

На правах рукописи



МАРАСАНОВ ЛЕОНИД ОЛЕГОВИЧ

**МЕТОД ОЦЕНКИ СООТВЕТСТВИЯ ТРЕБОВАНИЯМ
ЭКСПЛУАТАЦИОННЫХ РАЗРЕШЕНИЙ В ЧАСТИ
АВТОМАТИЧЕСКОГО САМОЛЕТОВОЖДЕНИЯ ВОЗДУШНЫХ
СУДОВ ГРАЖДАНСКОЙ АВИАЦИИ**

Специальность 05.22.14 — Эксплуатация воздушного транспорта

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

МОСКВА 2022

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Московский государственный технический университет гражданской авиации (МГТУ ГА)»

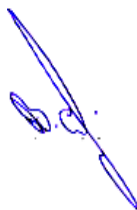
- Научный руководитель:** доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой Технической эксплуатации авиационных электросистем и пилотажно-навигационных комплексов (ТЭ АЭС и ПНК) МГТУ ГА
Кузнецов Сергей Викторович
- Официальные оппоненты:** доктор технических наук, доцент, главный конструктор тематического направления ТН-31 АО МНПК «Авионика»
Бронников Андрей Михайлович
- кандидат технических наук, заместитель генерального директора ООО «Экспериментальная мастерская НаукаСофт»
Патрикеев Андрей Павлович
- Ведущая организация:** Государственный научный центр РФ ФГУП «Государственный научно-исследовательский институт авиационных систем» (ФГУП ГосНИИАС).

Защита состоится 27 апреля 2022 года в 16:00 на заседании Диссертационного совета Д.223.011.01 при Федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Московский государственный технический университет гражданской авиации» (ФГБУ ВО «МГТУ ГА») по адресу: 125993, Москва, бул. Кронштадтский, д. 20.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ФГБУ ВО «МГТУ ГА» и на сайте ФГБУ ВО «МГТУ ГА» www.mstuca.ru по ссылке: <http://www.mstuca.ru/science/dissertCouncil/marasanov-leonid-olegovich.php>

Автореферат разослан " ____ " _____ 2022г.

Учёный секретарь
диссертационного совета
доктор технических наук, профессор



Самойленко Василий Михайлович

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы исследования. Международная организация гражданской авиации (ГА) ИКАО регламентирует необходимость выдачи эксплуатантам специальных эксплуатационных разрешений, таких как: производство полетов с использованием норм сокращенного минимума вертикального эшелонирования (RVSM - Reduced Vertical Separation Minimum); производство полетов с использованием навигации, основанной на характеристиках (PBN - Performance-based Navigation); осуществления автоматических посадок по категориям САII и САIII ИКАО; производство полетов по нормам EDTO/ETOPS (Extended Twin OperationS/Extended Diversion Time Operations) самолетов с газотурбинными двигателями продолжительностью более 60 мин до запасного аэродрома на маршруте с увеличенным временем ухода на запасной аэродром и к производству полетов на двухмоторном самолёте над мало ориентированной местностью; производство полетов с использованием бортовых систем предупреждения столкновений TCAS (Traffic alert and Collision Avoidance Systems), систем предупреждения о приближении земли EGPWS (Enhanced ground proximity warning systems) и электронной системы бортовой документации EFB (Electronic Flight Bag).

Возможность удовлетворения требованиям эксплуатационных разрешений вытекает из анализа состава, тактико-технических и эксплуатационно-технических характеристик бортового оборудования воздушных судов (ВС) эксплуатанта, программ технического обслуживания и ремонта (ТОиР) организации по ТОиР и ряда других факторов. Это должно происходить на основе научного подхода и с неукоснительным удовлетворением требований всех правовых и нормативных документов, а также анализа точностных характеристик автоматического самолетовождения.

В связи с этим представляется актуальным разработать метод оценки соответствия требованиям эксплуатационных разрешений в части автоматического самолетовождения ВС. Это позволит принимать решения о соответствии или несоответствии требованиям на этапе эксплуатации на основе анализа точностных характеристик автоматического самолетовождения, повысит безопасность полетов и снизит затраты на проведение проверок на соответствие.

Результаты данной работы позволят использовать предлагаемый метод при выдаче эксплуатационных разрешений и повысить достоверность принимаемых решений.

Степень разработанности темы исследования. Теоретическим исследованиям оценки точности автоматического самолетовождения посвящено достаточно большое количество работ. Этой проблемой занимались как разработчики бортового оборудования: конструкторские бюро, так и многие исследовательские коллективы, и исследователи в области эксплуатации: Красовский А.А., Буков В.Н., Косьянчук В.В., Бронников А.М., Белгородский С.Л., Воробьев В.Г., Кушельман В.Я.

В работах перечисленных авторов исследовались методы оценки точности автоматического самолетовождения, но эти исследования не применялись для решения задач, возникающих на этапе эксплуатации, в частности, при выдаче эксплуатационных разрешений.

Новые методы математической статистики разработаны Большевым Л.Н., Чибисовым Д.М., Гринвудом П., Никулиным М.С., Мирвалиевым М. и другими. Но, к сожалению, в инженерной практике оценки точности автоматического самолетовождения они не применяются.

Данные обстоятельства указывают на необходимость применения новых методов математической статистики для оценки точности автоматического самолетовождения вообще, и для принятия решения о соответствии этой точности требованиям эксплуатационных разрешений.

Области исследований (по паспорту специальности 05.22.14 Эксплуатация воздушного транспорта):

1. Разработка моделей и методов анализа и оценки уровня эксплуатационно-технических характеристик авиационной техники.
2. Разработка методов и средств информационного обеспечения процессов управления

эксплуатацией авиационной техники.

Объект исследования. Система обработки полетной информации, как подсистема расследования и предупреждения авиационных происшествий и инцидентов, обеспечения авиационной безопасности.

Предмет исследования. Программно-математическое обеспечение оценки точности автоматического самолетовождения, позволяющее решать задачи определения соблюдения требований эксплуатационных разрешений.

Цели и задачи исследований. Целью работы является решение научной задачи по оценке соответствия точности автоматического самолетовождения требованиям эксплуатационных разрешений.

В соответствии с поставленной целью в настоящей работе решены следующие задачи:

- выполнен анализ требований к точностным характеристикам автоматического самолетовождения ВС на этапе эксплуатации для выдачи эксплуатационных разрешений;
- разработан метод оценки соответствия требованиям эксплуатационных разрешений в части автоматического самолетовождения, основывающийся на анализе записей параметров полета;
- разработаны математические модели замкнутых систем «самолет – система автоматического управления»;
- выполнен анализ методов оценок вида функции законов распределения параметров полёта и осуществлен выбор наиболее оптимального из них;
- разработан обобщенный алгоритм выбора вида функции распределения параметров полета для оценки точностных характеристик и алгоритм оценки распределения параметров полета;
- разработано программное обеспечение для оценки точности автоматического самолетовождения на основе записей параметров полёта;
- осуществлена экспериментальная проверка предложенных алгоритмов оценки точностных характеристик и принятия решения о соответствии требованиям эксплуатационных разрешений на основе данных реальных полётов.

Научная новизна диссертационной работы заключается в следующем:

- разработан метод оценки соответствия требованиям эксплуатационных разрешений в части автоматического самолетовождения ВС ГА, обеспечивающий в отличие от известных методов, расширение используемой информации и ее статистическую обработку, а также принятие решений на основе новых математических методов;
- показано, что в режимах автоматического самолетовождения большинство параметров полета ВС, особенно в режиме захода на посадку и посадки, имеет логнормальное распределение функции плотности вероятности;
- разработан алгоритм оценки вида логнормального распределения параметров полёта на базе составленной таблицы с применением критерия Никулина;
- показано, что использование алгоритма увеличивает мощность принятия решения относительно предполагаемой функции распределения в 1,5-2 раза;
- показана работоспособность программно-математического обеспечения метода оценки соответствия на примерах обработки реальной полетной информации.

Теоретическая и практическая значимость работы заключается в определении параметров, характеризующих точность автоматического самолетовождения и регистрируемых бортовыми средствами параметрической информации, статистической обработке этих параметров с помощью современных методов и пакетов прикладных программ, сравнении с требуемыми показателями качества автоматического самолетовождения и принятия решения о соответствии или несоответствии значений параметров требуемым, достаточным для выдачи эксплуатационных разрешений.

Разработанный метод позволяет:

- расширить диапазон использования бортовых средств регистрации параметрической информации в части оценки точности автоматического самолетовождения с учетом

технического состояния бортового оборудования;

- повысить достоверность обработки параметрической информации вследствие применения новых статистических методов;

- повысить объективность принятия решения о соответствии или несоответствии требованиям эксплуатационных разрешений в части автоматического самолетовождения.

Методы исследования. Для решения поставленных задач в работе использованы методы математической статистики и теории принятия решений.

Положения, выносимые на защиту:

- алгоритмы оценки вида функции распределения с применением критерия Никулина для оценки точностных характеристик параметров полета, распределенных по нормальному и логнормальному законам;

- результаты статистического анализа параметров, характеризующих точность автоматического самолетовождения

- метод оценки соответствия требованиям эксплуатационных разрешений в части автоматического управления.

Степень достоверности результатов исследования. Достоверность результатов теоретических исследований в данной работе подтверждается тем, что методы и алгоритмы, разработанные автором, базируются на фундаментальных результатах теории математической статистики, справедливость которых доказана ранее. Результаты оценки адекватности математических моделей подтверждаются реальной эксплуатационной статистикой.

Личный вклад автора состоит в: разработке новых теоретических положений, представленных в настоящей работе - разработке алгоритма оценки вида функции распределения с применением критерия Никулина для оценки точностных характеристик параметров полета, распределенных по нормальному и логнормальному законам; получении результатов статистического анализа параметров, характеризующих точность автоматического самолетовождения; разработке рекомендаций по принятию решений о выдаче эксплуатационных разрешений; подготовке публикаций по материалам настоящей работы.

Апробация результатов исследования. Основные положения работы, научные и практические результаты исследований докладывались и получили положительную оценку на XIII Международной научно-технической конференции "Гражданская авиация на современном этапе развития науки, техники и общества", посвященной 50-летию университета (МНТК-2021), на XII Международной научно-технической конференции "Гражданская авиация на современном этапе развития науки, техники и общества", посвященной 95-летию гражданской авиации (МНТК-2018), на XI Международной научно-технической конференции "Гражданская авиация на современном этапе развития науки, техники и общества", посвященной 45-летию университета (МНТК-2016), на Международной молодежной научной конференции «XLII Гагаринские чтения», 2016г. МАИ, на межвузовской научно-теоретической конференции молодых ученых и аспирантов «Наука. Техника. Человек», 2014г. МГТУГА (г. Москва), на научно-практической конференции студентов и молодых учёных МАИ «Инновации в авиации и космонавтике-2014», на Международной молодежной научной конференции «XXXIX Гагаринские чтения», 2013г., МАТИ, на X Международной научно-технической конференции «Гражданская авиация на современном этапе развития науки, техники и общества», посвященной 90-летию гражданской авиации (МНТК-2013), на научно-практической конференции студентов и молодых учёных МАИ «Инновации в авиации и космонавтике-2012», на IX Международной научно-технической конференции «Гражданская авиация на современном этапе развития науки, техники и общества», посвященной 40-летию МГТУ ГА (МНТК-2011), на научно-практической конференции студентов и молодых учёных МАИ «Инновации в авиации и космонавтике-2011», на научном семинаре в ГосНИИ «Аэронавигация» с докладом «Совершенствование оценок точностных характеристик ЛА», Москва, 27/01/2009 г., на конкурсе научно – технических работ и проектов молодых ученых и специалистов «Молодежь и будущее авиации и космонавтики-2009» МАИ (г. Москва), на международной научно-технической конференции «Гражданская авиация на современном

этапе развития науки, техники и общества», посвященная 85-летию гражданской авиации России, г. Москва, 2008г., на международной научно-технической конференции «Гражданская авиация на современном этапе развития науки, техники и общества», посвященная 35-летию со дня основания университета МГТУГА, Москва, 2006г., на третьей научно-практической конференции «Исследования и перспективные разработки в авиационной промышленности» 2005 г. МАИ (г. Москва).

Публикации. Основные результаты диссертации опубликованы в 11-и печатных работах, 6 из которых опубликованы в изданиях, рекомендованных Высшей аттестационной комиссией при Министерстве науки и высшего образования Российской Федерации (45 с.). 4 публикации в трудах международных и всероссийских конференций (4 с.); 1 публикация в иных изданиях (1 с).

Структура и объём работы. Диссертация в виде рукописи общим объемом 186 страниц машинописного текста, включает в себя введение, основную часть работы (162 с.) из четырёх глав, заключение (с итогами исследования, рекомендациями и перспективами дальнейшей разработки темы работы), список сокращений и условных обозначений, список литературы из 132 наименований, а также 2-х приложений.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность, сформулирована цель, научная новизна и практическая значимость диссертационной работы.

В первой главе проведен анализ требований к точностным характеристикам автоматического самолетовождения ВС на этапе эксплуатации для выдачи эксплуатационных разрешений и сформулирована задача диссертационной работы.

Анализ перечня эксплуатационных разрешений, базирующихся на точности автоматического самолетовождения показывает их довольно широкий спектр и важность методов определения соблюдения требований этих разрешений (рисунок 1). Анализ методов определения соблюдения требований этих разрешений показывает, что не все эксплуатационные разрешения располагают методами определения соблюдения требований. Часть эксплуатационных разрешений располагают такими методами, однако они очень сложны и дорогостоящи в реализации.

В связи с этим возникает идея разработки такого метода оценки соответствия требованиям эксплуатационных разрешений в части автоматического самолетовождения, который базировался бы на анализе записей параметров полета, поступающих с бортовых средств регистрации.

Анализ возможностей использования бортовых регистраторов параметров полета для оценки точности автоматического самолетовождения показывает их широкий спектр и хорошие тактико-технические характеристики в части количества регистрируемых параметров, которые могли бы быть использованы для решения задачи.

Наиболее предпочтительной бортовой системой можно считать интегральную систему управления техническим состоянием (ИСУТС), являющуюся частью системы эксплуатационного контроля (СЭК) и регистрирующую разнообразную полетную информацию, в том числе, необходимую для оценки соответствия требованиям эксплуатационных разрешений, в свою очередь, являющуюся частью системы обработки полетной информации, как подсистемы расследования и предупреждения авиационных происшествий и инцидентов, обеспечения авиационной безопасности.

Анализ наземных средств обработки информации, регистрируемой бортовыми средствами полетной информации, показывает их широкие возможности в части обработки полетной информации, необходимой для оценки соответствия требованиям эксплуатационных разрешений.

Целесообразно применить комплексный подход к оценке точностных характеристик автоматического самолетовождения.

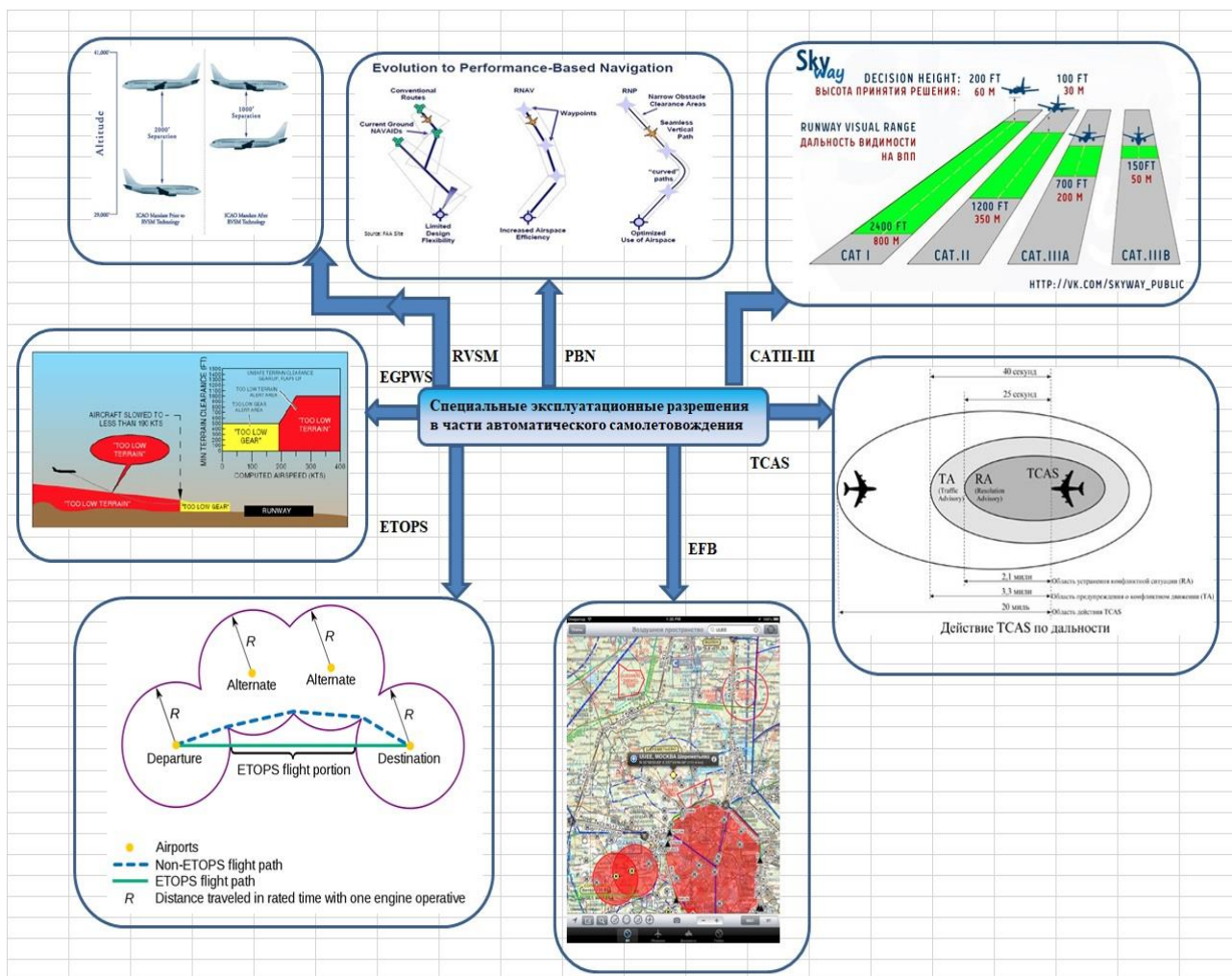


Рисунок 1.1 - Специальные эксплуатационные разрешения в части автоматического самолетовождения

Постановка задачи. Вышесказанное позволяет сделать вывод, что для решения научной задачи по оценке соответствия точности автоматического самолетовождения требованиям эксплуатационных разрешений необходимо:

- разработать метод оценки соответствия требованиям эксплуатационных разрешений в части автоматического самолетовождения, основывающийся на анализе записей параметров полета и включающий математические модели, алгоритмы обработки статистической информации, программное обеспечение и экспериментальную проверку метода;
- разработать математические модели движения самолета в основных режимах автоматического самолетовождения, критичных для выполнения требований эксплуатационных разрешений;
- выполнить анализ методов оценок вида функции законов распределения параметров полета и осуществить выбор наиболее подходящего из них;
- разработать обобщенный алгоритм выбора вида функции распределения параметров полета для оценки точностных характеристик и алгоритма оценки распределения;
- разработать программное обеспечение для оценки точности автоматического самолетовождения на основе записей параметров полета;
- осуществить экспериментальную проверку предложенных алгоритмов оценки точностных характеристик и принятия решения о соответствии требованиям эксплуатационных разрешений на основе данных реальных полетов.

Вторая глава посвящена разработке математических моделей движения самолета в основных режимах автоматического самолетовождения и оценке точностных характеристик.

Выбор и обоснование параметров автоматического самолетовождения для определения качества выполнения эксплуатационных разрешений следует провести, исходя из математических моделей полного пространственного движения самолета и в замкнутых контурах с системами автоматического управления (САУ).

Математическая модель полного пространственного движения самолета описывается системой дифференциальных и тригонометрических уравнений. Для приращений параметров система уравнений в пространстве состояний записывается следующим образом

$$\dot{\mathbf{x}}(t) = \mathbf{A}\mathbf{x}(t) + \mathbf{B}^Y \mathbf{u}^Y(t) + \mathbf{B}^B \mathbf{u}^B(t), \quad (1)$$

где $\mathbf{x}(t)$ - вектор-столбец переменных состояния полного пространственного движения самолета, который в транспонированном виде определяется следующим образом:

$$\begin{aligned} [\mathbf{x}(t)]^T &= [\Delta\omega_z(t), \Delta\alpha(t), \Delta\vartheta(t), \Delta V(t), \Delta\theta(t), \\ &\Delta H(t), \Delta L(t), \Delta\omega_x(t), \Delta\omega_y(t), \Delta\beta(t), \Delta\gamma(t), \Delta\psi(t), \Delta\Psi(t), \Delta z(t)], \end{aligned} \quad (2)$$

Здесь принципиальным является переход от абсолютных значений параметров к их приращениям относительно опорных значений. В частности, для углов атаки, тангажа, наклона траектории, высоты, числа М и скорости

$$\begin{aligned} \alpha &= \alpha^o + \Delta\alpha; & \vartheta &= \vartheta^o + \Delta\vartheta; \\ \theta &= \theta^o + \Delta\theta; & H &= H^o + \Delta H; \\ M &= M^o + \Delta M; & V &= V^o + \Delta V. \end{aligned} \quad (3)$$

В числе параметров продольного движения, меняющихся в режиме стабилизации высоты: ω_z - угловая скорость тангажа, α - угол атаки; ϑ - угол тангажа, H - высота, V - воздушная скорость, θ - угол наклона траектории, L - пройденное самолетом расстояние.

Ключевым параметром является высота. Однако и другие параметры продольного движения имеют важное значение. Без их оценки невозможно определить параметры модели, на основе которой можно было бы принять решение о качестве выдерживания эшелона по правилам RVSM.

В числе параметров бокового движения, меняющихся в режиме стабилизации на линии заданного пути: ω_x - угловая скорость крена; ω_y - угловая скорость рыскания; β - угол скольжения; γ - угол крена, ψ - угол рыскания, Ψ - угол пути, z - линейное боковое отклонение,

Ключевым параметром является линейное боковое отклонение. Однако и другие параметры бокового движения имеют важное значение. Без их оценки невозможно определить параметры модели, на основе которой можно было бы принять решение о качестве выдерживания самолета на линии заданного пути по правилам PBN или качестве стабилизации самолета на глиссаде по правилам CAT I- CAT III.

\mathbf{A} - матрица состояния полного пространственного движения самолета. Векторы-столбцы входа по управляющим воздействиям $\mathbf{u}^Y(t)$ и по внешним возмущениям $\mathbf{u}^B(t)$ в полном пространственном движении самолета имеют вид

$$\begin{aligned} [\mathbf{u}^Y(t)]^T &= [\Delta\delta_B(t), \Delta\delta_x(t), \Delta\delta_y(t), \\ &\Delta\delta_P(t), \Delta\delta_\vartheta(t), \Delta\delta_H(t), \Delta\delta_z(t)]; \end{aligned} \quad (4)$$

$$[\mathbf{u}^B(t)]^T = [\Delta f_x(t), \Delta f_y(t), \Delta m_{zB}(t),$$

$$\Delta \alpha_W(t), \Delta \dot{\alpha}_W(t), \Delta f_z(t), \Delta m_{xB}(t), \Delta m_{yB}(t), \Delta \beta_W(t), \Delta \dot{\beta}_W(t)].$$

(5)

\mathbf{B}^y , \mathbf{B}^B - матрицы входа по управляющим воздействиям и внешним возмущениям.

Проведем анализ параметров полета самолета, которые необходимо оценить в режиме стабилизации высоты. Для этого определим реакцию замкнутой системы «самолет – система автоматического управления САУ_Н» на управляющие воздействия. Дополним модель вынужденного продольного короткопериодического движения самолета уравнением траекторного движения самолета по высоте. Пусть управляющее воздействие на руль высоты создает САУ_Н. Управляющее воздействие по высоте формируется пилотом с помощью задатчика высоты с пульта управления САУ_Н в виде высоты эшелона по правилам RVSM. Тогда модель замкнутой системы “самолет - САУ_Н” будет содержать уравнение состояния, уравнения выхода и входа, а также закон управления САУ_Н:

$$\dot{\mathbf{x}}_{\text{пкт}}(t) = \mathbf{A}_{\text{пкт}} \mathbf{x}_{\text{пкт}}(t) + \mathbf{B}_{\text{пкт}}^y \mathbf{u}_{\text{пкт}}^y(t), \quad (6)$$

$$\mathbf{y}_{\text{пкт}}(t) = \mathbf{x}_{\text{пкт}}(t), \quad (7)$$

$$\mathbf{u}_{\text{пкт}}^y(t) = \Delta \delta_B^{\text{САУ}_N}(t), \quad (8)$$

$$\delta_B^{\text{САУ}_N}(t) = \mathbf{D}_{\text{пкт}}^{\text{САУ}_N} \mathbf{y}_{\text{пкт}}(t) + \mathbf{E}_{\text{пкт}}^{\text{САУ}_N} \Delta H_{\text{зад}}(t), \quad (9)$$

$$\text{где } \mathbf{x}_{\text{пкт}}(t) = \begin{bmatrix} \Delta \omega_z(t) \\ \Delta \alpha(t) \\ \Delta \vartheta(t) \\ \Delta H(t) \end{bmatrix}, \quad \mathbf{A}_{\text{пкт}} = \begin{bmatrix} a_{\omega_z, \omega_z} & a_{\omega_z, \alpha} & 0 & 0 \\ a_{\alpha, \omega_z} & a_{\alpha, \alpha} & 0 & 0 \\ a_{\vartheta, \omega_z} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & a_{H, \alpha} & a_{H, \vartheta} & 0 \end{bmatrix}, \quad \mathbf{B}_{\text{пкт}}^y = \begin{bmatrix} a_{\omega_z, \delta_B} \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix},$$

$$\mathbf{D}_{\text{пкт}}^{\text{САУ}_N} = [k_{\omega_z} \quad 0 \quad k_{\vartheta} \quad k_{\vartheta} \quad k_{\vartheta}^H], \quad \mathbf{E}_{\text{пкт}}^{\text{САУ}_N} = -k_{\vartheta} \quad k_{\vartheta}^H. \quad (10)$$

В работе показано, что статические ошибки являются основными причинами выхода самолета за пределы эшелона и нарушения требований эксплуатационных разрешений в части RVSM, выхода самолета за пределы коридора и нарушения требований эксплуатационных разрешений в части RNP и PBN, выхода самолета за пределы траектории снижения к ВПП и нарушения требований эксплуатационных разрешений в части САТИ-САТИИ.

Статические ошибки являются случайными величинами, а их изменение во времени – случайными процессами, в результате чего они становятся динамическими погрешностями. Вычисление динамических погрешностей в результате вторичной автоматизированной обработки параметров продольного и бокового движения самолета является насущной задачей при определении соблюдения требований эксплуатационных разрешений.

В третьей главе осуществлен выбор методов расчета и разработаны алгоритмы оценки точностных характеристик параметров полёта автоматического самолетовождения. Поставлена и решена задача определения вида функции распределения при оценке точностных характеристик автоматического самолетовождения.

Выбор методов расчёта и оценки точностных характеристик автоматического самолётовождения по зарегистрированным параметрам полёта определяется следующими факторами:

- конкретной задачей, решаемой на каждом этапе полёта;
- показателем точности, который необходимо оценить;
- типом модели погрешностей;
- объёмом и качеством априорной информации.

При этом необходимо учесть два противоречивых требования: с одной стороны, следует использовать математические модели максимально близкие к реальным системам и процессам, с другой стороны, модели должны быть простые, чтобы иметь эффективные алгоритмы расчёта. Основным показателем точности самолётовождения при выполнении различных режимов является вероятность нахождения погрешностей системы «самолет-САУ» в заданной области. В зависимости от этапа полёта, от моделей процесса и системы «самолет-САУ» методы оценки этой вероятности видоизменяются.

Так, для определения вероятности выхода системы «самолет-САУ» в заданный район воздушного пространства или вероятности невыхода за границы заданного коридора полёта в момент прохождения того или иного пункта маршрута для погрешностей, описываемых нормальными процессами, и для линейных систем достаточно применения корреляционной теории и вычисления функции распределения вероятности.

В тех случаях, когда ошибки системы могут быть представлены случайными величинами, задача определения невыхода системы «самолет-САУ» за границы заданной области за время полёта определяется зависимостью:

$$P(z_{н.г.}; z_{в.г.}) = F(z_{в.г.}) - F(z_{н.г.}), \quad (11)$$

где $F(z)$ - функции распределения случайной величины;

$z_{н.г.}$ и $z_{в.г.}$ - двусторонние границы заданной области верхней и нижней границ случайной величины.

Как правило, задача идентификации вида функции распределения решается на основе критерия согласия Хи-квадрат. Но как показали новые исследования в математической статистике, классический критерий согласия Хи-квадрат может давать значительные погрешности. Поэтому в данной работе использован модифицированный критерий Хи-квадрат, который называют критерием М.Никулина.

Иллюстрация задачи оценки точностных характеристик автоматического самолётовождения в режиме захода на посадку представлена на рисунке 2.

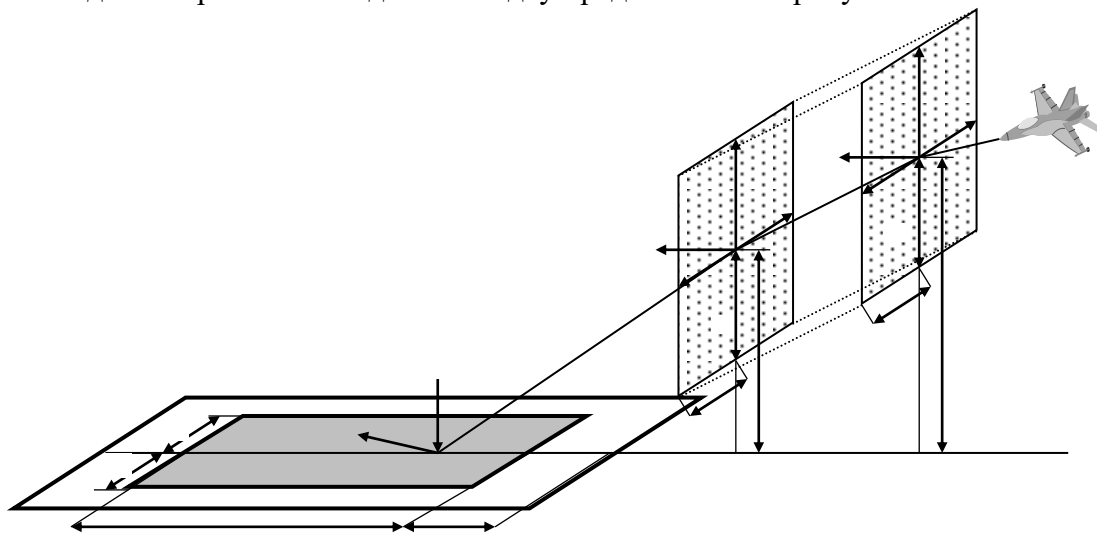


Рисунок 2 - Оценка точностных характеристик автоматического самолётовождения в режиме захода на посадку

Вероятность нахождения вектора параметров полета ВС в заданной области:

$$P_T = P(\vec{X}_3 \in G_3) \geq P_{\text{дон}} = 1 - q_{\text{дон}}, \quad (12)$$

где $q_{\text{дон}}$ - заданная вероятность выхода \vec{X}_3 за область допустимых значений.

\vec{X}_3 - вектор заданных параметров X_3 .

G_3 - область допустимых значений.

Требуется определить вид закона P_T .

Алгоритм оценки точностных характеристик в наиболее общем виде представлен на рисунке 3. Для реализации этого алгоритма необходимо разработать программно-математического обеспечение, которое позволяет определять законы распределения параметров полёта, и их параметры на основе полетных данных на ЭВМ.

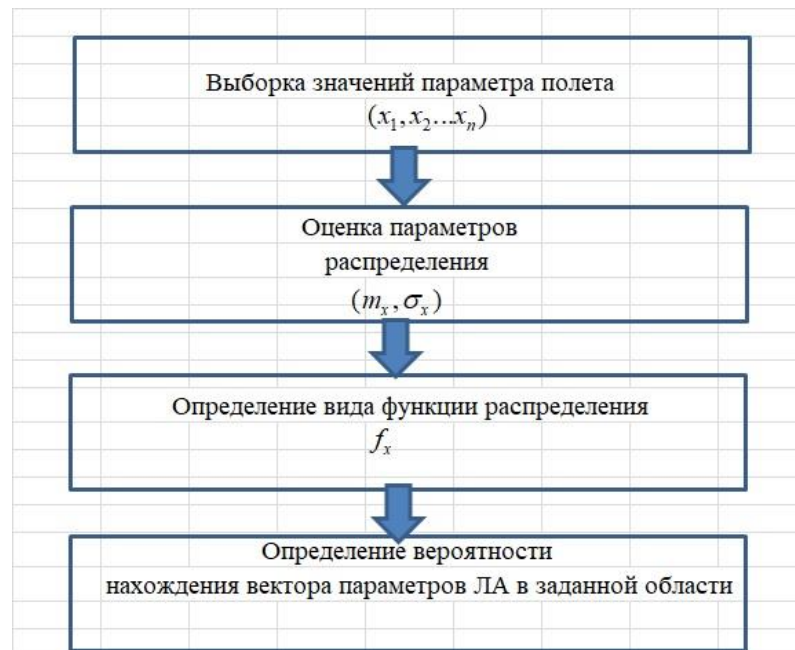


Рисунок 3 - Алгоритм оценки точностных характеристик параметров полета

В работе предлагается статистика $Y_n^2(\theta)$, которая представлена в следующей вычислительной форме:

$$Y^2(\theta) = X^2 + n^{-1} \alpha^T(\theta) \Lambda(\theta) \alpha(\theta), \quad (13)$$

где

$$X^2 = \sum_{j=1}^k \frac{(v_j - np_j)^2}{np_j}, \quad \Lambda(\theta) = \left\| i_{uv} - \sum_{j=1}^k \frac{u_{uj} \omega_{ju}}{p_j} \right\|^{-1} \quad (14)$$

и $\alpha(\theta) = (\alpha_1, \dots, \alpha_s)^T$, причем $\alpha_u = \frac{\omega_{u1} V_1}{p_1} + \dots + \frac{\omega_{uk} V_k}{p_k}$,

$\|i_{uk}\|$ - информационная матрица, соответствующая одному наблюдению ξ_j .

Если в $Y^2(\theta)$ заменить θ любой состоятельной оценкой θ^* (в частности, можно в качестве θ^* выбрать наиболее правдоподобную оценку θ^*), то предельное распределение статистики критерия не изменится, т.е. $Y_n^2(\theta^*)$ имеет в пределе при $n \rightarrow \infty$ распределение Хи-квадрат с $(k-1)$ степенями свободы.

Обобщенный алгоритм проверки критерия согласия Никулина приведен на рисунке 4.



Рисунок 4 - Обобщенный алгоритм проверки критерия согласия Никулина для оценки параметров полета

Блок-схема общего алгоритма оценки вида семейств логарифмически нормального распределения и их параметров представлена на рисунке 5. Для его реализации была использована система компьютерной математики Mathcad, результаты математического моделирования представлены в главе 4.

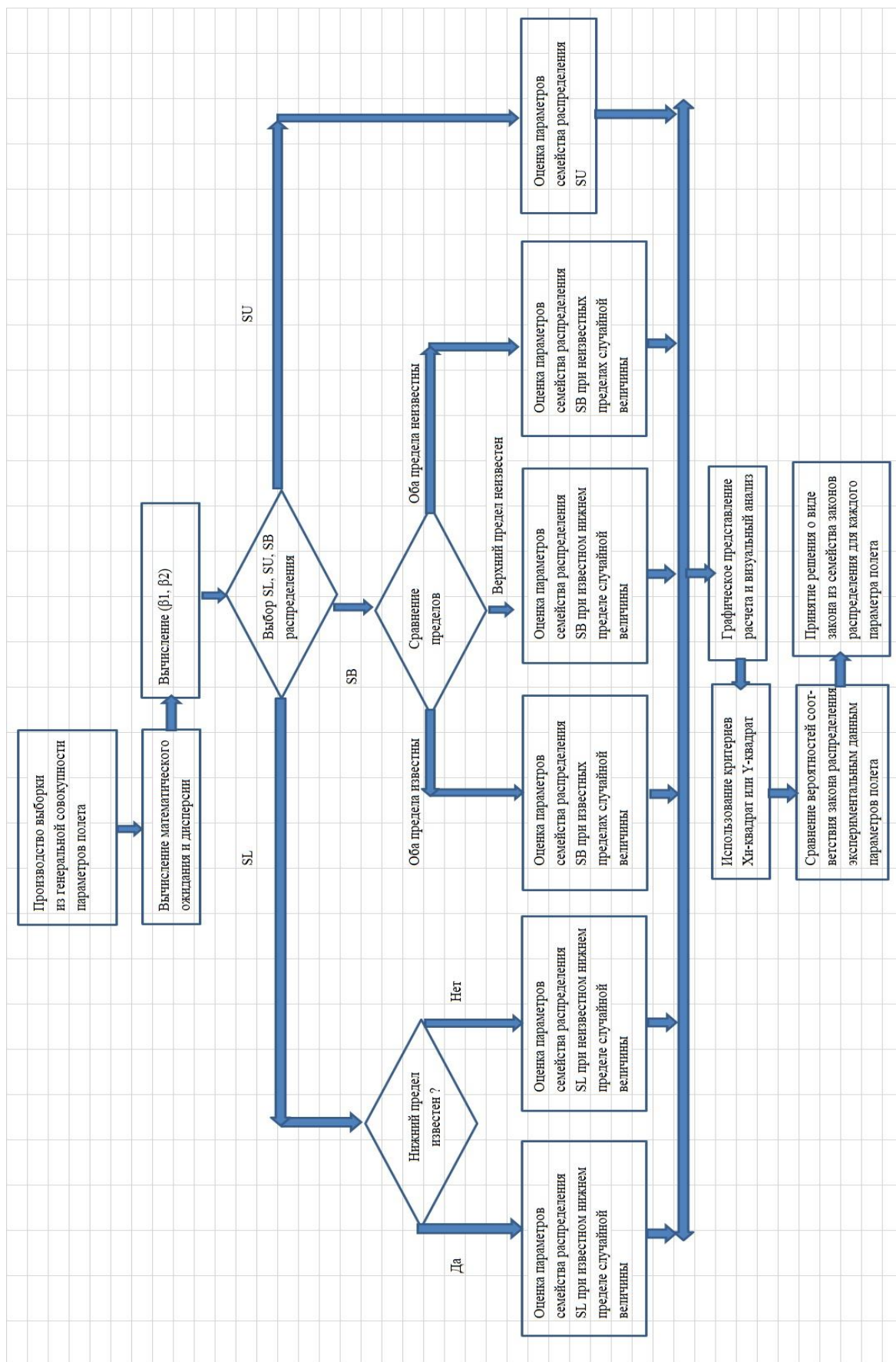


Рисунок 5 - Алгоритм оценки вида семейств логарифмически нормального распределения и параметров полета

Таким образом, сформулирована задача и разработан обобщенный алгоритм оценки точностных характеристик параметров полета. Проведен анализ существующих методов расчета и оценки функций распределения случайных величин для оценки точностных характеристик параметров полета автоматического самолетовождения. Разработаны алгоритмы проверки критерия Хи-квадрат. Проведено обоснование использования модифицированного критерия Хи-квадрат М.Никулина. Разработаны алгоритмы проверки модифицированного критерия согласия Никулина для оценки параметров полета. Из анализа гистограмм выборочных данных параметров полета сделан вывод о лог-нормальном распределении. Разработан алгоритм оценки вида семейств логарифмически нормального распределения и параметров полета.

В четвертой главе представлены результаты математического моделирования оценки точности параметров автоматического самолетовождения при определении соответствия требованиям эксплуатационных разрешений. Рассмотрим результаты исследования и оценку точности режима стабилизации высоты и соответствия требованиям RVSM. Для оценки точности самолетовождения на эшелоне выберем из множества параметров положения и движения самолета (рисунок 6) параметры продольного движения.

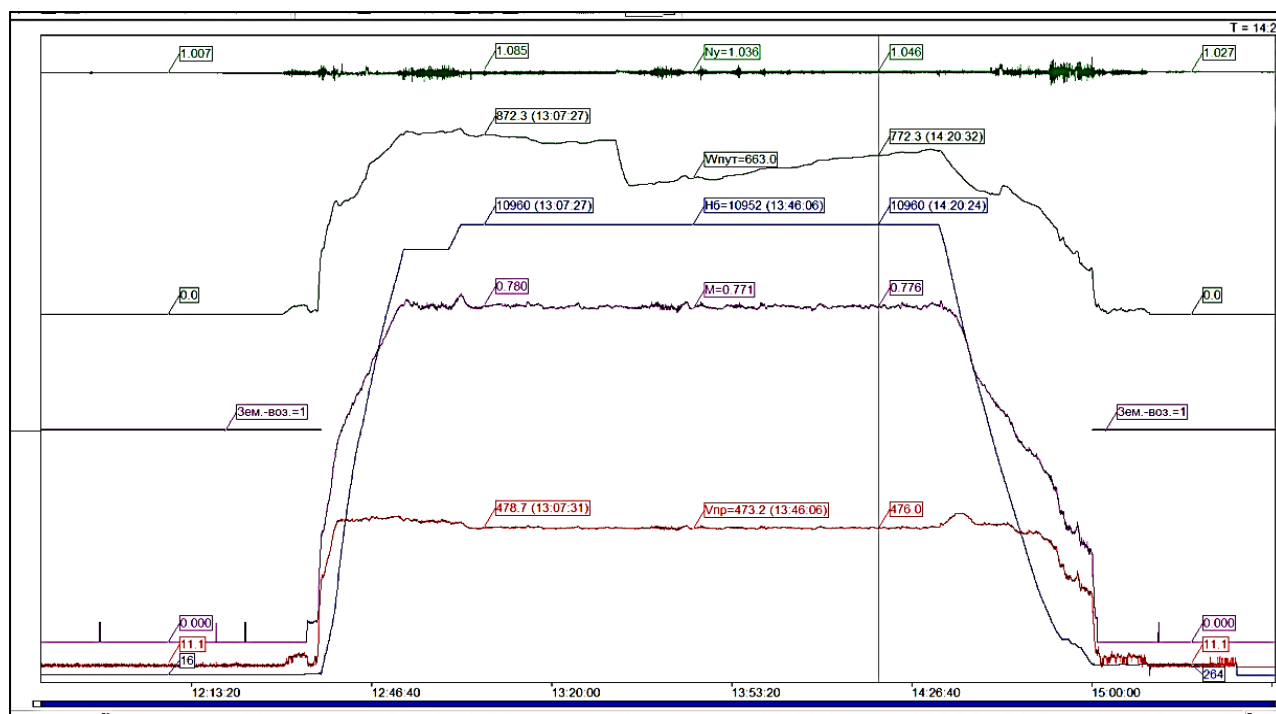


Рисунок 6 - Параметры продольного движения по результатам расшифровки полетной информации

При оценке точности выдерживания самолетом высоты эшелона и соответствия требованиям RVSM будем интересоваться следующими параметрами продольного движения и управляющего воздействия САУ: угол тангажа ψ ; высота барометрическая (H_b); угловая скорость тангажа (ω_z); положение руля высоты (δ_v). В таблице 1 показаны значения этих параметров на определенном интервале времени.

Таблица 1. Значения параметров продольного движения

Ил-96-300 /		МСРПА-02-ЭН1_402		
Время	Танг	НБ	Wz	PВ
12:59:56	1.9	10352	-0.1	-0.7
12:59:57	1.8	10352	-0.3	-1.2
12:59:58	1.8	10352	0.1	-1.2
12:59:59	1.9	10352	0.2	-1.5
13:00:00	1.9	10352	-0.1	-1.0
13:00:01	1.8	10352	-0.3	-1.2
13:00:02	1.8	10352	-0.3	-1.5
13:00:03	1.9	10352	0.2	-1.2
13:00:04	2.1	10352	-0.1	-1.2
13:00:05	1.9	10352	0.2	-1.2
13:00:06	2.1	10352	0.1	-1.0
13:00:07	1.9	10344	-0.3	-1.0
13:00:08	1.6	10352	-0.1	-1.5
13:00:09	1.8	10360	0.3	-1.7
13:00:10	1.9	10352	0.2	-1.2
13:00:11	1.9	10344	-0.1	-1.0
13:00:12	1.8	10352	0.1	-1.5
13:00:13	1.9	10352	0.1	-1.2
13:00:14	2.1	10352	-0.3	-1.0
13:00:15	1.8	10352	-0.3	-1.2
13:00:16	1.8	10360	0.4	-1.7
13:00:17	2.1	10352	-0.1	-0.7
13:00:18	1.9	10352	-0.3	-1.2
13:00:19	1.9	10352	0.1	-1.5
13:00:20	1.9	10352	-0.1	-1.0
13:00:21	1.9	10352	-0.1	-1.2
13:00:22	1.9	10352	0.2	-1.7
13:00:23	2.1	10352	0.1	-1.0

Полетная информация была обработана с использованием статистических методов. Для этой цели использовались методы статистического анализа, раскрытые в 3-ей главе диссертации. Проверялись гипотезы на соответствие параметров нормальному и лог-нормальному распределениям.

На рисунке 7 показаны графики изменения параметров продольного движения самолета и управляющего воздействия. Как видно из полученных значений, имеющиеся данные находятся в своих эксплуатационных границах.

На основе обработанной информации было произведено уточнение оценок отклонения самолета от заданных значений параметров положения и движения по высоте, а также реализована процедура принятия решений о соответствии требованиям по точности в части RVSM.

Показана принципиальная возможность использования информации со штатных бортовых регистраторов для оценки точности самолетовождения при производстве полетов по RVSM. Для этой цели использован аппарат математической статистики и различения статистических гипотез.

Продемонстрировано использование некоторых современных методов статистического анализа, включая модифицированный метод Никулина для оценки продольных параметров положения и движения самолета. Алгоритм различения статистических гипотез на основе критерия согласия Никулина и расчет мощности статистических критериев реализован в программе MathCad для выборок текущего значения барометрической высоты и отклонения ВС от высоты эшелона при полете по правилам RVSM. При этом учитываются и другие параметры продольного движения – угол тангажа, угол наклона траектории, угловая скорость тангажа и угол отклонения руля высоты.



Рисунок 7 - Графики изменения параметров продольного движения самолета и управляющего воздействия

Показана возможность уточнения оценок отклонения самолета от заданных значений параметров положения и движения, а также принятия решений о соответствии требованиям по точности. Результаты анализа могут быть использованы для научного обоснования выдачи эксплуатантам специальных эксплуатационных разрешений на полеты с использованием RVSM.

На основе обработанной информации было произведено уточнение оценок отклонения самолета от заданных значений параметров положения и движения по магнитному курсу и линейному боковому отклонению, а также реализована процедура принятия решений о соответствии требованиям по точности в части PBN.

Показана принципиальная возможность использования информации со штатных бортовых регистраторов для оценки точности самолетовождения при производстве полетов по PBN. Для этой цели использован аппарат математической статистики и различения статистических гипотез.

Результаты анализа могут быть использованы для научного обоснования выдачи эксплуатантам специальных эксплуатационных разрешений на полеты с использованием PBN.

Анализ состава параметров, фиксируемых МСРП-А-02 для прямой и косвенной оценки точностных характеристик полёта самолёта, показал, что их достаточно для решения задачи оценки точности автоматического самолетовождения при заходе на посадку по CAT I – CAT III. Однако для некоторых датчиков отсутствуют установленные относительные погрешности, что может вызвать трудности при оценке точностных характеристик этих параметров.

Для определения вероятности попадания колеса самолёта при заходе на посадку в точку касания в поле допуска по продольной и поперечной оси ВПП воспользуемся обработанными в программе MathCad математическими ожиданиями и среднеквадратическими отклонениями параметров поперечной и продольной точки касания. Проводим статистический анализ. Результаты проверки сведены в таблицу 3:

Таблица 3. Результаты проверки гипотез о функциях распределения

Параметр	Гипотеза принимается по критерию Хи-квадрат	Гипотеза принимается по критерию Игрек-квадрат
Крен на высоте 30 метров	Да	Да
Отклонение от глиссады на высоте 30 метров	Да	Да
Скорость вертикальная на высоте 30 метров	Да	Да
Отклонение М курса на высоте 30 метров	Да	Да
Отклонение курсовой зоны на высоте 30 метров	Да	Да
Курс на высоте 30 метров	Да	Да
Курс на высоте 15 метров	Да	Да
Тангаж на высоте 15 метров	Да	Да
Отклонение от заданной скорости на высоте 15 метров	Да	Да
Отклонение курсовой зоны на высоте 15 метров	Да	Да
Скорость вертикальная на высоте 15 метров	Да	Нет
Отклонение от глиссады на высоте 15 метров	Да	Да
Удаление от глиссады на высоте 15 метров	Да	Да
Отклонение М курса на высоте 15 метров	Да	Да
Отклонение курсовой зоны на высоте 6 метров	Да	Да
Отклонение курса на высоте 6 метров	Да	Да
Отклонение курсовой зоны в точке касания	Да	Да
Нормальное ускорение в точке приземления	Да	Да
Вертикальная скорость в точке касания	Нет	Нет
Отклонение М курса на высоте 0 метров	Да	Да
Отклонение курса в точке касания	Да	Да
Тангаж в точке касания	Да	Да
Крен в точке касания	Да	Нет
Отклонение от заданной скорости на высоте 0 метров	Да	Да
Продольная точка приземления	Да	Да

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Таким образом, в диссертационной работе представлено решение актуальной, имеющей большое значение для отрасли научной задачи по оценке соответствия точности автоматического самолетовождения требованиям эксплуатационных разрешений, требующая разработки на основе единого научно-методического аппарата новых методов и алгоритмов.

Решение научной задачи опиралось на проведенные автором и представленные в работе анализы: требований к точностным характеристикам автоматического самолетовождения ВС на этапе эксплуатации для выдачи эксплуатационных разрешений, перечня эксплуатационных разрешений, базирующихся на точности автоматического самолетовождения и методов определения соблюдения требований, возможностей использования бортовых средств регистрации параметров полета для оценки точности автоматического самолетовождения, состава и характера параметров автоматического самолетовождения, определяющих соблюдение требований эксплуатационных разрешений.

Анализ показал довольно широкий спектр и важность методов определения соблюдения требований этих разрешений, что не все эксплуатационные разрешения располагают методами определения соблюдения требований. Часть эксплуатационных разрешений используют такие методы, однако они очень сложны и дорогостоящи в реализации. В связи с этим выражена идея

разработки такого метода оценки соответствия требованиям эксплуатационных разрешений в части автоматического самолетовождения, который базировался бы на анализе записей параметров полета, поступающих с бортовых средств регистрации и использовал комплексный подход к оценке точностных характеристик автоматического самолетовождения.

Сущность *метода оценки соответствия требованиям эксплуатационных разрешений в части автоматического самолетовождения воздушных судов гражданской авиации* заключается в:

- использовании для решения этой задачи штатных бортовых средств регистрации параметров, а также интегральных систем управления техническим состоянием самолета;
- разработке математических моделей движения самолета в основных режимах автоматического самолетовождения для оценки точностных характеристик;
- сборе и статистической обработке информации о параметрах автоматического самолетовождения (высоте полета, боковому отклонению от линии заданного пути, отклонениях от равносигнальных линий курса и глиссады и т.д.);
- принятии решения о значимых отклонениях параметров автоматического самолетовождения от требуемых значений в течение значимых промежутков полета;
- анализе текущего технического состояния бортового оборудования с учетом соблюдения перечня минимального оборудования (ПМО) и его влияния на выполнение требований эксплуатационных разрешений;
- принятии решения о нарушении эксплуатационных разрешений и выдаче рекомендаций о приостановке действия этих разрешений для конкретного борта ВС или авиакомпания в целом.

В отличие от существующих методов, разработанный метод не требует применения наземных радиотехнических средств и необходимости пролета над ними для тестовых измерений, автономных специальных средств и необходимости осуществления измерений в тестовых полетах. Предлагаемый метод позволяет решать задачу в плановом порядке в рамках существующих процедур сбора и обработки полетной информации в системе обработки полетной информации и существенно упрощает работу авиационных властей по мониторингу соблюдения требований эксплуатационных разрешений.

В процессе разработки метода сформулирована задача и разработан обобщенный алгоритм оценки точностных характеристик параметров полета. Проведен анализ существующих методов расчета и оценки функций распределения случайных величин для оценки точностных характеристик параметров полёта автоматического самолетовождения. Разработаны алгоритмы проверки критерия Хи-квадрат, проведено обоснование использования модифицированного критерия Хи-квадрат М.Никулина. Разработаны алгоритмы проверки модифицированного критерия согласия Никулина для оценки параметров полета, алгоритм оценки вида семейств логарифмически нормального распределения параметров полета.

Показана принципиальная возможность использования информации со штатных бортовых регистраторов для оценки точности автоматического самолетовождения при производстве полетов по RVSM, PBN, CAT I – CAT III. Продемонстрировано использование некоторых современных методов статистического анализа, включая модифицированный метод Никулина для оценки продольных и боковых параметров положения и движения самолета в процессе автоматического самолетовождения.

Результаты диссертационной работы могут быть использованы для научного обоснования выдачи или приостановки специальных эксплуатационных разрешений на полеты с использованием RVSM, PBN, CAT I – CAT III и ряда других эксплуатационных разрешений.

Публикации по теме диссертационной работы

Научные публикации в рецензируемых научных изданиях, (по транспорту) рекомендованных ВАК при Министерстве образования и науки РФ для опубликования основных научных результатов диссертаций, вклад соискателя в которые является определяющим:

1. Марасанов, Л.О. Применение модифицированного критерия согласия хи-квадрат для определения вида функции распределения / Л.О. Марасанов, В.В. Глухов // Научный вестник МГТУГА — 2007. — № 121. — С. 94-102.

2. Марасанов, Л.О. Оптимизация группирования выборки для определения оценок параметров распределения / Л.О. Марасанов, В.В. Глухов // Научный вестник МГТУГА — 2007. — № 121. — С. 173-175.

3. Марасанов, Л.О. Совершенствование оценок точностных характеристик автоматических режимов полета летательных аппаратов на основе критерия Никулина-Рао / Л.О. Марасанов // Научный вестник МГТУГА — 2009. — № 148. — С. 62-70.

4. Марасанов Л.О. Применение модифицированного критерия согласия хи-квадрат (критерий Никулина-Рао) для оценки точностных характеристик автоматизированных режимов полета / Л.О. Марасанов // Научный вестник МГТУГА — 2012. — № 185. — С. 43-47.

5. Кузнецов, С.В. Научно-практические аспекты производства полетов с использованием RVSM, PBN, CATII и CATIII, EDTO/ETOPS, TCAS, EGPWS и EFB / С.В. Кузнецов, Г.Е. Перегудов, Л.О. Марасанов // Научный вестник МГТУ ГА. — 2017. — Т. 20. № 1. — С. 177-185.

6. Марасанов, Л.О. Оценка качества производства полетов по нормам RVSM, PBN, CATII и CATIII на основе модифицированного критерия Никулина / Л.О. Марасанов // Научный вестник МГТУ ГА. — 2017. — Т. 20. 6. — С. 63-72.

Научные публикации в других рецензируемых научных изданиях, рекомендованных ВАК при Министерстве образования и науки РФ для опубликования основных научных результатов диссертаций

1. Марасанов Л.О. Разработка программного обеспечения для реализации алгоритма оценки точностных характеристик летательных аппаратов (ЛА) на основе модифицированного критерия хи-квадрат / Л.О. Марасанов // Материалы конкурса научно – технических работ и проектов молодых ученых и специалистов «Молодежь и будущее авиации и космонавтики». <http://www.mai.ru> — 2009 г.

2. Марасанов Л.О. Применение модифицированного критерия согласия хи-квадрат (критерий Никулина) для оценки точностных характеристик летательных аппаратов. / Л.О. Марасанов // Научно-практическая конференция студентов и молодых учёных МАИ «Инновации в авиации и космонавтике-2011» Тезисы докладов научно-технической конференции. – М.: МЭЙЛЕР — 2011г.

3. Марасанов Л.О. Применение критерия согласия Никулина-Рао для оценки качества выполнения полётов ВС. / Л.О. Марасанов // Научно-практическая конференция студентов и молодых учёных МАИ «Инновации в авиации и космонавтике-2012» Тезисы докладов научно-технической конференции. – М.: МЭЙЛЕР — 2012 г.

4. Марасанов Л.О. Применение модифицированного критерия согласия Хи-квадрат (критерия Никулина) для оценки точностных характеристик ЛА / Л.О. Марасанов // Международная молодежная научная конференция «XXXIX Гагаринские чтения». Тезисы докладов. МАТИ – 2013г.

5. Марасанов Л.О. Применение модифицированного критерия согласия Хи-квадрат (критерия Никулина) для оценки точностных характеристик ЛА. / Л.О. Марасанов // XIX Международная телекоммуникационная конференция молодых ученых и студентов "МОЛОДЕЖЬ И НАУКА". Тезисы докладов. Ответственный редактор О.Н. Голотюк — 2015 — С. 225-226.

Соискатель



Марасанов Л.О.