

Труды МАИ. 2025. № 141
Trudy MAI. 2025. No. 141. (In Russ.)

Научная статья

УДК 629.7.075

URL: <https://trudymai.ru/published.php?ID=184514>

EDN: <https://www.elibrary.ru/WPQKLX>

ВЫЧИСЛИТЕЛЬНАЯ СИСТЕМА САМОЛЕТОВОЖДЕНИЯ – ЯДРО НАВИГАЦИОННОГО КОМПЛЕКСА

Виктор Владимирович Грошев¹, Наталия Александровна Зайцева²✉, Михаил Дмитриевич Тумаев³

^{1,2,3}Московский институт электромеханики и автоматики, МИЭА,

Москва, Российская Федерация

²n.zaytceva@aomiea.ru✉

Аннотация. В статье дается представление об основных функциональных задачах, решаемых вычислительными системами самолетовождения (ВСС). В составе современного бортового оборудования воздушных судов вычислительная система самолетовождения является его ядром. Используя связь с аэронавигационной базой данных, ВСС осуществляет построение плана полета, для выполнения которого формируются управляющие сигналы для перехода с одного участка на другой и для выдачи в систему управления полетом управляющие сигналы. Это позволяет выполнять схемы вылета (SID) и прибытия (STAR), указанные в базе данных. Ужесточение требований по точности выдерживания заданной линии пути, связанное с высокой плотностью воздушных потоков, длительностью перелетов и решением специальных задач, потребовало также решение задачи навигации 4D, то есть определение заданного времени прибытия в заданный пункт маршрута.

Ключевые слова: вычислительная система самолетовождения, схема вылета, схема прибытия, 4D навигация, план полета

Для цитирования: Грошев В.В., Зайцева Н.А., Тумаев М.Д. Вычислительная система самолетовождения – ядро навигационного комплекса // Труды МАИ. 2025. № 141. URL: <https://trudymai.ru/published.php?ID=184514>

Original article

FLIGHT MANAGEMENT SYSTEM IS THE CORE

Victor V. Groshev¹, Nataliya A. Zaitseva²✉, Mihail D. Tumaev³

^{1,2,3}Moscow Institute of Electromechanics and Automatics,
Moscow, Russian Federation

²n.zaytceva@aomiea.ru✉

Abstract. The article gives an idea of the main tasks solved by Flight Management System. As a part of modern airborne avionics systems, Flight Management System is the core, it uses the information from all navigation aids and data from aeronautical database. That is an essential requirement for automatic flight management. Connection with the aeronautical database allows to make a flight plan. Control signals for transition from one segment to another and for output to Flight Control System are generated in order to follow that flight plan. All that allows to follow strictly Standard Instrument Departure (SID) and Standard Instrument Arrival (STAR) Charts specified in the database. Aeronautical database contains information about the waypoints (latitude, longitude and altitude coordinates), the speed at which they are passed through, the segments that form departure and arrival charts. Twenty-three segments are standardized for the departure and arrival. Positioning uses combined information from the inertial system and the satellite navigation system, as well as the VOR and DME short-range radio navigation systems using a Kalman filter. Integrated information processing solves the problem of selecting a set of navigation aids that would ensure the highest navigation accuracy. The presence of various radio-technical equipment on board makes it possible to arrange integrated information processing in such a way that the FMS output data meets the requirements for

accuracy and integrity of navigation information, regardless of the flight phase or the aircraft mission. These requirements are defined in the Performance-based Navigation (PBN) Manual. ICAO 9613. Tougher requirements on the accuracy of holding the assigned track, caused by high air traffic density, flight duration and special missions, also required the solution of the 4D navigation problem, that is, calculation of the assigned time of arrival at the assigned waypoint.

Keywords: Flight Management System, Standard Instrument Departure, Standard Instrument Arrival, 4D navigation, flight plan

For citation: Groshev V.V., Zaitseva N.A., Tumaev M.D. Flight management system is the core. *Trudy MAI*. 2025. No. 141. (In Russ.). URL: <https://trudymai.ru/eng/published.php?ID=184514>

Интенсивность воздушного движения, требования по безопасности полетов, а также необходимость решения воздушным судном (ВС) целого ряда специальных задач, таких как перевозка пассажиропотока, доставка и выброс груза в заданном районе, поисковые работы и т. д., приводят к необходимости применения разнообразного бортового оборудования и к увеличению его количества на борту. Объединение различных видов навигационного оборудования привела к созданию навигационных комплексов (НК), основной задачей которых является обеспечение полетов воздушных судов различного класса и назначения.

Указанные особенности потребовали применения новых средств навигации, которые бы обеспечили с одной стороны безопасность полетов в любых районах, а с другой стороны позволили бы решать задачи, стоящие перед ВС с заданным уровнем точности [1, 2].

Современные навигационные комплексы, имея в своем составе сложное навигационное оборудование, обеспечивают выполнение полетов в любых физико-географических условиях на принципах зональной навигации [3]. В задачу навигационного комплекса входит автоматическое определение координат местоположения самолета, расчет траектории полета по имеющимся в навигационной базе данных промежуточным пунктам маршрута, включая этапы

взлета и захода на посадку [4], а также формирование управляющих сигналов для их выдачи в систему автоматического управления (САУ) для выполнения автоматического самолетовождения [5]. Кроме того, в соответствии с ARINC-702A определяется пакет данных для выдачи в систему электронной индикации (СЭИ), предоставляя экипажу информацию, позволяющую обеспечивать визуальный контроль выполнения полета по заданному маршруту [6,].

Основной навигационной задачей на всех этапах полета является [7] - задача определения текущих координат ВС методом счисления пути с их коррекцией по данным радиотехнических средств.

Поскольку методу счисления пути присущи погрешности в определении координат местоположения самолета, в состав НК входят такие средства навигации как радиотехнические системы ближней и дальней навигации (РСБН, РСДН), а также азимутальное и дальномерное оборудование VOR и DME [8, 9] и спутниковая навигационная система.

Современные вычислительные системы самолетовождения (ВСС) принимают информацию от взаимодействующего оборудования, обрабатывают ее и решают задачу информационного обеспечения самолетовождения по заданному маршруту, топливо-временную задачу и задачу выдерживания расписания [4].

Введение спутниковых навигационных систем вносит новое содержание в навигационное обеспечение полетов, поскольку они гарантируют точность позиционирования, которая на порядок, а в дифференциальном режиме и на два порядка выше, чем у радиотехнических систем ближней и дальней навигации, а также изменили формулировку понятия зональная навигация — это метод навигации, который позволяет выполнять полет по любой желаемой траектории. Зональная навигация делится на 3 уровня: 2D (горизонтальная навигация), 3D (вертикальная навигация) и 4D (прибытие в контрольный пункт маршрута в заданное время) [10, 11, 12].

В настоящее время в целях совершенствования структуры воздушного пространства и упрощения обслуживания воздушного движения согласно документа ИКАО Doc 9854 (Глобальная эксплуатационная концепция ОрВД) к эксплуатантам ВС

предъявляется требование производства полетов по заранее определенным трассам, схемам вылета и прибытия с использованием метода зональной навигации [13, 14]. Доступность навигационного обслуживания определяется траекторией полета, остатком времени полета до контрольной точки RTA и летно-техническими характеристиками воздушного судна, которые не могут быть заданы в процентах доступности этой функции. Если система предоставляет расчет ожидаемого времени полета к контрольной точке, то максимальная ошибка должна быть меньше, чем 1% времени, оставшегося для полета к этой контрольной точке по введенным данным об условиях полета и по плану полета.

Со стороны гражданской авиации предъявляется высокий уровень требований к ВСС, которая на всех этапах полета должна быть безопасной, эффективной, экономически выгодной, всепогодной и обладающей высокой степенью целостности навигационной информации [16].

ВСС представляет собой комплексную бортовую систему, которая включает в себя навигационную базу данных, вычислитель, пульт управления и индикации, формируя информацию для автоматической системы управления полетом [17]. Конструктивно вычислитель может быть совмещен или не совмещен с пультом управления и индикации, который является интерфейсом с экипажем.

Современное развитие вычислительной техники позволяет создавать вычислительные системы самолетовождения, программное обеспечение которых может решать разнообразные по сложности и выполняемым функциям задачи, обеспечивая экипаж необходимой информацией [18]. На рисунке 1 приведен перечень основных задач, решаемых современной навигационной вычислительной системой [19].



Рис. 1. Функции ВСС

К основным функциям относятся: навигация, планирование полета, самолетовождение в горизонтальной и вертикальной плоскостях, оптимизация и расчет взлетно-посадочных характеристик, интерфейс с пилотом через индикаторы системы электронной индикации (СЭИ) и многофункциональный пульт управления и индикации (МФПУ).

Комплексная обработка навигационной информации датчиков – на основании информации навигационных датчиков, взаимодействующих с ВСС, выбирается информация тех датчиков, которые обеспечивают наивысшую точность позиционирования с выполнением непрерывного контроля за качеством выходной информации и в случае необходимости проводится реконфигурация используемой информации или выдача сообщения о невозможности выдерживания требуемой точности.

Выходные сигналы содержат информацию о местоположении в координатах широты, долготы, высоты, о скорости воздушной и путевой и истинном путевом угле, о ветре, об истинном и магнитном курсе, угле сноса, магнитном склонении и инерциальном угле наклона траектории.

Планирование полета. Эта функция определяет последовательность прохождения пунктов маршрута, воздушных трасс, выдерживания заданного

эшелоны полета, процедуры вылета и прибытия, определенные диспетчером для полета из исходной точки в пункт назначения и альтернативные маршруты [7, 19]. Модуль «Формирование плана полета» предназначен для обеспечения пилота быстрыми и эффективными средствами создания плана полета, а также дружественным интерфейсом внесения изменений плана полета в случае необходимости или по требованию службы УВД.

Воздушная навигация осуществляется в пространстве 4D, что требует формирования пространственной траектории для всех этапов полета, к которым относятся: взлет; полет по стандартной схеме вылета – SID; полет по маршруту; выход в зону аэродрома прибытия; полет по стандартной схеме прибытия – STAR; заход на посадку; посадка.

Каждый их перечисленных этапов имеет свои особенности и требуют согласованных мероприятий по формированию параметров и их выдерживанию между ВСС и САУ для выполнения заданной пространственной траектории.

Горизонтальные аспекты формирования траектории определяют географически фиксированную на земле траекторию от пункта вылета до пункта назначения. Основные задачи, которые решаются при этом:

- определение пунктов маршрута (ПМ), которые могут быть получены из аэронавигационной базы данных (НБД), введены пилотом, или получены по линии передачи данных;
- определение типа участка маршрута;
- определение этапа перехода с участка на участок;
- тактические операции, например, «Прямо на», боковое смещение или зона ожидания.

Вертикальные аспекты [6] формирования траектории определяют профиль пути от начала до пункта назначения. Основные задачи, решаемые при этом:

- определение высоты пролета ПМ с учетом ограничения, определенного в НБД, либо заданного пилотом;

-определение скорости на каждом участке маршрута с учетом ограничений, определенных в НБД, а также летно-техническими характеристиками (ЛТХ) для данного ВС;

-определение вертикального угла наклона траектории полета на каждом участке маршрута с учетом ограничений, определенных ЛТХ данного ВС;

Функция формирования плана полета проектируется таким образом, чтобы обеспечить максимальный уровень безопасности. Для этого требуется разработка многочисленных встроенных защитных мероприятий от несанкционированных действий, как например:

-при вводе точки маршрута при подтверждении ввода индицируются координаты и регион;

-при наличии большого излома на маршруте выдается предупреждение об этом и цветом выделяется конкретный участок в плане полета.

Кроме того, все изменения сначала происходят в модифицированном плане и только после подтверждения экипажем модификации плана автоматически попадают в активный план полета, либо могут быть отменены.

Формировать план полета можно следующими способами:

-загрузить предварительно сохраненный маршрут;

-загрузить маршрут из базы данных маршрутов авиакомпании;

-загрузить маршрут из базы данных маршрутов пилота;

-создать новый маршрут, задавая его вручную.

-получить по линии передачи данных.

План полета может быть введен вручную с МФПУ. Навигационная база данных ВСС содержит все необходимые данные, связанные с каждым элементом плана для всех этапов полета ВС [20].

Самолетовождение в горизонтальной и вертикальной плоскостях. Управление в горизонтальной плоскости обеспечивает полет по ортодромии от одного участка к другому в соответствии с заданным планом полета [6]. Пример такого маршрута приведен на рисунке 2. Управляющим сигналом в горизонтальной плоскости является заданный крен – $\gamma_{зад}$. На рис. 2. приведен пример составления плана полета от

аэродрома вылета из Тюмени код аэродрома -USTR) до аэродрома назначения в Москве (код аэродрома Шереметьево –UUEE). План полета включает аэродромы вылета и посадки, участки воздушных трасс и зоны ожидания, стандартные схемы вылета и прибытия.

При выполнении плана полета, возможно, его оперативные изменения. На рис. 2. показано несколько вариантов таких изменений, а именно: полет с параллельным смещением, спрямление на точку ПМ35 и задание зоны ожидания. Все эти и другие варианты изменения плана полета предусмотрены предлагаемым алгоритмом и реализованы в программном модуле.

Модуль самолетовождения обеспечивает пилота быстрыми и эффективными средствами создания плана полета, а также дружественным интерфейсом внесения изменений в план полета по желанию пилота, или по требованию УВД посредством пульта МФПУ или системы МФИ.

Кроме того, в плане полета для каждого из участков рассчитываются следующие параметры: дальность данного участка, заданный путевой угол, время прибытия и остаток топлива. Считаются итоговые данные – дальность по маршруту, время прибытия в аэропорт посадки и остаток топлива. Возможность ввода данных по ветру для промежуточных пунктов маршрута позволяет повысить точность топливно-временных расчетов.

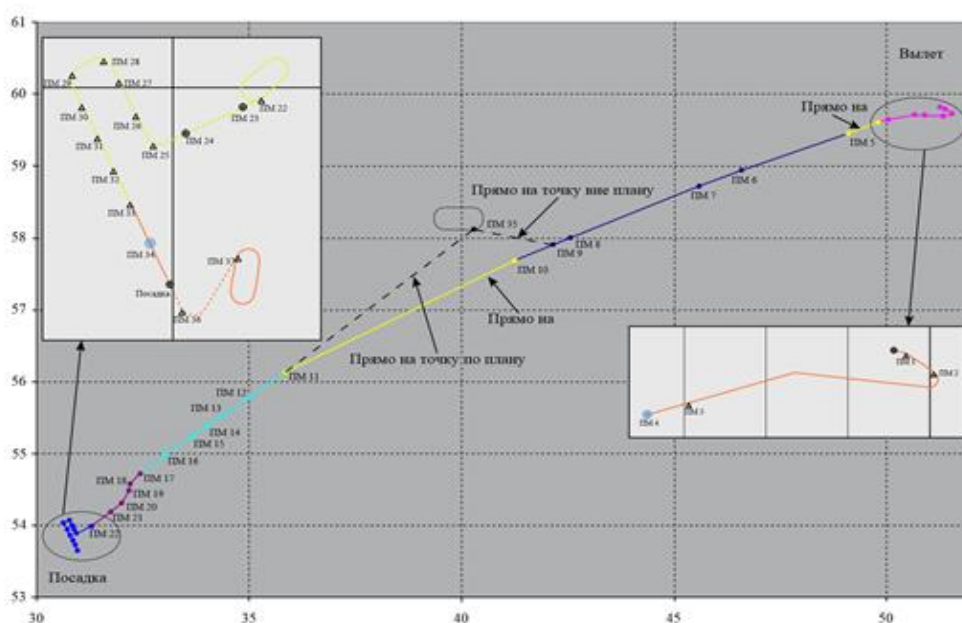


Рис. 2. Схема маршрута со схемами вылета и прибытия

Информация, получаемая в вычислительной системе, должна удовлетворять требованиям по точности, установленным для запланированного этапа полета и определяемым требуемыми навигационными характеристиками, установленными в документе [9].

Вертикальные аспекты формирования траектории определяют профиль пути от точки старта до пункта назначения. Основные задачи, решаемые при этом:

- определение высоты пролета ПМ с учетом ограничения, определенного в НБД, либо заданного пилотом, а также ее выдерживание при выполнении полета;
- определение скорости на каждом участке маршрута с учетом ограничений, определенных в НБД с учетом летно-технических характеристик для данного ВС, и ее выдерживание;
- определение вертикальных углов наклона траектории полета по очередному участку маршрута с учетом ограничений, определенных ЛТХ данного ВС.

Особенно важными и ответственными этапами с точки зрения обеспечения безопасности полета являются взлет, вылет по стандартной схеме SID, выполнение стандартной схемы прибытия и заход на посадку. На этих этапах главную роль играют указания службы УВД, которые, исходя из класса ВС, данных, полученных с борта ВС и внешних факторов, назначают ту или иную схему вылета или прибытия.

Модуль самолетовождения в вертикальной области обеспечивает выполнение следующих функций:

- формирование ПП в вертикальной плоскости;
- формирование пространственной траектории в соответствии с планом полета;
- формирование управляющих сигналов $\theta_{\text{зад}}$, $I_{\text{прзад}}$, $M_{\text{зад}}$ для обеспечения самолетовождения в вертикальной плоскости в соответствии с заданным ПП на всех этапах полета: взлет, набор высоты, крейсерский полет, снижение, заход на посадку, уход на второй круг;
- изменение ПП в вертикальной плоскости;

- выбор рекомендованной схемы вылета;
- расчет оставшегося времени и расстояния до начала снижения в заданную точку;
- расчет оптимального профиля набора высоты при задании режима набора;
- расчет параметров плана полета;
- контроль и сигнализацию отклонений от заданной пространственной траектории полета.

Модуль самолетовождения в вертикальной плоскости состоит из набора процедур, выполняющих следующие функции:

- процедура расчета параметров вертикального профиля схем SID/STAR/APPR для заданной ВПП, заданного аэродрома вылета/посадки;
- процедура расчета этапа набора/снижения, определение местоположения точек вертикального профиля ТОС, TOD (расстояние до ближайшего следующего ПМ) в общем плане полета;
- процедура расчета параметров вертикального профиля участков набора/снижения на маршруте;
- процедура расчета параметров плана полета (широта, долгота, ЗПУ, магнитное склонение, заданная приборная скорость/Мах) для точек вертикального профиля ТОС, TOD;
- процедура расчета приборных скоростей для каждого этапа полета в зависимости от заданного режима оптимизации.

Все перечисленные процедуры в процессе расчетов основываются на информации навигационной базы данных и базы данных летно-технических характеристик. В качестве примера формирования плана полета (рис. 3). в вертикальной плоскости рассмотрим вертикальный профиль маршрута (Тюмень, код аэродрома – URST) – Москва (код аэродрома – UUEE).

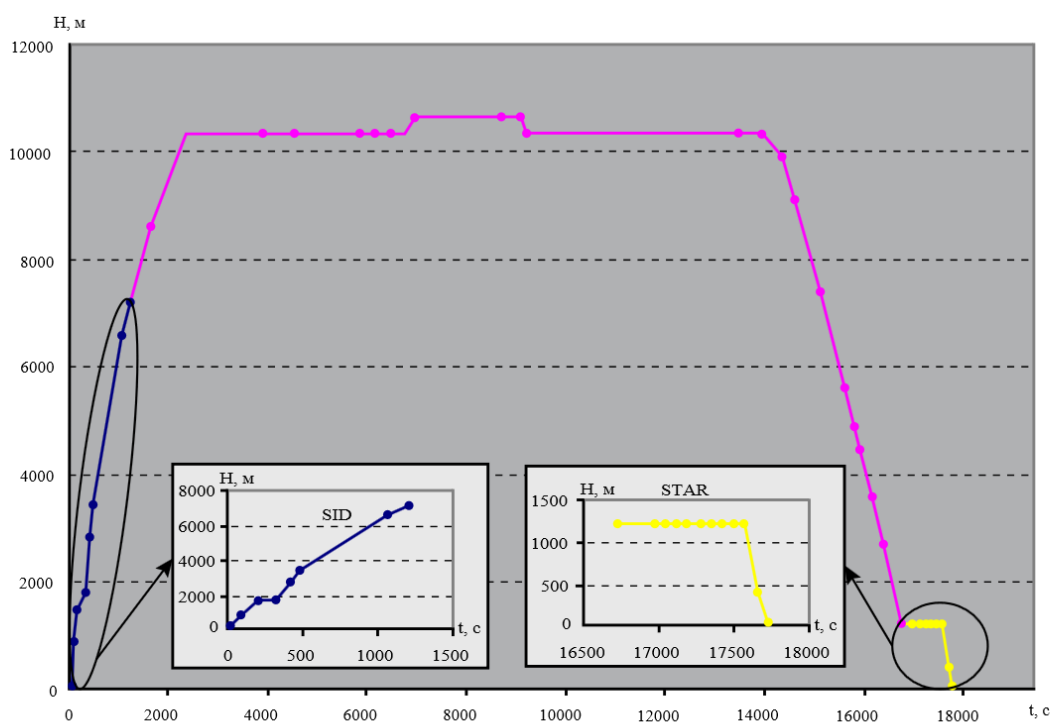


Рисунок 3. Вертикальный профиль

Топливо–временная задача. Одним из основных требований для гражданской авиации является обеспечение высокой экономической эффективности эксплуатации ВС. Под экономичностью полета ВС понимается достижение такого сочетания параметров полета, которое обеспечивает наиболее высокие экономические показатели. Для решения проблем оптимизации различных ВС принято было рассматривать типовые схемы планируемых полетов с целью определения их этапов и участков, характеризующихся определенными параметрами движения, например постоянством высот, набором или снижением высоты, переходом на другой эшелон, взлет и т.д. Это было необходимо для определения требуемого и возможного метода определения оптимальных параметров движения ВС по этапам и участкам. Формирование плана полета в ВСС с помощью Базы аэронавигационных данных позволяет определять участки траектории как расстояния между двумя последовательными ППМ и этапы полета с помощью анализа изменения параметра или ряда параметров движения ВС.

При оптимизации режимов полета, принято выделять четыре участка: набор (выход на эшелон), маршрут, изменение высоты эшелона, снижение. [20] Для разработки ПО ВСС в части оптимизации этапов набора и снижения рекомендуется

применять энергетический метод, требующий знание балансировочных характеристик ВС. Для маршрута приняты следующие оптимальные режимы полета с использованием следующих критериев оптимальности:

-минимальный километровый расход топлива Q_{\min} ,

-критерий максимальной маршрутной дальности полета (**критерий LRC**), определение оптимальной высоты полета аналогично; оптимальные скорости определяются на основе характеристик удельной дальности UD , уменьшенных на 1%.

-критерий минимальной полной стоимости, или экономический (**ЭКОН**) позволяет учитывать стоимостные затраты, приходящиеся на один полет ВС.

К ним относятся стоимость топлива, израсходованная в полете, стоимость эксплуатации ВС и его оборудование, заработная плата обслуживающего персонала, заработная плата экипажа. Экономический критерий позволяет авиакомпаниям оценивать рентабельность эксплуатации каждого конкретного ВС и перераспределять имеющиеся у нее ресурсы с учетом убыточных статей затрат.

Оптимальная высота полета определяется с учетом наивыгоднейшей высоты по предельной высоте или по потоку эффективной скороподъемности. Расчет оптимальных скоростей основывается на определении максимального значения характеристики удельной дальности UD , представляемой в составе ЛТХ ВС и являющейся обратной величиной по отношению к километровому расходу топлива ($UD = 1/q_{\text{км}}$).

При таком построении ПО аппаратуры ВСС используется модульно-иерархический принцип построения [21, 22], который обеспечивает:

- унификацию межмодульного обмена;
- взаимную независимость модулей ПО;
- простоту наращивания и модификации решаемых задач.

Для реализации принципа структурного построения, ПО разбивается на модули, каждый из которых выполняет законченную функцию и обменивается с взаимодействующими модулями строго определенным набором параметров.

В Московском институте электромеханики и автоматики накоплен более чем двадцатилетний опыт разработки таких систем, уровень сложности которых с каждой разработкой возрастает. Архитектура программного обеспечения построена с использованием модульных принципов и позволяет наращивать количество решаемых задач, не затрагивая ее базовой части. Это позволяет иметь различные модификации ВСС для самолетов различного класса и назначения.

Список источников

1. Кушельман В.Я. Стулов А.В. Навигация будет точнее и надежнее // Воздушный транспорт. 2015. № 3. С. 33-37.
2. Minimum Operational Performance Standards for Required Navigation Performance for Area Navigation//RTCA, Inc. 1150 Suite 910 Washington DC 20036 USA, 2015, 250 p.
3. Михайлов Н.А. Воздушная навигация. Международные полеты. – Новосибирск: Бэсттек-Авиа, 2000. - 169 с.
4. Грошев В.В., Зайцева Н.А., Кузнецов А.Г. Функциональное обеспечение современных систем самолетовождения // Труды ФГУП «НПЦ АП им. академика Н.А. Пилюгина». 2009. № 4. С. 43–47.
5. Бесекерский В.А., Попов Е.П. Теория автоматического регулирования. - М.: Наука, 1975. – 768 с.
6. Данилин П.Е., Зайцева Н.А., Кочнева Е.В. Построение заданной траектории стандартной схемы вылета/прибытия по данным аэронавигационной базы данных // Труды ФГУП «НПЦ АП им. академика Н.А. Пилюгина». 2009. № 4. С. 36–42.
7. Парусников Н.А. Теория навигационных систем. - М.: Изд-во Московского университета, 1980. – 227 с.
8. Харин Е.Г. Комплексная обработка информации навигационных систем летательных аппаратов. - М.: Изд-во МАИ, 2002. - 259 с.
9. Афенко К.А., Данилин П.Е., Зайцева Н.А., Кочнева Е.В., Потехин В.Г. Применение двухступенчатого фильтра при решении задачи позиционирования // Труды МИЭА. Навигация и управление летательными аппаратами. 2010. № 2. С. 52-59.

10. Лунев Е.М., Неретин Е.С., Будков А.С. Разработка и исследование траекторного управления при полете по маршрутам четырехмерной зональной навигации // Труды МАИ. 2017. № 95. URL: <https://trudymai.ru/published.php?ID=84531>
11. Шакина Н.П., Иванова А.Р. Прогнозирование метеорологических условий для авиации. - М.: Триада ЛТД, 2016. - 312 с.
12. Зайцева Н.А., Калинина И.В., Добрянин Е.А. О выдерживании времени прибытия в контрольную точку // Труды МИЭА. Навигация и управление летательными аппаратами. 2022. № 39. С. 75-86.
13. Вовк В.И., Липин А.В., Сарайский Ю.Н. Зональная навигация. - СПб: Центр автоматизированного обучения, 2004. – 128 с.
14. Остославский И.В., Стражева И.В. Динамика полета. Траектории летательных аппаратов. - М.: Машиностроение, 1969. – 500 с.
15. Кузнецов А.Г., Зайцева Н.А. К вопросу анализа концепции организации воздушного пространства // Труды МИЭА. Навигация и управление летательными аппаратами. 2019. № 27. С. 31-40.
16. Крюков С.П., Бодрунов С.Д., Александровская Л.Н., Аронов И.З. и др. Методы анализа и оценивание рисков в задачах менеджмента безопасности сложных технических систем. - СПб: Корпорация «Аэрокосмическое оборудование», 2007. - 453 с.
17. Федосов Е.А., Косьянчук В.В., Сельвесюк Н.И. Интегрированная модульная авионика // Радиоэлектронные технологии. 2015. № 1. С. 66–71.
18. Черный М.А., Кораблин В.И. Самолетовождение. - М.: Изд-во Транспорт, 1973. – 368 с.
19. Грошев В.В., Зайцева Н.А., Кузнецов А.Г., Стрелков В.Т. Структура программно-математического обеспечения вычислительной системы самолетовождения // Труды МИЭА. Навигация и управление летательными аппаратами. 2011. № 3. С. 64-69.
20. Скрипниченко С.Ю. Оптимизация режимов полёта по экономическим критериям. – М.: Машиностроение, 1988. – 151 с.

21. Титов А.Г., Неретин Е.С., Дудкин С.О., Брусникин П.М. Разработка архитектуры бортового сервера данных для применения в составе комплекса радиоэлектронного оборудования с применением концепции интегрированной модульной авионики // Труды МАИ. 2019. № 105. URL: <https://trudymai.ru/published.php?ID=104257>
22. Бусурин В.И., Медведев В.М., Карабицкий А.С., Гроппа Д.В. Алгоритмы анализа цифровой информации для оптимизации контроля систем управления // Труды МАИ. 2017. № 97. URL: <https://trudymai.ru/published.php?ID=87277>

References

1. Kushel'man V.YA. Stulov A.V. Navigation will be more accurate and reliable. *Vozdushnyi transport*. 2015. No. 3. P. 33-37. (In Russ.)
2. *Minimum Operational Performance Standards for Required Navigation Performance for Area Navigation*//RTCA, Inc. 1150 Suite 910 Washington DC 20036 USA, 2015, 250 p.
3. Mikhailov N.A. *Vozdushnaya navigatsiya. Mezhdunarodnye polety* (Air navigation. International flights). Novosibirsk: Besttek-Avia Publ., 2000. 169 p.
4. Groshev V.V., Zaitseva N.A., Kuznetsov A.G. Functional support of modern aircraft propulsion systems. *Trudy FGUP «NPTS AP im. akademika N.A. Pilyugina»*. 2009. No. 4. P. 43–47. (In Russ.)
5. Besekerskii V.A., Popov E.P. *Teoriya avtomaticheskogo regulirovaniya* (Theory of automatic control). Moscow: Nauka Publ., 1975. 768 c.
6. Danilin P.E., Zaitseva N.A., Kochneva E.V. Construction of a given trajectory of a standard takeoff/arrival scheme based on aeronautical database data. *Trudy FGUP «NPTS AP im. akademika N.A. Pilyugina»*. 2009. No. 4. P. 36–42. (In Russ.)
7. Parusnikov N.A. *Teoriya navigatsionnykh sistem* (Theory of navigation systems). Moscow: Izd-vo Moskovskogo universiteta Publ., 1980. 227 p.
8. Kharin E.G. *Kompleksnaya obrabotka informatsii navigatsionnykh sistem letatel'nykh apparatov* (Integrated processing of flight equipment navigation information). Moscow: Izd-vo MAI Publ., 2002. 259 p.

9. Afenko K.A., Danilin P.E., Zaitseva N.A., Kochneva E.V., Potekhin V.G. Application of a two-stage filter for solving positioning problems. *Trudy MIEA. Navigatsiya i upravlenie letatel'nymi apparatami*. 2010. No. 2. P. 52-59. (In Russ.)
10. Lunev E.M., Neretin E.S., Budkov A.S. Development and study of aircraft trajectory control model while flying en-route of four-dimensional area navigation. *Trudy MAI*. 2017. No. 95. (In Russ.). URL: <https://trudymai.ru/eng/published.php?ID=84531>
11. Shakina N.P., Ivanova A.R. *Prognozirovanie meteorologicheskikh uslovii dlya aviatsii* (Forecasting meteorological services for aviation). Moscow: Triada LTD Publ., 2016. 312 p.
12. Zaitseva N.A., Kalinina I.V., Dobryanin E.A. On maintaining the time of arrival at the control point. *Trudy MIEA. Navigatsiya i upravlenie letatel'nymi apparatami*. 2022. No. 39. P. 75-86. (In Russ.)
13. Vovk V.I., Lipin A.V., Saraiskii Yu.N. *Zonal'naya navigatsiya* (Zonal navigation). Saint Petersburg: Tsentr avtomatizirovannogo obucheniya Publ., 2004. 128 p.
14. Ostoslavskii I.V., Strazheva I.V. *Dinamika poleta. Traektorii letatel'nykh apparatov* (Dynamics of a flight. Trajectories of lethal devices). Moscow: Mashinostroenie Publ., 1969. 500 p.
15. Kuznetsov A.G., Zaitseva N.A. On the issue of analysis of airspace organization concepts. *Trudy MIEA. Navigatsiya i upravlenie letatel'nymi apparatami*. 2019. No. 27. P. 31-40. (In Russ.)
16. Kryukov S.P., Bodrunov S.D., Aleksandrovskaia L.N., Aronov I.Z. et al. *Metody analiza i otsenivanie riskov v zadachakh menedzhmenta bezopasnosti slozhnykh tekhnicheskikh sistem* (Methods of risk analysis and management in complex technical systems safety management tasks). Saint Petersburg: Korporatsiya «Aerokosmicheskoe oborudovanie» Publ., 2007. 453 p.
17. Fedosov E.A., Kos'yanchuk V.V., Sel'vesyuk N.I. Integrated modular avionika. *Radioelektronnye tekhnologii*. 2015. No. 1. P. 66–71. (In Russ.)
18. Chernyi M.A., Korablin V.I. *Samoletovozhdenie* (Airplane piloting). Moscow: Izd-vo Transport Publ., 1973. 368 p.

19. Groshev V.V., Zaitseva N.A., Kuznetsov A.G., Strelkov V.T. Structure of the program-mathematical support of the aircraft propulsion computing system. *Trudy MIEA. Navigatsiya i upravlenie letatel'nymi apparatami*. 2011. No. 3. P. 64-69. (In Russ.)
20. Skripnichenko S.Yu. *Optimizatsiya rezhimov poleta po ekonomicheskim kriteriyam* (Flight mode optimization according to economic criteria). Moscow: Mashinostroenie Publ., 1988. 151 p.
21. Titov A.G., Neretin E.S., Dudkin S.O., Brusnikin P.M. Developing the onboard data server for application as a part of radio-electronic equipment employing the concept of integrated modular avionics. *Trudy MAI*. 2019. No. 105. (In Russ.). URL: <https://trudymai.ru/eng/published.php?ID=104257>
22. Busurin V.I., Medvedev V.M., Karabitskii A.S., Groppa D.V. Algoritmy analiza tsifrovoi informatsii dlya optimizatsii kontrolya sistem upravleniya. *Trudy MAI*. 2017. No. 97. (In Russ.). URL: <https://trudymai.ru/eng/published.php?ID=87277>

Статья поступила в редакцию 22.11.2024

Одобрена после рецензирования 05.12.2024

Принята к публикации 25.04.2025

The article was submitted on 22.11.2024; approved after reviewing on 05.12.2024; accepted for publication on 25.04.2025