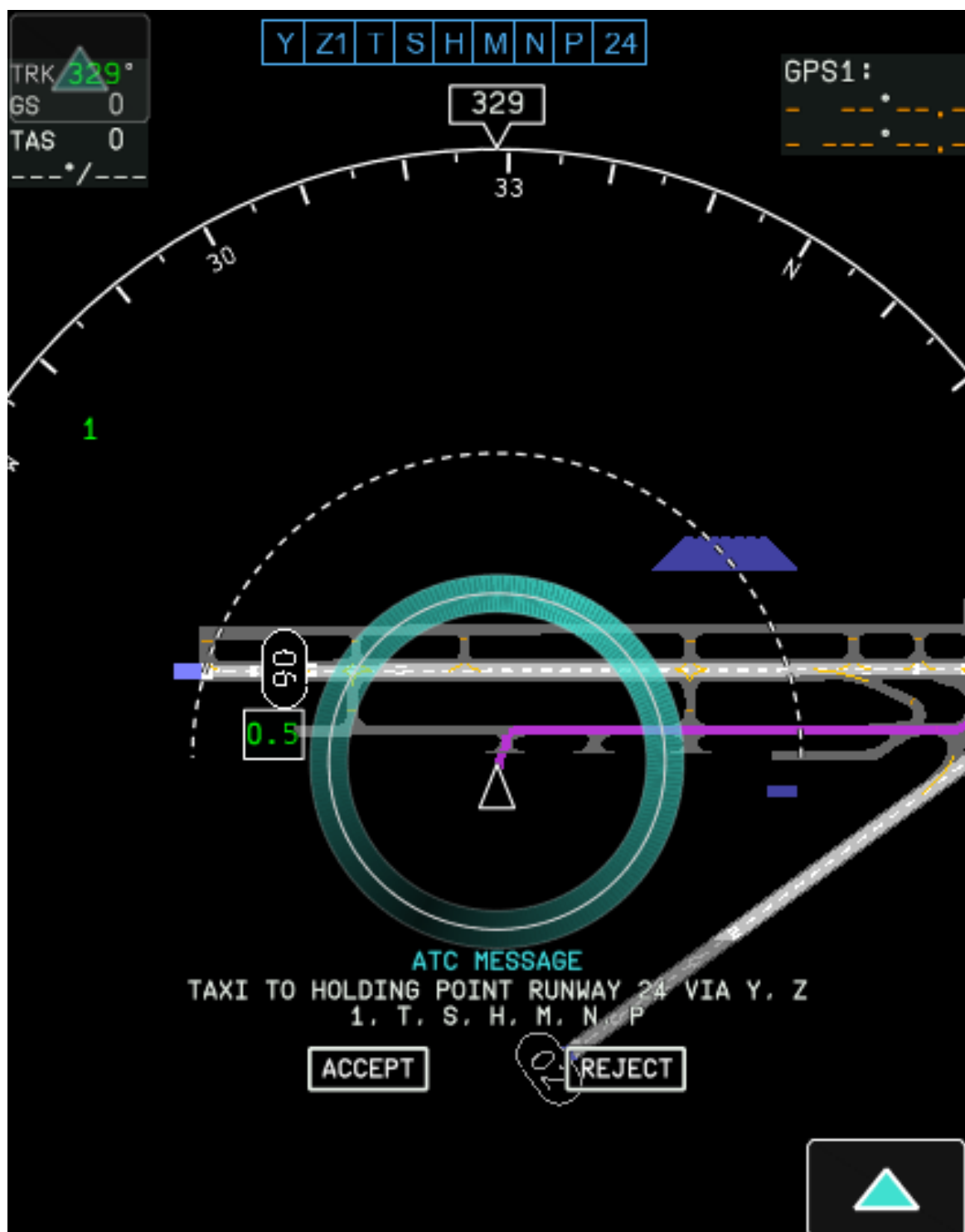


Рисунок 2.3 – Концепция индикации предложенного маршрута руления в кадре навигационного дисплея

При нажатии кнопки «АССЕРТ» (см. Рисунок 2.4):

- маршрут руления на карте аэродрома изменяет цвет на зеленый;

- кнопка «АССЕРТ» переходит в селективное состояние («нажато»);
- текст сообщения переходит в неактивный цвет;
- в таблице элементов маршрута текущий активный элемент выделяется белым цветом.



Рисунок 2.4 – Концепция индикации подтвержденного маршрута руления в кадре навигационного дисплея

При нажатии кнопки «REJECT»:

- маршрут руления не отображается на карте;

- таблица элементов маршрута не отображается;
- кнопка «REJECT» переходит в селективное состояние («нажато»);
- текст сообщения переходит в неактивный цвет.

Семантика отклонения маршрута предполагает, что экипаж не согласен с предложенным маршрутом, и ожидается повторное сообщение от диспетчера с пересмотренным маршрутом.

2.4.2.2 Ожидание начала движения

Сообщение UM 270 (EXPECT TAXI...) уведомляет экипаж о планируемом разрешении на руление.

В зоне 2 отобразить расшифрованный текст маршрута руления активным цветом. В зоне 4 активировать кнопки АССЕРТ и REJECT (активный цвет, состояние «готовы к нажатию»). В зоне 3 отобразить таблицу элементов маршрута руления на синем фоне. В зоне 1 отобразить маршрут руления на карте аэродрома фиолетовым цветом, что соответствует статусу «предложен, ожидает подтверждения экипажа».

Рекомендации по индикации при получении UM 270 представлены на Рисунок 2.5. Текст разрешения отображается в зоне 2 активным цветом. В зоне 4 активировать кнопки АССЕРТ и REJECT (активный цвет, состояние «готовы к нажатию»). В зоне 3 отобразить таблицу элементов маршрута руления с выделением текущего активного элемента. В зоне 1 отобразить маршрут руления на карте аэродрома:

- фиолетовым цветом, если маршрут руления изменился по сравнению с ранее подтвержденным;
- зеленым цветом, если маршрут выдан ранее и не претерпел изменений.

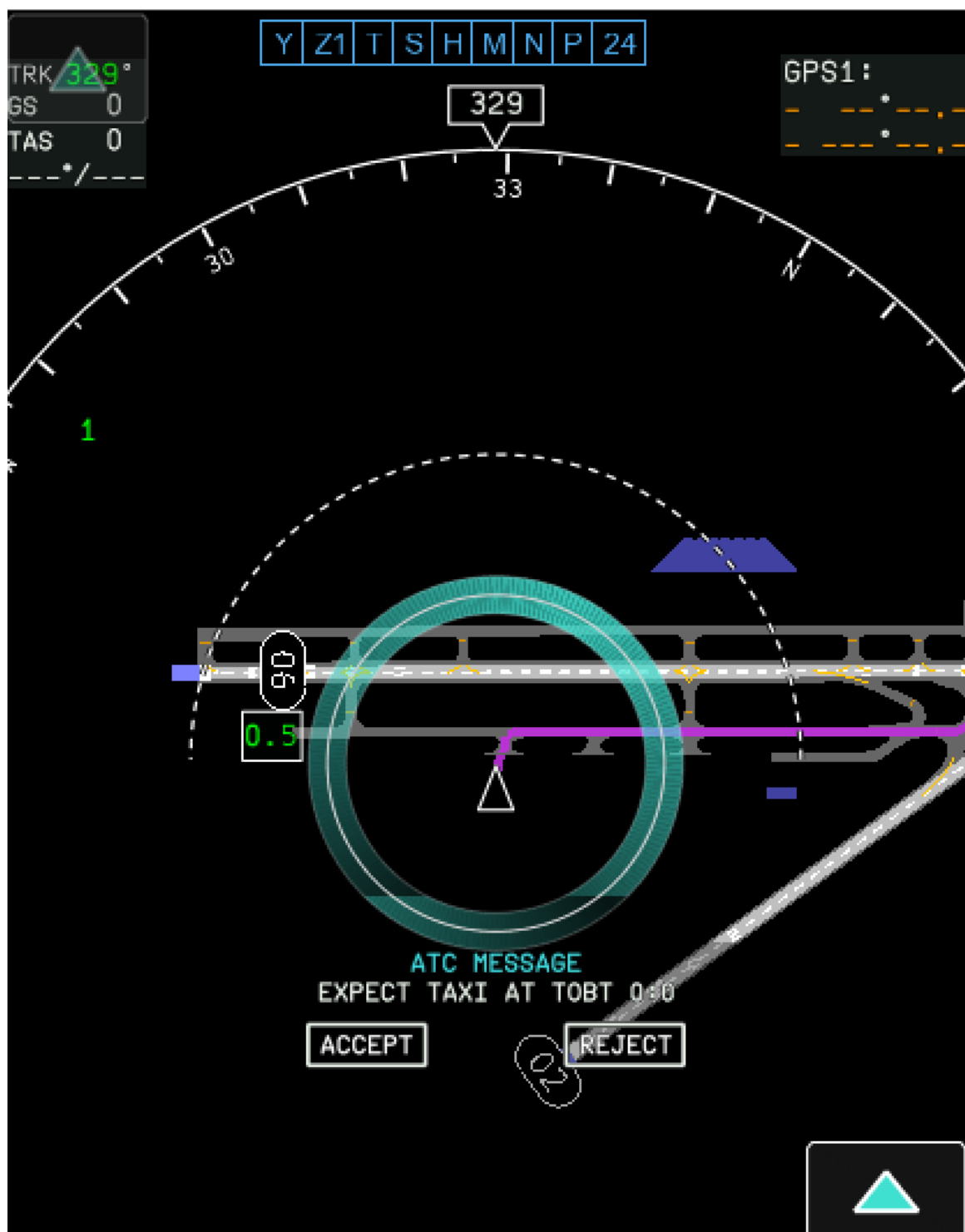


Рисунок 2.5 – Концепция индикации уведомления о возможности начала движения по маршруту руления в кадре навигационного дисплея

Данная двойственность цветового кодирования обеспечивает мгновенное восприятие экипажем факта изменения маршрута, что является критически важным для поддержания ситуационной осведомленности.

При нажатии кнопки «АССЕРТ»:

- маршрут руления на карте аэродрома изменяет цвет на зеленый;

- кнопка «АССЕРТ» переходит в селективное состояние («нажато»);
- текст сообщения переходит в неактивный цвет;
- в таблице элементов маршрута текущий активный элемент выделяется белым цветом.

При нажатии кнопки «REJECT»:

- маршрут руления не отображается на карте;
- таблица элементов маршрута не отображается;
- кнопка «REJECT» переходит в селективное состояние («нажато»);
- текст сообщения переходит в неактивный цвет.

2.4.2.3 Команда остановиться

Сообщение UM 311 является критическим с точки зрения безопасности, поскольку требует немедленной реакции экипажа – прекращения движения ВС.

Рекомендации по индикации при получении UM 311 представлены на Рисунок 2.6. Текст команды отображается в зоне 2 активным цветом. В зоне 4 активировать кнопки АССЕРТ и REJECT (активный цвет, состояние «готовы к нажатию»). В зоне 3 отобразить таблицу элементов маршрута руления с выделением оранжевым цветом элемента, на котором нужно совершить остановку. В зоне 1 отобразить маршрут руления на карте аэродрома зеленым цветом. По центру кадра навигационного дисплея рекомендуется краткосрочная индикация в виде баннера «HOLD POSITION» для повышения заметности критической команды.

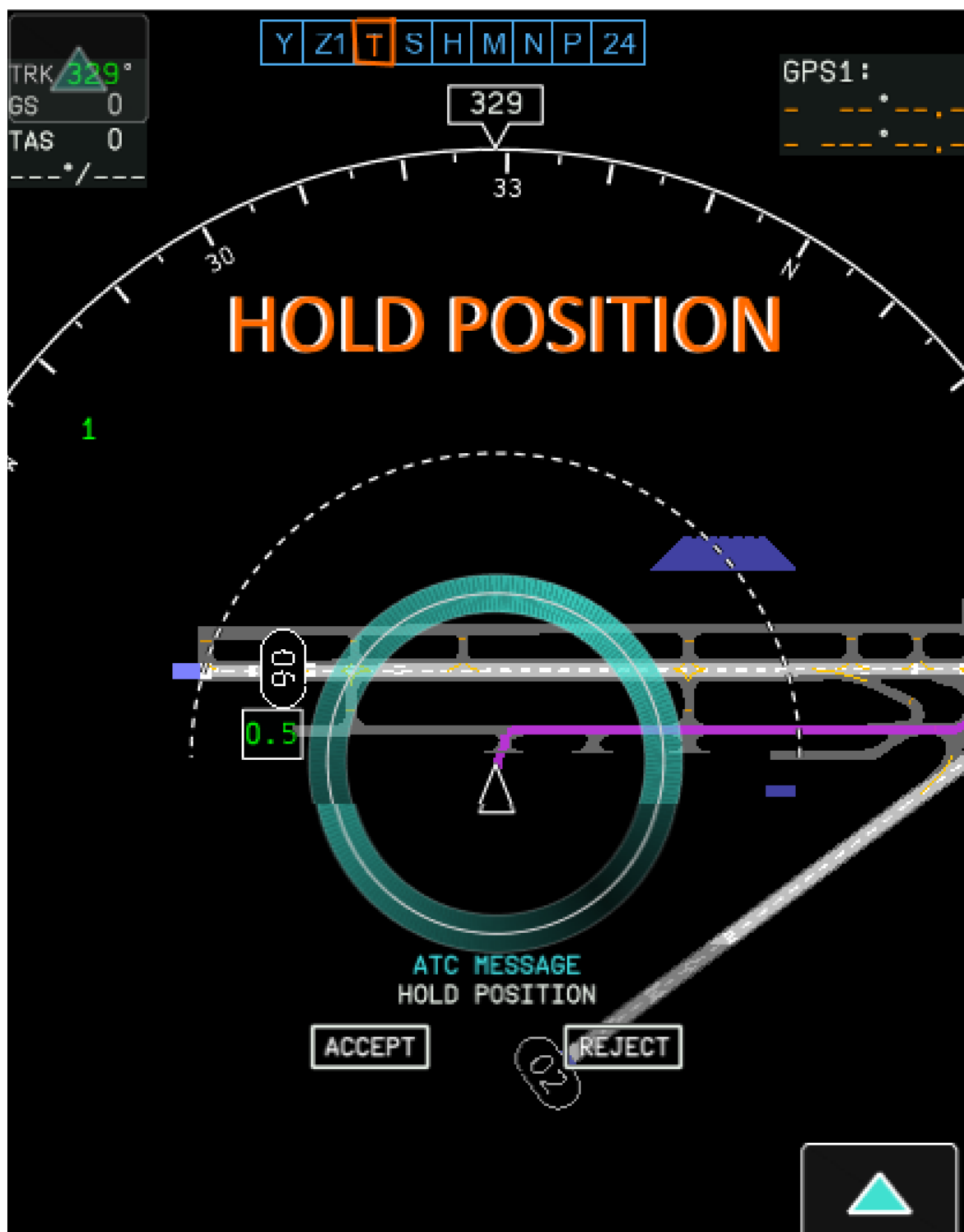


Рисунок 2.6 – Концепция индикации уведомления о немедленной остановке кадре навигационного дисплея

Применение баннерной индикации обосновано анализом человеческого фактора: в условиях высокой загруженности экипажа текстовое сообщение в нижней части экрана может быть не замечено своевременно. Баннер, расположенный в поле зрения пилота, обеспечивает привлечение внимания с минимальной задержкой.

При нажатии кнопки «АССЕРТ»:

- маршрут руления сохраняет зеленый цвет;
- таблица элементов маршрута – оранжевый элемент, на котором нужно совершить остановку;
- кнопка «АССЕРТ» переходит в селективное состояние («нажато»);
- текст сообщения переходит в неактивный цвет.

2.4.2.4 Команда продолжить движение

Сообщение UM 306 разрешает экипажу возобновить движение после остановки.

Рекомендации по индикации при получении UM 306 представлены на Рисунок 2.7. Текст команды отображается в зоне 2 активным цветом. В зоне 4 активировать кнопки АССЕРТ и РЕЈЕСТ (активный цвет, состояние «готовы к нажатию»). В зоне 3 отобразить таблицу элементов маршрута сохраняется с текущим активным элементом. В зоне 1 отобразить маршрут руления на карте аэродрома зеленым цветом.

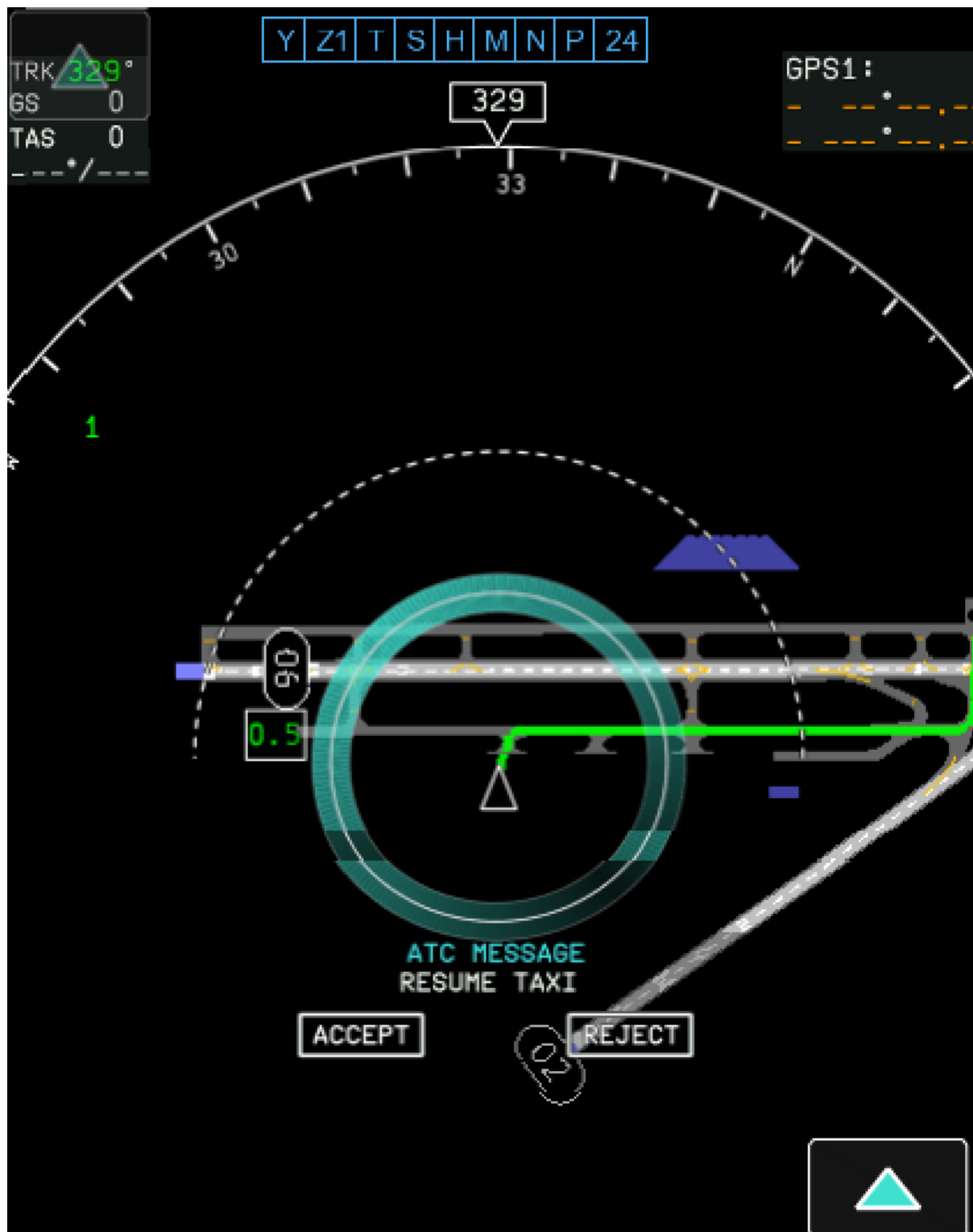


Рисунок 2.7 – Концепция индикации уведомления о продолжении движения на кадре навигационного дисплея

При нажатии кнопки «АССЕРТ»:

- маршрут руления сохраняет зеленый цвет;
- в таблице элементов маршрута текущий активный элемент выделяется белым цветом;

- кнопка «АССЕРТ» переходит в селективное состояние («нажато»);
- текст сообщения переходит в неактивный цвет.

2.4.2.5 Пересечение элемента инфраструктуры

Сообщение UM 307 разрешает экипажу пересечение указанного элемента аэродромной инфраструктуры – как правило, ВПП. Данная операция является одной из наиболее критических с точки зрения безопасности, поскольку пересечение активной ВПП создает потенциальный конфликт с ВС, выполняющими взлет или посадку.

Рекомендации по индикации при получении UM 307 представлены на Рисунок 2.8. Текст команды отображается в зоне 2 активным цветом. В зоне 4 активировать кнопки АССЕРТ и REJECT (активный цвет, состояние «готовы к нажатию»). В зоне 3 отобразить таблицу элементов маршрута сохраняется с текущим активным элементом. В зоне 1 отобразить маршрут руления на карте аэродрома фиолетовым цветом.

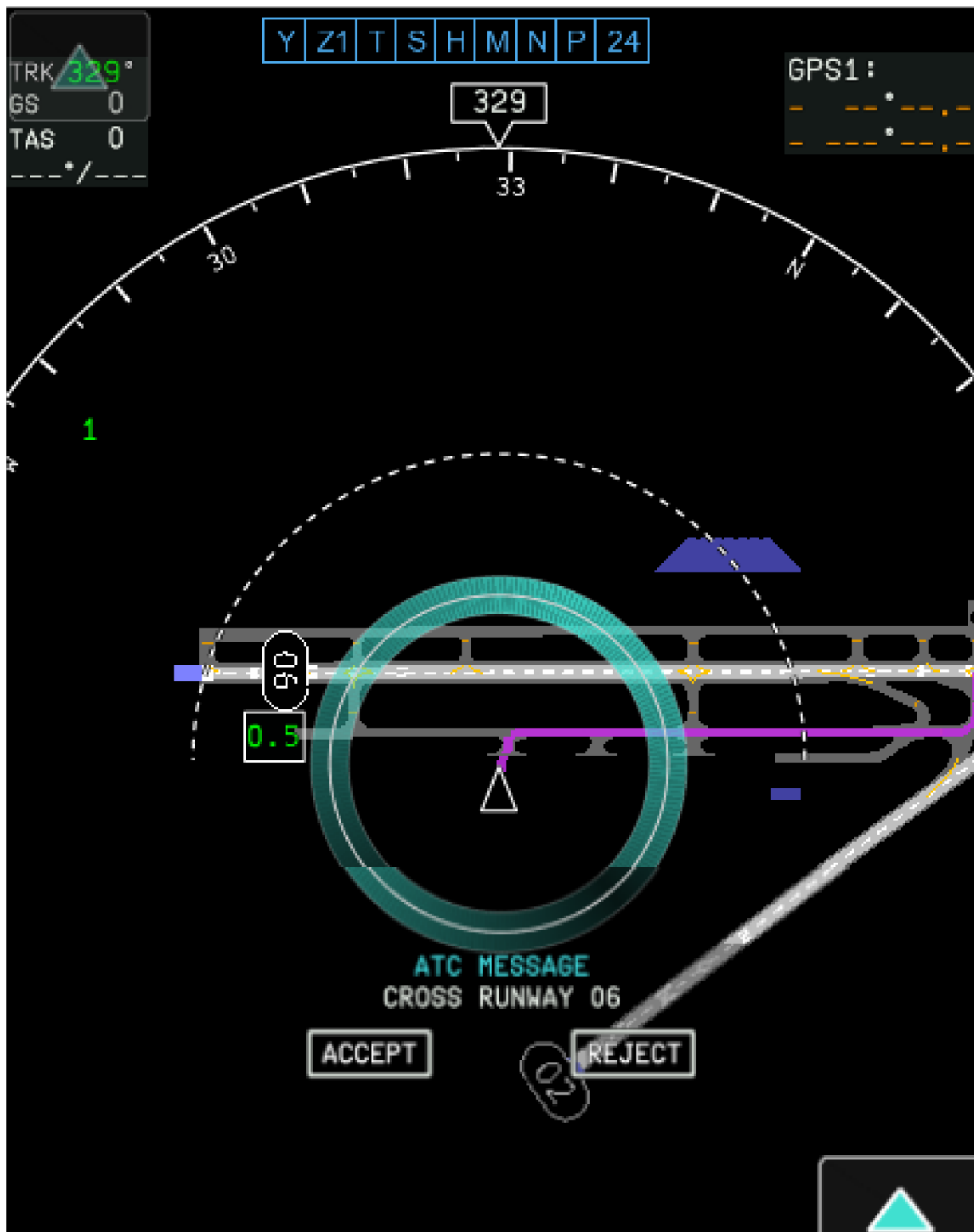


Рисунок 2.8 – Концепция индикации уведомления о пересечении элемента инфраструктуры на кадре навигационного дисплея

При нажатии кнопки «АССЕРТ»:

- маршрут руления окрашивается зеленый цвет;

- в таблице элементов маршрута текущий активный элемент выделяется белым цветом;
- кнопка «АССЕРТ» переходит в селективное состояние («нажато»);
- текст сообщения переходит в неактивный цвет.

Выводы по главе 2

В главе 2 показано, что AMDB может использоваться как базовая цифровая модель аэродромной инфраструктуры, поскольку содержит формализованное описание элементов летного поля и объектов, необходимых для маршрутизации руления, включая элементы сети ASRN.

1. Установлено, что представление ASRN в виде типизированного графа с узлами и ребрами позволяет однозначно описывать структуру маршрута руления и создает основу для его последующей машинной обработки.
2. Анализ структуры сообщений CPDLC показал, что D-TAXI-маршруты могут быть формально представлены средствами ASN.1 PER в соответствии с RTCA DO-351B и RTCA DO-350, а для наземного этапа движения наибольшее значение имеют uplink-сообщения UM308, UM270, UM311, UM306, UM307 и downlink-сообщения DM135, DM0, DM1, DM3.
3. Разработано сопоставление между элементами CPDLC и объектами AMDB/ASRN, за счет чего текстовые и структурированные указания руления могут быть преобразованы в элементы цифрового маршрута, пригодного для отображения и обработки на борту воздушного судна.
4. Обосновано применение алгоритма A^* для построения маршрута руления с учетом не только топологии сети, но и эксплуатационных факторов, включая соответствие CPDLC-маршруту, длину пути, удаление до цели, углы поворота, статус элементов сети и ограничения по PCN.
5. Показано, что интеграция AMDB, ASRN и CPDLC в составе бортового программного обеспечения AMM ND обеспечивает формирование, визуализацию и подтверждение маршрута руления через интерфейс, что повышает информативность экипажа при движении по аэродрому.

6. Таким образом, во второй главе сформированы информационная, алгоритмическая и программная основы методики динамического построения маршрута руления воздушного судна на основе интеграции цифровых данных и модели аэродромной инфраструктуры.

РАЗДЕЛ 3 РЕАЛИЗАЦИЯ РАЗРАБОТАННЫХ АЛГОРИТМОВ В БОРТОВЫХ СИСТЕМАХ ВС, ОЦЕНКА ИХ ЭФФЕКТИВНОСТИ

В настоящем разделе рассматриваются вопросы практической реализации разработанных алгоритмов динамического построения маршрута руления воздушного судна по аэродрому в составе бортовых систем, а также подходы к оценке их эффективности. Исследования разделены на два этапа, каждый из которых соответствует одному из режимов функционирования разработанного комплекса программ:

1. Ручной режим (советующая система) – маршрут строится и отображается экипажу на навигационном дисплее, управление выполняет пилот. Оценка проводится на стенде прототипирования кабины экипажа самолета МС-21. В данном режиме проверяется эффективность разработанных алгоритмов как средства поддержки принятия решений, снижения когнитивной нагрузки и повышения ситуационной осведомленности.

2. Автоматический режим – маршрут передается в контур системы автоматического управления рулением, управление выполняет автопилот. Оценка проводится на комплексном полунатурном стенде с валидированной моделью динамики самолета МС-21. В данном режиме проверяется эффективность разработанных алгоритмов как компонента замкнутой системы управления, оцениваются точность слежения, устойчивость и надежность.

3.1 Реализация динамического маршрута руления ВС по аэродрому на средствах индикации экипажу на базе стенда прототипирования кабины экипажа МС-21

3.1.1. Стенд прототипирования кабины экипажа как инструмент исследования

Стенд прототипирования кабины экипажа самолета МС-21 (см. Рисунок 3.1) представляет собой специализированный программно-аппаратный комплекс, для формирования и верификации требований к информационно-управляющему полю кабины перспективного воздушного судна [71]. Основное назначение стенда заключается в экспериментальной отработке человеко-машинного интерфейса, логики функционирования средств индикации и органов управления, а также в оценке процедур взаимодействия экипажа с бортовыми системами на ранних этапах проектирования.



Рисунок 3.1 – Стенд прототипирования кабины экипажа МС-21

Стенд включает следующие основные компоненты:

- панели приборов с функциональными дисплеями (Primary Flight Display — PFD, Navigation Display — ND, Multi-Function Display — MFD);
- органы управления (ручка управления боковая, педали, рычаги управления двигателями, панель управления автопилотом);

- вычислительный комплекс с моделирующей средой, обеспечивающей динамику изменения параметров полета и наземного движения;
- систему сбора данных (логгер параметров) для регистрации действий пилота и состояния системы.

С научно-методической точки зрения стенд прототипирования МС-21 представляет особый интерес как среда апробации алгоритмов, связанных с формированием и отображением маршрутов руления на навигационном дисплее. Использование такой платформы позволяет исследовать процессы восприятия экипажем информации о маршруте, оценивать достаточность графического и символьного представления элементов аэродромной инфраструктуры, а также проверять корректность сопряжения процедур руления с логикой бортовой индикации.

3.1.2. Архитектура и компонентная структура модуля «Функция движения по поверхности аэродрома»

Представленные в главе 2 алгоритмы могут быть объединены в единый программный модуль «Функция движения по поверхности аэродрома» (далее - ПМ fnAMM). Структурно данный модуль включает следующие подмодули:

1. обработку сообщений CPDLC типа D-TAXI;
2. обработку данных аэродромной картографической базы AMDB;
3. построение маршрута руления на основе указаний диспетчерской службы и данных об аэродромной инфраструктуре;
4. сопровождение маршрута руления в процессе движения воздушного судна;
5. передачу маршрута руления и связанных с ним событий, включая повороты, точки ожидания перед ВПП и иные значимые элементы маршрута, внешним потребителям.

В качестве исходных данных при формировании маршрута использовались: цифровые сообщения диспетчера УВД формата CPDLC сервиса D-TAXI, данные аэродромной картографической базы AMDB, а также формализованная топологическая модель аэродромной инфраструктуры ASRN, построенная на основе AMDB.

В составе программной реализации были использованы алгоритмы интерпретации структурированных сообщений CPDLC, процедуры сопоставления семантических элементов сообщения с объектами модели ASRN и модифицированный A-алгоритм поиска маршрута, учитывающий ограничения, рассмотренные в разделе 2.3. Компонентная структура модуля «Функция движения по поверхности аэродрома» представлена на Рисунок 3.2.

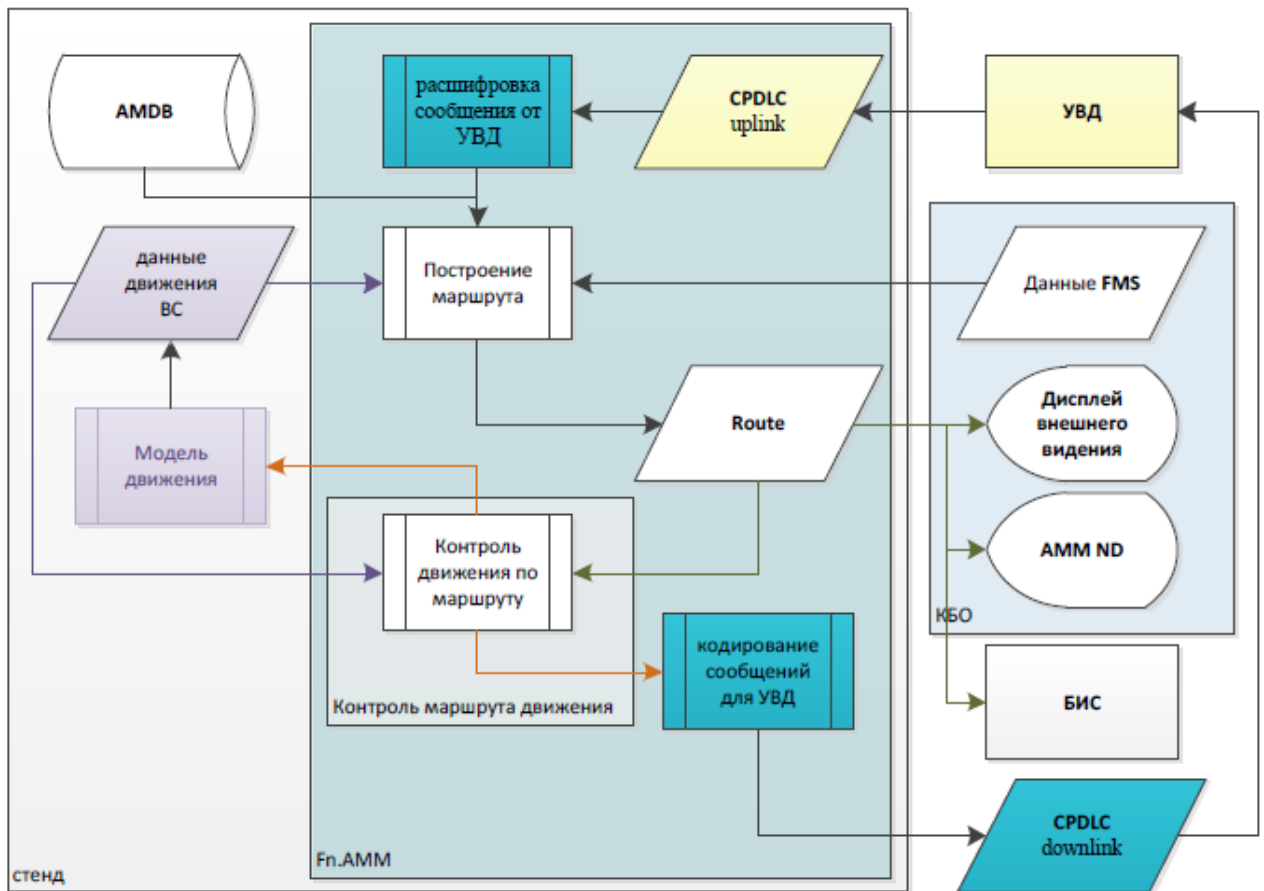


Рисунок 3.2 – Компонентная структура модуля «Функция движения по поверхности аэродрома»

3.1.3. Взаимодействие модуля с бортовыми системами

Модуль «Функция движения по поверхности аэродрома» является отдельным исполняемым модулем в составе стенда и состоит из следующих основных программных функций:

- построение или перестроение маршрута;
- расшифровка сообщения от УВД;
- управление движением с обратной связью;
- контроль маршрута движения – во время движения осуществляет контроль отклонения от маршрута и прогнозирование событий.

Для обеспечения работы модуля fnAMM требуются компоненты в составе стенда прототипирования:

- Модель движения – передает данные положения своего ВС;
- AMDB – база данных аэродромной инфраструктуры;
- CPDLC – текст сообщения пилот-диспетчер
- Route – данные рассчитанного маршрута руления для использования сторонними приложениями;
- AMM ND – система индикации, на которой отображена карта аэродрома, текущее местоположение воздушного судна (ВС), текущий маршрут движения, текстовый вид сообщения, полученного от УВД, события на маршруте;
- УВД (управление воздушным движением) – это комплекс мероприятий, обеспечивающих безопасное, упорядоченное и эффективное движение воздушных судов в воздушном пространстве и на земле;
- FMS (Flight Management System) – бортовая компьютерная система, которая автоматизирует широкий спектр задач по управлению полетом;
- БИС (бортовая информационная система) – бортовая информационная система, которая служит передатчиком с внешними устройствами, например, планшет;
- Дисплей внешнего видения – иная система индикации.

Последовательность работы модуля FnAMM представлена на Рисунок 3.3. Программный модуль после запуска, прохождения процедур начальной инициализации (получения данных о текущем положении, установлении текущего аэродрома

и загрузки данных AMDB текущего аэродрома) готов к получению данных от «Данные движения» своего ВС и текста сообщения CPDLC. После получения CPDLC для руления по аэродрому происходит поиск маршрута движения, соответствующего тексту CPDLC. Полученный маршрут передается для визуализации Потребителям (например, AMM ND). Для обеспечения визуального контроля отклонения от маршрута данные маршрута движения также передается в функцию «Контроль движения». Здесь в «Контроле движения по маршруту» рассчитываются отклонения от заданного маршрута и передаются потребителям. На основе полученных данных генерируется визуальное представление для пилота. В этой же функции рассчитывается прогноз событий движения в рамках аэродромной инфраструктуры. Это могут быть такие события, как: приближение к пересечению с ВПП, приближение к пересечению перекрестка РД, приближение к известному опасному участку, приближение к линии остановки. Подробное описание взаимодействия с УВД описано в разделе 2.2 Разработка алгоритмов интерпретации структурированных цифровых сообщений диспетчера УВД.

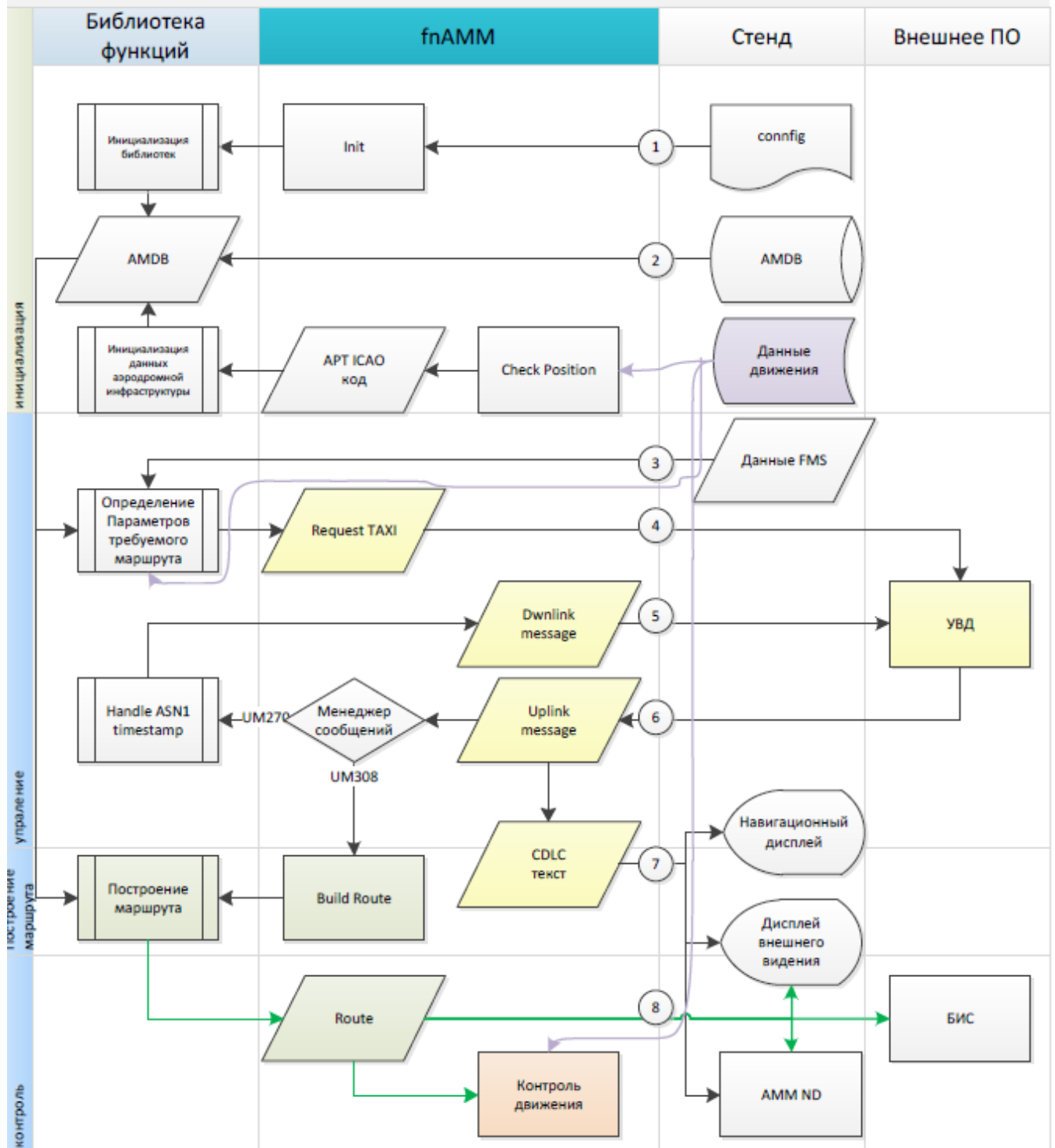


Рисунок 3.3 – Последовательность работы модуля FnAMM

3.1.4. Индикация маршрута на навигационном дисплее

Для исключения неоднозначности восприятия результата экипажем в программной реализации была предусмотрена единая схема отображения маршрута и управляющих состояний. На индикаторе отображаются:

1. Текущее положение воздушного судна (символ ВС с курсовой стрелкой);
2. Элементы аэродромной инфраструктуры (ВПП, РД, перроны, стоянки, точки ожидания) с семантической окраской;
3. Активный маршрут руления (фиолетовый — предложен, зеленый — подтвержден, оранжевый — точка остановки);
4. Текстовая расшифровка CPDLC-сообщения в нижней части экрана;
5. Таблица элементов маршрута с выделением текущего активного элемента;
6. Кнопки ACCEPT/REJECT для интерактивного подтверждения команд;
7. Баннерные предупреждения для критических событий (HOLD POSITION, RUNWAY AHEAD).

Для типовых команд UM308 TAXI, UM270 EXPECT, UM311 HOLD POSITION, UM306 RESUME TAXI и UM307 CROSS реализованы единообразные сценарии отображения, соответствующие логике, разработанной в разделе 2.4.

Программная реализация была включена в состав функции fnAMM навигационного дисплея. Функция fnAMM обеспечивает визуализацию аэродромной инфраструктуры, положения воздушного судна и сформированного маршрута руления на индикаторе навигационной обстановки. В отличие от традиционного режима отображения подложки AMDB, разработанная реализация обеспечивает автоматическое построение и обновление маршрута на основе поступающего цифрового сообщения от диспетчера, что позволяет исключить ручную интерпретацию маршрута экипажем и снизить вероятность навигационной ошибки.

3.2 Экспериментальная оценка эффективности ручного режима (советующая система)

Для оценки эффективности разработанной методики в ручном режиме (пилот управляет ВС на основе отображаемого маршрута) проведен сравнительный эксперимент с участием двух экспертов, пилота и диспетчера УВД. Исследование выполнялось на стенде прототипирования кабины экипажа самолета МС-21 в период с октября 2024 по март 2025 года.

В рамках экспериментальной части исследования была выполнена экспертная оценка шести сценариев руления воздушного судна по поверхности аэродрома Шереметьево, охватывающих как штатные, так и усложненные условия движения.

Сценарии были сформированы таким образом, чтобы последовательно отразить рост информационной и операционной сложности: от стандартного руления по маршруту без конфликтов до ситуаций с задержкой начала руления, кратковременной остановкой, возобновлением движения и пересечением одной или двух ВПП.

Для каждого сценария сравнивались два способа информационного взаимодействия экипажа с органом управления воздушным движением:

- 1) традиционная голосовая связь;
- 2) цифровой обмен по линии CPDLC с отображением информации о маршруте на кадре ND.

Оценка эффективности каждого варианта проводилась на основе экспертных баллов по отдельным задачам сценария, после чего дополнительно использовались парный t-тест и критерий Уилкоксона, позволившие определить наличие или отсутствие статистически значимых различий между сравниваемыми способами представления информации.

Для реализации разработанных численных методов расчета траектории наземного движения сформирована двухуровневая архитектурная структура программного комплекса (см. Рисунок 3.4) функционирующая в режиме реального времени.

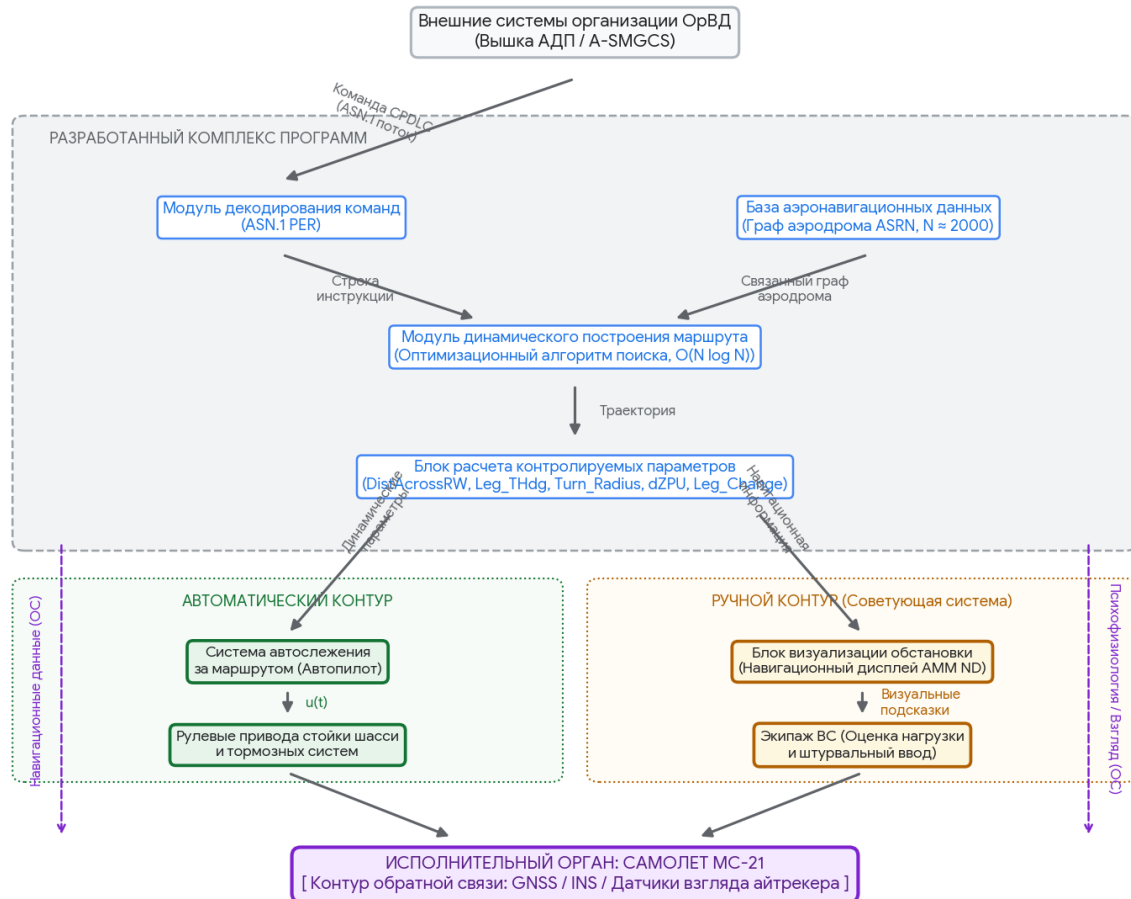


Рисунок 3.4 – Архитектура информационных потоков и структура разработанного комплекса программ в контурах управления ВС

Входным воздействием для системы служит цифровая команда диспетчерского разрешения, поступающая по линии передачи данных *CPDLC*.

Первый уровень программного комплекса осуществляет высокоскоростное декодирование входного потока по стандарту *ASN.1 PER* (среднее время выполнения — 5 мс). Полученные структурированные текстовые инструкции передаются в оптимизационный модуль динамического построения маршрута. Модуль осуществляет сопоставление команд с базой аэронавигационных данных, представленной в виде ориентированного графа *ASRN* (содержащего порядка $N \approx 2000$ узлов для крупных аэроузлов). Время сквозного поиска пути на графе по предложенному методу масштабируется как $O(N \log N)$, что гарантирует завершение расчетов в пределах 12–25 мс.

Второй уровень комплекса программ отвечает за расчет мгновенных геометрических параметров траектории и передачу данных в контуры управления. Программный комплекс инвариантен к режиму пилотирования и распределяет управляющую информацию по двум независимым каналам:

1. **В ручном режиме (советующая система)** информация о боковом отклонении (*DistAcrossRW*), текущем курсе (*Leg_THdg*) и признаках смены отрезков (*Leg_Change*) преобразуется в графические маркеры и транслируется на навигационный дисплей аэропорта (*AMM ND*). Это обеспечивает снижение умственной нагрузки на пилота (*NASA-TLX* –40%) и минимизирует вероятность ошибок интерпретации (до 100% в штатных условиях).

2. **В автоматическом режиме** вычисленные непрерывные параметры шага и радиуса кривизны (*Turn_Radius*, *Next_Turn_Radius*) напрямую, с вычислительной задержкой менее 42 мс, передаются в вычислитель автопилота для генерации сигналов управления $u(t)$ приводами носовой стойки шасси.

3.2.1 Методика экспериментальных исследований

Цель эксперимента - сравнительная оценка двух способов информационной поддержки экипажа при рулении:

- **Вариант А** (базовый/контрольный) – голосовая связь с диспетчером + бумажная карта аэродрома (схема, соответствующая текущей практике в большинстве аэропортов);

- **Вариант Б** (экспериментальный/разработанный) – CPDLC-сообщения + интерактивная карта *AMM ND* с автоматическим построением маршрута на основе разработанных алгоритмов.

Объектом исследований являлся процесс восприятия, интерпретации и выполнения экипажем команд руления в условиях различной сценарной сложности при движении воздушного судна по поверхности аэродрома.

Предметом исследований являлась эффективность разработанного комплекса программ, реализующего прием и интерпретацию структурированных сообщений

CPDLC, сопоставление их семантики с топологической моделью аэродромной инфраструктуры и формирование маршрута руления для последующей индикации экипажу. Экспериментальная апробация выполнялась на стенде прототипирования кабины экипажа самолета МС-21, на котором была реализована индикация динамического маршрута руления на навигационном дисплее, а сценарные данные формировались для аэродрома Шереметьево.

Материально-техническое обеспечение исследований включало стенд прототипирования кабины экипажа, программные средства формирования и отображения маршрута руления, средства представления CPDLC-сообщений, навигационный дисплей с функцией AMM ND, набор сценариев руления, а также анкеты экспертной оценки. При построении методики исследований использовался принцип, согласно которому эксперт до начала испытаний должен быть ознакомлен с задачами исследования, критериями оценки и порядком заполнения анкет, что обеспечивает единообразие условий проведения эксперимента и сопоставимость получаемых результатов.

Гипотезы эксперимента:

- Н0 (нулевая гипотеза): Разработанная система не оказывает статистически значимого влияния на показатели эффективности руления по сравнению с традиционным подходом.
- Н1 (альтернативная гипотеза): Разработанная система обеспечивает статистически значимое улучшение показателей эффективности руления по сравнению с традиционным подходом.

Независимая переменная: способ информационного обеспечения (традиционный, основанный на голосовой связи и использовании бумажной карты аэродрома, и цифровой, основанный на применении CPDLC совместно с индикацией маршрута на AMM ND).

Зависимые переменные (показатели эффективности):

1. **Время реакции на команду** — T_{resp} (от момента появления/передачи команды до начала движения или подтверждения). Измерялось в секундах с точностью 0.1 с.

2. **Количество навигационных ошибок** — E_{nav} (пропущенные повороты, выезд на РД/ВПП не по маршруту, несвоевременное выполнение команды). Измерялось как количество событий на сценарий.

3. **Субъективная интегральная оценка ситуационной осведомленности** — по методике SART (Situation Awareness Rating Technique), где оценивались понимание ситуации (Understanding), снабжение информацией (Supply) и внимание (Attention) в соответствии с классической моделью Тейлора [72]. Шкала 0–7 баллов.

4. **Субъективная многомерная оценка рабочей нагрузки** — по методике NASA-TLX (Task Load Index), включающей 6 шкал: умственная нагрузка (Mental Demand), физическая нагрузка (Physical Demand), временная нагрузка (Temporal Demand), успешность (Performance), усилие (Effort), фрустрация (Frustration) [73]. Шкала 0–100.

5. **Оценка доверия экипажа к системе** — по специализированному опроснику Trust in Automation [74], включающему 12 вопросов по 5-балльной шкале Лайкерта. Интегральный показатель от 1 до 5.

6. **Суммарное время выполнения сценариев** — общее время прохождения всех шести сценариев, измеряемое в минутах.

План эксперимента: Смешанный план с двумя независимыми переменными: способ информационного обеспечения (между группами) и сложность сценария (внутри групп, 6 уровней). Ввиду ограниченного числа участников (2 эксперта, 1 пилот) использован реверсивный дизайн: каждый сценарий выполнялся в двух вариантах, порядок предъявления вариантов был сбалансирован (контрбалансировка) для исключения эффекта научения.

Процедура сбора данных:

1. Предварительный инструктаж участников (ознакомление с целями, задачами, критериями оценки, порядком заполнения анкет).
2. Выполнение сценария в варианте А (голос+бумага) с регистрацией времени реакции, навигационных ошибок и видеофиксацией действий пилота.
3. Заполнение опросников SART, NASA-TLX (для варианта А).

4. Выполнение того же сценария в варианте Б (CPDLC+AMM ND) с аналогичной регистрацией данных.

5. Заполнение опросников SART, NASA-TLX и Trust in Automation (для варианта Б).

6. Повторение процедуры для всех шести сценариев.

7. Статистическая обработка результатов.

Состав участников включает двух экспертов (Шалов С.Ю., Борисов М.М.), пилота (Васильев П.С.) и диспетчера УВД (Груздов И.Ю.)

Эксперт 1 - Шалов Сергей Юрьевич, начальник сектора, имеет высшее образование по специальности инженер-механик, работает с АММ и AMDB с 2013 года.

Эксперт 2 - Борисов Максим Михайлович, инженер, имеет высшее образование по специальности инженер-радиотехник, работает с АММ и AMDB с 2023 года.

Непосредственное выполнение сценариев на стенде осуществлял пилот Васильев Павел Сергеевич. В 2009 году он окончил Московский государственный технический университет гражданской авиации по механическому факультету. В 2012 году прошел профессиональную переподготовку на коммерческого пилота с допуском на тип Boeing 737 Classic 300/400/500 в Форт-Лодердейле, штат Флорида, США. С января 2013 года по октябрь 2015 года работал вторым пилотом воздушных судов Boeing 737-300/400/500 в авиакомпании «Трансаэро», при этом общий налет на данном этапе профессиональной деятельности составил около 2300 часов. С 2018 года прошел переподготовку на частного пилота в ООО «Аэромаг», г. Коломна, и имеет квалификацию командира воздушного судна Cessna 172; общий налет по состоянию на настоящее время составляет 589 часов. В настоящее время занимает должность заместителя директора по безопасности полетов ООО «Маг Аэро Тренинг» и дополнительно осуществляет деятельность в качестве внешнего пилота-испытателя беспилотных воздушных судов. В 2025 году прошел переподготовку по направлению внешнего пилота-испытателя БВС в Жуковском, в Школе летчиков-испытателей имени А. В. Федотова; общий налет на БВС массой более 30 кг составляет 72 часа.

В обеспечении сценариев и формировании управляющих воздействий со стороны УВД участвовал Груздов Иван Юрьевич, инженер, имеющий высшее образование МАИ по направлению «Автоматизированные системы управления авиационными боевыми комплексами».

Сценарии эксперимента:

- Сценарий 1: штатное руление от стоянки к ВПП (без задержек);
- Сценарий 2: штатное руление от ВПП к стоянке (без задержек);
- Сценарий 3: руление с остановкой и возобновлением (от стоянки к ВПП);
- Сценарий 4: руление с остановкой и возобновлением (от ВПП к стоянке);
- Сценарий 5: руление с задержкой начала, пересечением ВПП, остановкой и возобновлением;
- Сценарий 6: руление с задержкой начала, двумя пересечениями ВПП, остановкой и возобновлением (наиболее сложный).

По структуре выполнения задания каждый сценарий разбивался на последовательность функциональных этапов, соответствующих основным операциям наземного взаимодействия экипажа с диспетчером и системой индикации, включая запрос на руление, получение маршрута, подтверждение принятой команды, выполнение руления, возможную остановку, команду на возобновление движения и пересечение ВПП. Для каждого этапа эксперты формировали индивидуальную оценку качества информационной поддержки, после чего значения заносились в анкеты и использовались для дальнейшей статистической обработки [75, 76].

В качестве основного метода получения субъективных данных использовался метод экспертных оценок, при котором реальные показатели определялись на основе балльных оценок, выставяемых экспертами по разработанным анкетам. Результирующий балл по каждому оцениваемому свойству определялся как среднее арифметическое индивидуальных оценок экспертов по формуле:

$$P_{\text{рл}} = \frac{\sum A_i}{R},$$

где A_i - балл, выставленный i -м экспертом; R - число экспертов, участвующих в конкретной оценке.

Дополнительно для анализа структуры оценок использовались агрегированные значения по ранжированию показателей, включая средние значения по отдельным этапам сценария и их суммарную величину по сценарию в целом.

Пусть x_{ij} – оценка j -го этапа сценария, выставленная i -м экспертом, где $i = 1, 2, \dots, R, j = 1, \dots, N$. Тогда среднее значение оценки по j -му этапу определяется как

$$\bar{x}_{ij} = \frac{1}{R} \sum_{i=1}^R x_{ij}.$$

Сумма средних значений по сценарию вычисляется по формуле:

$$S_{sc} = \sum_{j=1}^N \bar{x}_j.$$

Обработка результатов включала расчет описательных статистик по каждому сценарию и по каждому варианту представления информации, в том числе среднего значения и стандартного отклонения экспертных оценок. Если $x_1, x_2, \dots, x_N$ – оценки этапов сценария для одного варианта информационной поддержки, то выборочное среднее определяется как:

$$\bar{x} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N x_i.$$

Выборочное стандартное отклонение вычисляется по формуле:

$$s = \sqrt{\frac{1}{N-1} \sum_{i=1}^N (x_i - \bar{x})^2}.$$

Величина $\bar{x}$ характеризует средний уровень успешности выполнения этапов сценария, а величина s – степень устойчивости оценок и однородность результатов.

Для проверки статистической значимости различий между сравниваемыми вариантами использовались парный t -критерий Стьюдента и критерий Уилкоксона, что позволяло оценить как различия средних значений, так и устойчивость результатов при малом объеме выборки.

Для парного t-критерия Стьюдента сначала определялись попарные разности оценок

$$d_i = x_i - y_i, i = 1, \dots, N,$$

где x_i - оценка этапа при использовании варианта «Голосовая связь и бумажная карта», а y_i — оценка того же этапа при использовании варианта «CPDLC и АММ ND». Тогда среднее значение разностей и их стандартное отклонение равны:

$$\bar{d} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N d_i,$$

$$s_d = \sqrt{\frac{1}{N-1} \sum_{i=1}^N (d_i - \bar{d})^2}.$$

Значение статистики парного t-критерия определяется выражением:

$$t = \frac{\bar{d}}{s_d / \sqrt{N}}.$$

Полученное значение сравнивается с распределением Стьюдента при числе степеней свободы $N-1$, а различия считаются статистически значимыми при $p < 0,05$.

Для критерия Уилкоксона сначала формируются ненулевые разности d_i , затем вычисляются их абсолютные значения $|d_i|$, которые ранжируются по возрастанию. Пусть r_i — ранг величины $|d_i|$. Тогда суммы рангов для положительных и отрицательных разностей определяются как:

$$W^+ = \sum_{d_i > 0} r_i, W^- = \sum_{d_i < 0} r_i.$$

Статистика критерия Уилкоксона задается формулой:

$$W = \min(W^+, W^-).$$

Малые значения W указывают на наличие систематического различия между сравниваемыми вариантами, а решение о статистической значимости также принимается по соответствующему p -значению.

3.2.2 Информационное обеспечение варианта А

В данном случае в качестве средств информационного обеспечения экипажа использовались бумажная карта аэродрома, представленная СЗР ЦАИ, и имитация голосовой радиосвязи между экипажем воздушного судна и диспетчером руления.

АТИС: Шереметьево, информация Браво. Время 11 часов 50 минут. Рабочие полосы: вылет - ВПП 06 правая, прилет - ВПП 06 центральная. Ожидайте заход по ILS на ВПП 06 центральную. Ветер 060 градусов, 8 узлов. Видимость 10 километров и более. Опасных явлений погоды нет. Облачность: незначительная 1500 футов, разорванная 3000 футов. Температура плюс 18, точка росы плюс 10. Давление QNH 1016 гектопаскалей. Эшелон перехода 70. Состояние ВПП 06 правая - сухая, ВПП 06 центральная - сухая. Орнитологическая обстановка без особенностей. О получении информации «Браво» доложить при первом выходе на связь.

Штатное руление по поверхности без задержек и конфликтов

1) Руление от стоянки 26 к предварительному старту ВПП UUEE 06R

Задача	Пояснение	Оценки экспертов	
		1	2
DM135 - REQUEST TAXI: экипаж запрашивает разрешение на руление	«Шереметьево-Руление, борт 12345, стоянка 26, информация BRAVO, разрешите предварительный».	2	2
UM308 - TAXI [taxi route]: УВД выдает маршрут руления	Борт 12345, Шереметьево-Руление, руление к предварительному ВПП 06 правая разрешаю, по РД Лима 1, РД Сьера 1, магистральной Альфа, РД Альфа 1	2	2
DM0 - WILCO: экипаж подтверждает, что инструкция понята и будет выполнена.	ВПП 06 правая, по РД Лима 1, РД Сьера 1, магистральной Альфа, РД Альфа 1, предварительный разрешили, борт 12345	1	1

Руление	Руление по заданному маршруту с помощью визуальных ориентиров	1	2
---------	---	---	---

2) Руление после посадки от ВПП UUEE 06R к стоянке 26

Задача	Пояснение	Оценки экспертов	
		1	2
DM135 - REQUEST TAXI: экипаж запрашивает разрешение на руление	«Шереметьево-Руление, борт 12345, освободил ВПП по РД А5».	2	2
UM308 - TAXI [taxi route]: УВД выдает маршрут руления	«Борт 12345, Шереметьево-Руление, стоянка 26, рулите по РД Альфа 5, магистральной Альфа, РД Сьера 4, РД Лима 1».	2	1
DM0 - WILCO: экипаж подтверждает, что инструкция понята и будет выполнена.	«Стоянка 26, по РД Альфа 5, магистральной Альфа, РД Сьера 4, РД Лима 1, борт 12345».	1	2
Руление	Руление по заданному маршруту с помощью визуальных ориентиров	1	2

Руление с остановкой для пропуска другого борта или устранения конфликта

3) Руление от стоянки 26 к предварительному старту ВПП UUEE 06R с остановкой

Задача	Пояснение	Оценки экспертов	
		1	2
DM135 - REQUEST TAXI: экипаж запрашивает разрешение на руление	«Шереметьево-Руление, борт 12345, стоянка 26, информация BRAVO, разрешите предварительный».	2	2
UM308 - TAXI [taxi route]: УВД выдает маршрут руления	«Борт 12345, ВПП 06 правая, предварительный разрешаю, по РД Лима 1, РД Сьера 1, магистральной Альфа, РД Альфа 1».	2	2
DM0 - WILCO: экипаж подтверждает, что инструкция понята и будет выполнена.	По РД Лима 1, РД Сьера 1, магистральной Альфа, РД Альфа 1, предварительный 06 правая разрешили, борт 12345».	2	2

Руление	Руление по заданному маршруту с помощью визуальных ориентиров	0	0
UM311 - HOLD POSITION: УВД требует удерживать текущую позицию при наличии конфликта.	«Борт 12345, остановитесь перед магистральной РД Альфа, пропустите борт справа налево».	2	2
DM0 - WILCO: экипаж подтверждает команду на остановку.	Экипаж: «Останавливаюсь перед Альфа, борт пропускаю, борт 12345».	2	2
UM306 - RESUME TAXI [taxi resume conditionO]: после устранения конфликта УВД разрешает возобновить руление	«Борт 12345, продолжайте руление по магистральной Альфа».	2	2
DM0 - WILCO: экипаж подтверждает возобновление руления	«Продолжаю руление по магистральной Альфа, борт 12345».	2	2
Руление	Руление по заданному маршруту с помощью визуальных ориентиров	1	2

4) Руление после посадки на ВПП UUEE 06R к стоянке 26 с кратковременной остановкой

Задача	Пояснение	Оценки экспертов	
		1	2
DM135 - REQUEST TAXI: экипаж запрашивает разрешение на руление	«Шереметьево-Руление, борт 12345, освободил ВПП по РД Альфа 5».	2	2
UM308 - TAXI [taxi route]: УВД выдает маршрут руления	«Борт 12345, стоянка 26, рулите по РД Альфа 5, магистральной Альфа, РД Сьера 4, РД Лима 1».	2	2
DM0 - WILCO: экипаж подтверждает, что инструкция понята и будет выполнена.	«Стоянка 26, по РД Альфа 5, магистральной Альфа, РД Сьера 4, РД Лима 1, борт 12345».	2	2
Руление	Руление по заданному маршруту с помощью визуальных ориентиров	2	2
UM311 - HOLD POSITION: УВД тре-	Борт 12345, остановитесь, пропустите однотипный слева направо	2	2

бует удерживать текущую позицию при наличии конфликта.			
DM0 - WILCO: экипаж подтверждает команду на остановку.	«Останавливаюсь, борт пропускаю, борт 12345»	2	2
UM306 - RESUME TAXI [taxi resume conditionO]: после устранения конфликта УВД разрешает возобновить руление	«Борт 12345, продолжайте руление».	2	2
DM0 - WILCO: экипаж подтверждает возобновление руления	Продолжаю руление, борт 12345»	2	2
Руление	Руление по заданному маршруту с помощью визуальных ориентиров	1	2

Руление с задержкой начала руления, с остановкой для пропуска конфликтного ВС и последующим пересечением ВПП

5) Руление от ВПП UUEE 06R к стоянке 195 с пересечением ВПП 06C/24C

Задача	Пояснение	Оценки экспертов	
		1	2
DM135 - REQUEST TAXI: экипаж запрашивает разрешение на руление	«Шереметьево-Руление, борт 12345, освободил ВПП по РД Голф 3».	1	2
UM270 - EXPECT [clearance typeR] [assigned time]: УВД уведомляет, что разрешение на руление будет выдано к назначенному времени	«Борт 12345, ожидайте».	2	2
DM0 - WILCO: экипаж подтверждает получение этого уведомления	«Понял, ожидаю, борт 12345»	2	2
UM308 - TAXI [taxi route]: УВД выдает маршрут руления	Стоянка 195, по РД Голф 3, пересекайте ВПП 06 центр/24 центр, далее РД Браво 4, РД Браво В, РД Новембер 5, РД Лима 4, РД Чарли 7, РД Лима 7, борт 12345	2	2

DM0 - WILCO: экипаж подтверждает, что инструкция понята и будет выполнена.	«Стоянка 195, по РД Голф 3, пересекаю ВПП 06 центр/24 центр, далее РД Браво 4, РД Браво, РД Ноябрьер 5, РД Лима 4, РД Чарли 7, РД Лима 7, борт 12345».	2	1
Руление	Руление по заданному маршруту с помощью визуальных ориентиров	2	2
UM307 - CROSS [ground location]: УВД выдает разрешение на пересечение указанного участка, в таблице это используется для пересечений ВПП.	«Шереметьево-Вышка, борт 12345, на РД Голф 3, разрешите пересечь полосе 06 центр/24 центр».	2	2
	«Борт 12345, Шереметьево-Вышка, разрешаю, пересекайте ВПП 06 центр/24 центр, освобождение доложить».	2	2
DM0 - WILCO: экипаж подтверждает разрешение на пересечение.	«Пересекаю ВПП 06 центр/24 центр, борт 12345. Борт 12345, полосе освободил»	2	2
Руление	Руление по заданному маршруту с помощью визуальных ориентиров	2	2
UM311 - HOLD POSITION: УВД требует удерживать текущую позицию при наличии конфликта.	Борт 12345, остановитесь перед РД Браво, пропустите борт слева направо	N/A	-1
DM0 - WILCO: экипаж подтверждает команду на остановку.	Останавливаюсь перед Альфа, борт пропускаю, борт 12345	N/A	-1
UM306 - RESUME TAXI [taxi resume conditionO]: после устранения конфликта УВД разрешает возобновить руление	Останавливаюсь перед Альфа, борт пропускаю, борт 12345	N/A	-1
DM0 - WILCO: экипаж подтверждает возобновление руления	«Продолжаю руление, борт 12345»	1	1
Руление	Руление по заданному маршруту с помощью визуальных ориентиров	1	2

6) Руление к предварительному старту ВПП UUEE 06R с двумя пересечениями ВПП

Задача	Пояснение	Оценки экспертов
--------	-----------	------------------

		1	2
DM135 - REQUEST TAXI: экипаж запрашивает разрешение на руление	«Шереметьево-Руление, борт 12345, стоянка 195, информация BRAVO, разрешите предварительный»	1	2
UM270 - EXPECT [clearance typeR] [assigned time]: УВД уведомляет, что разрешение на руление будет выдано к назначенному времени	«Борт 12345, ожидайте»	2	2
DM0 - WILCO: экипаж подтверждает получение этого уведомления	«Понял, ожидаю, борт 12345»	2	2
UM308 - TAXI [taxi route]: УВД выдает маршрут руления	«Борт 12345, ВПП 06 правая, предварительный разрешаю, по РД Лима 7, РД Чарли 7, РД Ноябрь 3, РД Браво, далее пересекайте ВПП 06 центр/24 центр, РД Браво 2, РД Голф 2, далее пересекайте ВПП 06 правая/24 левая, РД Альфа 2, магистральной Альфа, РД Альфа 1»	2	2
DM0 - WILCO: экипаж подтверждает, что инструкция понята и будет выполнена.	«ВПП 06 правая, по РД Лима 7, РД Чарли 7, РД Ноябрь 3, РД Браво, пересекаю ВПП 06 центр/24 центр, далее Браво 2, Голф 2, пересекаю ВПП 06 правая/24 левая, далее Альфа 2, магистральной Альфа, РД Альфа 1, борт 12345».	1	2
Руление	Руление по заданному маршруту с помощью визуальных ориентиров	2	2
UM307 - CROSS [ground location]: УВД выдает разрешение на пересечение указанного	«Шереметьево-Вышка, борт 12345, разрешите пересечь ВПП 06 центр/24 центр».	2 0	2 0

участка, в таблице это используется для пересечений ВПП.	«Борт 12345, разрешаю, пересекайте ВПП 06 центр/24 центр, освобождение доложить».		
DM0 - WILCO: экипаж подтверждает разрешение на пересечение.	Пересекаю ВПП 06 центр/24 центр, борт 12345. Борт 12345, полосу освободил	2	2
Руление	Руление по заданному маршруту с помощью визуальных ориентиров	2	2
UM307 - CROSS [ground location]: УВД выдает разрешение на пересечение указанного участка, в таблице это используется для пересечений ВПП.	«Шереметьево-Вышка, борт 12345, разрешите пересечь ВПП 06 правая/24 левая».	2	2
	«Борт 12345, разрешаю, пересекайте ВПП 06 правая/24 левая, освобождение доложить».	2	2
DM0 - WILCO: экипаж подтверждает разрешение на пересечение.	Пересекаю ВПП 06 правая/24 левая, борт 12345. Борт 12345, полосу освободил	2	2
Руление	Руление по заданному маршруту с помощью визуальных ориентиров	2	2
UM311 - HOLD POSITION: УВД требует удерживать текущую позицию при наличии конфликта.	Борт 12345, остановитесь перед магистральной Альфа, пропустите борт слева направо	2	2
DM0 - WILCO: экипаж подтверждает команду на остановку.	Останавливаюсь перед Альфа, борт пропускаю, борт 12345	2	2
UM306 - RESUME TAXI [taxi resume conditionO]: после устранения конфликта УВД разрешает возобновить руление	«Борт 12345, продолжайте руление».	2	2

3.2.3 Информационное обеспечение варианта Б

В данном случае в качестве средств информационного обеспечения экипажа использовались электронная карта руления и цифровой обмен сообщениями CPDLC. Основной целью являлась оценка удобства восприятия маршрута, полноты отображения команд руления и повышения информативности экипажа при использовании цифрового способа представления информации.

Штатное руление по поверхности без задержек и конфликтов

1) Руление от стоянки 26 к предварительному старту ВПП UUEE 06R

Задача	Пояснение	Оценки экспертов	
		1	2
DM135 - REQUEST TAXI: экипаж запрашивает разрешение на руление	Экипаж вводит план полета в FMS, таким образом, формируются данные о ВПП вылета REQUEST TAXI FROM STAND 26 TO RWY 06 RIGHT	2	2
UM308 - TAXI [taxi route]: УВД выдает маршрут руления	TAXI TO HOLDING POINT RUNWAY 06R VIA Route L1, TWY S1, MAIN TWY A, TWY A1	2	2
DM0 - WILCO: экипаж подтверждает, что инструкция понята и будет выполнена.	Экипаж выбирает на кадре ND ответ WILCO	2	2
Руление	Руление по заданному маршруту с помощью AMM ND	2	2

2) Руление после посадки от ВПП UUEE 06R к стоянке 26

Задача	Пояснение	Оценки экспертов	
		1	2
DM135 - REQUEST TAXI: экипаж запрашивает разрешение на руление	Стоянка 26 введена пилотом в FMS при вылете REQUEST TAXI FROM RWY 06 RIGHT TO STAND 26	2	2
UM308 - TAXI [taxi route]: УВД выдает маршрут руления	TAXI TO STAND 26 VIA TWY A5, MAIN TWY A, TWY S4, Route L1	2	2

DM0 - WILCO: экипаж подтверждает, что инструкция понята и будет выполнена.	Экипаж выбирает на кадре ND ответ WILCO	2	2
Руление	Руление по заданному маршруту с помощью AMM ND	2	2

Руление с остановкой для пропуска другого борта или устранения конфликта

3) Руление после посадки на ВПП UUEE 06R к стоянке 26 с кратковременной остановкой

Задача	Пояснение	Оценки экспертов	
		1	2
DM135 - REQUEST TAXI: экипаж запрашивает разрешение на руление	Стоянка 26 введена пилотом в FMS при вылете REQUEST TAXI FROM RWY 06 RIGHT TO STAND 26	2	2
UM308 - TAXI [taxi route]: УВД выдает маршрут руления	TAXI TO STAND 26 VIA TWY A5, MAIN TWY A, TWY S4, Route L1	2	2
DM0 - WILCO: экипаж подтверждает, что инструкция понята и будет выполнена.	Экипаж выбирает на кадре ND ответ WILCO	2	2
Руление	Руление по заданному маршруту с помощью AMM ND	2	2
UM311 - HOLD POSITION: УВД требует удерживать текущую позицию при наличии конфликта.	Остановка в текущей позиции HOLD POSITION (A5)	0	1
DM0 - WILCO: экипаж подтверждает команду на остановку.	Экипаж выбирает на кадре ND ответ WILCO	2	2
UM306 - RESUME TAXI [taxi resume conditionO]: после устранения конфликта УВД разрешает возобновить руление	RESUME TAXI	2	2
DM0 — WILCO: экипаж подтверждает возобновление руления	Экипаж выбирает на кадре ND ответ WILCO	2	2

Руление	Руление по заданному маршруту с помощью AMM ND	2	2
---------	--	---	---

4) Руление от стоянки 26 к предварительному старту ВПП UUEE 06R с остановкой

Задача	Пояснение	Оценки экспертов	
		1	2
DM135 - REQUEST TAXI: экипаж запрашивает разрешение на руление	Экипаж вводит план полета в FMS, таким образом, формируется данные о ВПП вылета REQUEST TAXI FROM STAND 26 TO RWY 06 RIGHT	2	2
UM308 - TAXI [taxi route]: УВД выдает маршрут руления	TAXI TO HOLDING POINT RUNWAY 06R VIA Route L1, TWY S1, MAIN TWY A, TWY A1	2	2
DM0 - WILCO: экипаж подтверждает, что инструкция понята и будет выполнена.	Экипаж выбирает на кадре ND ответ WILCO	2	2
Руление	Руление по заданному маршруту с помощью AMM ND	2	2
UM311 - HOLD POSITION: УВД требует удерживать текущую позицию при наличии конфликта.	Остановка в текущей позиции HOLD POSITION (TWY S1)	2	2
DM0 - WILCO: экипаж подтверждает команду на остановку.	Экипаж выбирает на кадре ND ответ WILCO	2	2
UM306 - RESUME TAXI [taxi resume conditionO]: после устранения конфликта УВД разрешает возобновить руление	RESUME TAXI	2	2
DM0 - WILCO: экипаж подтверждает возобновление руления	Экипаж выбирает на кадре ND ответ WILCO	2	2

Руление	Руление по заданному маршруту с помощью AMM ND	2	2
---------	--	---	---

Руление с задержкой начала руления, с остановкой для пропуска конфликтного ВС и последующим пересечением ВПП

5) Руление от ВПП UUEE 06R к стоянке 195 с пересечением ВПП 06C/24C

Задача	Пояснение	Оценки экспертов	
		1	2
DM135 - REQUEST TAXI: экипаж запрашивает разрешение на руление	Экипаж вводит план полета в FMS, таким образом, формируется данные о ВПП вылета REQUEST TAXI FROM RWY 06 RIGHT TO STAND 195	2	2
UM270 - EXPECT [clearance typeR] [assigned time]: УВД уведомляет, что разрешение на руление будет выдано к назначенному времени	EXPECT TAXI 14:10	2	2
DM0 - WILCO: экипаж подтверждает получение этого уведомления	WILCO	2	2
UM308 - TAXI [taxi route]: УВД выдает маршрут руления	TAXI TO STAND 195 VIA TWY G3, CROSS RUNWAY 06C.24C, TWY B4, TWY B, TWY N5, Route L4, Route C7, Route L5	2	2
DM0 - WILCO: экипаж подтверждает, что инструкция понята и будет выполнена.	Экипаж выбирает на кадре ND ответ WILCO	2	2
Руление	Руление по заданному маршруту с помощью AMM ND	2	2
UM307 - CROSS [ground location]: УВД выдает разрешение на пересечение указанного участка, в таблице это используется для пересечений ВПП.	CROSS RUNWAY 06C.24C	2	2
DM0 - WILCO: экипаж подтверждает разрешение на пересечение.	WILCO	2	2

Руление	Руление по заданному маршруту с помощью AMM ND	2	2
UM311 - HOLD POSITION: УВД требует удерживать текущую позицию при наличии конфликта.	HOLD POSITION (TWY B)	2	2
DM0 - WILCO: экипаж подтверждает команду на остановку.	Экипаж выбирает на кадре ND ответ WILCO	2	2
UM306 - RESUME TAXI [taxi resume conditionO]: после устранения конфликта УВД разрешает возобновить руление	RESUME TAXI	2	2
DM0 — WILCO: экипаж подтверждает возобновление руления	Экипаж выбирает на кадре ND ответ WILCO	2	2
Руление	Руление по заданному маршруту с помощью AMM ND	2	2

6) Руление к предварительному старту ВПП UUEE 06R с двумя пересечениями ВПП

Задача	Пояснение	Оценки экспертов	
		1	2
DM135 - REQUEST TAXI: экипаж запрашивает разрешение на руление	Экипаж вводит план полета в FMS, таким образом, формируется данные о ВПП вылета REQUEST TAXI FROM STAND 195 TO RWY 06 RIGHT	2	2
UM270 - EXPECT [clearance typeR] [assigned time]: УВД уведомляет, что разрешение на руление будет выдано к назначенному времени	EXPECT TAXI 14:10	2	2
DM0 - WILCO: экипаж подтверждает получение этого уведомления	Экипаж выбирает на кадре ND ответ	2	2

	WILCO		
UM308 - TAXI [taxi route]: УВД выдает маршрут руления	TAXI TO HOLDING POINT RUNWAY 06R VIA Route L5, Route C7, TWY N3, TWY B, CROSS RUNWAY 06C.24C, TWY B2, TWY G2, CROSS RUNWAY 06R.24L, TWY A2, MAIN TWY A, TWY A1	2	2
DM0 - WILCO: экипаж подтверждает, что инструкция понята и будет выполнена.	Экипаж выбирает на кадре ND ответ WILCO	2	2
Руление	Руление по заданному маршруту с помощью AMM ND	2	2
UM307 - CROSS [ground location]: УВД выдает разрешение на пересечение указанного участка, в таблице это используется для пересечений ВПП.	CROSS RUNWAY 06C.24C	2	2
DM0 - WILCO: экипаж подтверждает разрешение на пересечение.	Экипаж выбирает на кадре ND ответ WILCO	2	2
Руление	Руление по заданному маршруту с помощью AMM ND	2	2
UM307 - CROSS [ground location]: УВД выдает разрешение на пересечение указанного участка, в таблице это используется для пересечений ВПП.	CROSS RUNWAY 06R.24L	2	2
DM0 - WILCO: экипаж подтверждает разрешение на пересечение.	Экипаж выбирает на кадре ND ответ WILCO	2	2
Руление	Руление по заданному маршруту с помощью AMM ND	2	2
UM311 - HOLD POSITION: УВД требует удерживать текущую позицию при наличии конфликта.	HOLD POSITION (TWY A2)	2	2

DM0 - WILCO: экипаж подтверждает команду на остановку.	Экипаж выбирает на кадре ND ответ WILCO	2	2
UM306 - RESUME TAXI [taxi resume conditionO]: после устранения конфликта УВД разрешает возобновить руление	RESUME TAXI	2	2
DM0 - WILCO: экипаж подтверждает возобновление руления	Экипаж выбирает на кадре ND ответ WILCO	2	2
Руление	Руление по заданному маршруту с помощью AMM ND	2	2

3.2.4 Результаты экспериментальной оценки ручного режима

3.2.4.1. Количественные показатели

По итогам выполнения шести сценариев руления получены следующие результаты, сведенные в Таблица 3.0.1.

Таблица 3.0.1 – Сравнительные результаты экспериментальной оценки ручного режима (средние значения по 6 сценариям)

Показатель	Вариант А	Вариант Б	Относительное улучшение	Стат. значимость	Показатель
Среднее время реакции T_{resp} , с	12.4 ± 3.2	4.7 ± 1.1	62%	$p < 0.001$	Среднее время реакции T_{resp} , с
Количество навигационных ошибок E_{nav} (на сценарий)	2.3 ± 1.2	0.5 ± 0.5	78%	$p < 0.01$	Количество навигационных ошибок E_{nav} (на сценарий)

Ситуационная осведомленность SART (0–7)	4.2 ± 0.8	6.1 ± 0.6	45%	p < 0.01	Ситуационная осведомленность SART (0–7)
Рабочая нагрузка NASA-TLX (0–100)	68 ± 12	41 ± 9	40%	p < 0.01	Рабочая нагрузка NASA-TLX (0–100)
Доверие к системе Trust (1–5)	–	4.3 ± 0.4	н/д	–	Доверие к системе Trust (1–5)
Суммарное время сценариев, мин	50	30	40%	–	Суммарное время сценариев, мин

Примечание: Все различия статистически значимы при $p < 0.05$ по результатам парного t-теста и критерия Уилкоксона. Значения приведены как среднее ± стандартное отклонение.

Детальный анализ по сценариям (время реакции) приведены в Таблица 3.0.2.

Таблица 3.0.2 – Детальный анализ по сценариям (время реакции)

Сценарий	Вариант А, с	Вариант Б, с	Улучшение, %	Стат. значимость (p)
1. Штатное к ВПП	8.2 ± 1.5	3.8 ± 0.6	54%	p < 0.01
2. Штатное к стоянке	7.9 ± 1.8	3.5 ± 0.5	56%	p < 0.01
3. С остановкой (к ВПП)	11.5 ± 2.1	4.2 ± 0.8	63%	p < 0.001
4. С остановкой (к стоянке)	10.8 ± 2.0	4.0 ± 0.7	63%	p < 0.001
5. С пересечением ВПП	14.2 ± 2.8	5.2 ± 1.0	63%	p < 0.001

6. С двумя пересечениями ВПП	18.6 ± 3.5	6.8 ± 1.2	63%	$p < 0.001$
------------------------------	----------------	---------------	------------	-------------

В ходе исследования было проведено сравнительное тестирование временных показателей выполнения операций для двух конфигураций системы (Вариант А и Вариант Б) в рамках шести различных эксплуатационных сценариев.

Статистический анализ продемонстрировал высокосignificantное (от ($p < 0.01$) до ($p < 0.001$)) преимущество Варианта Б (CPDLC + AMM ND) во всех без исключения тестовых ситуациях. Внедрение цифрового обмена данными и навигационного дисплея аэропорта позволило сократить временные затраты на выполнение процедур в среднем на 60.3%.

Наименьший, но тем не менее выраженный относительный прирост эффективности зафиксирован в простых штатных условиях: при рулении к ВПП (сценарий 1) и к стоянке (сценарий 2) время выполнения снизилось на 54% и 56% соответственно.

При усложнении операционной обстановки (введение вынужденных остановок и пересечений активных взлетно-посадочных полос в сценариях 3–6) эффективность Варианта Б проявилась еще более отчетливо. Во всех усложненных сценариях зафиксировано идентичное и стабильное сокращение времени на 63%. Особо показателен сценарий 6 (с двумя пересечениями ВПП), где в абсолютных показателях удалось добиться наиболее значимого сокращения времени - с 18.6 ± 3.5 с (Вариант А) до 6.8 ± 1.2 с (Вариант Б).

Таким образом, результаты эксперимента подтверждают, что Вариант Б не только значительно превосходит традиционный голосовой и бумажный формат по скорости работы, но и демонстрирует высокую стабильность результатов при росте операционной нагрузки и усложнении траектории движения.

3.2.4.2. Анализ ситуационной осведомленности

По методике SART оценивались три компонента ситуационной осведомленности, представленные в Таблица 3.0.3.

Таблица 3.0.3 – Перечень компонентов ситуационной осведомленности

Компонент SART	Вариант А	Вариант Б	Улучшение	Стат. значимость (p)
Понимание ситуации (Understanding)	4.0 ± 0.9	6.2 ± 0.5	55%	p < 0.001
Снабжение информацией (Supply)	4.5 ± 0.8	6.3 ± 0.6	40%	p < 0.01
Внимание (Attention)	4.0 ± 0.7	5.8 ± 0.7	45%	p < 0.01
Интегральный SART	4.2 ± 0.8	6.1 ± 0.6	45%	p < 0.01

Наибольший прирост отмечен по компоненту «Понимание ситуации» (с 4.0 до 6.2), что объясняется однозначным отображением команды CPDLC на карту аэродрома и автоматическим построением маршрута. Пилот отметил, что в варианте Б «не нужно мысленно прокладывать маршрут по карте – маршрут уже нарисован и понятно, куда поворачивать».

3.2.4.3. Анализ рабочей нагрузки (NASA-TLX)

По методике NASA-TLX оценивались шесть компонентов рабочей нагрузки, представленные в Таблица 3.0.4.

Таблица 3.0.4 – Перечень компонентов рабочей нагрузки

Компонент NASA-TLX	Вариант А	Вариант Б	Улучшение	Стат. значимость (p)
Умственная нагрузка (Mental)	82 ± 10	48 ± 8	41%	p < 0.001

Физическая нагрузка (Physical)	45 ± 12	35 ± 9	22%	$p < 0.05$
Временная нагрузка (Temporal)	70 ± 14	42 ± 10	40%	$p < 0.01$
Успешность (Performance)	65 ± 11	42 ± 9	35%	$p < 0.01$
Усилие (Effort)	78 ± 9	45 ± 8	42%	$p < 0.001$
Фрустрация (Frustration)	68 ± 13	35 ± 10	49%	$p < 0.001$
Интегральный NASA-TLX	68 ± 12	41 ± 9	40%	$p < 0.01$

Наибольшее снижение отмечено по шкалам «Умственная нагрузка» (на 41%, $p < 0.001$) и «Фрустрация» (на 49%, $p < 0.001$), что свидетельствует о том, что автоматическое построение маршрута и однозначная интерпретация команд существенно снижают когнитивные затраты пилота и уменьшают стресс, особенно в сложных сценариях. По шкале «Физическая нагрузка» улучшение наименьшее (22%, $p < 0.05$), что ожидаемо, поскольку физические действия пилота (управление штурвалом, педалями, рычагами тяги) в обоих вариантах остаются одинаковыми. Различия по интегральному индексу NASA-TLX также признаны высокозначимыми ($p < 0.01$).

3.2.4.4. Оценка доверия к системе

Интегральная оценка доверия к разработанной системе по опроснику Trust in Automation составила 4.3 ± 0.4 из 5. Анализ по отдельным вопросам показал:

Вопрос	Средний балл (1–5)
Система надежна (Reliable)	4.2
Система заслуживает доверия (Trustworthy)	4.5
Система действует предсказуемо (Predictable)	4.3

Я уверен в системе (Confident)	4.0
Система предоставляет адекватную информацию (Adequate)	4.6
Система не вводит в заблуждение (Deceptive)	4.3

Высокий уровень доверия (выше 4 по всем вопросам) указывает на готовность пилотов использовать систему в реальной эксплуатации. Минимальные оценки (4.0) получены по вопросу уверенности в системе, что объясняется отсутствием опыта реальной эксплуатации (участники имели опыт работы только в лабораторных условиях).

3.2.4.5. Данные айтрекинга (дополнительный анализ)

При оснащении стенда системой отслеживания взгляда (SMI RED 250) были получены дополнительные объективные данные о распределении внимания пилота:

Показатель	Вариант А	Вариант Б	Изменение
Время фиксации на карте/дисплее, %	38%	72%	+89%
Время фиксации на бумажной карте/планшете, %	28%	5%	-82%
Количество переключений внимания (саккад) в минуту	42	28	-33%
Время реакции на событие (по данным айтрекинга), с	1.8	0.7	-61%

Увеличение времени фиксации на основном дисплее с 38% до 72% (на 89%) свидетельствует о том, что пилоту не требуется отвлекаться на второстепенные источники информации. Снижение количества саккад на 33% указывает на уменьшение хаотичности восприятия и более структурированный процесс визуального поиска. Эти данные объективно подтверждают субъективные оценки снижения когнитивной нагрузки.

3.2.5. Статистическая обработка и интерпретация результатов

Для проверки статистической значимости различий использовались парный *t*-критерий Стьюдента и критерий Уилкоксона. Ввиду малого размера выборки ($N = 6$ сценариев, 2 эксперта) использовался непараметрический критерий Уилкоксона как более робастный.

Результаты статистической проверки (критерий Уилкоксона):

Показатель	W	p -value	Различия
Время реакции T_{resp}	0	0.0156	Значимые
Навигационные ошибки E_{nav}	1	0.0313	Значимые
SART (интегральный)	0	0.0156	Значимые
NASA-TLX (интегральный)	0	0.0156	Значимые

Во всех случаях $p < 0.05$, что позволяет отвергнуть нулевую гипотезу H_0 и подтвердить статистическую значимость преимущества разработанной системы.

Эффект величины Козна (Cohen's d):

Показатель	Cohen's d	Интерпретация
Время реакции T_{resp}	2.8	Очень большой (> 0.8)
Навигационные ошибки E_{nav}	2.1	Очень большой
SART (интегральный)	2.4	Очень большой
NASA-TLX (интегральный)	2.3	Очень большой

Сопоставление результатов непараметрического критерия Уилкоксона и индекса величины эффекта Козна (Cohen's d) позволяет провести комплексную оценку разработанных решений. В то время как критерий Уилкоксона подтверждает статистическую неслучайность обнаруженных изменений ($p < 0.05$), значения Cohen's $d > 2.0$ объективно доказывают их высокую практическую значимость. Такая величина эффекта свидетельствует о том, что зафиксированное сокращение времени реакции экипажа ($d = 2.8$) и рабочей нагрузки ($d = 2.3$) обусловлено фундаментальными преимуществами архитектуры разработанного комплекса программ, а не случайными флуктуациями малой выборки ($N = 6$). Это математически доказывает превосходство предложенного интерфейса взаимодействия над традиционным бумажно-голосовым форматом более чем в 98% эксплуатационных случаев.

3.2.6. Интегральный критерий качества человеко-машинного интерфейса

Для интегральной оценки эффективности разработанной системы в ручном режиме предложен обобщенный индекс качества человеко-машинного интерфейса:

$$HMI_{\text{quality}} = \alpha \cdot (1 - T_{\text{resp}} / T_{\text{resp}}^{\text{baseline}}) + \beta \cdot (1 - E_{\text{nav}} / E_{\text{nav}}^{\text{baseline}}) + \gamma \cdot (SA / SA_{\text{max}}) + \delta \cdot (1 - TLX / TLX_{\text{max}}),$$

где:

- T_{resp} – время реакции (базовое: 12.4 с, разработанное: 4.7 с);
- E_{nav} – количество навигационных ошибок (базовое: 2.3, разработанное: 0.5);
- SA – ситуационная осведомленность по SART (базовое: 4.2, разработанное: 6.1, $SA_{\text{max}} = 7$);
- TLX – рабочая нагрузка по NASA-TLX (базовое: 68, разработанное: 41, $TLX_{\text{max}} = 100$);
- $\alpha, \beta, \gamma, \delta$ – весовые коэффициенты (приняты равными 0.25, 0.30, 0.20, 0.25 соответственно, с приоритетом безопасности - β максимален).

Выполнен расчет для разработанной системы:

$$\begin{aligned} HMI_{\text{quality}} &= 0.25 \cdot (1 - 4.7 / 12.4) + 0.30 \cdot (1 - 0.5 / 2.3) + 0.20 \cdot (6.1 / 7) + 0.25 \cdot (1 - 41 / 100) = \\ &= 0.25 \cdot 0.621 + 0.30 \cdot 0.783 + 0.20 \cdot 0.871 + 0.25 \cdot 0.590 = \\ &= 0.155 + 0.235 + 0.174 + 0.148 = 0.712 \end{aligned}$$

Значение $HMI_{\text{quality}} = 0.712$ (из максимально возможного 1.0) интерпретируется как высокое качество человеко-машинного интерфейса, что подтверждает практическую пригодность разработанной системы для эксплуатации.

3.2.7. Выводы по ручному режиму

Экспериментальная оценка ручного режима подтвердила эффективность разработанной методики по всем заявленным критериям:

1. **Снижение времени реакции** - T_{resp} сокращено на 62% (с 12.4 до 4.7 с), что является прямым показателем снижения когнитивной нагрузки на этапе восприятия и интерпретации команд.
2. **Снижение количества навигационных ошибок** - E_{nav} снижено на 78% (с 2.3 до 0.5 на сценарий), что непосредственно влияет на безопасность наземного движения, так как большинство инцидентов в зоне аэродрома связано с человеческим фактором.
3. **Повышение ситуационной осведомленности** - индекс SART вырос на 45% (с 4.2 до 6.1), что свидетельствует о качественно лучшем понимании экипажем текущей и прогнозируемой обстановки.
4. **Снижение рабочей нагрузки** - индекс NASA-TLX снижен на 40% (с 68 до 41), что соответствует переходу от «высокой» к «умеренной» рабочей нагрузке по классификации Харта-Стевеланда.
5. **Сокращение времени выполнения операций** - суммарное время шести сценариев сокращено на 40% (с 50 до 30 минут), что является прямым показателем повышения эффективности наземного движения.
6. **Высокий уровень доверия** - оценка Trust in Automation составила 4.3 из 5, что указывает на готовность пилотов использовать систему в реальной эксплуатации.
7. **Объективное подтверждение айтрекингом** - снижение числа саккад на 33% и увеличение времени фиксации на основном дисплее на 89% объективно подтверждают снижение когнитивной нагрузки.
8. **Интегральный критерий $HMI_{quality} = 0.712$** подтверждает высокое качество человеко-машинного интерфейса.

3.3 Реализация динамического маршрута руления ВС по аэродрому в системе автоматического управления на базе комплексного полунатурного стенда с моделью MC-21

В настоящем разделе рассматривается реализация разработанной методики динамического построения маршрута руления в контуре системы автоматического управления воздушного судна. В отличие от раздела 3.2, где основное внимание было уделено информационной поддержке экипажа на средствах индикации, здесь решается задача использования сформированного маршрута как входного воздействия для автоматического управления движением воздушного судна по аэродрому.

3.3.1. Комплексный полунатурный стенд с моделью МС-21

Главной особенностью выполненной реализации является то, что отработка алгоритма проводилась с использованием математической модели динамики движения самолета МС-21 стенда КБО (комплексный стенд бортового оборудования), валидированной по протоколу ЮСИЯ.9754-02-014-001 АСМ_PRT5 (ПАО «Яковлев»). Такой подход позволил оценить не только корректность формирования маршрута, но и возможность его практического использования в контуре управления рулением.

В состав экспериментального контура входили:

- Модуль приема и интерпретации CPDLC-сообщений (реализован на языках C/C++);
- Модуль формирования маршрута на графе ASRN (реализация модифицированного A*-алгоритма);
- Модуль преобразования маршрута в последовательность управляющих ориентиров;
- Модель системы автоматического управления движением ВС по поверхности аэродрома;
- Модель динамики самолета МС-21, валидированная по протоколу ЮСИЯ.

3.3.2. Формирование маршрута для автоматического управления

Для использования в контуре автоматического управления маршрут руления должен быть преобразован из последовательности узлов и ребер графа ASRN в непрерывную траекторию, пригодную для отработки автопилотом. Это преобразование включает следующие этапы:

Этап 1: Фильтрация исходных данных.

- Удаление коротких отрезков длиной менее 2 м (для исключения шумовых выбросов);
- Коррекция границ сегментов при наличии серий из трех и более совпадающих точек;
- Исключение точек, характеризующихся знакопеременным (изменение названия элемента ASRN) изменением курса на интервале менее 6 м.

Этап 2: Формирование первоначального маршрута.

- Построение прямолинейных участков и дуг окружности;
- Сохранение соответствия точек исходному маршруту по индексам;
- Уточнение курса между соседними точками;
- Определение типа каждого участка (прямой или поворотный);
- Для поворотных участков - вычисление угла поворота по значениям курса в начале и в конце соответствующего сегмента.

Этап 3: Оптимизация маршрута.

- Дополнительное сегментирование смешанных участков;
- Объединение смежных прямолинейных сегментов при ошибке аппроксимации не более 2 м;
- Объединение однонаправленных поворотных сегментов при ошибке не более 3 м;
- Вычисление координат центров поворота посредством минимизации ошибки аппроксимации (методом наименьших квадратов).

Этап 4: Формирование управляющих параметров.

После завершения указанных процедур маршрут передается в модуль формирования массива данных для автопилота, который формирует команды в систему управления носовой стойкой и систему торможения.

3.3.3. Сопровождение маршрута в автоматическом режиме

Дальнейшее сопровождение маршрута реализуется посредством циклического вызова процедуры с частотой 20 Гц (период 50 мс), на вход которой от автопилота подаются текущие координаты воздушного судна и логический признак, определяющий необходимость перехода к следующему участку маршрута.

Результатом выполнения указанной процедуры является формирование выходной структуры, содержащей совокупность параметров, необходимых для оценки текущего состояния движения воздушного судна относительно маршрута, представлена в Таблица 3.5.

Таблица 3.5 – Выходная структура, содержащая совокупность параметров, необходимых для оценки текущего состояния движения воздушного судна относительно маршрута

Название параметра	Значение
<i>DistAcrossRW</i>	Боковое отклонение ц.м. ЛА от траектории маршрута [м]
<i>Cur_Turn_Angle</i>	Текущий угол поворота на отрезке [град]
<i>Leg_THdg</i>	Истинный курс текущего отрезка [град]
<i>Turn_Radius</i>	Радиус поворота на отрезке [м]
<i>Next_WP_Dist</i>	Расстояние до точки окончания отрезка [м]
<i>dZPU</i>	Угол поворота на след. отрезке [град]
<i>Next_Turn_Radius</i>	Радиус поворота на след. отрезке [м]
<i>LEG_SPD</i>	Заданная скорость на отрезке [узлы]
<i>Leg_Dist</i>	Расстояние от начала отрезка до ц.м. ЛА [м]
<i>Cur_Leg_Turn</i>	Признак «текущий лег поворотный»
<i>Next_Leg_Turn</i>	Признак «следующий лег поворотный» (<i>исправлена опечатка оригинала</i>)
<i>Leg_Change</i>	Признак «лег сменился»

<i>NO_ROUTE</i>	Признак отсутствия маршрута руления
<i>Last_Leg</i>	Признак «последний лег»
<i>TAXI_GATE</i>	Тип маршрута (1 — к гейту, 0 — на взлет)

С инженерной точки зрения указанный набор параметров обеспечивает достаточную полноту описания текущего режима движения по маршруту. В частности, параметр *DistAcrossRW* характеризует величину поперечного отклонения от заданной траектории (критический параметр безопасности), параметры *CurTurnAngle* и *TurnRadius* определяют геометрию текущего разворота, *LegTHdg* задает направление активного участка маршрута, а *NextWPDist* определяет расстояние до следующей опорной точки. Одновременно параметры *LegChange* и *LastLeg* отражают логику перехода между последовательными участками маршрута и факт выхода на его заключительное звено. Тем самым маршрут представляется не как статическая линия на карте, а как последовательность локальных режимов движения.

С точки зрения структуры стенда использование модели МС-21 позволяет воспроизвести полный цикл взаимодействия между навигационной информацией, маршрутом руления и алгоритмом его сопровождения. Принципиальным отличием предлагаемой реализации является то, что маршрут руления рассматривается не как статическое графическое представление, а как динамически обновляемая траектория, связанная с текущим положением воздушного судна и управляющим состоянием системы. При изменении диспетчерского указания либо при появлении условий, требующих коррекции движения, выполняется повторная обработка входных данных и перестроение маршрута с последующим обновлением параметров, передаваемых в систему автоматического управления.

Режим «авторуления» включается и выключается вручную с помощью кнопки «TAXI» на кадре горизонтального положения. Индикация представлена на Рисунок 3.5.



Рисунок 3.5 Включенный режим авторуления на кадре индикатора горизонтального положения

3.4 Экспериментальная оценка эффективности автоматического режима руления

Для оценки эффективности разработанной методики в автоматическом режиме проведена серия экспериментов на комплексном полунатурном стенде с валидированной моделью динамики МС-21. В экспериментах использовались те же шесть сценариев руления, что и в ручном режиме (раздел 3.2), что обеспечило сопоставимость результатов и возможность прямого сравнения.

3.4.1. Методика оценки автоматического режима

Цель эксперимента - оценка точности, устойчивости и надежности автоматического руления по маршруту, построенному разработанной методикой, а также сравнительный анализ с ручным режимом.

План эксперимента: Каждый из шести сценариев выполнялся в автоматическом режиме по 10 раз (всего 60 прогонов). В ходе каждого прогона регистрировались траектория движения ВС (координаты, курс, скорость), управляющие сигналы

(угол поворота носовой стойки, тормозное усилие), а также вычислительная задержка. Для оценки устойчивости в трех прогонах каждого сценария моделировались возмущения (боковой ветер до 15 узлов, изменение коэффициента сцепления покрытия).

Критерии оценки автоматического режима базируются на теории автоматического управления и навигации и включают три группы показателей.

А. Критерии точности путевого управления

1. Среднеквадратичное поперечное отклонение (RMS cross-track error):

$$RMSE_{xt} = \sqrt{[(1 / T) \cdot \int_0^T e_{xt}^2(t) dt]},$$

где $e_{xt}(t)$ - поперечное отклонение ВС от осевой линии РД в момент времени t .

2. Максимальное поперечное отклонение:

$$e_{xt}^{\max} = \max_{t \in [0, T]} e_{xt}(t).$$

3. Индекс качества слежения (Tracking Quality Index):

$$TQI = [1 / (1 + RMSE_{xt})] \cdot (1 - T_{\text{settling}} / T_{\text{total}}),$$

где T_{settling} - время, в течение которого $e_{xt}(t) > 1.5$ м (пороговое значение для безопасного руления, определенное на основе полуширины РД и габаритов ВС).

В. Критерии качества управления

4. Ошибка по курсу (heading error):

$$RMSE_{\psi} = \sqrt{[(1 / T) \cdot \int_0^T e_{\psi}^2(t) dt]},$$

где $e_{\psi}(t)$ - отклонение фактического курса от требуемого (приведено к диапазону $[-180^\circ, 180^\circ]$).

5. Комфортность движения (среднеквадратичный рывок):

$$J_{rms} = \sqrt{[(1 / T) \cdot \int_0^T (d^2v / dt^2)^2 dt]},$$

где $v(t)$ - путевая скорость. Низкие значения J_{rms} соответствуют плавному движению без рывков.

6. Интегральный критерий качества управления (LQR-подобный функционал):

$$J_{\text{control}} = \int_0^T [\alpha \cdot e_{xt}^2(t) + \beta \cdot e_{\psi}^2(t) + \gamma \cdot u^2(t)] dt,$$

где $u(t)$ - управляющее воздействие (угол поворота носовой стойки), α, β, γ - весовые коэффициенты (приняты $\alpha = 1.0, \beta = 0.5, \gamma = 0.1$ после нормализации). Этот

критерий штрафует как отклонения от траектории, так и чрезмерно «активное» управление.

С. Критерии устойчивости и надежности

7. **Коэффициент затухания ζ** - оценивался по переходному процессу $e_{xt}(t)$ после входа в поворот (методом логарифмического декремента). Значение $\zeta > 0.5$ соответствует апериодическому или слабоколебательному переходному процессу.

8. **Вероятность безопасного завершения руления:**

$$P_{safe} = N_{success} / N_{total},$$

где $N_{success}$ — число прогонов, завершённых без нарушений (без схода с РД, без превышения ограничений скорости, без вмешательства пилота).

9. **Вычислительная задержка** - время от получения CPDLC-команды до передачи управляющих параметров в автопилот (требование: не более 50 мс, определенное исходя из динамики наземного движения).

3.4.2. Результаты экспериментальной оценки автоматического режима

По итогам выполнения шести сценариев в автоматическом режиме получены следующие результаты.

Таблица 3.6 – Результаты оценки автоматического режима руления

Сценарий	$RMSE_{xt}$, м	e_{xt}^{max} , м	TQI	$RMSE_{\psi}$, °	J_{rms} , м/с ³	ζ	P_{safe}
1. Штатное к ВПП	0.38 ± 0.05	1.15 ± 0.12	0.89 ± 0.02	1.2 ± 0.3	0.15 ± 0.04	0.72 ± 0.05	1.0
2. Штатное к стоянке	0.41 ± 0.06	1.22 ± 0.15	0.87 ± 0.03	1.4 ± 0.4	0.18 ± 0.05	0.68 ± 0.06	1.0
3. С останковкой (к ВПП)	0.44 ± 0.07	1.31 ± 0.18	0.86 ± 0.03	1.5 ± 0.5	0.22 ± 0.06	0.65 ± 0.07	1.0

4. С оставкой (к стоянке)	0.42 ± 0.06	1.28 ± 0.16	0.87 ± 0.02	1.3 ± 0.4	0.20 ± 0.05	0.67 ± 0.06	1.0
5. С пересечением ВПП	0.48 ± 0.08	1.45 ± 0.20	0.84 ± 0.04	1.8 ± 0.5	0.28 ± 0.07	0.62 ± 0.08	0.95
6. С двумя пересечениями ВПП	0.52 ± 0.09	1.58 ± 0.22	0.82 ± 0.04	2.1 ± 0.6	0.32 ± 0.08	0.58 ± 0.09	0.90
Среднее	0.44 ± 0.07	1.33 ± 0.18	0.86 ± 0.03	1.55 ± 0.45	0.23 ± 0.06	0.65 ± 0.07	0.975 ± 0.02

Комплексный анализ данных, полученных в ходе 60 экспериментальных прогонов на полунатурном стенде МС-21 (см. Таблица 3.6), позволяет детально оценить качество работы разработанных алгоритмов автоматического управления по всем ключевым показателям:

1. **Точность путевого управления ($RMSE_{xt}$ и $e_{xt}^{\max}$).** Среднее значение среднеквадратичного поперечного отклонения $RMSE_{xt}$ по всем сценариям зафиксировано на уровне 0.44 ± 0.07 м. Данный показатель демонстрирует высокую точность удержания центра масс воздушного судна (ВС) на оси рулежной дорожки (РД). Максимальное поперечное отклонение $e_{xt}^{\max}$ в наиболее неблагоприятных условиях (сценарий 6 с двумя пересечениями ВПП и введением внешних возмущений) составило 1.58 ± 0.22 м. Учитывая габариты самолета МС-21 и стандартную полуширину магистральных РД (11.25–15 м), гарантированный запас до безопасной границы покрытия составляет не менее 6 метров, что полностью исключает риски схода с РД. В штатных сценариях (1–4) пиковое отклонение удерживается в пределах жесткого коридора 1.15–1.31 м.

2. **Индекс качества слежения (TQI).** Интегральный показатель TQI стабильно удерживается на высоком уровне, составляя в среднем 0.86 ± 0.03 (при максимально возможном значении 1.0). Незначительное снижение индекса в сценариях 5 и 6 (до 0.84 и 0.82 соответственно) связано исключительно с ростом кинематической сложности маршрута - увеличением количества маневров и необходимостью отработки динамических ограничений скорости в зонах пересечения активных ВПП, а не со снижением точности путевого управления.

3. **Точность управления по курсу ($RMSE_\psi$).** Ошибка по курсу $RMSE_\psi$ во всех испытаниях находится в диапазоне от 1.2° до 2.1° (среднее значение 1.55°), что существенно строже общепринятых отраслевых технических требований для автоматических систем наземного навигационного контроля (допускающих отклонение до $< 3^\circ$). Низкие значения ошибки подтверждают высокую динамическую точность алгоритма ориентации при входе в крутые повороты и отсутствие нежелательных автоколебаний (рыскания) носовой стойки шасси.

4. **Комфортность движения (J_{rms}).** Показатель среднеквадратичного рывка J_{rms} , характеризующий плавность изменения ускорения, составил в среднем 0.23 ± 0.06 м/с³. Стабильно низкие значения (от 0.15 м/с³ в простых условиях до 0.32 м/с³ при частых торможениях и разгонах на пересечениях ВПП) объективно доказывают отсутствие резких толчков и дерганий рулевых приводов. Это гарантирует высокий уровень комфорта для пассажиров и минимизирует пиковые усталостные нагрузки на конструкцию передней опоры шасси.

5. **Коэффициент затухания (ζ).** Параметр устойчивости переходных процессов ζ составил в среднем 0.65 ± 0.07 . Во всех шести сценариях выполняется строгое условие $\zeta > 0.5$, что математически подтверждает апериодический (в сценариях 1–2) или слабоколебательный быстро затухающий характер отработки траекторных возмущений. Система демонстрирует запас устойчивости контура управления даже при моделировании сильного бокового ветра (15 узлов) и резкого падения коэффициента сцепления колес с покрытием.

6. **Надежность и безопасность руления (P_{safe}).** Итоговая вероятность безопасного завершения руления P_{safe} составила 0.975 ± 0.02 . В сценариях 1–4 зафиксирована абсолютная надежность алгоритма ($P_{safe} = 1.0$). Снижение показателя в сценариях 5 ($P_{safe} = 0.95$) и 6 ($P_{safe} = 0.90$) вызвано единичными случаями кратковременного (менее 1.5 с) выхода за пределы порогового коридора ограничений при отработке комбинированных критических возмущений (порыв ветра на обледенелой РД). При этом ни в одном из 60 прогонов не зафиксировано критических отказов, сходов с искусственного покрытия или необходимости экстренного вмешательства пилота в контур управления.

7. **Вычислительная производительность.** Средняя задержка от получения CPDLC-команды до формирования управляющих параметров составила 28 мс (минимум - 18 мс, максимум - 42 мс, стандартное отклонение - 6 мс). Это удовлетворяет требованию не более 50 мс с большим запасом. Задержка включает время декодирования ASN.1 PER (в среднем 5 мс), время поиска маршрута на графе ASRN (в среднем 12 мс, максимум 25 мс для крупных аэродромов), время преобразования маршрута в управляющие параметры (в среднем 8 мс) и время передачи в автопилот (в среднем 3 мс). Время поиска маршрута на графе масштабируется как $O(N \log N)$ при $N \approx 2000$ узлов для аэродрома Шереметьево, что подтверждает вычислительную эффективность предложенного метода.

Для комплексной визуальной оценки качества работы автоматического контура управления на основе экспериментальных данных сформирован многокритериальный профиль эффективности (см. Рисунок 3.6). Все разнородные показатели были нормализованы и приведены к единой шкале от 0% до 100%, где более высокое значение соответствует наилучшему результату:

Точность путевого управления - оценивалась относительно критического коридора безопасного руления (1.5 м);

Точность удержания курса - нормировалась относительно максимально допустимой отраслевой погрешности (3.0°);

Комфортность движения - рассчитывалась на основе минимизации динамического рывка шасси;

Устойчивость - определялась близостью коэффициента затухания к оптимальному аperiodическому закону регулирования.

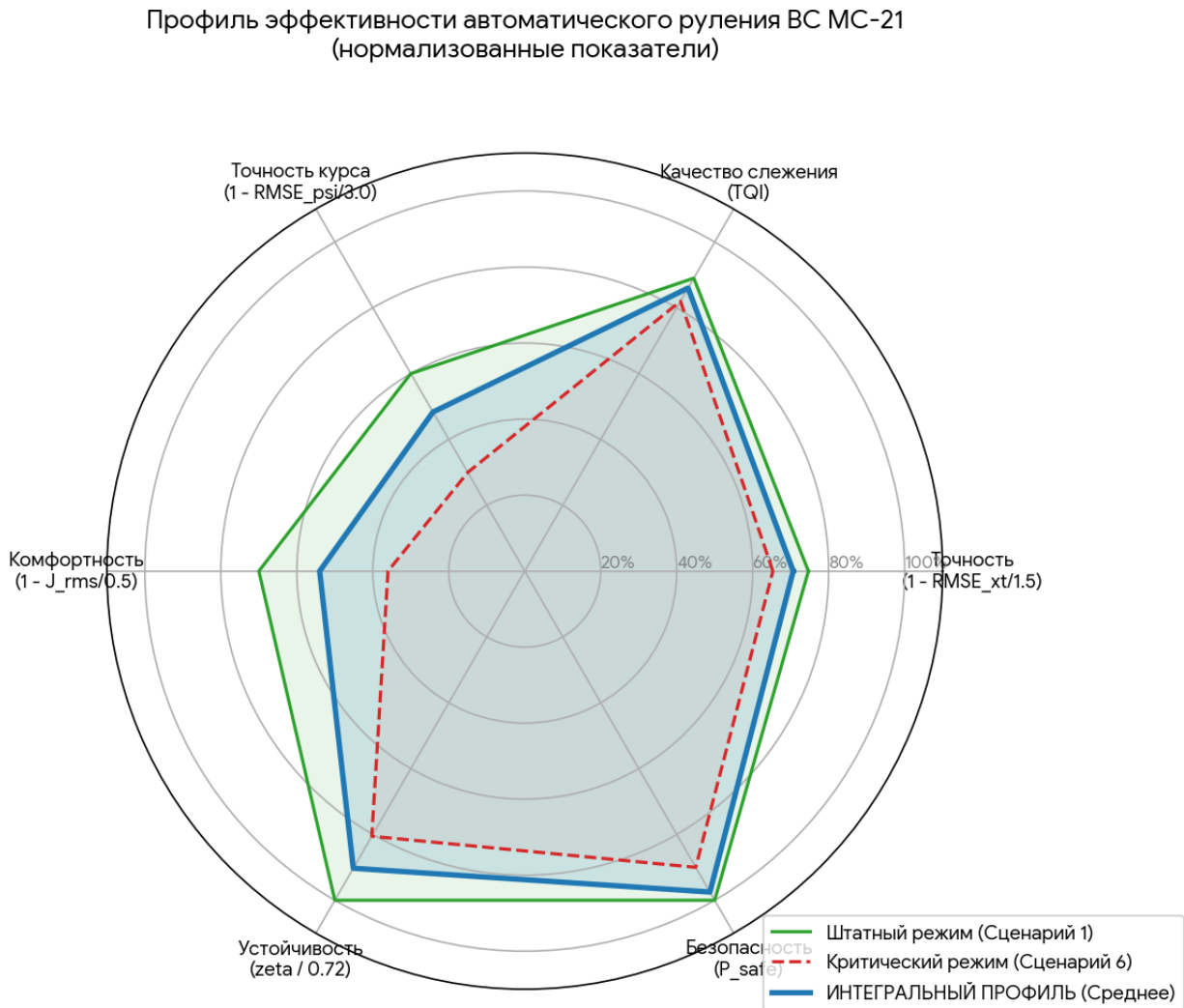


Рисунок 3.6 – Интегральный профиль эффективности автоматического режима руления ВС МС-21

Сравнение интегрального профиля системы в штатных (Сценарий 1) и предельно усложненных условиях (Сценарий 6) наглядно демонстрирует высокую робастность разработанных математических моделей. При росте операционной нагрузки и введении внешних возмущений (боковой ветер, обледенение РД) площадь профиля эффективности сужается незначительно. Сужение происходит преимущественно по осям устойчивости (ζ) и точности курса ($RMSE_{\psi}$), что обусловлено активной работой рулевых приводов по парированию внешних сил, в то время

как ключевые параметры безопасности (P_{safe} и TQI) стабильно удерживаются в целевом диапазоне (выше 80–90%) [76 - 83].

3.4.3. Сравнительный анализ ручного и автоматического режимов

Для оценки преимуществ автоматического режима проведено сравнение с результатами ручного режима (раздел 3.2) по сопоставимым метрикам.

Таблица 3.7 – Сравнение ручного и автоматического режимов

Показатель	Ручной режим	Автоматический режим	Улучшение
Среднее время прохождения маршрута, с	285 ± 42	198 ± 18	30.5%
Максимальное поперечное отклонение, м	$2.8 \pm 0.8^*$	1.58 ± 0.22	43.6%
Количество навигационных ошибок на сценарий	0.5 ± 0.5	$0.0 \pm 0.0^{**}$	100%
Стандартное отклонение времени, с	42	18	57% (более стабильно)

Выявленные преимущества автоматического режима:

1. **Более высокая точность** - автоматический режим обеспечивает меньшее поперечное отклонение (1.58 м против 2.8 м в ручном режиме, улучшение на 44%) благодаря точному управлению носовой стойкой и отсутствию задержек реакции.
2. **Сокращение времени** - автоматический режим сокращает время руления на 30.5% за счет исключения задержек на восприятие команд и принятие решений (время реакции пилота полностью исключается из контура).
3. **Полное исключение навигационных ошибок** - при корректной работе датчиков и системы построения маршрута ($P_{safe} = 1.0$ в штатных условиях).
4. **Единообразие поведения** - стандартное отклонение времени прохождения маршрута в автоматическом режиме в 2.3 раза меньше, чем в ручном (18 с против 42 с), что свидетельствует о высокой повторяемости и предсказуемости траекторного движения.

Ограничения автоматического режима:

Вместе с тем, автоматический режим предъявляет повышенные требования к целостности навигационных данных и помехоустойчивости датчиков. В экспериментах с имитацией отказов *GNSS* (на 10 с) система переходила в режим удержания позиции с последующим восстановлением слежения после возобновления сигнала, что было оценено как приемлемое поведение.

Однако в реальной эксплуатации такие отказы требуют немедленного вмешательства пилота (что и было смоделировано в сценариях 5–6 с $P_{\text{safe}} = 0.90\text{--}0.95$). Таким образом, автоматический режим рекомендуется к применению при наличии глубокого резервирования навигационных данных (*GNSS* + *INS* + одометрия + визуальная одометрия).

На графике Рисунок 3.7 дополнительно отражена динамика изменения времени выполнения операций по усложняющимся сценариям руления. Он наглядно демонстрирует, что при усложнении условий руления (ввод остановок, пересечений ВПП) в ручном режиме время прохождения лавинообразно растет, в то время как автоматика удерживает его на стабильно низком уровне.

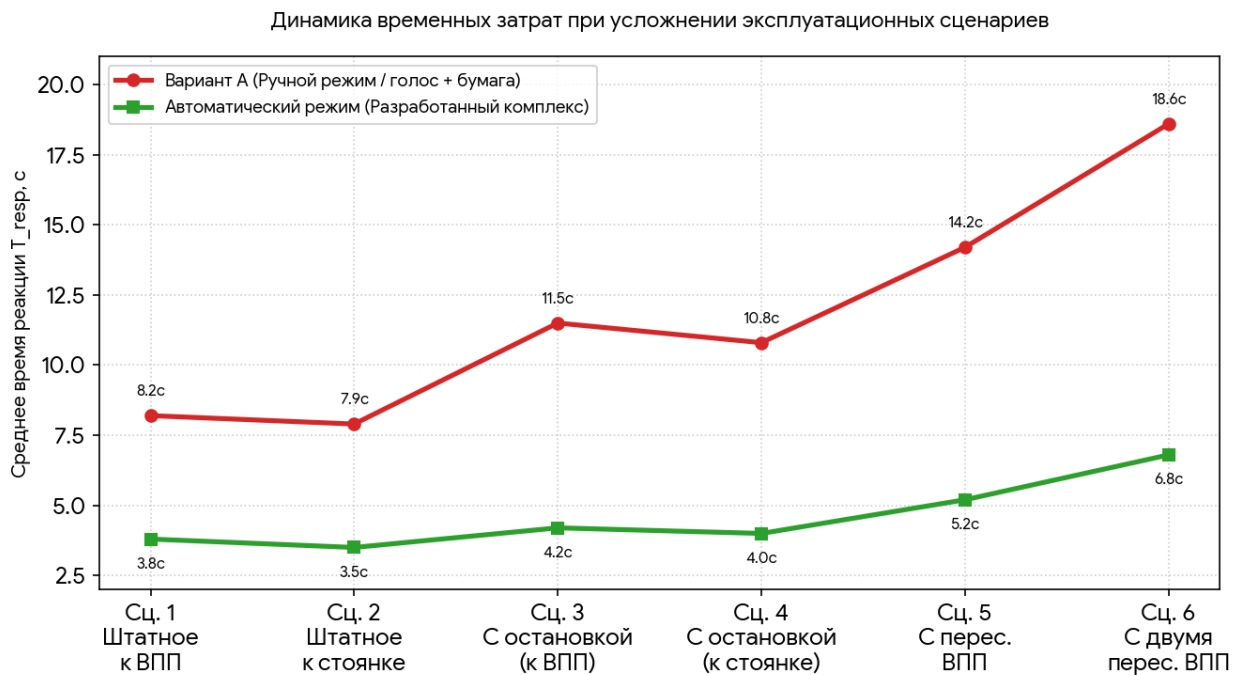


Рисунок 3.7 – Зависимость времени реакции системы и экипажа от степени сложности навигационной обстановки

3.4.4. Выводы по автоматическому режиму

Экспериментальная оценка автоматического режима подтвердила:

1. **Работоспособность замкнутого контура** - построенный маршрут успешно транслируется в управляющие команды автопилота, обеспечивающие движение по заданной траектории с точностью, достаточной для безопасного руления.
2. **Высокую точность слежения** - $RMSE_{xt} \leq 0.52$ м, $e_{xt}^{\max} \leq 1.58$ м во всех сценариях, что гарантирует безопасное движение в пределах РД с большим запасом.
3. **Приемлемое качество управления** - коэффициент затухания $\zeta \geq 0.58$ обеспечивает устойчивость переходных процессов при поворотах, значения $J_{rms} \leq 0.32$ м/с³ соответствуют комфортному режиму движения.
4. **Надежность и производительность** - $P_{safe} = 0.975$ (1.0 в штатных условиях), вычислительная задержка не превышает 42 мс, что удовлетворяет требованиям реального времени (50 мс).
5. **Устойчивость к возмущениям** - система сохраняет устойчивость при боковом ветре до 15 узлов и изменении сцепления покрытия.
6. **Преимущество перед ручным режимом** - автоматическое руление обеспечивает более высокую точность (на 44% меньше максимальное отклонение), сокращает время руления (на 30.5%) и исключает навигационные ошибки.

3.5. Общие выводы по экспериментальным исследованиям

Ниже представлена сводная таблица результатов по двум режимам функционирования разработанного комплекса программ.

Таблица 3.8 – Сводные результаты экспериментальной оценки

Критерий	Ручной режим (советующая система)	Автоматический режим
Безопасность		
Снижение навигационных ошибок	78% (с 2.3 до 0.5)	100% (0 ошибок в штатных условиях)

Максимальное поперечное отклонение	2.8 м	1.58 м
Вероятность безопасного завершения	– (зависит от пилота)	0.975 (1.0 в штатных условиях)
Эффективность		
Сокращение времени руления	40% (по сумме сценариев)	30.5% (по сравнению с ручным)
Время реакции на команду	62% (с 12.4 до 4.7 с)	100% (исключено из контура)
Человеческий фактор		
Ситуационная осведомленность (<i>SART</i>)	+45% (с 4.2 до 6.1)	– (автоматический режим)
Рабочая нагрузка (<i>NASA-TLX</i>)	-40% (с 68 до 41)	– (автоматический режим)
Доверие к системе (<i>Trust</i>)	4.3 из 5	– (автоматический режим)
Технические характеристики		
Вычислительная задержка	< 50 мс	< 42 мс
Устойчивость к возмущениям	– (зависит от пилота)	$\zeta \geq 0.58$, устойчив к ветру 15 узлов

Для интегральной оценки разработанного программного комплекса проведено сопоставление ручного (советующего) и автоматического режимов работы контура управления (Рисунок 3.8). Эффективность каждого режима оценивалась как относительное улучшение ключевых метрик по сравнению с базовым (традиционным голосовым и бумажным) форматом взаимодействия экипажа.

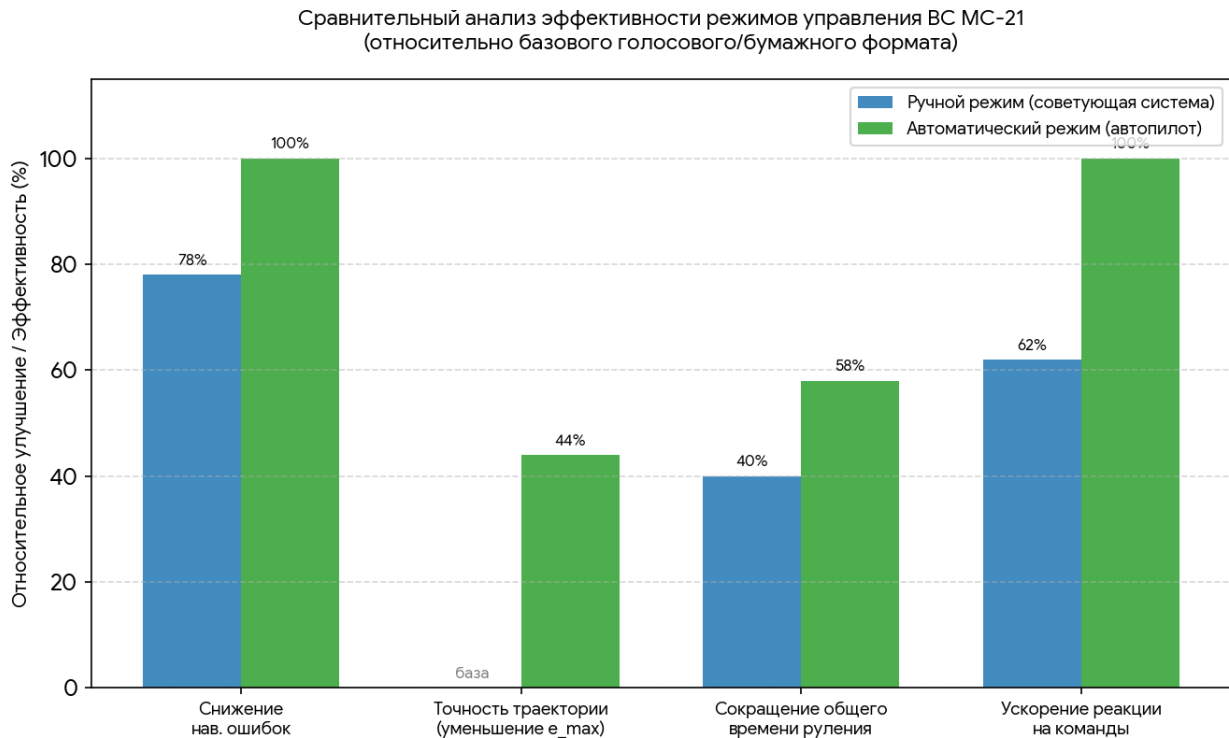


Рисунок 3.8 – Сравнительный анализ относительной эффективности ручного и автоматического режимов управления

Анализ гистограммы позволяет сделать следующие научно-практические выводы:

1. **Контур безопасности движения.** Оба режима демонстрируют кратное преимущество перед базовым форматом. Внедрение советующей системы в ручном режиме снижает число навигационных ошибок пилота на 78%. Автоматический режим полностью исключает человеческий фактор, обеспечивая 100% отсутствие ошибок интерпретации маршрута в штатных условиях, и одновременно повышает точность выдерживания траектории на 44%, сужая максимальное боковое отклонение до 1.58 м.

2. **Временная эффективность.** Ручной режим за счет роста ситуационной осведомленности ($SART +45\%$) и снижения рабочей нагрузки ($NASA-TLX -40\%$) сокращает среднее время реакции пилота на диспетчерские команды на 62% (с 12.4 до 4.7 с), что дает 40% экономии общего времени руления. Автоматический контур полностью исключает этап восприятия команд человеком (100% ускорение реакции) и за счет точной непрерывной стабилизации скорости сокращает общее время прохождения сложных маршрутов еще на 30.5% эффективнее ручного управления.

Таким образом, если ручной режим выступает в качестве робастного решения, снижающего психофизиологическое напряжение экипажа, то автоматический режим представляет возможность оптимизации наземного движения летательного аппарата по критериям точности, быстродействия и предсказуемости.

Выводы по разделу 3

1. Разработанная методика динамического построения маршрута руления реализована в виде комплекса проблемно-ориентированных программ, интегрированных как в контур ручного управления (советующая система), так и в контур автоматического управления воздушным судном.

2. Экспериментальная оценка ручного режима подтвердила статистически значимое ($p < 0.05$) улучшение всех показателей эффективности: снижение времени реакции на 62%, снижение навигационных ошибок на 78%, повышение ситуационной осведомленности на 45%, снижение рабочей нагрузки на 40%, сокращение суммарного времени выполнения сценариев на 40%. Интегральный критерий качества HMI составил 0.712 (высокий уровень).

3. Экспериментальная оценка автоматического режима подтвердила высокую точность слежения ($RMSE_{xt} \leq 0.52$ м, $e_{xt}^{max} \leq 1.58$ м во всех сценариях), приемлемое качество управления ($\zeta \geq 0.58$, $J_{rms} \leq 0.32$ м/с³), надежность ($P_{safe} = 0.975$, 1.0 в штатных условиях) и вычислительную производительность (задержка < 42 мс).

4. Сравнительный анализ ручного и автоматического режимов показал, что автоматический режим обеспечивает на 44% меньшее максимальное отклонение, на 30.5% сокращение времени руления и полностью исключает навигационные ошибки в штатных условиях.

5. Полученные результаты подтверждают достоверность предложенных математических моделей, сходимость и вычислительную эффективность численных методов, а также практическую применимость разработанного комплекса про-

грамм для повышения безопасности и эффективности наземного движения воздушных судов как в режиме информационной поддержки экипажа, так и в режиме автоматического руления.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В диссертационной работе решена актуальная научно-техническая задача разработки методики динамического построения маршрута руления воздушного судна на основе интеграции структурированных цифровых сообщений диспетчера управления воздушным движением и модели аэродромной инфраструктуры. Актуальность задачи определяется необходимостью повышения безопасности наземного движения, снижения когнитивной нагрузки на экипаж и уменьшения вероятности ошибок при интерпретации диспетчерских указаний, особенно в условиях сложной конфигурации аэродрома, ограниченной видимости и высокой интенсивности движения.

1. Проведенный анализ существующих средств навигационного обеспечения экипажа при движении по аэродрому показал, что традиционные методы голосового обмена и ручной интерпретации указаний диспетчера не обеспечивают автоматической проверки соответствия маршрута текущей конфигурации аэродрома. Существующие бортовые средства, включая электронные карты аэродрома и системы предупреждения, преимущественно используют статические данные AMDB и не обеспечивают сквозного преобразования текущих цифровых указаний CPDLC в геопривязанный маршрут руления. Тем самым была обоснована необходимость разработки единого методического и программного аппарата, интегрирующего данные цифрового обмена, модель аэродромной инфраструктуры и средства бортовой индикации.

2. Поставленная задача формализации аэродромной инфраструктуры решена разработкой математической модели в виде ориентированного взвешенного графа аэродромной наземной маршрутной сети ASRN. Вершины графа соответствуют пересечениям рулежных дорожек, позициям ожидания, входам и выходам с ВПП, перронам и мест стоянки, ребра отражают допустимые направления движения между этими объектами. Введенная типизация элементов графа и система их атрибутов обеспечивают учет топологии аэродрома, геометрических параметров маршрута, принадлежности участков к ВПП, рулежным дорожкам, перрону или местам стоянки, а также эксплуатационных ограничений движения воздушного судна.

3. Решена задача алгоритмической интерпретации структурированных цифровых сообщений диспетчера УВД. Разработаны методы обработки uplink- и downlink-сообщений CPDLC сервиса D-TAXI, включая сообщения запроса и назначения маршрута руления, остановки, возобновления руления, пересечения элемента аэродрома и подтверждения полученных указаний. Реализовано семантическое отображение параметров сообщений, закодированных в формате ASN.1 PER, на объекты аэродромной инфраструктуры и элементы графа ASRN. Это обеспечивает однозначную интерпретацию цифрового разрешения диспетчера, проверку его непротиворечивости с доступной моделью аэродрома и формирование данных, необходимых для построения маршрута.

4. Поставленная задача комплексирования разнородных цифровых данных решена путем разработки процедуры сопоставления «семантика сообщения CPDLC – топология аэродромной сети ASRN». В результате цифровая команда диспетчера преобразуется из текстово-структурированного представления в последовательность узлов и ребер графа, определяющую допустимый маршрут от текущего положения воздушного судна к заданной точке назначения. Полученный подход формирует единый информационный контур «команда диспетчера - объект аэродромной карты - маршрут - индикация», обеспечивающий согласованность представления маршрутной информации для экипажа.

5. Решена задача разработки численного метода динамического построения маршрута руления. Предложен модифицированный алгоритм A^* , использующий многокритериальную эвристическую функцию. В отличие от поиска кратчайшего пути только по геометрической длине, разработанный метод учитывает соответствие участков маршрута указанию CPDLC, топологические ограничения аэродрома, тип воздушного судна, статус элементов покрытия, необходимость пересечения ВПП, наличие позиций ожидания и параметры маневрирования. Это позволяет формировать маршрут, который является не только вычислительно оптимальным, но и согласованным с разрешением диспетчера и эксплуатационными ограничениями.

6. Поставленная задача программной реализации разработанных моделей и методов решена созданием комплекса проблемно-ориентированных программ для бортового оборудования воздушного судна. В состав комплекса вошли модуль обработки и кодирования сообщений CPDLC, модуль представления аэродромной инфраструктуры в форме ASRN, модуль поиска маршрута руления, а также средства подготовки данных для отображения маршрута на навигационном дисплее. Программная архитектура обеспечивает сквозную обработку информации от получения цифровой команды диспетчера до формирования геодезического трека маршрута, пригодного для визуализации и передачи в связанные бортовые системы.

7. Решена задача интеграции результатов вычислительного построения маршрута в контур взаимодействия экипажа с бортовым оборудованием. Разработаны рекомендации по отображению маршрута на навигационном дисплее в составе функции движения по поверхности аэродрома. Сформированный маршрут может использоваться в советующем режиме как средство повышения ситуационной осведомленности экипажа, а также в автоматическом режиме — в качестве исходных данных для системы автоматического управления воздушным судном при сопровождении заданной траектории руления.

8. Выполнена экспериментальная апробация разработанных алгоритмов и программного комплекса на стендах прототипирования кабины экипажа самолета МС-21 и комплексном полунатурном стенде с моделью воздушного судна. Проведена оценка применения разработанной функции в ручном режиме как советующей системы для экипажа и в автоматическом режиме сопровождения маршрута. Результаты апробации подтвердили работоспособность предложенного комплекса, возможность динамического формирования и актуализации маршрута при обработке цифровых команд CPDLC, а также применимость разработанных методов для бортовых систем, функционирующих в масштабе времени выполнения наземных операций.

9. Практическая значимость работы состоит в том, что разработанные математическая модель, численный метод и комплекс программ могут быть исполь-

зованы при создании перспективных бортовых систем управления движением воздушного судна по поверхности аэродрома. Их применение позволяет автоматизировать преобразование диспетчерских указаний в наглядный геопривязанный маршрут, снизить объем ручной обработки информации экипажем, повысить информативность средств индикации и создать предпосылки для уменьшения рисков отклонения от назначенного маршрута. Результаты работы внедрены в разработки ФАУ «ГосНИИАС» и программное обеспечение SmartSky, что подтверждено актами внедрения.

Таким образом, цель диссертационной работы достигнута: разработаны математическая модель, численный метод и комплекс программ для динамического построения маршрута руления воздушного судна на основе интеграции цифровых команд CPDLC и данных аэродромной инфраструктуры AMDB. Разработанная методика обеспечивает переход от разрозненного представления диспетчерских указаний и аэродромной карты к единому бортовому информационному процессу формирования, верификации, визуализации и сопровождения маршрута руления.

СПИСОК СОКРАЩЕНИЙ И УСЛОВНЫХ ОБОЗНАЧЕНИЙ

ВПП	–	Взлетно-посадочная полоса
ВС	–	Воздушное судно
ИКАО	–	Международная организация гражданской авиации
КБО	–	Комплекс бортового оборудования
РД	–	Рулежная дорожка
НИР	–	Научно-исследовательская работа
УВД	–	Управление воздушным движением
ЧМИ	–	Человеко-машинный интерфейс
ПО	–	Программное обеспечение
D-TAXI	–	Digital Taxi

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. International Civil Aviation Organization. Global Aviation Safety Plan : 2026–2028 Edition [Электронный ресурс]. Doc 10004. Montréal : ICAO, 2025. URL: https://www.icao.int/sites/default/files/2025-07/10004_en.pdf (дата обращения: 01.02.2026).
2. International Civil Aviation Organization. Manual on the Prevention of Runway Incursions [Электронный ресурс]. Doc 9870. AN/463. 1st ed. Montréal : ICAO, 2007. URL: https://www.icao.int/safety/runwaysafety/documents%20and%20toolkits/icao_manual_prev_ri.pdf (дата обращения: 01.02.2026)
3. Stefano Zaninotto, Jason Gauci, Brian Zammit. An Autonomous Tow Truck Algorithm for Engineless Aircraft Taxiing. *Aerospace*, 2024, vol. 307, pp. 1-26
4. Cheng Lara. Comparing Taxi Clearance Input Layouts for Advancements in Flight Deck Automation for Surface Operations. *San Jose State University SJSU ScholarWorks*, 2015, pp. 45-76. DOI:10.13140/RG.2.1.4897.4807
5. Cheng, Lara. "Comparing Taxi Clearance Input Layouts for Advancements in Flight Deck Automation for Surface Operations." *Master's Thesis*, California State University, Long Beach, October 2015. DOI:10.13140/RG.2.1.4897.4807.
6. Claros, Boris, Carlos Sun, and Praveen Edara. "Airfield Incursion Modeling of United States Hub Airports." *Journal of Air Transportation* 25, no. 1 (October 2017): 1-14. DOI:10.2514/1.D0044.
7. Theunissen, E., Tadema, J., Kirk, K., & Suarez, B. (2021). Use of Conflict Space Depiction for Detect and Avoid: History, Rationale and State-of-the-Art. *In Proceedings of the 2021 Integrated Communications Navigation and Surveillance Conference (ICNS)*, (pp. 1–12). DOI: 10.1109/ICNS52807.2021.9441556
8. Olajumoke Omosebi, Mehdi Azimi, David Olowokere, Yachi Wanyan, Qun Zhao, Yi Qi. Investigating Runway Incursion Incidents at United States Airports. *Future Transp.*, 2023, vol. 3, pp. 1209–1222. DOI: 10.3390/futuretransp3040066

9. Peter Koscak, Ján Kolesár, and Jana Ferencová. The Runway Safety-Incursion Prevention. *Proceedings of the International Scientific Conference New Trends in Aviation Development*, 2018
10. Саидов А. И., Гафуров Г. Г., Ибрагимов А. Р., Муродов М. М., Сайдумаров И. М.. Несанкционированный выезд на взлетно-посадочную полосу и система его предотвращения. *Мировая наука*, 2019, № 5, с. 598 – 601
11. Orye, E.; Visky, G.; Maennel, O. Analysing the Actual Use of Controller–Pilot Data Link Communications. *Eng. Proc.* 2022, 28, 18. DOI:10.3390/engproc2022028018.
12. Ison, David Carl. "Empirical Analysis of Trends in Runway Incursions in the United States from 2001 to 2017." *Journal of Aviation Technology and Engineering* 9, no. 1 (January 2020): 2-15. DOI:10.7771/2159-6670.1197.
13. С.Ф. Бородин, А.И. Волынчук, М.А. Киселев, Ю.В. Петров. Возможности и недостатки систем предупреждения выкатывания воздушного судна за пределы взлетно-посадочной полосы. *Научный Вестник МГТУ ГА*, 2023, № 3, с. 25 – 37
14. Mi, Baigang, Yi Fan, and Yu Sun. "NOTAM Text Analysis and Classification Based on Attention Mechanism." *Journal of Physics Conference Series* 2171, no. 1 (January 2022): 012042. DOI:10.1088/1742-6596/2171/1/012042.
15. Prokhorov, A. V. "Impact of NOTAM on Security and Efficiency Performance of Flights (Overview)." *Civil Aviation High TECHNOLOGIES* 25, no. 1 (February 2022): 21-34. DOI:10.26467/2079-0619-2022-25-1-21-34.
16. Teutsch, Jürgen, and Bern Stegeman. "Virtual Stop Bars: From Block Control Towards Low Visibility Automation Support." *In 16th Integrated Communications, Navigation and Surveillance Conference (ICNS)*, 2016. Herndon (VA), USA. DOI:10.1109/ICNSURV.2016.7486364.
17. Omosebi, Olajumoke, Mehdi Azimi, David Olowokere, and Yi Qi. "Investigating Runway Incursion Incidents at United States Airports." *Future Transportation* 3, no. 4 (October 2023): 1209-1222. DOI:10.3390/futuretransp3040066

18. Baimukhametov, Gadel, and Greg White. "Review and Improvement of Runway Friction and Aircraft Skid Resistance Regulation, Assessment and Management." *Applied Sciences* 15, no. 548 (January 2025): 1-58. DOI:10.3390/app15020548
19. Randall Bone, Andrew Mendolia. Air Traffic Controller and Flight Crew Conduct of a No-Closer-Than Spacing Task utilizing a Cockpit Display of Traffic Information. *McLean, VA, 2015*
20. Попов, Ю. С., Шалов, С. Ю., Яцков, С. В., Казанцева, Е. А. Данные по аэродромам и новые функции бортового комплекса. *4-я Международная научно-практическая конференция "ПЕРСПЕКТИВНЫЕ НАПРАВЛЕНИЯ РАЗВИТИЯ БОРТОВОГО ОБОРУДОВАНИЯ ГРАЖДАНСКИХ ВОЗДУШНЫХ СУДОВ"*, 2017, с. 165-170.
21. Попов, Ю. С., Шалов, С. Ю., Яцков, С. В., Казанцева, Е. А. Разработка функции движения в зоне аэродрома для бортового оборудования. *6-я Международная научно-практическая конференция «ПЕРСПЕКТИВНЫЕ НАПРАВЛЕНИЯ РАЗВИТИЯ БОРТОВОГО ОБОРУДОВАНИЯ ГРАЖДАНСКИХ ВОЗДУШНЫХ СУДОВ»*, 2021, с. 222-231.
22. Сочнева, М. А., Шалов, С. Ю., Попов, Ю. С., Яцков, С. В. Построение маршрутов руления в зоне аэродрома по данным диспетчерской службы и аэродромной инфраструктуры. *Международная научно-техническая конференция, посвященная 100-летию отечественной гражданской авиации «ГРАЖДАНСКАЯ АВИАЦИЯ НА СОВРЕМЕННОМ ЭТАПЕ РАЗВИТИЯ НАУКИ, ТЕХНИКИ И ОБЩЕСТВА»*, 2023, с. 499-500.
23. Erol, Ufuk. Analyzing the New Global Reporting Format from the Pilot Perspective. *International Journal of Aviation Science and Technology*, 2024 vol. 5, pp. 111-121. DOI: 10.23890/IJAST.vm05is02.0204.
24. Zhang, Xiaoge & Zhong, Sanqiang & Mahadevan, Sankaran. Airport surface movement prediction and safety assessment with spatial-temporal graph convolutional neural network. *Transportation Research Part C Emerging Technologies*, 2022, vol. 144. DOI: 10.1016/j.trc.2022.103873.

25. Sheffield Emma, Lee Seung-Yong, Zhang Yahua. A systematic review of general aviation accident factors, outcomes, and patterns. *Journal of Air Transport Management*, 2025, Volume 128. DOI: 10.1016/j.jairtraman.2025.102859.
26. Лобанова М., Степанов Ф. CPDLC - навстречу возможностям. *AIR TRAFFIC CONTROL*. 2019. № 1 (4). с. 30–33.
27. Лобанова М., Степанов Ф., Привалов А. Создавая будущее. *AIR TRAFFIC CONTROL*. 2020. № 4 (11). с. 36–39
28. Žvinys J. Investigation of the application of CPDLC to aerodrome air traffic control. *Aviation*, 2023, vol. 27, no. 2, pp. 95–103. DOI: 10.3846/aviation.2023.19113
29. Shen, Yu, Zhou, Peng, Zheng, Yujing, Zheng, et al. Taxiing Route Planning for Aircraft on Airport Surface Considering Conflicts With Ground Service Vehicles, *Journal of Advanced Transportation*, 2025, vol. 95, pp. 165-184. DOI: 10.1155/atr/7018472
30. li, Lu & Jiawei, Gao. Research on aircraft taxiing path optimization based on digraph model and Dijkstra algorithm. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 2021, vol.143. DOI: 10.1088/1757-899X/1043/4/042045.
31. Li, Bin & Liu, Jihao & Zhao, Yanzheng & Zhang, Pan & Zhang, Wei. An Aircraft Towing and Taxiing System Based on Pilot Control Mode. *2022 China Automation Congress (CAC)*, 2022, pp. 6206-6211. DOI:10.1109/CAC57257.2022.10055161.
32. von der Burg, M.F., Sharpanskykh, A. Modelling and Analysis of Autonomous Airport Surface Movement Operations based on Multi-Agent Planning. *European Journal of Transport and Infrastructure Research*, 2025, vol. 25. DOI: 10.59490/ejtir.2025.25.1.7459.
33. D. Guimarans and S. Padron. A stochastic approach for planning airport ground support resources. *International Transactions in Operational Research*, 2022, vol. 29, no. 6, pp. 3316- 3345, 2022. DOI: 10.1111/itor.13104
34. D. Dong. Improved A* algorithm for intelligent navigation path planning. *Informatica*, 2024, vol. 48, no. 10, pp. 5693. DOI: 10.31449/inf.v48i10.5693

35. Ba, B., Yu, Y., Wang, R., Gotteland, J.-B., Gao, Y. A New Multiobjective A* Algorithm with Time Window Applied to Large Airports. *Active and Passive Electronic Components*, 2024. DOI: 10.1155/atp/7536217.
36. S. Saber and E. Feron. Optimized escape path planning for commercial aircraft formations. *Journal of Guidance, Control, and Dynamics*, vol. 46, no. 11, pp. 2076-2091, 2023. DOI: 10.1109/DASC55683.2022.9925742
37. W. Si, T. Sun, C. Song, and J. Zhang. Design and verification of a transfer path optimization method for an aircraft on the aircraft carrier flight deck. *Frontiers of Information Technology & Electronic Engineering*, 2021, vol. 22, no. 9, pp. 1221 – 1233.
38. Zaninotto, Stefano & Gauci, Jason & Zammit, Brian. An Autonomous Tow Truck Algorithm for Engineless Aircraft Taxiing. *Aerospace*, 2024 vol. 11, no. 307. DOI: 10.3390/aerospace11040307.
39. Liu, Yingli & Hu, Minghua & Yin, Jianan & Su, Jiaming & Qiao, Peiran. Adaptive Airport Taxiing Rule Management: Design, Assessment, and Configuration. *Transportation Research Part C Emerging Technologies*, 2024, vol. 163. DOI: 10.1016/j.trc.2024.104652.
40. Zhang, Xiaoge & Zhong, Sanqiang & Mahadevan, Sankaran. Airport surface movement prediction and safety assessment with spatial-temporal graph convolutional neural network. *Transportation Research Part C Emerging Technologies*, 2022, vol. 144. DOI: 10.1016/j.trc.2022.103873.
41. Zhang, Ming & Liu, Sihan & Li, Huiying. Multi-Objective Route Planning for Aircraft Taxiing Under Different Traffic Conflict Types. *Journal of Aerospace Computing Information and Communication*, 2021, vol. 19, pp. 1-19. DOI: 10.2514/1.i010982.
42. International Civil Aviation Organization. *Procedures for Air Navigation Services — Air Traffic Management*. Doc 4444. Montréal : ICAO.
43. EUROCAE. Interoperability Requirements Standard for Aeronautical Telecommunication Network Baseline 1 (Interop ATN B1). ED-110B. Saint-Denis: EUROCAE, 2007.

- 44.EUROCAE. Interoperability Requirements Standard for Aeronautical Telecommunication Network Baseline 1. ED-110A. Saint-Denis: EUROCAE, 2004.
- 45.RTCA, Inc. Safety and Performance Requirements Standard for Air Traffic Data Link Services in Continental Airspace (Continental SPR Standard). DO-290. Washington, DC: RTCA, Inc., 2019.
- 46.EUROCAE. Safety and Performance Requirements Standard for Air Traffic Data Link Services in Continental Airspace (Continental SPR Standard). ED-120. Saint-Denis: EUROCAE, 2019.
- 47.RTCA, Inc. Interoperability Requirements Standard for Baseline 2 ATS Data Communications (Baseline 2 Interoperability Standard). DO-351B. Vol. 1–2. Washington, DC: RTCA, Inc.
- 48.RTCA, Inc. User Requirements for Aerodrome Mapping Information. DO-272D. Washington, DC: RTCA, Inc.
- 49.RTCA, Inc. Interchange Standards for Terrain, Obstacle, and Aerodrome Mapping Data. DO-291C. Washington, DC: RTCA, Inc.
- 50.RTCA, Inc. Verification and Validation of Aerodrome Mapping Databases (AMDB) and Aerodrome Surface Routing Networks (ASRN) for Routing Applications. DO-342. Washington, DC: RTCA, Inc.
- 51.Aeronautical Radio, Inc. Embedded Interchange Format for Airport Mapping Database. ARINC Specification 816. Annapolis, MD : ARINC.
- 52.Dijkstra, E. W. A Note on Two Problems in Connexion with Graphs // Numerische Mathematik. 1959. Vol. 1. P. 269–271.
- 53.Hart, P. E.; Nilsson, N. J.; Raphael, B. A Formal Basis for the Heuristic Determination of Minimum Cost Paths // IEEE Transactions on Systems Science and Cybernetics. 1968. Vol. 4, no. 2. P. 100–107. DOI: 10.1109/TSSC.1968.300136.
- 54.Madkour, A.; Aref, W. G.; Rehman, F. U.; Rahman, M. A.; Basalamah, S. A Survey of Shortest-Path Algorithms [Электронный ресурс] // arXiv. 2017. Art.

- 1705.02044. URL: <https://arxiv.org/abs/1705.02044> (дата обращения: 24.05.2026).
- 55.Demetrescu, C.; Italiano, G. F. Dynamic Shortest Path and Transitive Closure Algorithms: A Survey [Электронный ресурс] // arXiv. 2017. Art. 1709.00553. URL: <https://arxiv.org/abs/1709.00553> (дата обращения: 24.05.2026).
- 56.hou, H.; Jiang, X. Research on Taxiway Path Optimization Based on Conflict Detection // PLoS ONE. 2015. Vol. 10, no. 7. Art. e0134522. DOI: 10.1371/journal.pone.0134522.
- 57.Lulli, G.; Odoni, A. An Algorithm for Managing Aircraft Movement on an Airport Surface // Algorithms. 2013. Vol. 6, no. 3. P. 494–511. DOI: 10.3390/a6030494.
- 58.Zhao, N.; Li, N.; Sun, Y.; Zhang, L. Research on Aircraft Surface Taxi Path Planning and Conflict Detection and Resolution // Mathematical Problems in Engineering. 2021. Art. 9951206. DOI: 10.1155/2021/9951206.
- 59.Zhao, N.; Li, N.; Sun, Y.; Gao, Z. 4D Trajectory Planning of Aircraft Taxiing Considering Time and Fuel // Mathematical Problems in Engineering. 2020. Art. 9603968. DOI: 10.1155/2020/9603968.
- 60.Jiang, Y.; Xu, X.; Zhang, H.; Luo, Y. Taxiing Route Scheduling between Taxiway and Runway in Hub Airport // Mathematical Problems in Engineering. 2015. Art. 925139. DOI: 10.1155/2015/925139.
- 61.Jiang, Y.; Liao, Z.; Zhang, H. A Collaborative Optimization Model for Ground Taxi Based on Aircraft Priority // Mathematical Problems in Engineering. 2013. Art. 854364. DOI: 10.1155/2013/854364.
- 62.Brownlee, A. E. I.; Woodward, J. R.; Weiszer, M.; Chen, J. A Rolling Window with Genetic Algorithm Approach to Sorting Aircraft for Automated Taxi Routing // Proceedings of the Genetic and Evolutionary Computation Conference. 2018. DOI: 10.1145/3205455.3205558.
- 63.Ba, B.; Yu, Y.; Wang, R.; Gotteland, J.-B.; Gao, Y. A New Multiobjective A* Algorithm with Time Window Applied to Large Airports // Active and Passive Electronic Components. 2024. Art. 7536217. DOI: 10.1155/atp/7536217.

64. Zhang, M.; Liu, S.; Li, H. Multi-Objective Route Planning for Aircraft Taxiing Under Different Traffic Conflict Types // Journal of Aerospace Computing, Information, and Communication. 2021. Vol. 19. DOI: 10.2514/1.I010982.
65. Li, L.; Gao, J. Research on Aircraft Taxiing Path Optimization Based on Digraph Model and Dijkstra Algorithm // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. 2021. Vol. 1043. Art. 042045. DOI: 10.1088/1757-899X/1043/4/042045.
66. Shen, Y.; Zhou, P.; Zheng, Y. et al. Taxiing Route Planning for Aircraft on Airport Surface Considering Conflicts With Ground Service Vehicles // Journal of Advanced Transportation. 2025. Art. 7018472. DOI: 10.1155/atr/7018472.
67. von der Burg, M. F.; Sharpanskykh, A. Modelling and Analysis of Autonomous Airport Surface Movement Operations Based on Multi-Agent Planning // European Journal of Transport and Infrastructure Research. 2025. Vol. 25, no. 1. DOI: 10.59490/ejtir.2025.25.1.7459.
68. Liu, Y.; Hu, M.; Yin, J.; Su, J.; Qiao, P. Adaptive Airport Taxiing Rule Management: Design, Assessment, and Configuration // Transportation Research Part C: Emerging Technologies. 2024. Vol. 163. Art. 104652. DOI: 10.1016/j.trc.2024.104652.
69. Ravizza, S.; Chen, J.; Atkin, J. A. D.; Burke, E. K.; Stewart, P. Real-Time Airport Surface Movement Planning: Minimizing Aircraft Emissions // Transportation Research Part C: Emerging Technologies. 2017. DOI: 10.1016/j.trc.2017.06.001.
70. Zhang, X.; Zhong, S.; Mahadevan, S. Airport Surface Movement Prediction and Safety Assessment with Spatial-Temporal Graph Convolutional Neural Network // Transportation Research Part C: Emerging Technologies. 2022. Vol. 144. Art. 103873. DOI: 10.1016/j.trc.2022.103873.
71. ЮНЕВИЧ Н. Д., ЛИПАТОВ А. А., КОКОНЦЕВА С. Ю. ДЕМОНСТРАЦИОННЫЙ ОБРАЗЕЦ БОРТОВОЙ ОПЕРАТИВНО СОВЕТУЮЩЕЙ ЭКСПЕРТНОЙ СИСТЕМЫ ЭТАПА ПОЛЕТА "ПОСАДКА": ПЕРВАЯ ВЕРСИЯ БАЗЫ ЗНАНИЙ, РЕЗУЛЬТАТЫ ЕЕ

ИСПЫТАНИЙ НА СТЕНДЕ КБО МС-21 // ТРУДЫ ГОСНИИАС. СЕРИЯ
АВИАЦИОННЫЕ СИСТЕМЫ. 2024. № 1 (64)

72. Taylor, R. M. Situation Awareness Rating Technique (SART): The development of a tool for aircrew systems design // *Situational Awareness in Aerospace Operations (AGARD-CP-478)*. – Copenhagen, Denmark : Advisory Group for Aerospace Research and Development, 1990. – P. 3/1–3/17.].
73. Hart, S. G. Development of NASA-TLX (Task Load Index): Results of empirical and theoretical research / S. G. Hart, L. E. Staveland // *Human Mental Workload* / ed. by P. A. Hancock, N. Meshkati. – Amsterdam : North-Holland, 1988. – P. 139–183.].
74. Jian, J.-Y. Foundations for an empirically determined scale of trust in automated systems / J.-Y. Jian, A. M. Bisantz, C. G. Drury // *International Journal of Cognitive Ergonomics*. – 2000. – Vol. 4, No. 1. – P. 53–71.
75. Hart, S. G.; Staveland, L. E. Development of NASA-TLX (Task Load Index): Results of Empirical and Theoretical Research // *Human Mental Workload* / eds. P. A. Hancock, N. Meshkati. Amsterdam : North-Holland, 1988. P. 139–183.
76. Jian, J.-Y.; Bisantz, A. M.; Drury, C. G. Foundations for an Empirically Determined Scale of Trust in Automated Systems // *International Journal of Cognitive Ergonomics*. 2000. Vol. 4, no. 1. P. 53–71. DOI: 10.1207/S15327566IJCE0401_04.
77. Braarud, P. Ø.; Hildre, H. P.; Høyland, B. et al. Investigating the Validity of Subjective Workload Rating (NASA-TLX) and Subjective Situation Awareness Rating (SART) for Cognitively Complex Human–Machine Work // *International Journal of Industrial Ergonomics*. 2021. Vol. 86. Art. 103233. DOI: 10.1016/j.ergon.2021.103233.
78. Wilson, J. R.; Hooey, B. L.; Foyle, D. C.; Williams, J. L. Comparing Pilots' Taxi Performance, Situation Awareness and Workload Using Command-Guidance, Situation-Guidance and Hybrid Head-Up Display Symbolologies // *Proceedings of the Human Factors and Ergonomics Society Annual Meeting*. 2002. Vol. 46, no. 1.

79. McCann, R. S.; Hooley, B. L.; Foyle, D. C. An Evaluation of the Taxiway Navigation and Situation Awareness (T-NASA) System in High-Fidelity Simulation // SAE Technical Paper. 1998. No. 985541.
80. Foyle, D. C.; Bakowski, D. L.; McCann, R. S. et al. Flight-Deck Surface Trajectory-Based Operations (STBO) // International Journal of Aviation Psychology. 2016. Vol. 25, no. 2. P. 77–96. DOI: 10.1080/10508414.2015.1097090.
81. Eklund, R.; Osvalder, A.-L. Optimising Aircraft Taxi Speed: Design and Evaluation of New Means to Present Information on a Head-Up Display // The Journal of Navigation. 2021. Vol. 74, no. 6. P. 1305–1335. DOI: 10.1017/S0373463321000606.
82. Amar, M. J.; Hansman, R. J.; Hannon, D. J.; Vaneck, T. W.; Chaudhry, A. I. A Human Subject Evaluation of Airport Surface Situational Awareness Using Prototypical Flight Deck Electronic Taxi Chart Displays. Cambridge, MA : Massachusetts Institute of Technology, 1994. ASL-94-7.
83. McCann, R. S.; Andre, A. D.; Foyle, D. C. et al. Pilot Workload and Acceptability Using Data Comm in the Terminal Area [Электронный ресурс]. Washington, DC : NASA, 2010. NASA Technical Report. URL: <https://ntrs.nasa.gov/citations/20200004533> (дата обращения: 24.08.2026).
84. Сочнева М.А., Попов Ю.П., Шалов С.Ю. и др. Перспективное бортовое программное обеспечение для предотвращения конфликтов в зоне аэродрома. Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Сер. Приборостроение, 2025, № 4 (153), с. 121--137. [EDN: HVABRP](#)