



На правах рукописи

КАЛЮЖНЫЙ ЮРИЙ СЕРГЕЕВИЧ

**МЕТОДИКА И АЛГОРИТМ ОПЕРАТИВНОЙ РЕКОНФИГУРАЦИИ
МАРШРУТА ПОЛЕТА ВОЗДУШНЫХ СУДОВ ГРАЖДАНСКОЙ
АВИАЦИИ**

Специальность 2.9.6. «Аэронавигация и эксплуатация авиационной техники»

автореферат диссертации
на соискание ученой степени кандидата технических наук

Москва 2025

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Московский государственный технический университет гражданской авиации» (МГТУ ГА) на кафедре «Аэродинамика, конструкция и прочность летательных аппаратов».

Научный руководитель:

Доктор технических наук, профессор заведующий кафедрой «Аэродинамика, конструкция и прочность летательных аппаратов» МГТУ ГА
Киселев Михаил Анатольевич

Официальные оппоненты:

Доктор технических наук начальник отдела 901 публичного акционерного общества «Московский институт электромеханики и автоматики»
Гребенкин Александр Витальевич

Кандидат технических наук, доцент начальник кафедры авиационных комплексов и конструкции летательных аппаратов военного учебно-научного центра «Военно-воздушная академия имени профессора Н.Е. Жуковского и Ю.А.Гагарина»
Верещиков Дмитрий Викторович

Ведущая организация:

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Санкт-Петербургский государственный университет гражданской авиации» (ФГБОУ ВО СПбГУ ГА)

Защита состоится «01» Октября 2025 года в 14:00 часов на заседании диссертационного совета 42.2.001.01 на базе ФГБОУ ВО МГТУ ГА по адресу: 125993, г. Москва, Кронштадтский бульвар, 20.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Московский государственный технический университет гражданской авиации» (МГТУ ГА) и на сайте www.mstuca.ru.

Автореферат разослан «___» _____ 2025 г.

Ученый секретарь диссертационного совета 42.2.001.01
доктор технических наук, профессор

В.М. Самойленко

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы исследований.

Анализ статистики авиационных происшествий (АП), произошедших в период с 2011 по 2020 годы в Российской Федерации, показал, что значительный процент АП, как при осуществлении коммерческих перевозок (для самолетов катастроф/ аварий, соответственно: 31.5%/ 27.9% и для вертолетов: 60.9%/ 29.9%), так и при совершении полетов авиации общего назначения (АОН) (для самолетов катастроф/ аварий, соответственно: 60.4%/ 37.2% и для вертолетов: 49.3%/ 41.1%) связан со следующими группами событий (рисунки 1-4):

- столкновение с препятствиями при полете на малой высоте (LALT);
- потеря управления в полете (LOC-I);
- столкновение с землей в управляемом полете (CFIT);
- попадание в приборные метеоусловия, к которым экипаж не допущен (UIMC);
- попадание в зону сильной грозовой деятельности (WSTRW).

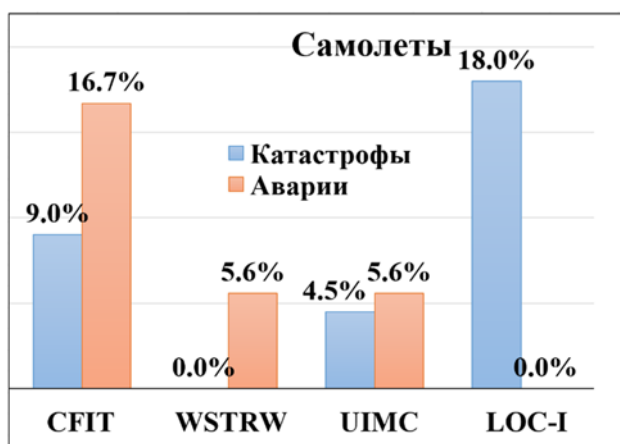


Рисунок 1 – Типы событий, определившие авиационные происшествия с самолетами коммерческой авиации в 2011 - 2020 годах

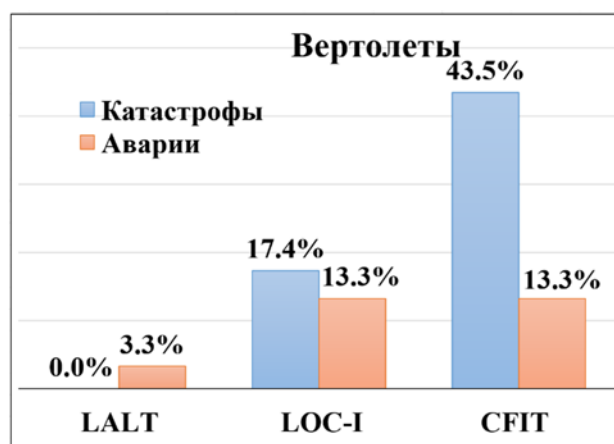


Рисунок 2 – Типы событий, определившие авиационные происшествия с вертолетами коммерческой авиации в 2011 - 2020 годах

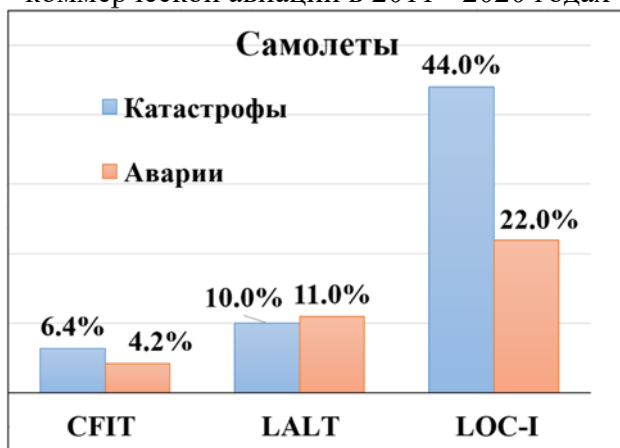


Рисунок 3 – Типы событий, определившие авиационные происшествия с самолетами АОН в 2011 - 2020 годах

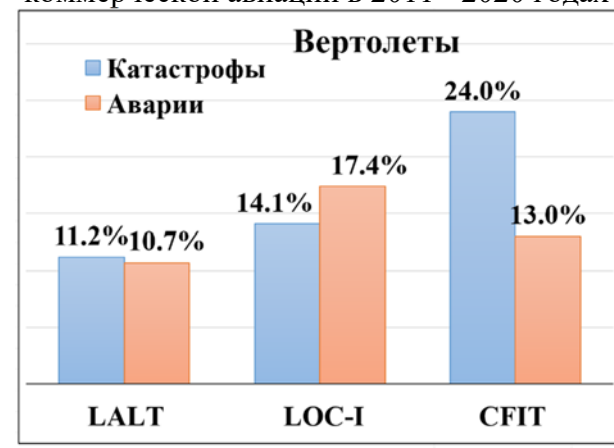


Рисунок 4 – Типы событий, определившие авиационные происшествия с вертолетами АОН в 2011 - 2020 годах

Основными факторами, приведшими к указанному АП, явились недостаточная ситуационная осведомленность, ошибки экипажа в условиях значительной психофизиологической нагрузки и ограниченного времени для принятия решений по оперативной корректировке

маршрута полета из-за неожиданного появления естественных или искусственных препятствий на исходном маршруте полета. Современные комплексы бортового оборудования (КБО) позволяют обнаружить препятствия. По отдельным типам препятствий, например, грозовой фронт, даже оценить их опасность. Но решение о способе перестроения маршрута полета с целью облета препятствий пилот должен принять самостоятельно, после чего перейти на ручное управление или скорректировать заданные ранее точки маршрута для его последующей реализации системой самолетовождения (FMS), согласовав изменения в плане полета с диспетчером управления воздушным движением. Сформировать новую траекторию, безопасную с точки зрения облета вновь выявленных препятствий, учитывая возможности и ограничения воздушного судна (ВС) в условиях значительной психофизиологической нагрузки и ограниченного времени, является трудной задачей. Автоматизированные средства корректировки маршрута для облета препятствий на сегодняшний день на борту ВС отсутствуют.

Таким образом, налицо **противоречие практического характера** между отсутствием на борту ВС функционального дополнения системы самолетовождения, позволяющего скорректировать маршрут полета с учетом выявленных в процессе полета препятствий (наземных и воздушных) и необходимостью повышения безопасности полета, обусловленной значительным количеством АП, связанных со столкновением в полете с естественными или искусственными препятствиями, попаданием в сложные метеоусловия.

Противоречие научного характера заключается в необходимости уменьшения времени принятия и реализации решения по перестроению маршрута полета с учетом выявленных в процессе полета препятствий путем автоматизации процесса синтеза нового безопасного маршрута полета, с одной стороны, и отсутствии методики и алгоритма оперативной реконфигурации маршрута полета, обеспечивающих перестроение маршрута полета с учетом вновь выявленных препятствий (наземных и воздушных), а также характеристик ВС, с другой стороны.

В диссертации для разрешения указанных противоречий решается **актуальная научная задача** разработки методики и алгоритма оперативной реконфигурации маршрута полета, обеспечивающих перестроение маршрута полета с учетом вновь выявленных препятствий (наземных и воздушных) и характеристик ВС.

Степень разработанности темы исследования.

Проблеме, связанной с построением маршрута движения посвящено достаточно много научных работ. Данные работы делятся на несколько направлений:

- перестроение маршрута полета ВС;
- построение маршрута полета беспилотного ВС (БВС);
- построение маршрутов движения автономных транспортных средств и самоходных тележек;
- реконфигурация компонентов сетевой инфраструктуры.

Известные задачи по перестроению маршрута полета ВС можно разделить на две группы. К первой группе относятся задачи по преодолению зон противовоздушной обороны (ПВО). Ко второй группе относятся задачи по предотвращению столкновения ВС с земной поверхностью.

Построение маршрута полета с целью преодоления зон ПВО рассматривается в работах Арапова О.Л., Зуева Ю.С., Ананьева А.В., Рыбалко А.Г., Петренко С.П., Ильинова Е.В., Васильченко А. С., Донцова А.А., Иконникова В.Н., Сухомлинова Д.В., Иванова М. С., Афолина И. Е., Макаренко С. И. Решение данного типа задач предполагает, как правило, минимизацию вероятности поражения ВС при преодолении зон ПВО. Такой подход допускает построение маршрута полета с «заходом» в зону ПВО т.е. в «препятствие», что не позволяет использовать результаты указанных выше работ для построения маршрута облета препятствий для гражданских ВС.

Задачи по перестроению траектории полета с целью увода от столкновения с препятствием

ВС рассматриваются в работах Акимова А.Н., Воробьева В.В., Суполка А.А., Евдокимчик Е. А., Мозоляко Е.В., Демченко О.Ф., Долженкова Н.Н., Матвеева А.И., Sorokowski P., Suplisson A.W. Формируемая в этих работах траектория предотвращает столкновение с препятствием, но не решает задачу дальнейшего продолжения полета с возвратом на исходный или на новый маршрут полета.

Построение маршрутов полета БВС рассматривается в работах De Berg M., Cheong O., Van Kreveld M., Overmars M., Cao L, Wang L, Liu Y, Yan S. В основе методов, используемых указанными авторами, лежат вероятностные подходы к построению маршрута движения, а также применение нейросетевых модулей для расчета траекторий движения. Данные решения неприменимы в гражданской авиации, что связано со сложностью верификации и доказательства надежности указанных алгоритмов во всех возможных сценариях, что требуется в обязательном порядке для квалификации оборудования и сертификации ВС в целом.

Проблеме, связанной с перестроением маршрута движения робототехнических устройств, предназначенных для движения по земле типа роботов-пылесосов, автономных складских тележек и т.п. посвящены работы Казакова К.А., Семенова В.А., Shao M-, Yan R-, Wu J, Lee J-, Han C-, Shin D-, Shin K, Alshammrei S, Boubaker S, Kolsi L, Mohsen AM, Sharkas MA, Zaghlol MS. В данных работах предлагаются методы, которые или неприменимы в трехмерном пространстве или не учитывают ограничения на управляющие параметры, которые характерны для ВС и не характерны для наземной техники.

Проблематикой построения маршрута, применительно к проектированию и реконфигурации сетей, занимались Макаренко С. И., Афанасьев О. В., Баранов И. А., Самофалов Д. В., Кузюрин Н. Н., Фомин С. А., Егунов М. М. Шувалов В. П., Цветков К. Ю., Михайлов Р. Л., Квасов М. Н., Перепелкин Д. А. Результаты работ указанных выше авторов не могут быть использованы для построения маршрута полета ВС, поскольку не учитывают отмеченные ранее важные особенности ВС, такие, например, как ограничения на управляющие параметры.

Таким образом, можно утверждать, что на сегодняшний день, несмотря на значительные успехи, достигнутые при решении задач преодоления зон ПВО, предотвращения столкновения ВС с препятствием, построения маршрута полета БВС, маршрутов движения автономных транспортных средств и самоходных тележек, реконфигурации компонентов сетевой инфраструктуры нерешенной остается задача разработки методики и алгоритма оперативной реконфигурации маршрута полета, обеспечивающих перестроение маршрута полета с учетом вновь выявленных препятствий (наземных и воздушных), характеристик ВС для реализации в составе КБО ВС.

Целью исследования является повышение уровня безопасности полетов (БП) за счет разработки методики, алгоритма, бортовой версии алгоритма (функции), обеспечивающих возможности оперативной реконфигурации маршрута полета с целью облета препятствий, запретных зон полета, областей с опасными метеорологическими явлениями.

Объектом исследования являются КБО ВС гражданской авиации.

Предметом исследования является управление траекторией полета ВС.

Методы и методология исследования. Теоретические и практические решения поставленных задач выполняются с применением методов математического моделирования динамики полета ВС.

Научная новизна работы состоит в том, что в ней впервые предложена методика оперативной реконфигурации маршрута полета, обеспечивающая, в отличие от существующих, следующие возможности:

- непрерывный анализ безопасности реализуемого маршрута полета с учетом поступающей в процессе полета информации о наземных препятствиях, запретных зонах полета, областей с опасными метеорологическими явлениями;

- оперативной реконфигурации маршрута полета при возникновении угрозы безопасности полета с учетом характеристик ВС.

Практическая значимость работы.

Разработан бортовой алгоритм оперативной реконфигурации маршрута полета, который, реализуя возможности предложенной методики оперативной реконфигурации маршрута полета, обеспечивает:

- непрерывный анализ безопасности реализуемого маршрута полета с учетом поступающей в процессе полета информации о наземных препятствиях, запретных зонах полета, областей с опасными метеорологическими явлениями;
- оперативную реконфигурацию маршрута полета при возникновении угрозы безопасности полета с учетом возможностей ВС по реализации нового маршрута с выдерживанием ограничений на управляющие функции ВС (нормальную скоростную перегрузку, скоростной угол крена и темп их изменения) и допускает реализацию в виде функции на современных КБО, построенных по принципам интегрированной модульной авионики и «стеклянной кабины», способствуя тем самым устранению причин значительного числа авиационных происшествий и обеспечению безопасности при эксплуатации авиационной техники.

Достоверность научных результатов подтверждается полнотой и результатами тестирования методики и алгоритма оперативной реконфигурации маршрута полета в сценариях с набором препятствий различной конфигурации, наземных и воздушных, в горизонтальной и вертикальной плоскостях (ГП и ВП). Тестирование показало, что относительная погрешность при расчетах длины траектории облета препятствий не превысила 2%, а относительная погрешность в расчетах времени облета препятствий не превысила 4%, что говорит о работоспособности разработанной методики и алгоритма оперативной реконфигурации маршрута полета и подтверждает корректность применяемой модели динамики полета.

Положения, выносимые на защиту:

1. Методика оперативной реконфигурации маршрута полета.
2. Алгоритм оперативной реконфигурации маршрута полета.
3. Бортовой алгоритм оперативной реконфигурации маршрута полета.

Апробация работы и публикации.

Результаты диссертационной работы докладывались и обсуждались на 5 международных и всероссийских конференциях в период с 2023-2025 гг. и на научном семинаре С.М. Белоцерковского в 2025 г.

По материалам диссертационного исследования опубликованы 7 научных работ, в том числе:

- 3 научные статьи в рецензируемых научных изданиях, рекомендованных ВАК для публикации научных результатов диссертаций на соискание ученых степеней кандидата и доктора наук, перечень которых утвержден Приказом Минобрнауки России от 31.05.2023 № 534;
- 4 тезисов докладов, опубликованных в других изданиях.

Получено 1 свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ (рег. №2023666395, 2023 г.).

Материалы диссертационного исследования использованы для написания отчетов НИР «Разработка научно-технического задела в области интеллектуализации бортового оборудования воздушных судов местных воздушных линий».

Реализация результатов. Основные результаты диссертационной работы внедрены в ФАУ «ГосНИИАС», ООО НПП «ПРИМА», что подтверждено соответствующими актами.

Личный вклад автора. Основные результаты работы получены либо лично автором, либо при его непосредственном участии, что подтверждено публикациями в научных изданиях.

В опубликованных в соавторстве работах автору принадлежат постановка задачи, вывод основных соотношений, результаты теоретических и практических исследований.

Структура и объем работы. Диссертационная работа состоит из введения, четырёх глав, заключения, списка сокращений, списка литературы. Общий объём диссертации составляет 217 страниц печатного текста и содержит 259 рисунков и 5 таблиц. Библиографический список включает 101 наименование работ.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность темы, выявлены противоречия практического и научного характера в области перестроения маршрута полета ВС для облета обнаруженных препятствий, сформулированы цель и задача исследования, научная новизна, практическая значимость полученных результатов, определены границы исследований, сформулированы положения, выносимые на защиту и изложено краткое содержание диссертации.

В первой главе проведен анализ статистики АП за 2011-2020 гг. Установлены группы событий, приведшие к значительному числу АП – это события типа LALT, LOC-I, CFIT, UIMS, WSTRW. Расследования данных АП выявило, что основными причинами их возникновения стали отсутствие полной ситуационной осведомленности и неправильные действия экипажа в условиях повышенной психофизиологической нагрузки и дефицита времени на принятие решения.

Выполнен анализ научных работ, связанных с построением и перестроением маршрута полета пилотируемых и беспилотных ВС, маршрутов движения автономных транспортных средств и самоходных тележек, реконфигурации компонентов сетевой инфраструктуры. Анализ показал невозможность прямого использования достигнутых их авторами результатов для решения задачи оперативного перестроения маршрута полета ВС с учетом выявленных препятствий ввиду наличия существенных особенностей ВС как объекта управления, отличающих ВС от наземных робототехнических устройств и информационных потоков, а также специфических требований к бортовому ПО гражданских ВС, не позволяющих использовать результаты, полученные для военных ВС и БВС.

Установлено, что препятствия, представляющие угрозу ВС (рельеф местности, области с опасными метеорологическими явлениями, запретные зоны полетов, искусственные сооружения), могут быть обнаружены при помощи датчиков современных КБО (метеолокаторы, многоспектральные камеры, лидары, георадары, дальномеры и т.п.), а также на основе информации цифровой карты местности, доступной на борту ВС. Однако решение об изменении маршрута полёта ВС пилот должен принимать и реализовывать самостоятельно, что затруднительно в условиях высокой психофизиологической нагрузки и ограниченного времени. Автоматизированные системы корректировки маршрута на борту ВС в настоящее время отсутствуют.

В результате установлено, что актуальной научной задачей является разработка методики и алгоритма оперативной реконфигурации маршрута полета, обеспечивающих перестроение маршрута полета с учетом вновь выявленных препятствий (наземных и воздушных), а также характеристик ВС для реализации в составе КБО ВС.

Во второй главе выполнена постановка задачи исследования, заключающаяся в следующем.

Пусть:

- 1) маршрут полета задан начальной X_1 , поворотными $X_2, X_3, \dots, X_{n-1}$ и конечной X_n точками (пунктами) маршрута (НПМ, ППМ, КПМ);
- 2) препятствия заданы множеством точек $X_{пр 1}, \dots, X_{пр m}$, описывающих границы препятствия;
- 3) полет ВС описывается системой дифференциальных уравнений динамики материальной точки:

$$\begin{cases} \frac{dV}{dt} = g(n_{xa} - \sin\theta), \\ \frac{d\theta}{dt} = \frac{g}{V}(n_{ya}\cos\gamma_a - \cos\theta), \\ \frac{d\Psi}{dt} = -\frac{g}{V\cos\theta}n_{ya}\sin\gamma_a, \\ \frac{dx_g}{dt} = V\cos\theta\cos\Psi, \\ \frac{dy_g}{dt} = V\sin\theta, \\ \frac{dz_g}{dt} = -V\cos\theta\sin\Psi, \\ \frac{dm}{dt} = -c_s, \end{cases}$$

где V – скорость ВС; θ, Ψ, γ_a – угол наклона траектории, угол пути и скоростной угол крена; x_g, y_g, z_g – координаты ВС в нормальной земной системе координат; g – ускорение свободного падения; n_{ya}, n_{xa} – нормальная скоростная и тангенциальная перегрузки;

4) заданы ограничения на высоту и скорость полета, величину и темп изменения нормальной скоростной перегрузки и скоростного угла крена;

5) известны аэродинамические характеристики ВС и высотно-скоростные характеристики силовой установки.

Необходимо:

- 1) оценить безопасность маршрута;
- 2) в случае угрозы безопасности полета рассчитать альтернативные безопасные маршруты полета из начальной в конечную точку маршрута;
- 3) определить максимально возможную скорость полета по альтернативным маршрутам для двух вариантов управления скоростью:
 - вариант 1 – скорость полета на маршруте постоянна;
 - вариант 2 – скорость полета на маршруте изменяется;
- 4) выбрать маршрут, оптимальный по заданному критерию (минимальная длина или время полета по маршруту; минимальное отклонение от маршрута).

Представлено содержание разработанной методики и алгоритма оперативной реконфигурации маршрута полета. Схема алгоритма приведена на рисунке 5.

Ключевые особенности алгоритма:

- 1) траектория считается безопасной, если описанный вокруг нее цилиндр (туннель безопасности) не имеет пересечений с препятствиями. В общем случае размеры указанного цилиндра (размеры зоны безопасности) (рисунок 6) должны быть достаточны для того, чтобы обеспечить невыход ВС при выдерживании заданного маршрута полета за пределы туннеля безопасности. Отклонение ВС от заданного маршрута в процессе полета возможно вследствие порыва ветра, навигационных ошибок (точности определения собственного местоположения), пилотажных ошибок (точности выдерживания траектории), выхода управляющих параметров (нормальной скоростной перегрузки, скоростного угла крена, темпа их изменения) на ограничения. Реакция на возможные возмущения при отслеживании заданной траектории полета также будет определяться текущим режимом полета (высота и скорость полета) и быстродействием системы управления. Ширина туннеля безопасности рассчитывается по формуле: $\Delta L = f(\Delta U_{\text{макс}}, \Delta_{\text{нав}})$, где $\Delta U_{\text{макс}}$ – это предельное отклонение от маршрута, связанное с выходом управляющих

параметров на ограничения, $\Delta_{\text{нав}}$ – предельное отклонение от маршрута, вызванное ошибкой определения собственных координат (ошибка навигации);

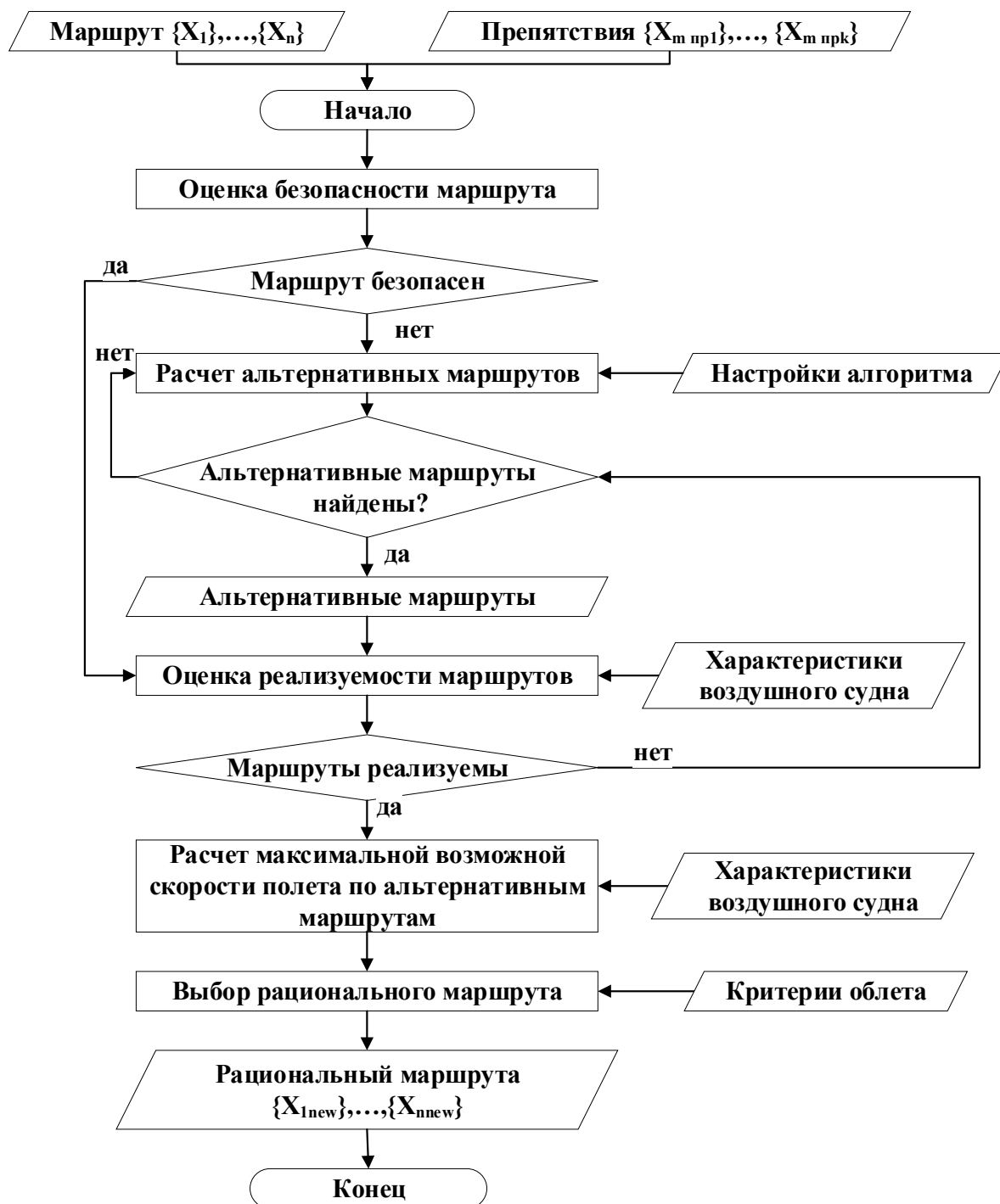


Рисунок 5 – Общий вид алгоритма оперативной реконфигурации маршрута полета

2) оценка реализуемости маршрута представляет из себя процедуру многократного интегрирования уравнений движения ВС при разной скорости (разных законах управления скоростью) полета ВС с целью определения максимально возможной скорости (закон изменения максимально возможной скорости), при которой маршрут полета реализуем;

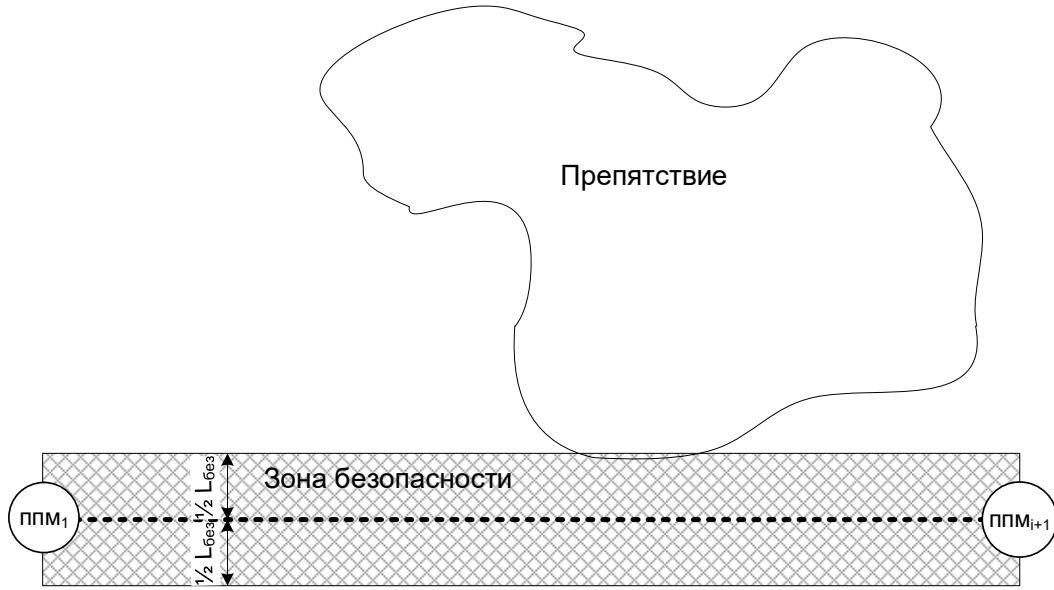


Рисунок 6 – Зона безопасности

3) для отслеживания заданной траектории полета используется алгоритм синтеза управления, разработанный Киселевым М.А. и адаптированный автором для задач оперативной реконфигурации маршрута полета. Для определения требуемых значений управляющих параметров маршрут полета на участке от X_i до X_{i+1} описывается параметрическими уравнениями сплайнов вида:

$$X_i X_{i+1}(\tau) = (1 - 3\tau + 2\tau^2)X_i + (3\tau^2 - 2\tau^3)X_{i+1} + (\tau - 2\tau^2 + \tau^3)K_i - (\tau^2 - \tau^3)K_{i+1},$$

где $\tau \in [0,1]$, а векторы $K_1, \dots, K_n$ определяются из решения матричного уравнения:

$$\begin{bmatrix} 1 & 4 & 1 & & & \\ & 1 & 4 & 1 & & \\ & & \ddots & \ddots & \ddots & \\ & & & 1 & 4 & 1 \\ & & & & 1 & 4 & 1 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} K_1 \\ K_2 \\ \vdots \\ K_{n-1} \\ K_n \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -3 & 0 & 3 & & & \\ & -3 & 0 & 3 & & \\ & & \ddots & \ddots & \ddots & \\ & & & -3 & 0 & 3 \\ & & & & -3 & 0 & 3 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} X_1 \\ X_2 \\ \vdots \\ X_{n-1} \\ X_n \end{bmatrix}.$$

Реализация базовой траектории (сплайна) при заданном режиме работы двигателей требует создания вполне определенной (из решения обратной задачи динамики полета) величины управляющих параметров:

$$\gamma_{\text{потр}} = \arctg \left(-\frac{\varphi' \cos \theta}{\theta' + \frac{g}{V\lambda} \cos \theta} \right); \quad n_{ya \text{ потр}} = \frac{1}{\cos \gamma} \left(\frac{V}{g} \lambda \theta' + \cos \theta \right),$$

где

$$\theta' = \frac{y''(x'^2 + y'^2 + z'^2) - y'(x'x'' + y'y'' + z'z'')}{(x'^2 + y'^2 + z'^2)^{\frac{2}{3}} \cos \theta}; \quad \varphi' = -\frac{x'z'' - z'x''}{x'^2 + z'^2};$$

Производные по координатам – это частные производные по безразмерному параметру τ сплайнов, интерполирующих маршрут полета:

$$x'_g = \frac{\partial x_g}{\partial \tau}; \quad y'_g = \frac{\partial y_g}{\partial \tau}; \quad z'_g = \frac{\partial z_g}{\partial \tau}$$

Заметим, что в случае выхода управляющих параметров на свои предельные значения, ВС отклоняется от маршрута, продолжая полет с предельными значениями управляющих параметров, а затем, по мере возникновения возможностей управления, возвращается на исходную траекторию;

4) расчет альтернативных маршрутов полета представляет собой процедуру, в основе которой лежит последовательный поиск двух новых точек для двух альтернативных маршрутов полета, формируемых путем вращения луча, исходящего из текущей точки маршрута, в направлении следующей точки маршрута влево и вправо от исходного направления полета до касания луча с препятствием и последующим переносом полученной точки касания на заданное расстояние от препятствия с учетом минимально допустимого кратчайшего расстояния между маршрутом полета и препятствием (рисунок 7). Таким образом, общую схему поиска новой точки маршрута можно разделить на два этапа:

- поворот отрезка;
- проверка луча на пересечение с препятствием.

При повороте отрезка с вершинами (x_H, z_H) и (x_K, z_K) вокруг (x_H, z_H) на угол α (при повороте влево $\alpha > 0$, при повороте вправо $\alpha < 0$) новые координаты конца отрезка $(x_{\text{пов}}, z_{\text{пов}})$ рассчитываются так:

$$\begin{aligned} x_{\text{пов}} &= (z_K - z_H) \sin \alpha + (x_K - x_H) \cos \alpha + x_H; \\ z_{\text{пов}} &= (z_K - z_H) \cos \alpha + (x_K - x_H) \sin \alpha + z_H. \end{aligned}$$

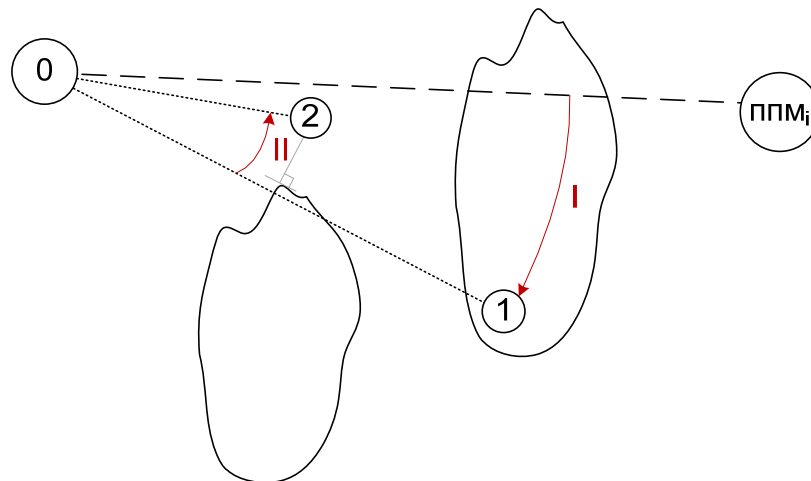


Рисунок 7 – Поворот луча поиска маршрута

Проведена оценка работоспособности разработанного алгоритма, для чего решены тестовые задачи по оперативной реконфигурации маршрута полета ВС при облете одного и нескольких гипотетических препятствий различных конфигураций, наземных и воздушных, в ГП и ВП. Некоторые результаты представлены ниже.

На рисунке 8 показаны исходный (черная линия) и рассчитанный с помощью алгоритма безопасный (зеленая линия) маршруты полета при облете единичного препятствия в ГП. Длина безопасного маршрута, полученная аналитически (т.е. точным методом), 7341.6 м. Длина маршрута, рассчитанная при моделировании полета ВС, 7369 м. Таким образом, погрешность в определении длины маршрута (точность модели динамики полета) составила 0.4 %. Моделирование показало, что пролет по маршруту возможен при скорости полета не выше 213 км/ч из-за выхода угла крена на ограничение и недопустимого отклонения траектории полета от исходного маршрута. Изменение параметров полета ВС представлены на рисунках 9–11 при скорости 250 км/ч (синяя линия) и при скорости 213 км/ч (красная линия). Видно, что при

скорости 250 км/ч на 55 секунде отклонение от маршрута полета стало равным предельному заданному значению отклонения 100 м, а при скорости 213 км/ч максимальное отклонение от исходного маршрута составило около 97 м. Как следует из рисунка 10 отклонение от маршрута связано с выходом на ограничения угла крена. Время полета, полученное аналитически (т.е. точным методом) исходя из длины маршрута 7369 м и скорости полета ВС 213 км/ч, составило 124 с. Время прохождения маршрута, полученное в результате моделирования, составило 125 с. Таким образом, погрешность модели динамики полета в части расчета времени полета составила менее 0.4 %.

На рисунке 12 представлены результаты решения задачи по облету нескольких препятствий в ГП. Исходный маршрут показан черной линией. Рассчитанные с использованием разработанного алгоритма альтернативные безопасные маршруты облета препятствий показаны:

- №1 желтой линией, длина маршрута 9936 м;
- №2 зеленой линией, длина маршрута 8593 м;
- №3 синей линией, длина маршрута 11327 м.

Кратчайший маршрут – маршрут №2. На рисунках 13 - 16 представлены изменения параметров полета при пролете по маршруту №2 с постоянной (красная линия) и переменной (синяя линия) скоростью. Время полета с постоянной скоростью составило 183 с, с переменной скоростью 136 с, т.е. на 25% меньше. Диапазон изменения скорости полета при полете с переменной скоростью – от 168 км/ч до 395 км/ч. При полете с постоянной скоростью максимальная скорость, при которой возможно прохождение маршрута, составила 169 км/ч. Как и ранее отклонение от маршрута связано с выходом на ограничение угла крена (рисунок 13).

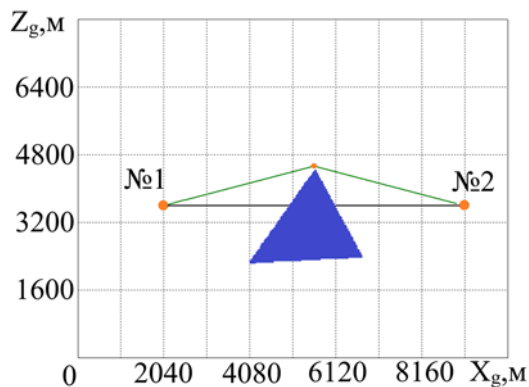


Рисунок 8 – Исходный и безопасный маршрут облета препятствия

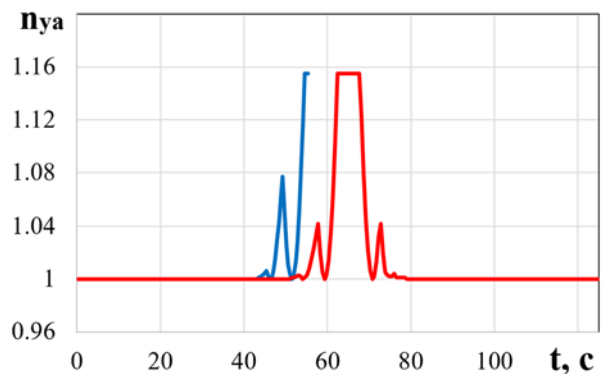


Рисунок 9 – Изменения нормальной перегрузки

На рисунке 17 представлены результаты решения задачи по облету препятствия в ВП. Исходный маршрут показан черной линией. Рассчитанные с использованием разработанного алгоритма альтернативные безопасные маршруты облета препятствий показаны:

- маршрут №1 желтой линией, длина маршрута 9367 м;
- маршрут №2 красной линией, длина маршрута 13943 м.

Кратчайший маршрут – маршрут №1. На рисунках 18 - 21 представлены изменения параметров полета при пролете по маршруту №1 с постоянной (красная линия) и переменной (синяя линия) скоростями. Время полета пролета с постоянной скоростью составило 183 с с переменной скоростью 138 с т.е. на 17% меньше. Диапазон изменения скорости полета при полете с переменной скоростью – от 185 км/ч до 276 км/ч. При полете с постоянной скоростью, максимальная скорость при которой возможно прохождение маршрута, составила 185 км/ч.

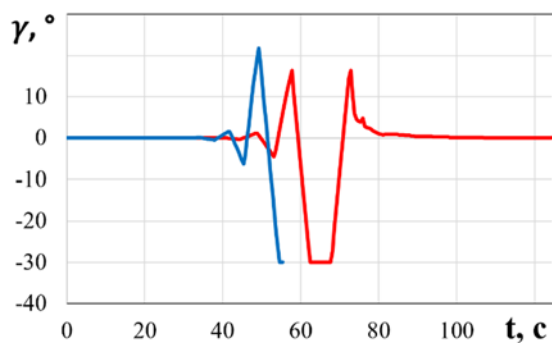


Рисунок 10 – Изменение угла крена

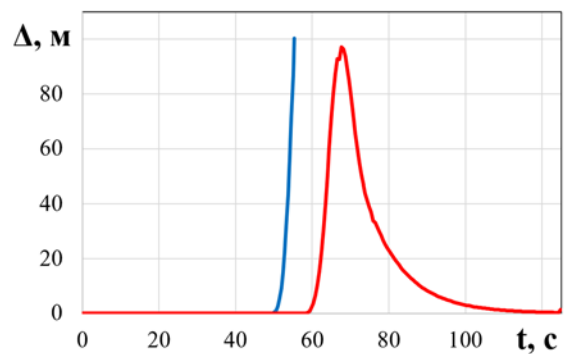


Рисунок 11 – Отклонение от маршрута

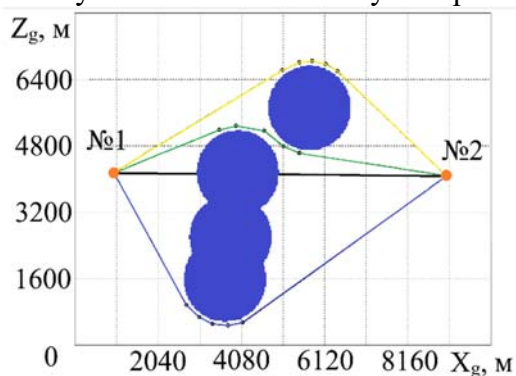


Рисунок 12 – Исходный и безопасные маршруты

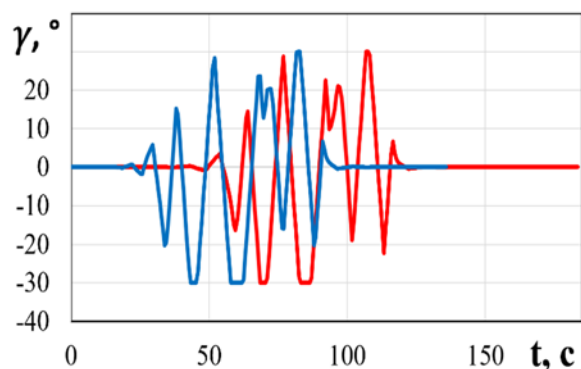


Рисунок 13 – Изменение угла крена при пролете по маршруту №2

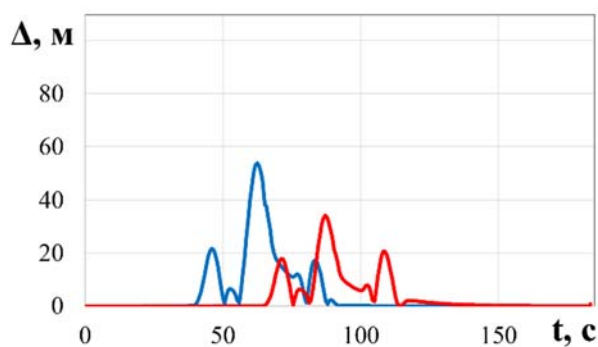


Рисунок 14 – Отклонение от маршрута при пролете по маршруту №2

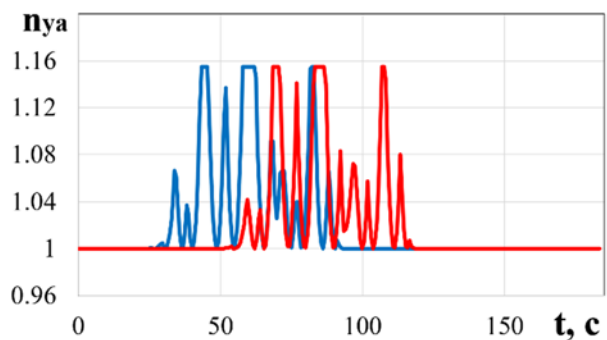


Рисунок 15 – Изменения нормальной перегрузки при пролете по маршруту №2

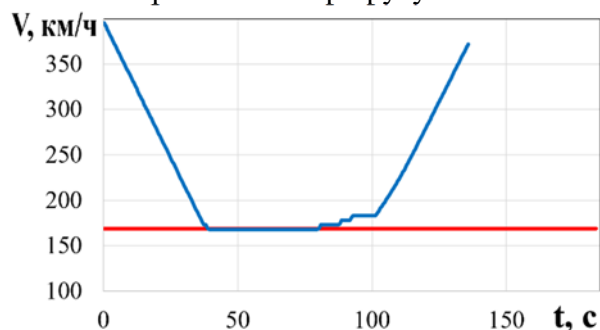
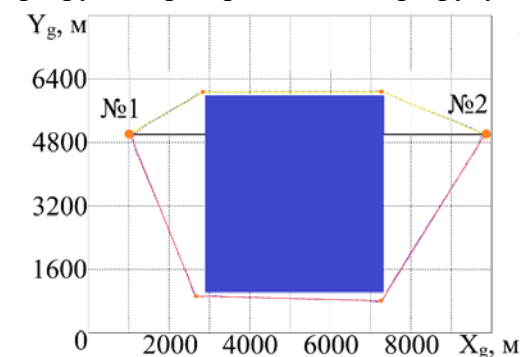
Рисунок 16 – Изменения n_{ua} при пролете по маршруту №2

Рисунок 17 – Исходный и безопасные маршруты

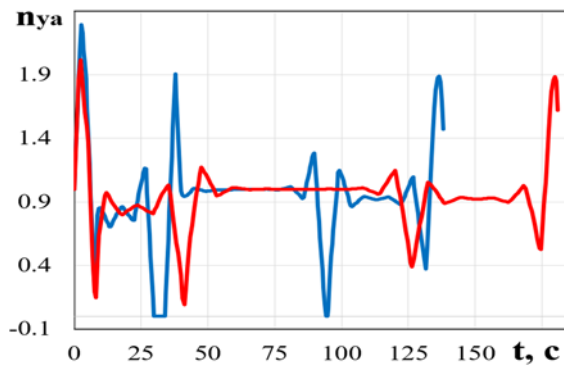


Рисунок 18 – Изменения нормальной перегрузки на маршруте №1

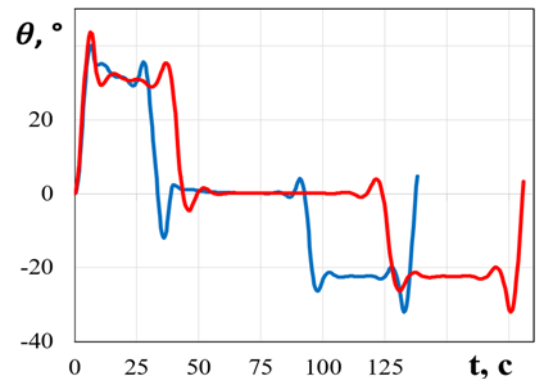


Рисунок 19 – Изменение угла наклона траектории на маршруте №1

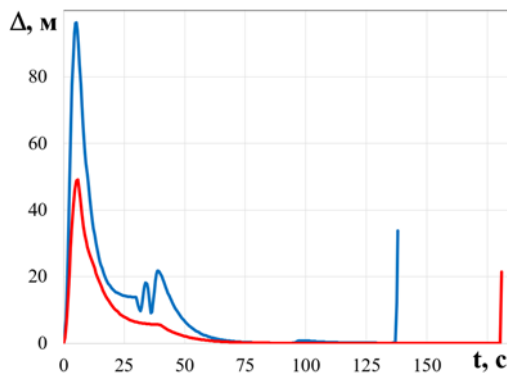


Рисунок 20 – Отклонение траектории на маршруте №1

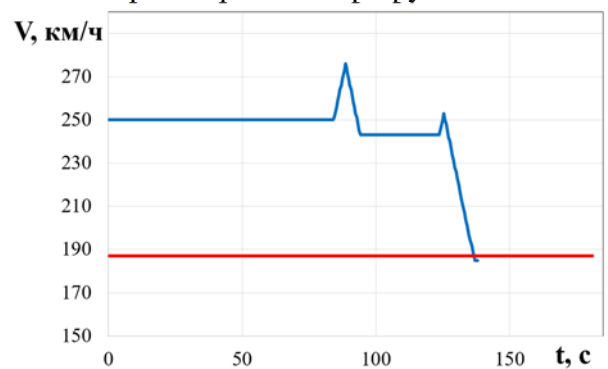


Рисунок 21 – Изменение скорости на маршруте №1

В третьей главе выполнен анализ современных КБО ВС нормальной и транспортной категории с точки зрения возможности создания и реализации бортового алгоритма оперативной реконфигурации маршрута полета. Показано, что:

- 1) современные и перспективные КБО, строятся на основе концепции интегрированной модульной авионики (применительно к общей архитектуре) и концепции «стеклянная кабина» (с точки зрения информационно-управляющего поля кабины экипажа);
- 2) уровень современных и перспективных КБО позволяет реализовать бортовой алгоритм оперативной реконфигурации маршрута полета в виде функции без изменения архитектуры и с минимальной доработки КБО;
- 3) реализация маршрута полета, рассчитанного с использованием алгоритма оперативной реконфигурации маршрута полета, принципиально не отличается от реализации в FMS исходного маршрута полета.

На рисунке 22 представлена возможная архитектура КБО, а также каналы информационного обмена, необходимые для работы алгоритма. Заметим, что для реализации алгоритма облета препятствий необходима доработка КБО в части разработки алгоритма подготовки данных координат (оцифровки) препятствий, выявленных бортовыми датчиками (метеолокаторами, лидарами, штормоскопами) для их последующей интеграции в цифровую карту, используемую в свою очередь в качестве исходных данных при работе алгоритма облета препятствий. Разработка алгоритма подготовки данных координат (оцифровки) препятствий выходит за рамки данной работы, однако работы по данной проблеме ведутся в настоящее время другими исследователями, что подтверждается их публикациями.

Для обоснования требований к бортовой реализации алгоритма оперативной реконфигурации маршрута полета (функции) проанализированы состояние и перспективы

развития компонентов современных КБО, рассмотрены типичные КБО, устанавливаемые на ВС нормальной (КБО Garmin G1000) и транспортной категорий (КБО ВС SSJ-NEW). Сформированы требования к бортовой реализации алгоритма, в частности функциональные требования, требования к точности аэронавигационных средств, а также аппаратно-технические требования. Определен необходимый объем доработки рассмотренных типовых КБО. Состав функций, реализуемых КБО ВС нормальной категории на примере КБО Garmin G1000, показан на рисунке 23. Состав функций, реализуемых КБО ВС транспортной категории на примере КБО SSJ-NEW, показан на рисунке 24. На указанных рисунках уже реализованные в КБО функции, необходимые для работы алгоритма облета препятствий, отмечены светлым фоном. Функции, разрабатываемые в рамках настоящей работы, отмечены темно-серым фоном. Функции, разработка которых необходима для реализации на борту алгоритма, но выходит за рамки данной работы, отмечены светло-серым фоном.

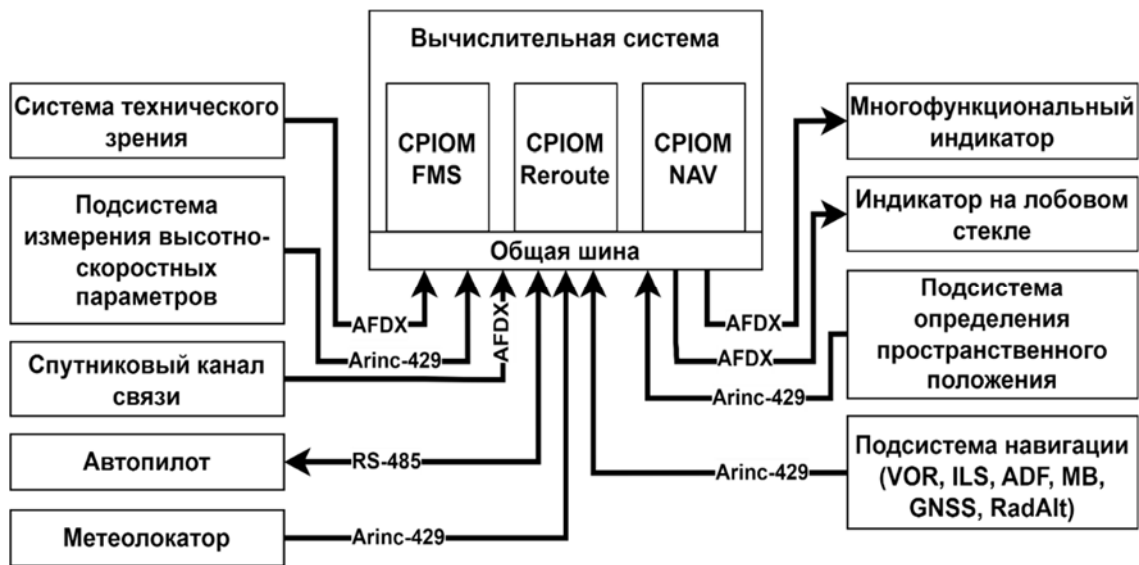


Рисунок 22 – Общая схема компонентов КБО

На рисунке 25 представлено содержание бортового алгоритма оперативной реконфигурации маршрута полета. Исходные данные, необходимые для работы алгоритма поступают от:

- FMS (исходный маршрут полета);
- навигационной системы (данные о текущем положении ВС);
- метеолокатора, штормоскопа, спутниковой системы и радиосвязи (погодные данные, данные о запретных зонах полета);
- системы улучшенного видения, лидара (данные о препятствиях);
- цифровой карты бортового сервера данных (данные о препятствиях);
- бортового сервера данных (данные о характеристиках и состоянии ВС, ширине туннеля безопасности).

Синтезированный безопасный альтернативный маршрут полета при обнаружении угрозы безопасности полета на исходном маршруте выбирается для реализации пилотом с помощью пульта управления на многофункциональном дисплее и затем передается в CPIOM FMS для реализации в автоматическом или директорном режимах.

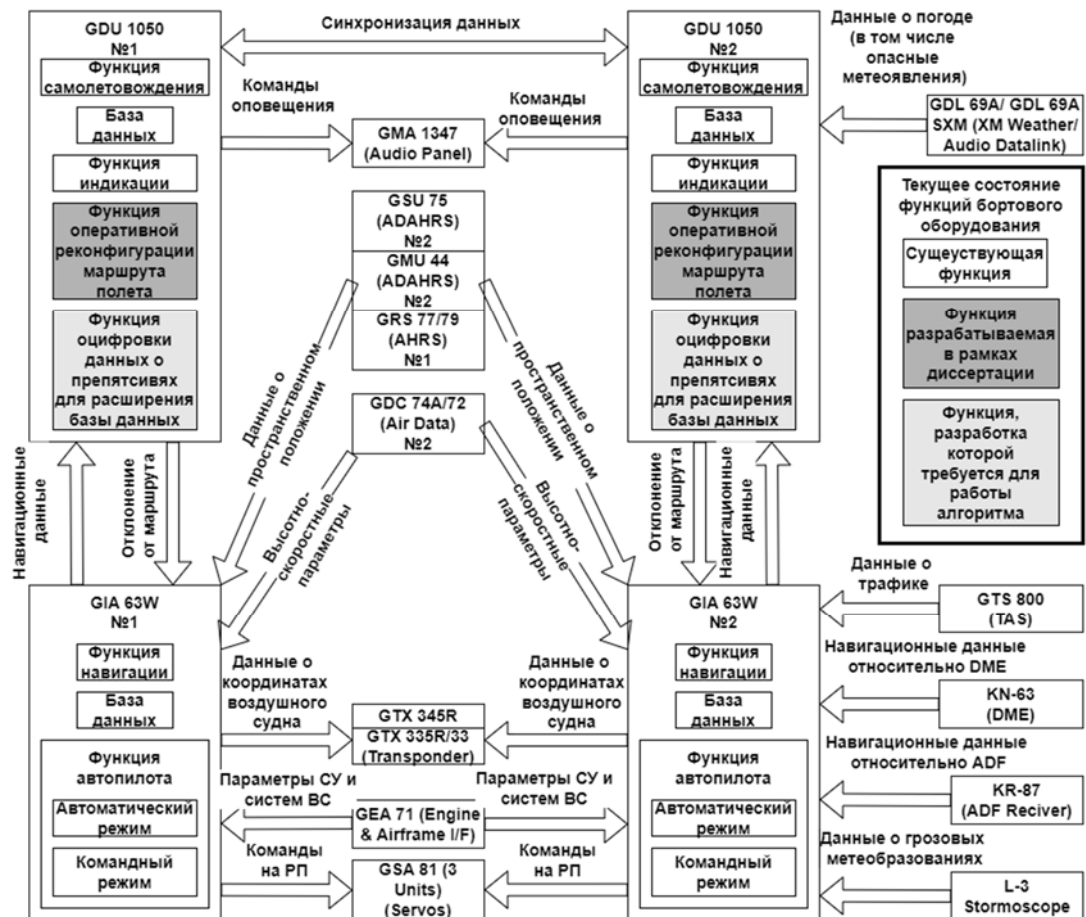


Рисунок 23 – Доработка комплекса бортового оборудования для ВС нормальной летной категории



Рисунок 24 – Доработка комплекса бортового оборудования для ВС транспортной категории

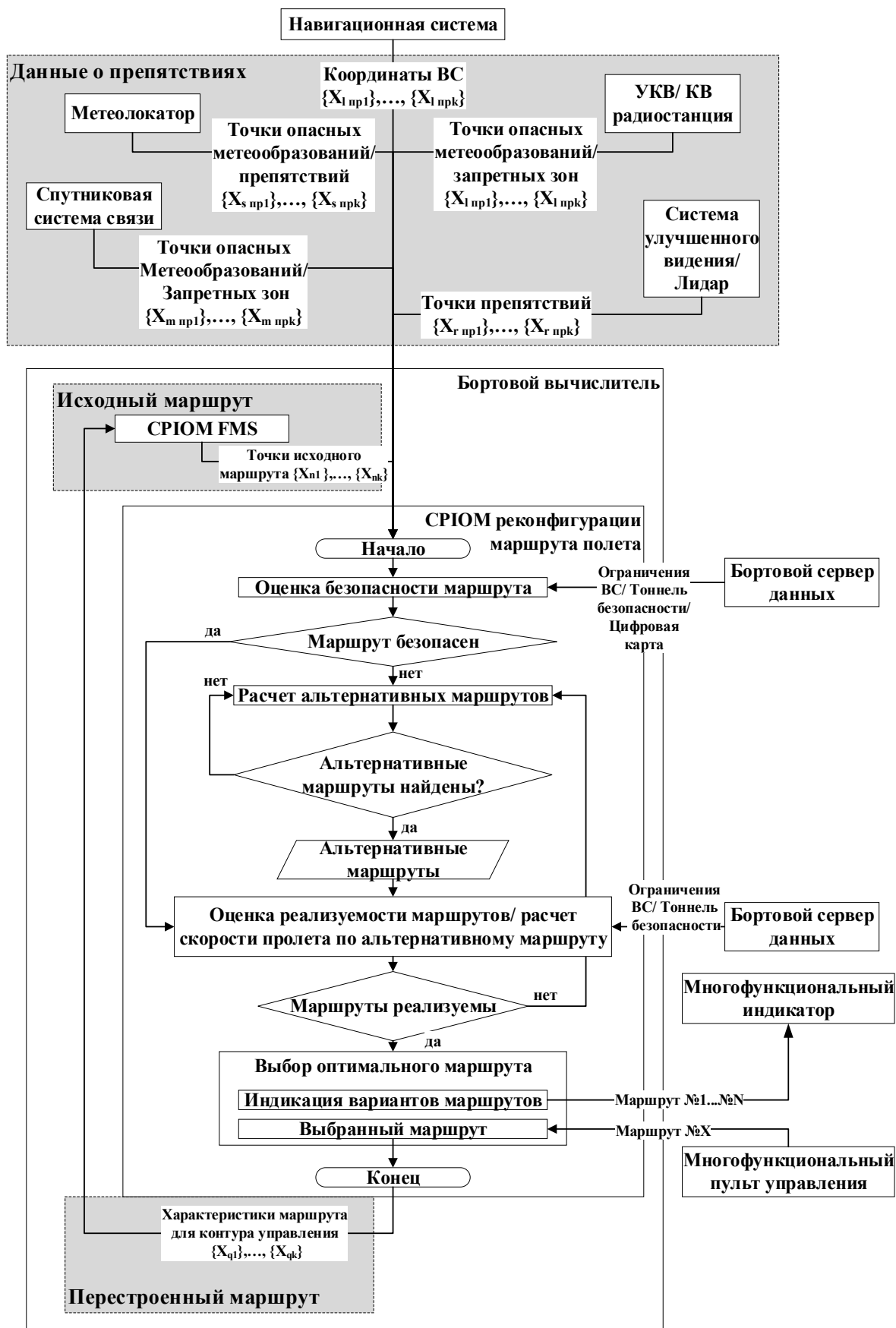


Рисунок 25 – Схема бортового алгоритма оперативной реконфигурации маршрута полета

В четвертой главе проведена проверка адекватности разработанного бортового алгоритма (функции) оперативной реконфигурации маршрута полета. Проверка проводилась с помощью решения тестовых задач, предполагающих облет наземных препятствий в виде горного массива и воздушных препятствий в виде грозового фронта в ВП и ГП. Для демонстрации адаптивности методики и алгоритма оперативной реконфигурации маршрута полета к характеристикам ВС исследования проводились для ВС двух типов: вертолета транспортной категории типа Ми-8 и самолета транспортной категории типа МС-21. При расчетах использовалась карта местности типа SRTM с разрешением 30 метров.

На рисунке 26 представлены результаты решения задачи по облету препятствия в ГП. Исходный маршрут показан черной линией. Рассчитанные с использованием разработанного алгоритма альтернативные безопасные маршруты облета препятствия для вертолета транспортной категории типа Ми-8 показаны:

- маршрут №1 желтой линией, длина маршрута 80544 м, время полета 1377 с;
- маршрут №2 красной линией, длина маршрута 99258 м, время полета 1489 с.

Кратчайший маршрут – маршрут №1. На рисунках 27 - 30 представлены изменения параметров полета при полете по маршруту №1. Диапазон изменения скорости полета – от 79 км/ч до 240 км/ч. Как и ранее отклонение от маршрута связано с выходом на ограничения угла крена (рисунок 28).

На рисунке 31 представлены результаты решения задачи по облету препятствия в ВП. Исходный маршрут показан черной линией. Рассчитанный с использованием разработанного алгоритма альтернативный безопасный маршрут облета препятствия для вертолета транспортной категории типа Ми-8 показан зеленой линией. Длина маршрута составила 53559 м, время полета 804 с. На рисунках 32 - 35 представлены изменения параметров полета. Видно, что на протяжении всего полета реализуется максимальная скорость 240 км/ч, перегрузка не выходит на ограничение, а отклонение от маршрута составило менее 1 м.

На рисунке 36 представлены результаты решения задачи по облету препятствий в ГП. Исходный маршрут показан черной линией. Рассчитанные с использованием разработанного алгоритма альтернативные безопасные маршруты облета препятствий для самолета транспортной категории типа МС-21 показаны:

- маршрут №1 желтой линией, длина маршрута 89618 м, время полета 498 с;
- маршрут №2 красной линией, длина маршрута 70803 м, время полета 697 с.

Кратчайший маршрут – маршрут №2. На рисунках 37 - 40 представлены изменения параметров полета при полете по маршруту №2. Диапазон изменения скорости полета – от 469 до 600 км/ч. Отклонение траектории от маршрута связано с выходом на ограничения угла крена (рисунок 38).

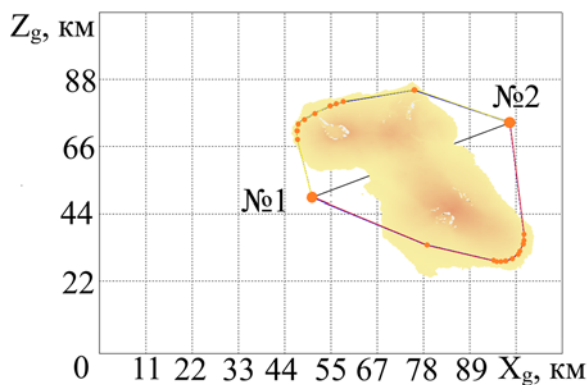


Рисунок 26 – Исходный и безопасные маршруты облета препятствия

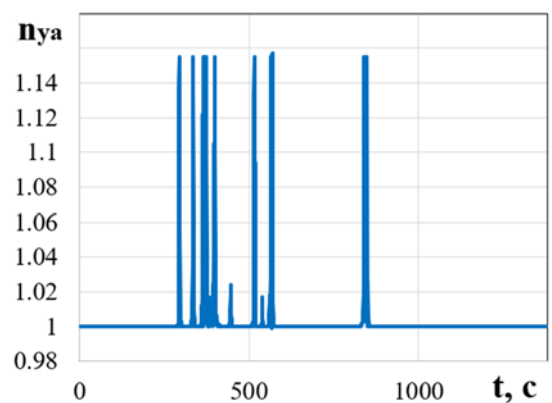


Рисунок 27 – Изменения нормальной перегрузки при полете по маршруту №1

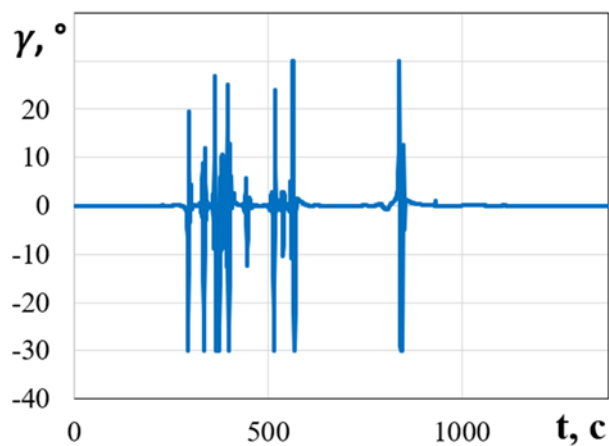


Рисунок 28 – Изменение угла крена при полете по маршруту №1

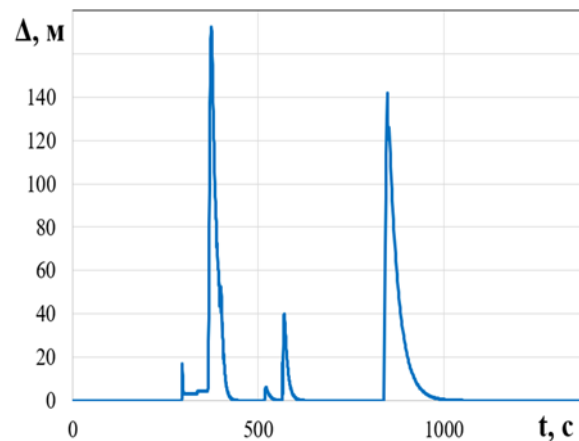


Рисунок 29 – Отклонение траектории от маршрута №1

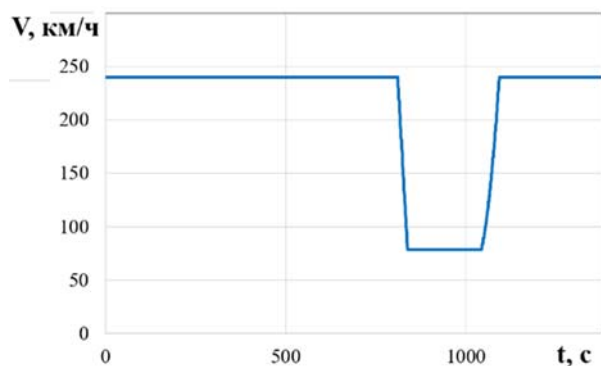


Рисунок 30 – Изменение скорости при пролете по маршруту №1

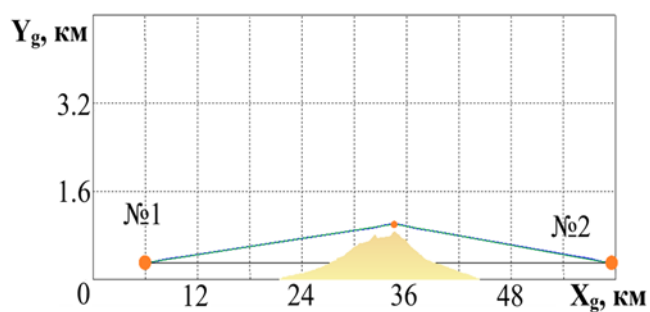


Рисунок 31 – Исходный и безопасный маршрут облета препятствия

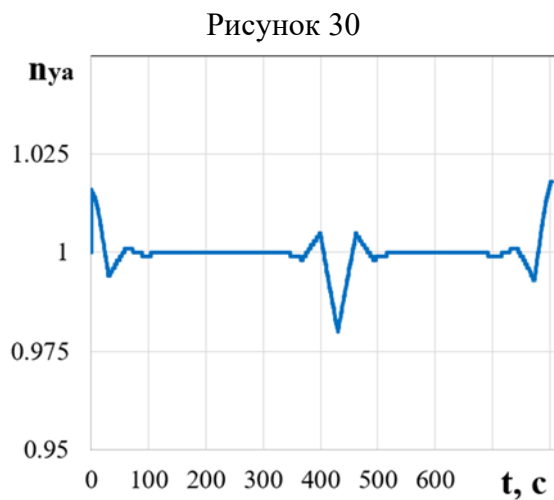


Рисунок 32 – Изменения нормальной перегрузки при полете по маршруту

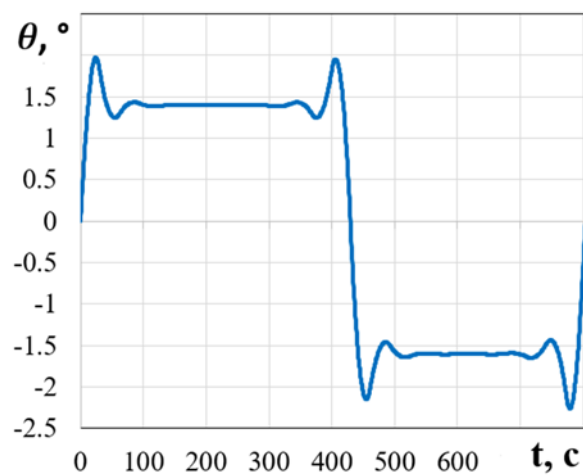


Рисунок 33 – Изменение угла наклона траектории при полете по маршруту

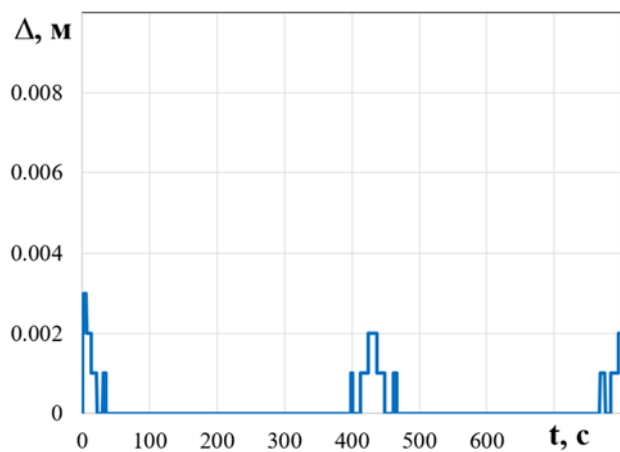


Рисунок 34 – Отклонение траектории от маршрута

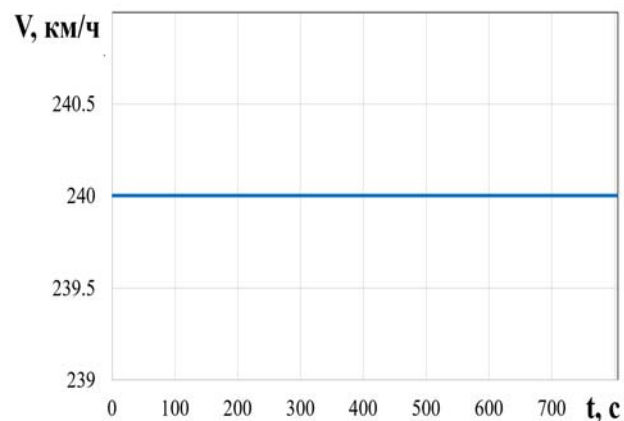


Рисунок 35 – Изменение скорости при пролете по маршруту

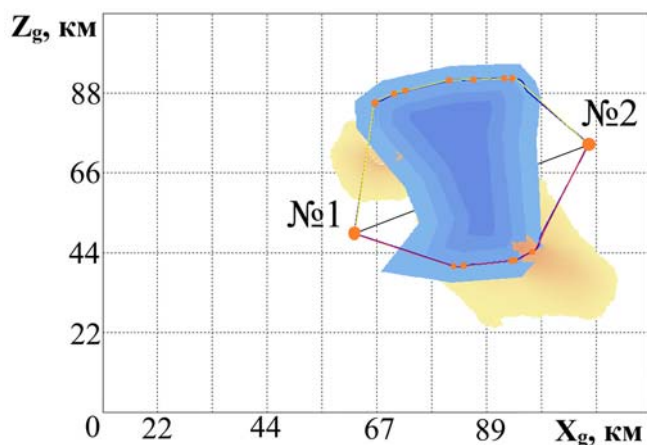


Рисунок 36 – Исходный и безопасный маршрут облета препятствия

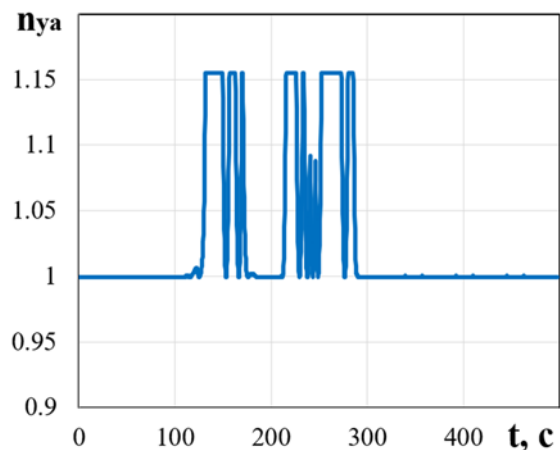


Рисунок 37 – Изменения нормальной перегрузки при полете по маршруту №2

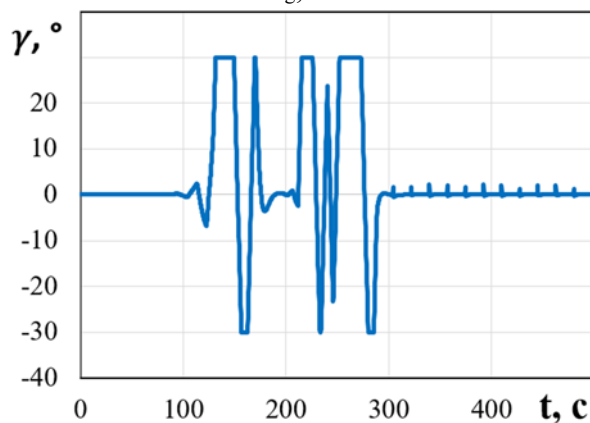


Рисунок 38 – Изменение угла крена при полете по маршруту №2

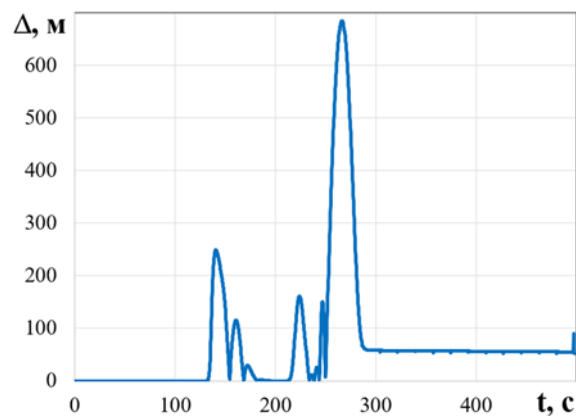


Рисунок 39 – Отклонение траектории от маршрута №2

На рисунке 41 представлены результаты решения задачи по облету препятствия в ВП. Исходный маршрут показан черной линией. Рассчитанные с использованием разработанного

алгоритма альтернативные безопасные маршруты облета препятствия для самолета транспортной категории типа МС-21 показаны:

- маршрут №1 зеленой линией, длина маршрута 53669 м, время полета 323 с
- маршрут №2 коричневой линией, длина маршрута 53586 м, время полета. 322 с.

Кратчайший маршрут – маршрут №2. На рисунках 42 - 45 представлены изменения параметров полета при полете по маршруту №2. Видно, что на протяжении всего полета реализуется максимальная скорость 600 км/ч. Перегрузка не выходит на ограничение, отклонение от маршрута составило менее 2 м (рисунок 42).

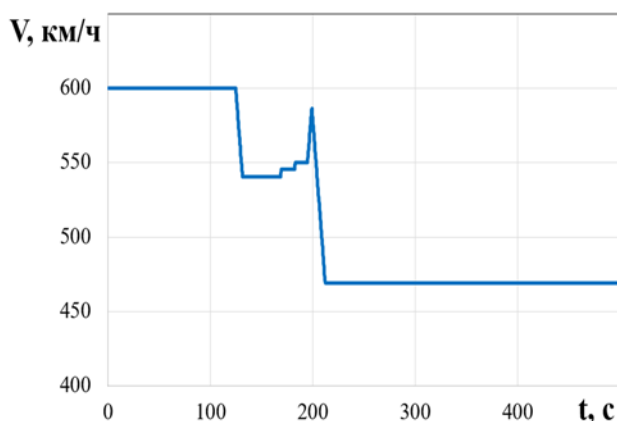


Рисунок 40 – Изменение скорости при пролете по маршруту №2

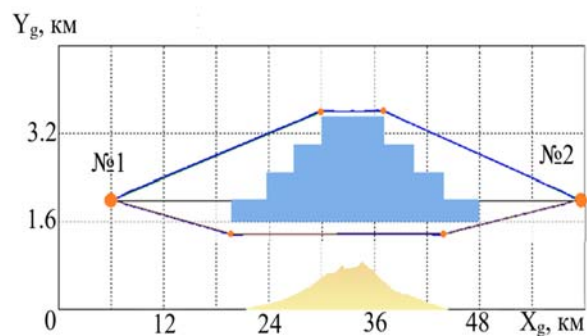


Рисунок 41 – Исходный и безопасный маршрут облета препятствия №1

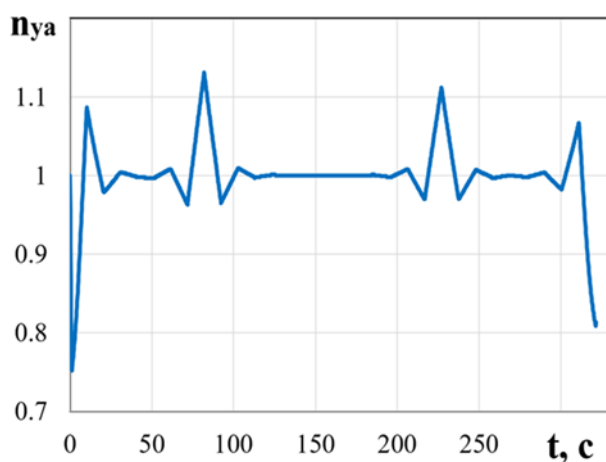


Рисунок 42 – Изменения нормальной перегрузки при полете по маршруту №2

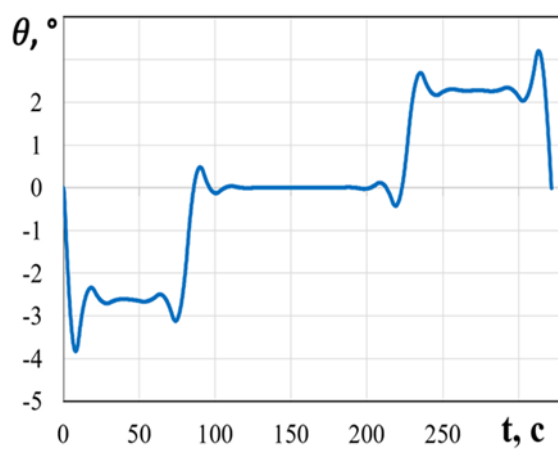


Рисунок 43 – Изменение угла наклона траектории при полете по маршруту №2

Представленные численные примеры решения тестовых задач, подтверждают:

1. Достоверность разработанного бортового алгоритма (функции) оперативной реконфигурации маршрута полета при облете наземных естественных препятствий в виде горного массива и воздушных препятствий в виде грозового фронта.

2. Адаптивность разработанного бортового алгоритма (функции) оперативной реконфигурации маршрута полета к характеристикам ВС.

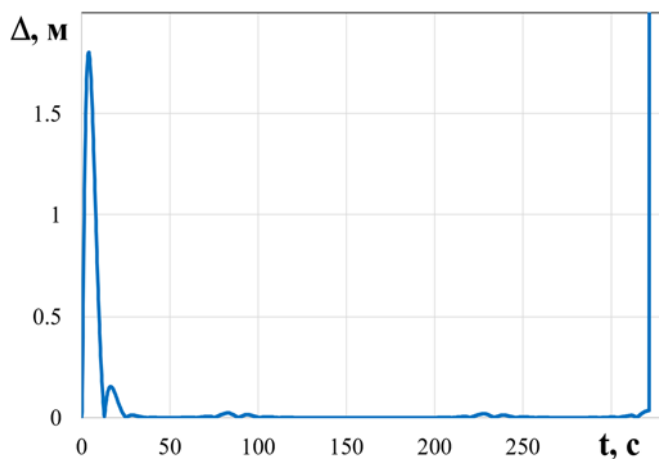


Рисунок 44 – Отклонение траектории от маршрута №2

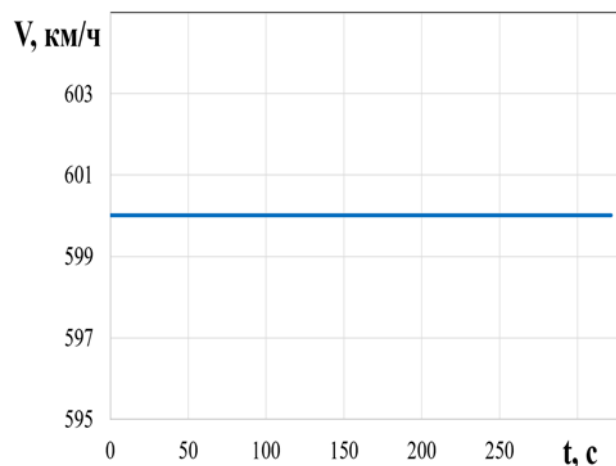


Рисунок 45 – Изменение скорости при пролете по маршруту №2

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В диссертационной работе представлено решение актуальной, имеющей важное значение для воздушного транспорта Российской Федерации научной задачи разработки методики и алгоритма оперативной реконфигурации маршрута полета, обеспечивающих перестроение маршрута полета с учетом вновь выявленных препятствий (наземных и воздушных) и характеристик ВС.

В ходе исследований в работе были получены следующие основные результаты:

1. Проведен анализ статистики АП за 2011 по 2020 годы который показал, что как при осуществлении коммерческих перевозок, так и при совершении полетов авиации общего назначения, значительное количество АП связано со столкновением с препятствиями при полете на малой высоте (до 21.9%), потерей управления в полете (до 66%), столкновением с землей в управляемом полете (до 56.8%), попаданием в приборные метеоусловия, к которым экипаж не допущен (до 10.1%), попаданием в зону сильной грозовой деятельности (до 5.6%). Расследования данных АП выявили, что главными причинами их возникновения связаны с отсутствием полной ситуационной осведомленности, неправильными действиями экипажа в условиях повышенной психофизиологической нагрузки, дефицитом времени на принятие решения, не позволяющие экипажу самостоятельно сформировать новую траекторию, безопасную с точки зрения облета вновь выявленных препятствий и учитывающую возможности и ограничения ВС при отсутствии на борту ВС на сегодняшний день автоматизированных средств корректировки маршрута с целью облета препятствий. За счет функционального дополнения системы самолетовождения, позволяющего скорректировать маршрут полета с учетом выявленных в процессе полета препятствий (наземных и воздушных) может быть устранена причина отмеченных АП и тем самым повышен уровень безопасности полетов.
2. Разработана методика, обеспечивающая оперативную реконфигурацию маршрута полета.
3. Разработан алгоритм, обеспечивающий на основе данных о текущем маршруте полета, координатах препятствия:
 - оценку безопасности маршрута полета;
 - расчет множества альтернативных безопасных и реализуемых данным ВС маршрутов полета с выделением оптимальных по выбранным критериям маршрутов облета препятствий.
4. Разработан бортовой алгоритм оперативной реконфигурации маршрута полета, допускающий

реализацию в виде функционального дополнения системы самолетовождения в бортовых комплексах вновь разрабатываемых и существующих ВС, создаваемых (созданных) в соответствии с принципами интегрированной модульной авионики и «стеклянной кабины».

5. Показана работоспособность разработанной методики, алгоритма и бортового алгоритма оперативной реконфигурации маршрута полета при облете наземных естественных препятствий в виде горного массива и воздушных препятствий в виде грозового фронта.

6. Продемонстрирована адаптивность разработанной методики, алгоритма и бортового алгоритма оперативной реконфигурации маршрута полета (функции) к характеристикам ВС.

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ ДИССЕРТАЦИИ ОПУБЛИКОВАНЫ В СЛЕДУЮЩИХ РАБОТАХ

Публикации в рецензируемых изданиях, рекомендованных ВАК РФ

1. Methodology for plotting the flight planned route change of the aircraft in flight / M. A. Kiselev, Y. S. Kalyuzhny, A. V. Karpov, S. F. Borodkin // Civil Aviation High Technologies. – 2023. – Vol. 26, No. 6. – P. 33-46.

2. Исследования по перестроению маршрута в процессе полета воздушного судна / М. А. Киселев, Ю. С. Калюжный, А. В. Карпов, С. Ф. Бородин // Научный вестник Московского государственного технического университета гражданской авиации. – 2024. – Т. 27, № 3. – С. 35-49.

3. Анализ существующих подходов к перестроению маршрута полета воздушного судна в процессе его выполнения / М. А. Киселев, Ю. С. Калюжный, А. В. Карпов, Ю. В. Петров // Научный вестник Московского государственного технического университета гражданской авиации. – 2023. – Т. 26, № 3. – С. 53-65.

Публикации в других изданиях

4. Киселев, М. А. Некоторые результаты оперативной реконфигурации маршрута полёта вертолёта типа ми-8 / М. А. Киселев, Ю. С. Калюжный // К.Э. Циолковский: ключевые идеи и современные достижения космонавтики: Материалы 59-х Научных чтений, посвященных разработке научного наследия и развитию идей К.Э. Циолковского, Калуга, 17–19 сентября 2024 года. – Калуга: Эйдос, 2024. – С. 356-358.

5. Киселев, М. А. К вопросу оперативной реконфигурации маршрута полета / М. А. Киселев, Ю. С. Калюжный // Гражданская авиация на современном этапе развития науки, техники и общества: Сборник тезисов докладов Международной научно-технической конференции, посвященной 100-летию отечественной гражданской авиации, Москва, 18–19 мая 2023 года. – Москва: ИД Академии имени Н. Е. Жуковского, 2023. – С. 126-128.

6. Киселев, М. А. Некоторые результаты оперативной реконфигурации маршрута полета воздушных судов нормальной и транспортной категорий / М. А. Киселев, Ю. С. Калюжный, А. В. Карпов // Навигация, наведение и управление летательными аппаратами: Сборник тезисов докладов V Всероссийской научно-технической конференции, Москва, 27–28 ноября 2024 года. – Москва: Государственный научно-исследовательский институт авиационных систем, 2024. – С. 64-66.

7. Киселев, М. А. Проблематика оперативной реконфигурации маршрута полета / М. А. Киселев, Ю. С. Калюжный, А. В. Карпов // Моделирование авиационных систем : Сборник тезисов докладов V Всероссийской научно-технической конференции, Москва, 29–30 ноября 2023 года. – Москва: Государственный научно-исследовательский институт авиационных систем, 2023. – С. 238-240.

Научно-исследовательские работы

8. Разработка научно-технического задела в области интеллектуализации бортового оборудования воздушных судов местных воздушных линий. Отчет по НИР №ГОСНИИАС.2200.100.1574-002/ Научный руководитель Н.И. Сельвесюк М.: ФАУ «ГосНИИАС», 2022 г., 922 с. Отчет по НИР № ГОСНИИАС.2300.100.5096-001./ Научный руководитель Н.И. Сельвесюк М.: ФАУ «ГосНИИАС», 2022 г., 249 с.

Соискатель:



Ю.С. Калюжный

Подписано в печать: 03.06.2025
Формат: 60x84/16
Печать офсетная
Объем: 1,4 усл.п.л.
Тираж 50 экз. Заказ № 05-062025
Отпечатано в типографии «Сору.ру»
г.Москва, ул. Люсиновская, д.4
+7 495 156 10-00, www.copy.ru