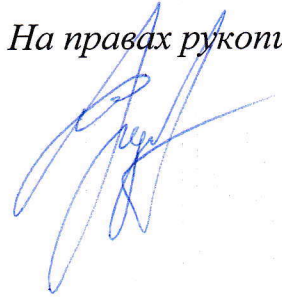


На правах рукописи



УДК: 681.518.3+629.5.05+629.7.05] (043.3)

БУДКОВ Александр Сергеевич

**РАЗРАБОТКА СИСТЕМЫ ПОДДЕРЖКИ ПРИНЯТИЯ РЕШЕНИЯ
ДЛЯ ЗАДАЧИ ЧЕТЫРЁХМЕРНОЙ НАВИГАЦИИ
В ГРАЖДАНСКОЙ АВИАЦИИ**

Специальность 2.3.1 – Системный анализ, управление и обработка информации
(технические науки)

Автореферат

диссертации на соискание учёной степени
кандидата технических наук

Москва – 2021

Работа выполнена на кафедре 703 «Системное проектирование авиаконструкций» Института № 7 «Робототехнические и интеллектуальные системы» федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет)» (МАИ).

Научный руководитель: **Неретин Евгений Сергеевич**
кандидат технических наук, доцент

Официальные оппоненты: **Косьянчук Владислав Викторович**
доктор технических наук, профессор, профессор РАН, федеральное государственное унитарное предприятие «Государственный научно-исследовательский институт авиационных систем», заместитель генерального директора

Ерохин Вячеслав Владимирович
доктор технических наук, доцент,
Иркутский филиал федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Московский государственный технический университет гражданской авиации» (МГТУ ГА), профессор кафедры авиационного радиоэлектронного оборудования

Ведущая организация: Федеральное государственное унитарное предприятие «Государственный научно-исследовательский институт гражданской авиации», 125438, г. Москва, ул. Михалковская, д. 67, к. 1

Защита диссертации состоится 14 октября 2021 г. в 14 часов 00 минут на заседании диссертационного совета 24.2.327.03 при МАИ по адресу: 125993, г. Москва, Волоколамское шоссе, д. 4.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке МАИ и на сайте МАИ https://mai.ru/events/defence/index.php?ELEMENT_ID=157534.

Отзывы на автореферат диссертации, заверенные печатью организации, просьба направлять по адресу: 125993, г. Москва, Волоколамское шоссе, д. 4.

Автореферат диссертации разослан « ____ » _____ 2021 г.

Учёный секретарь
диссертационного совета 24.2.327.03,
д. т. н



А. В. Старков

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы исследования.

Одним из направлений развития аэронавигации в соответствии с глобальным аэронавигационным планом Международной организации гражданской авиации (ИКАО) является внедрение возможности глобального управления четырёхмерными траекториями.

Для реализации этой возможности требуется модернизация не только наземной аэронавигационной инфраструктуры, но и модернизация существующих комплексов бортового оборудования. Одной из основных бортовых систем, обеспечивающих полёт воздушного судна (ВС) по заданному маршруту, является система самолётовождения. Именно она в первую очередь должна быть способна поддерживать полёты по четырёхмерным маршрутам.

Ключевой задачей четырёхмерной навигации является обеспечение возможности ВС прибыть в заданную точку маршрута в заданное время. В функционале современных вычислительных систем самолётовождения уже существует функция, которая в той или иной мере решает эту задачу. Эта функция называется RTA (от англ. Required Time of Arrival).

В процессе полёта по четырёхмерному маршруту возможна ситуация, когда ошибка по времени прибытия в заданную точку маршрута превышает допустимые значения, в этой ситуации современные системы самолётовождения лишь сформируют информационное сообщение о невозможности выдержать заданное ограничение. А при пересечении активным маршрутом запретной для полёта зоны или при возникновении вдоль сформированного маршрута сложных метеоусловий реакция системы не будет носить даже уведомительного характера.

В условиях стремления к глобальному управлению четырёхмерными маршрутами, в сторону чего в настоящее время движется мировое аэронавигационное сообщество гражданской авиации, такого функционала будет недостаточно.

Система, обеспечивающая поддержку четырёхмерных маршрутов, должна быть устойчива к внешним возмущениям, приводящим к его изменениям, таким

как: сложные метеоусловия вдоль траектории маршрута, конфликтные ситуации с другими ВС, запретные зоны. Такая система должна максимально упрощать процесс принятия решения и обеспечивать экипаж максимально полной необходимой информацией.

Но, в то же время, постоянный рост функционала бортовых систем приводит к необходимости анализа экипажем большего количества информации, что усложняет процесс принятия решения в любой чрезвычайной ситуации.

Упрощение процесса принятия решения возможно благодаря внедрению автоматизированного обмена аэронавигационной и метеорологической информацией в цифровом формате между бортовыми и наземными комплексами в соответствии с глобальным аэронавигационным планом ИКАО.

Таким образом, актуальной задачей является повышение уровня автоматизации при выполнении полётов по четырёхмерным маршрутам, в частности упрощение процесса принятия решения экипажем при возникновении нештатной ситуации.

Цель диссертационной работы – повышение уровня безопасности полётов за счёт автоматизации оперативного бортового планирования четырёхмерных маршрутов с учётом влияния ветровой обстановки, запретных зон и зон сложных метеоусловий.

Объект исследования – система самолётовождения гражданского самолёта.

Предмет исследования – алгоритмическое обеспечение функции планирования четырёхмерных маршрутов.

Задачи диссертационной работы:

– сформировать требования к системе поддержки принятия решения по результатам анализа функциональных недостатков современных систем самолётовождения в части решения задачи четырёхмерной навигации;

– разработать архитектуру системы поддержки принятия решения, учитывающую функциональность системы, а также необходимые взаимодействующие системы для решения поставленной цели;

–разработать методику, обеспечивающую поиск оптимальных четырёхмерных маршрутов для выбранных критериев оптимальности (минимум ошибки по времени прибытия, минимум расхода топлива, минимум времени полёта, минимум расхода топлива / времени полёта);

–разработать алгоритмическое обеспечение методики поиска оптимальных четырёхмерных маршрутов, учитывающее влияние ветровой обстановки, лётно-технические характеристики (ЛТХ) ВС, запретные для полёта зоны и зоны сложных метеоусловий, а также обеспечивающее поиск траектории полёта в трехмерном пространстве за один шаг вычислений;

–разработать человеко-машинный интерфейс системы поддержки принятия решения, обеспечивающий взаимодействие экипажа с системой и отображение необходимой информации для принятия решения о сформированных оптимальных маршрутах;

–разработать программное обеспечение, реализующее созданное математическое обеспечение методики поиска оптимальных четырёхмерных маршрутов;

–провести имитационное моделирование на базе разработанного программно-алгоритмического обеспечения.

Методы исследования, применённые в работе: методы обработки информации в сложных системах, методы экспериментальных исследований, численные методы математического анализа и компьютерного моделирования, методы оптимизации, методы теории графов.

Научная новизна диссертационной работы заключается в следующем:

–разработана архитектура системы поддержки принятия решения, обеспечивающая выполнение функции поиска оптимальных четырёхмерных маршрутов по выбранным критериям;

–разработана методика поиска оптимальных четырёхмерных маршрутов, учитывающая:

- влияние ветровой обстановки;
- ЛТХ ВС;

- запретные для полёта зоны и зоны сложных метеоусловий;
- поиск траектории полёта в трёхмерном пространстве за один шаг вычислений;
- разработано алгоритмическое обеспечение, реализующее функцию поиска оптимальных четырёхмерных маршрутов.

Научные результаты, выносимые на защиту:

- архитектура системы поддержки принятия решения, обеспечивающая выполнение функций системы поддержки принятия решения;
- методика поиска оптимальных четырёхмерных маршрутов, учитывающая:
 - влияния ветровой обстановки;
 - ЛТХ ВС;
 - запретные для полёта зон и зоны сложных метеоусловий;
 - поиск траектории полёта в трёхмерном пространстве за один шаг вычислений без разделения расчёта горизонтального и вертикального профилей.
- алгоритмическое обеспечение, реализующее функцию поиска оптимальных четырёхмерных маршрутов.
- результаты моделирования, подтвердившие достоверность полученных в работе теоретических выводов.

Практическая значимость полученных в диссертационной работе результатов состоит в следующем:

- сформированы требования к системе поддержки принятия решения по результатам анализа функциональных недостатков современных систем самолётовождения в части решения задачи четырёхмерной навигации;
- создано программное обеспечение, реализующее полученные научные результаты и позволяющее обеспечивать оперативное планирование маршрута в условиях сложных метеоусловий или других нештатных ситуациях при полётах по маршрутам четырёхмерной навигации;

–создан человеко-машинный интерфейс, позволяющий обеспечить взаимодействие экипажа с системой в части отображения информации о маршрутах по заданным критериям оптимальности.

Внедрение и реализация. Основные результаты диссертационной работы внедрены при выполнении научно-исследовательских работ в филиале ПАО «Корпорация «Иркут» «Центр комплексирования» и учебный процесс на кафедре 703 «Системное проектирование авиаконструкций» Института № 7 «Робототехнические и интеллектуальные системы» МАИ, что подтверждается соответствующими актами о внедрении.

Достоверность полученных результатов обеспечивается корректным применением математического аппарата и их экспериментальной проверкой.

Апробация работы. Основные положения диссертационной работы представлены и обсуждены на XXVI и XXIX Международных научно-технических конференциях «Современные технологии в задачах управления, автоматизации и обработки информации» (г. Алушта, 2017, 2020 г.), IV Всероссийской научно-технической конференции «Системы управления беспилотными космическими и атмосферными летательными аппаратами» (г. Москва, 2017 г.), 9-м, 10-м и 12-м Всероссийских межотраслевых молодежных конкурсах научно-технических работ и проектов «Молодёжь и будущее авиации и космонавтики» (г. Москва, 2017, 2018, 2020 гг.), Всероссийской межвузовской научно-технической конференции студентов и аспирантов «Микроэлектроника и информатика – 2018» (г. Москва, г. Зеленоград, 2018 г.), XLIV, XLV и XLVI Международных молодежных научных конференциях «Гагаринские чтения» (г. Москва, 2018, 2019, 2020 гг.), Международной конференции «High-tech and Innovations in Research and Manufacturing (HIRM-2019)» (г. Красноярск, 2019 г.), XII научно-практической конференции студентов и аспирантов «Актуальные проблемы развития авиационной техники и методов ее эксплуатации – 2019» (г. Иркутск, 2019 г.), 17-й и 18-й Международных конференциях «Авиация и космонавтика – 2018, 2019» (г. Москва, 2018, 2019 гг.), XXII конференции молодых ученых «Навигация и управление движением» (с международным участием) (г. Санкт-Петербург,

2020 г.), XI Международной научно-технической конференции «Проблемы совершенствования робототехнических и интеллектуальных систем летательных аппаратов» (г. Москва, 2020 г.), Международной конференции «EAI IoTaaS 2020 (6th EAI International Conference on IoT as a Service)» (КНР, г. Сиань, 2020 г.), Научных семинарах Института № 7 «Робототехнические и интеллектуальные системы» МАИ, научно-техническом совете ПАО «Корпорация «Иркут».

Публикации. Основные результаты диссертационной работы полностью отражены в 8 статьях (5 из которых – в журналах, рекомендованных Перечнем ведущих периодических изданий ВАК при Министерстве науки и высшего образования РФ), 18 трудах и тезисах докладов международных, всероссийских и межрегиональных конференций и семинаров, а также зарегистрированы в государственном Реестре программ для ЭВМ.

Структура и объём диссертационной работы. Диссертация состоит из введения, четырёх глав, заключения и списка использованных источников. Общий объём работы составляет 168 страниц, включая 63 рисунка и 11 таблиц. Список использованных источников содержит 80 наименований.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во **введении** даётся общая характеристика работы, сформулированы основная цель и вытекающие из неё задачи исследования, указаны объект, предмет и методы исследования, приведён обзор исследований по рассматриваемой тематике, отражены актуальность, научная новизна и практическая значимость диссертационной работы. Кратко излагается содержание работы по главам.

Первая глава диссертационной работы посвящена анализу функционала современных систем самолётовождения в части решения задачи четырёхмерной навигации. Рассмотрен принцип работы функции контроля прибытия в заданную точку маршрута в заданное время (RTA).

По результатам анализа принципа работы функции RTA установлено, что в ситуации, когда ошибка по времени прибытия в заданную точку маршрута

превышает допустимые значения, современные системы самолётовождения лишь сформируют информационное сообщение о невозможности выдержать заданное ограничение. При этом, в случае возникновения вдоль сформированного маршрута сложных метеоусловий, запретных зон или конфликтных ситуаций с другими участниками воздушного движения, реакция системы не носит даже уведомительного характера.

В связи с этим сделан вывод о недостаточной функциональности существующих систем самолётовождения в условиях глобального управления четырёхмерными маршрутами, в сторону чего в настоящее время движется мировое аэронавигационное сообщество гражданской авиации.

Для решения установленной проблемы в дополнение к существующему функционалу бортовых систем самолётовождения необходимо обеспечить:

- решение задачи многокритериального поиска оптимальных четырёхмерных маршрутов по выбранным критериям оптимальности для возможности выбора стратегии полёта при возникновении нештатной ситуации;
- мониторинг доступности полёта по активному плану полёта и уведомление экипажа в случае его недоступности для дальнейшего полёта, вызванной пересечением зон сложных метеоусловий или запретных зон;
- отображение информации об оптимальных четырёхмерных маршрутах и статусе полёта по активному маршруту.

Во второй главе диссертационной работы в результате проведённого анализа рассматриваемой задачи определены требования к функционалу системы поддержки принятия решения, а на их основе предложена архитектура системы (рис. 1). Для каждой функции системы разработано специализированное математическое обеспечение.

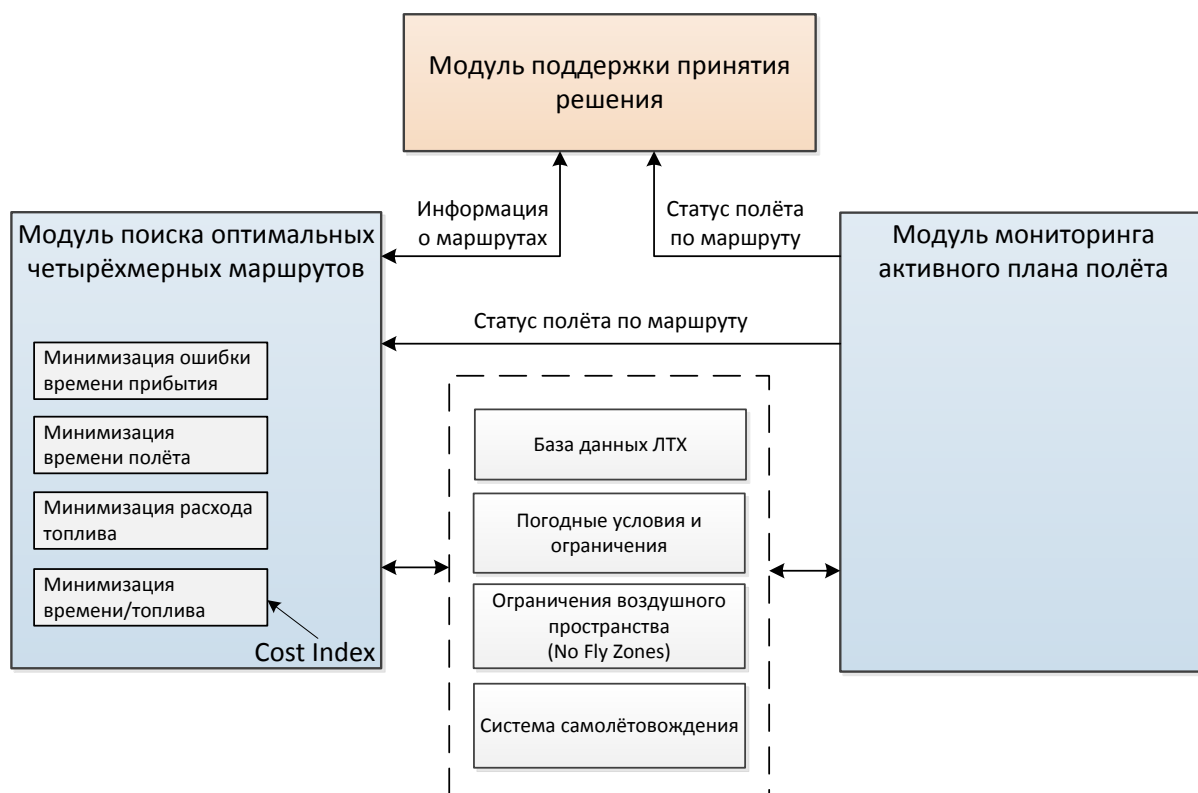


Рис. 1. Архитектура системы поддержки принятия решения

Модуль мониторинга активного плана полёта осуществляет контроль возможности движения по активному плану полёта в процессе его выполнения с учётом информации о погодных условиях и ограничениях воздушного пространства (рис. 2), а также вычисляет ошибку во времени прибытия по отношению к заданному и формирует статус выполнения задачи четырёхмерной навигации.

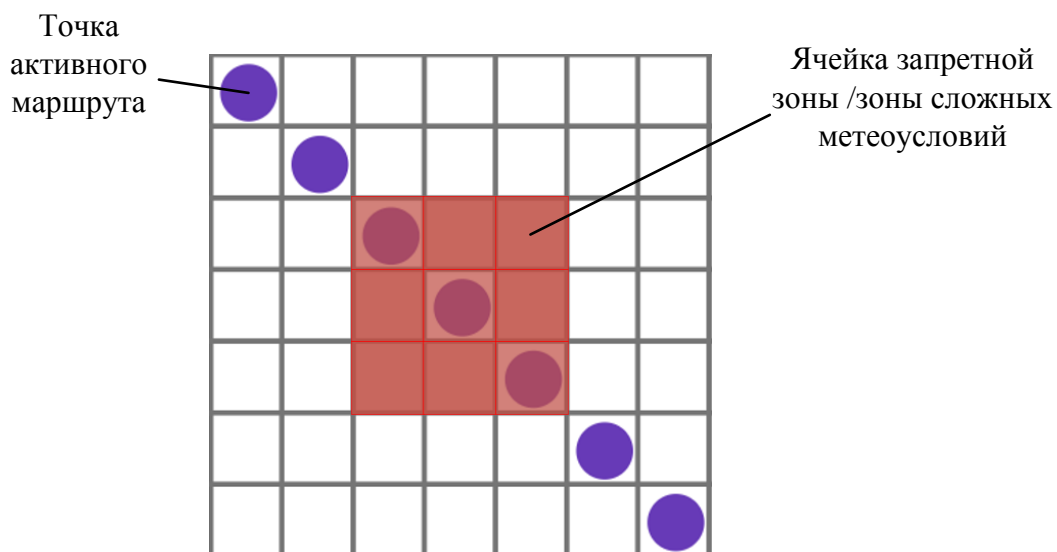


Рис. 2. Пример пересечения запретной зоны активным маршрутом

Модуль поиска оптимальных четырёхмерных маршрутов осуществляет поиск множества допустимых четырёхмерных маршрутов в диапазоне заданных скоростей и высот полёта с учётом информации о ветровой обстановке, зон сложных метеоусловий и запретных зон, а также динамических характеристик ВС. Далее из множества допустимых траекторий производится отбор решений по следующим критериям:

- 1) минимизация ошибки по времени прибытия;
- 2) минимизация расхода топлива;
- 3) минимизация времени полёта;
- 4) минимизация расхода топлива и времени полёта;

Для поиска решения по последнему критерию используется параметр индекса стоимости (от англ. Cost Index (CI). Он характеризует отношение стоимости единицы времени к стоимости единицы топлива.

Модуль поддержки принятия решения в зависимости от возникшей ситуации обеспечивает выдачу информации о возможных стратегиях полёта посредством взаимодействия с человеко-машинным интерфейсом системы самолётовождения. Экипаж, в свою очередь, получает возможность провести детальный анализ автоматически рассчитанной информации о каждой из доступных стратегий и для дальнейшего принятия решения. При этом выбор одного из предлагаемых системой решений не является обязательным.

Для решения задачи поиска оптимальных четырёхмерных маршрутов разработаны требования к методике, обеспечивающей её решение. Для выбранных критериев оптимизации определён вид целевой функции:

$$F(\bar{x}) = C_f m_f + C_t T = C_f (m_f + CI * T),$$

$$CI = \frac{C_t}{C_f},$$

где C_f – стоимость единицы затрачиваемого на полёт топлива;

C_t – стоимость единицы затрачиваемого на полёт времени;

m_f – масса затрачиваемого на полёт топлива, кг;

T – общее количество затрачиваемого на полёт времени, с;

CI – индекс стоимости, соотношение стоимости единицы времени на эксплуатацию ВС к стоимости единицы топлива.

Векторный аргумент целевой функции имеет следующий вид:

$$\bar{x} = (m_f, T, m, M, CI, \bar{W}, B, L, H)^T,$$

где: m – масса ВС, M – скорость полёта по маршруту в числе Маха, \bar{W} – вектор скорости ветра, B, L, H – координаты точек маршрута в географической системе координат.

В результате анализа методов оптимизации, применяемых к задаче поиска оптимального маршрута, с учетом разработанных требований к методике, сделан вывод о необходимости использования алгоритма поиска по первому наилучшему совпадению на графе A^* (A-star).

Для возможности анализа ветровой обстановки при решении задачи планирования траектории в среде с препятствиями на основе графов трёхмерное пространство декомпозировано на ячейки одинакового размера, но с разным шагом в горизонтальной и вертикальной плоскостях. Также, базовый алгоритм A-star адаптирован для его использования в трёхмерном пространстве. Модифицированная целевая функция стоимости для алгоритма A-star имеет вид:

$$F = (C_f m_f + C_t T) + (C_f m_{fH} + C_t T_H),$$

где: m_{fH} – эвристическая оценка массы затрачиваемого топлива, кг;

T_H – эвристическая оценка затрачиваемого времени, с.

Блок-схема разработанного алгоритма методики поиска оптимальных четырёхмерных маршрутов, удовлетворяющая определённым к ней требованиям, представлена на рис. 3.

При расчёте множества существующих четырёхмерных маршрутов с целью повышения точности параметров рассчитываемого маршрута учитывается маневренность воздушного судна при пролёте поворотных пунктов маршрута (рис. 4). Также, для учёта особенностей ЛТХ ВС, при расчёте участков набора высоты и снижения выполняется проверка пересечения запретных ячеек

пространства с целью исключения маршрута из решения при наличии пересечения запретных ячеек (рис. 5).

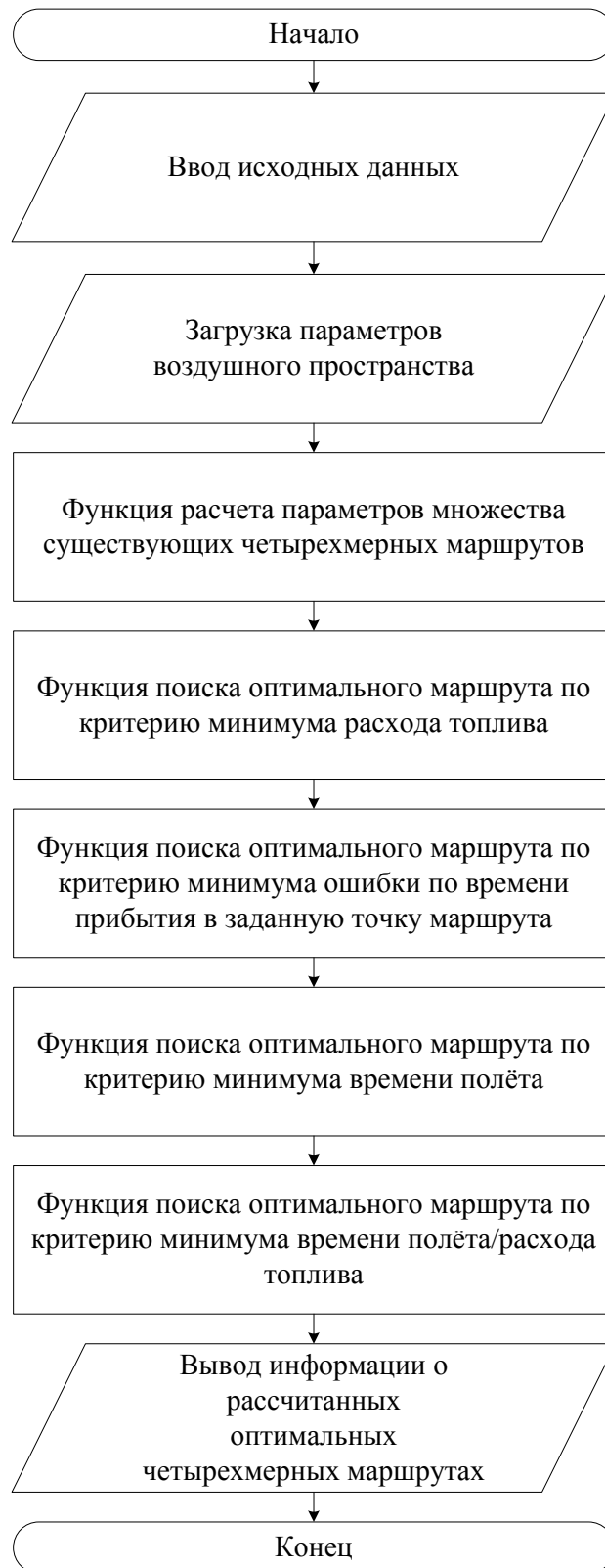


Рис. 3. Блок-схема разработанного алгоритма методики поиска оптимальных четырёхмерных маршрутов

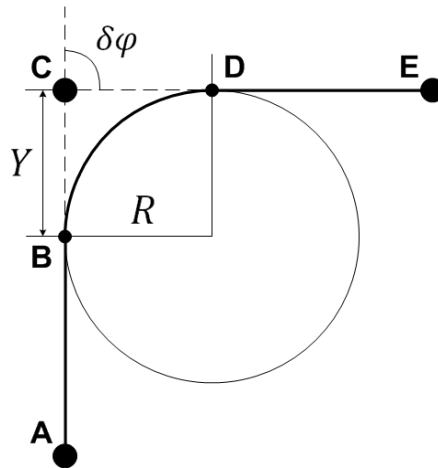


Рис. 4. Фрагмент маршрута с дугой перехода между участками

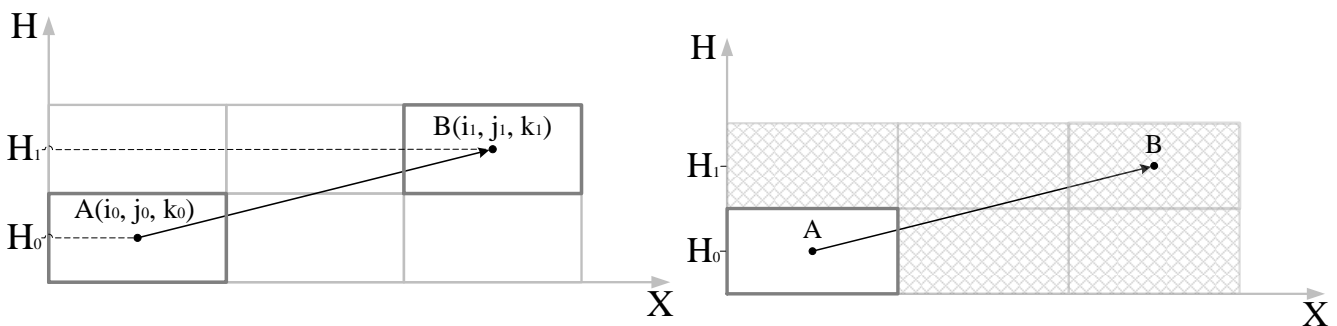


Рис. 5. Пример участка набора высоты в вертикальной плоскости и ячеек пространства, требующих проверки на отсутствие запрета

В третьей главе диссертации разработано программно-алгоритмическое обеспечение, реализующее функции системы поддержки принятия решения:

- алгоритмическое обеспечение модуля поиска оптимальных четырехмерных маршрутов;

- алгоритмическое обеспечение модуля мониторинга активного плана полёта;

- алгоритмическое обеспечение модуля поддержки принятия решения;

- программное обеспечение модуля поиска оптимальных четырёхмерных маршрутов (ПО «Имитатор модуля поиска оптимального четырёхмерного маршрута системы поддержки принятия решения»);

- программное обеспечение модуля мониторинга активного плана полёта и модуля поддержки принятия решения (ПО «Имитатор модуля мониторинга активного плана полёта и модуля поддержки принятия решения»).

Разработанное ПО «Имитатор модуля поиска оптимального четырёхмерного маршрута системы поддержки принятия решения» реализует созданное алгоритмическое обеспечение модуля поиска оптимальных четырёхмерных маршрутов и позволяет моделировать работу модуля. ПО разработано на языке программирования *Java Script* и зарегистрировано в Реестре программ для ЭВМ.

Пример главного окна и окна вывода информации о параметрах оптимальных четырёхмерных маршрутов ПО «Имитатор модуля поиска оптимального четырёхмерного маршрута системы поддержки принятия решения» представлены на рис. 6.

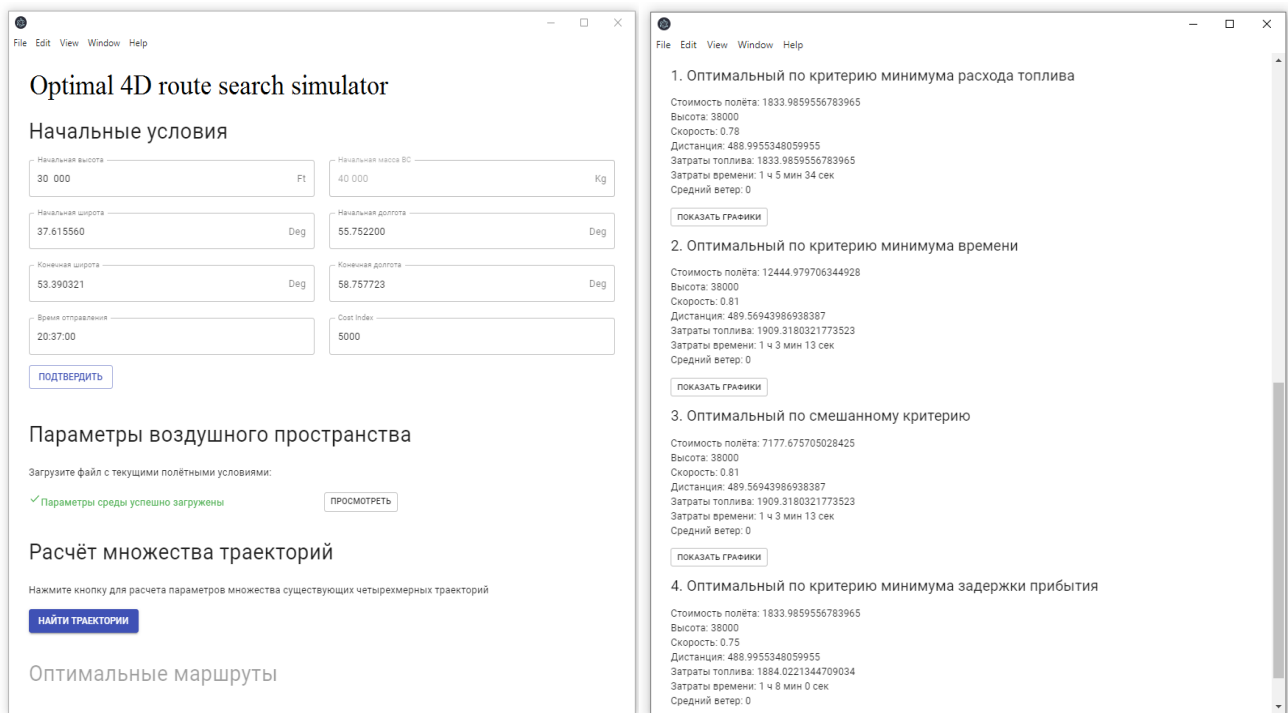


Рис. 6. ПО «Имитатор модуля поиска оптимального четырёхмерного маршрута системы поддержки принятия решения»

ПО «Имитатор модуля мониторинга активного плана полёта и модуля поддержки принятия решения» реализует созданное алгоритмическое обеспечение модуля мониторинга активного плана полёта и модуля поддержки принятия решения и позволяет моделировать его работу. ПО разработано в среде математического моделирования и программирования *ANSYS SCADE*.

Пример главного окна и окна отображения информации о параметрах оптимального по критерию минимума расхода топлива четырёхмерного

маршрута ПО «Имитатор модуля мониторинга активного плана полёта и модуля поддержки принятия решения» представлены на рис. 7.

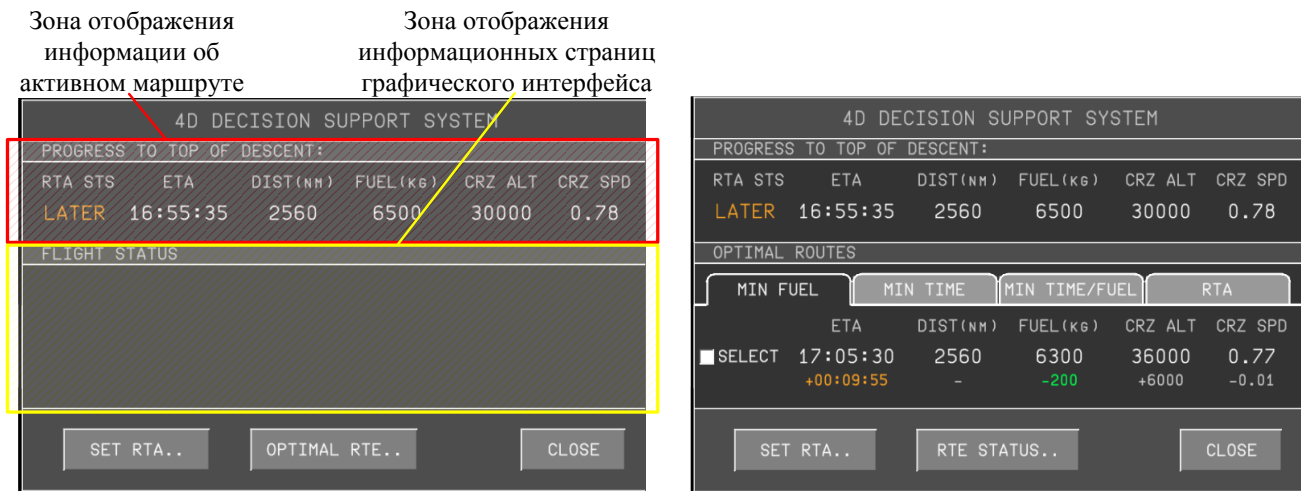


Рис. 7. ПО «Имитатор модуля мониторинга активного плана полёта и модуля поддержки принятия решения»

В четвёртой главе диссертации представлены:

- результаты оценки эффективности используемых критериев оптимизации;
- результаты оценки эффективности анализа трехмерного пространства за один шаг вычислений при решении задачи поиска оптимального четырёхмерного маршрута;
- результаты оценки эффективности использования алгоритма A-star с точки зрения времени вычислений на маршрутах различной дальности.

Моделирование было проведено в три этапа.

На первом этапе моделирования для оценки эффективности используемых критериев оптимизации было проведено более 500 тестов по расчёту оптимальных четырёхмерных маршрутов, результаты которых были сравнены с результатами решения аналогичной задачи, но по критерию минимума длины маршрута. Для проведения экспериментов производился поиск маршрутов только в горизонтальной плоскости, соответствующей заданной крейсерской высоте полёта. Вдоль ортодромии между начальной и конечной точками маршрута несимметрично расположена запретная для полёта зона квадратной формы. Для демонстрации влияния ветровой обстановки на результаты расчёта

по выбранным критериям проведены расчёты параметров оптимальных маршрутов с и без влияния ветровой обстановки.

Результаты моделирования показали, что при поиске маршрута, оптимального по критерию минимума длины полёта, ветровая обстановка не влияет на горизонтальный профиль полёта и такой маршрут далеко не всегда будет оптимальным по критериям, используемым в настоящей диссертационной работе (рис. 8). И даже не смотря на то, что маршрут, который оптимален по критерию, например, минимума расхода топлива, имеет большую длину, показатель расхода топлива и времени полёта у него меньше, чем у маршрута, оптимального по критерию минимума длины.

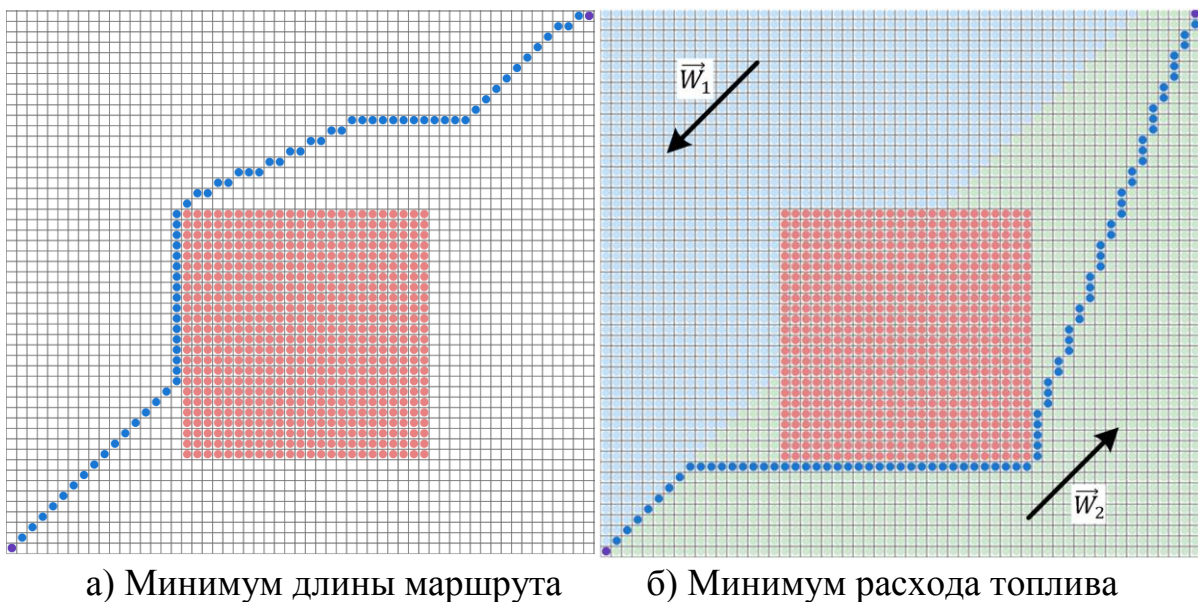


Рис. 8. Графики горизонтальных профилей рассчитанных маршрутов в плоских координатах проекции Гаусса-Крюгера в виде маршрутной сетки и с влиянием ветровой обстановки

На втором этапе моделирования для оценки эффективности анализа трёхмерного пространства за один шаг вычислений при решении задачи поиска оптимальных четырёхмерных маршрутов проведено более 500 тестов по расчёту оптимальных четырёхмерных маршрутов двумя разными способами. Первый способ заключался в выполнении расчёта трёхмерной траектории маршрута с разделением на два шага. На первом шаге выполнялся поиск только горизонтальной траектории, а затем, вторым шагом, на основе известной горизонтальной траектории выполнялся расчёт вертикального профиля. Второй

способ заключался в выполнении расчёта трехмерной траектории за один шаг вычислений без разделения на горизонтальный и вертикальный профили. В результате попарно сравнивались рассчитанные двумя разными способами маршруты для каждого выбранного в настоящей диссертационной работе критерия оптимальности.

Результаты моделирования показали, что форма запретной зоны или зоны сложных метеоусловий существенно влияет на результат расчёта оптимальных четырёхмерных маршрутов в зависимости от метода расчёта трёхмерной траектории. Метод поиска трёхмерной траектории маршрута с разделением на два шага может приводить к ошибочному решению задачи поиска оптимальных маршрутов по заданным в настоящей работе критериям.

На третьем этапе моделирования для оценки эффективности использования алгоритма A-star с точки зрения времени вычислений на маршрутах различной дальности проведено более 500 тестов для различных начальных условий.

В качестве начальных условий изменялось расстояние между начальной и конечной точками маршрута, количество и размер запретных зон или зон сложных метеоусловий, а также диапазон анализируемых для полёта высот.

Результаты экспериментов подтвердили адекватность времени вычислений, а также подтвердили соответствие требованиям нормативной документации для маршрутов до 2000 м. миль.

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ ДИССЕРТАЦИОННОЙ РАБОТЫ

В диссертационной работе получены следующие основные выводы и результаты.

1. Поставлена и решена задача разработки системы поддержки принятия решения, обеспечивающей решение проблем, возникающих при полётах по четырёхмерным маршрутам.

2. Разработана архитектура системы поддержки принятия решения, которая содержит все необходимые элементы и связи с внешними системами для обеспечения возложенных на неё функций. Система состоит из трех модулей,

а также взаимодействует с базой данных ЛТХ, системой самолётовождения, источником метеоданных и данных о запретных зонах.

3. Разработана методика поиска оптимальных четырёхмерных маршрутов, удовлетворяющая требованиям, определённым к ней в результате анализа выявленных проблем при полётах по четырёхмерным маршрутам, а именно:

- обеспечивать поиск решений по четырём критериям оптимизации;
- выполнять расчёт трёхмерной траектории за один шаг вычислений без разделения горизонтальной и вертикальной плоскостей;
- учитывать влияние ветровой обстановки, а также наличие зон сложных метеоусловий или запретных зон;
- ЛТХ ВС.

4. Разработаны правила формирования признака недоступности движения по активному маршруту, определены условия информирования экипажа о возникновении нештатной ситуации при полёте по четырёхмерному маршруту для функций мониторинга активного плана полёта и поддержки принятия решения соответственно.

5. Разработаны алгоритмы, реализующие основные шаги методики поиска оптимальных четырёхмерных маршрутов, правила мониторинга статуса выполнения четырёхмерного маршрута, а также формирования признаков возникновения проблем в процессе выполнения четырёхмерного маршрута.

6. Разработанное математическое обеспечение реализовано в виде программного обеспечения на языке Java Script, имеет модульную архитектуру и включает в себя: модуль поиска оптимальных четырёхмерных маршрутов, модуль мониторинга активного плана полёта и модуль поддержки принятия решения. ПО *«Имитатор модуля поиска оптимального четырёхмерного маршрута системы поддержки принятия решения»* зарегистрировано в Реестре программ для ЭВМ (свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ №2021616587 от 23.04.2021).

7. Проведено три этапа моделирования, которые полностью подтвердили работоспособность и адекватность разработанного программно-

алгоритмического обеспечения для расчёта оптимальных четырёхмерных маршрутов.

Результаты моделирования численно подтвердили эффективность:

- применения выбранных критериев оптимизации для решения задачи поиска оптимальных четырёхмерных маршрутов;
- анализа трёхмерного пространства за один шаг вычислений;
- применения алгоритма A-star с точки зрения адекватности времени вычислений на маршрутах различной дальности.

8. Результаты диссертационной работы внедрены в научно-исследовательскую и опытно-конструкторскую работу «Разработка бортового радиоэлектронного оборудования для семейства магистральных самолетов МС-21 (МС-21-200 и МС-21-300, с двигателями PW-1400 и ПД-14)» филиала ПАО «Корпорация «Иркут» «Центр комплексирования» и учебный процесс кафедры 703 «Системное проектирование авиакомплексов» Института № 7 «Робототехнические и интеллектуальные системы» МАИ, что подтверждается соответствующими актами о внедрении.

ПУБЛИКАЦИИ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

В рецензируемых научных журналах и изданиях, входящих в Перечень Высшей аттестационной комиссии Российской Федерации

1. Поляков В. Б. Архитектура перспективных комплексов управления бортовым оборудованием [Электронный ресурс] / Неретин Е. С., Будков А. С. [и др.] // Электрон. журн. «Труды МАИ». – М.: МАИ, 2018. – № 100. – Режим доступа: <http://trudymai.ru/published.php?ID=93459>, свободный.

2. Лунев Е. М. Разработка и исследование модели траекторного управления самолётом при полёте по маршрутам четырёхмерной зональной навигации [Электронный ресурс] / Неретин Е. С., Будков А. С. // Электрон. журн. «Труды МАИ». – М.: МАИ, 2017. – №95. Режим доступа: <http://trudymai.ru/published.php?ID=63034>, свободный.

3. Лунев Е. М. Проведение тестирования разработанных алгоритмов траекторного управления на стенде поискового моделирования [Электронный

ресурс] / Неретин Е. С., Будков А. С. // Электрон. журн. «Труды МАИ». – М.: МАИ, 2018. – №98. Режим доступа: <http://trudymai.ru/published.php?ID=90385>, свободный.

4. Будков А. С. Анализ проблем, возникающих при выполнении маршрутов четырёхмерной навигации в гражданской авиации, и определение основных путей решения [Электронный ресурс] // Международный информационно-аналитический журнал «Crede Experto: транспорт, общество, образование, язык». – 2021. – № 1 (28). – Режим доступа: http://ce.if-mstuca.ru/wp-content/uploads/2021/1/Budkov_CE_2021-1.pdf, свободный.

5. Будков А. С. Разработка системы поддержки принятия решения для задачи четырёхмерной навигации [Текст] // Навигация и управление летательными аппаратами. – М.: МИЭА, 2021. – № 32. – с. 2-21.

*В научных журналах и изданиях,
включенных в международные системы цитирования SCOPUS, Web of Science*

6. Lunev E. M., Neretin E. S., Budkov A. S., Ivanov A. S. Application of distributed integrated modular avionics concept for perspective aircraft equipment control systems – Journal of Physics: Conference Series, vol. 1353, 6 May 2019, Krasnoyarsk, Russian Federation. URL: <https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1742-6596/1353/1/012007/pdf>.

7. Neretin E. S., Budkov A. S., Ivanov A. S., Ponomarev K. A. Research on modernization directions of the human-machine interface of flight management system for future civil aircrafts – Journal of Physics: Conference Series, vol. 1353, 6 May 2019, Krasnoyarsk, Russian Federation. URL: <https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1742-6596/1353/1/012007/pdf>.

8. Neretin Evgeny S., Budkov Alexander S., Ivanov Andrey S. Optimal Four-Dimensional Route Searching Methodology for Civil Aircrafts – Lecture Notes of the Institute for Computer Sciences, Social Informatics and Telecommunications Engineering, vol 346. Springer, Cham. – 2021. – P. 462-473. URL: https://doi.org/10.1007/978-3-030-67514-1_37.

В других изданиях

9. Будков А. С. Система поддержки принятия решения для решения задачи 4-D навигации [Текст] // Гагаринские чтения – 2019: Сборник тезисов докладов: М.; МАИ, 2019. – с. 665.

10. Неретин Е. С., Будков А. С. Функциональное программно-алгоритмическое обеспечение системы поддержки принятия решения для задачи 4-D навигации [Текст] // XXII конференция молодых ученых «Навигация и управление движением» (с международным участием): Материалы XXII конференции молодых ученых «Навигация и управление движением». – СПб.:ГНЦ РФ АО «Концерн «ЦНИИ «Электроприбор», 2020. – с. 348-350.

11. Будков А. С. Методика поиска оптимального четырехмерного маршрута для решения задачи 4-D навигации [Текст] // Гагаринские чтения – 2020: Сборник тезисов докладов: М.; МАИ, 2020. – с. 818-819.

12. Неретин Е. С., Будков А. С. Определение путей решения проблем, возникающих при выполнении маршрутов четырёхмерной навигации в гражданской авиации [Текст] // Сборник докладов XI Международной научно-технической конференции «Проблемы совершенствования робототехнических и интеллектуальных систем летательных аппаратов». – М.: Эдитус, 2021 – с. 76-81.

Объекты интеллектуальной собственности

13. Будков А. С., Неретин Е. С. Имитатор модуля поиска оптимального четырёхмерного маршрута системы поддержки принятия решения. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2021616587. Заявка № 2021614033 от 19.03.2021. Зарегистрировано в Реестре программ для ЭВМ 23.04.2021.